الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département de Géologie

Pour l'obtention du diplôme de Master académique en Sciences de la Terre

Option : Hydro-système et ressources en eau.

Thème

Modélisation pluie_débit cas de bassin versant de l'oued Ain sefra wilaya de Naama sud-ouest Algérien

Présenté par :

- M^elle GUETTAF DJIHANE
- M^elle BAHRA RABAB

Jury de soutenance :

Nom	prénom	Grade	Qualité	université
Mme. Bakhti	Amel	MCB	Président	Oran2
Mr. Bergane	Cheikh	MCB	Examinateur	USTO
Mme. Belkhir	Khadidja	MAA	Encadreur	Oran2

Promotion : Juin 2025

Remerciement

Je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la santé, et son soutien durant les périodes les plus difficiles.

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à mon encadrante, Mme Belkhir Khadidja. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour avoir supervisé ce mémoire, pour ses précieux conseils, et pour son aide tout au long de mon travail.

Je remercie Mme Bakhti pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

J'exprime également toute ma gratitude à M. Bergan pour avoir accepté de faire partie de ce jury et d'examiner ce travail.

Je souhaite remercier toute l'équipe du département de géologie pour l'attention particulière portée à ce travail, ainsi que pour leur aide. Je remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

الى الرجال الصابرة...

المقاومة الصامدة المدافعين عن شرف الامة الذين صنعوا الحياة تحت الارض

بهم ايقنت وتعلمت ان علم الجيولوجيا ليست للدراسات فقط وانما هي حياة

غلبوا بيها الكيان صنعوا فيها الامل والحرية اخرجوا منها علماء ومهندسين وعظماء

وقادة شهداء صنعوا التاريخ

وركعوا بها المحتل

فإنفاقكم مصيدة موت المحتل وهلاكهم

"فالحر تحت الارض يشعل ثورة والحر رغم الموت ليس يموت"

هذة غزة مقبرة الطغاة ومجد المقاومة وتاج العز وجرح الغائر في ضمائرنا ووجداننا طالما حيينا

المجد لغزة الجريحة المقاومة

المجد لدماء ابناؤها النازف من النحر النحر

المجد لهم جميعا، المجد الى الاحرار السجون الثابتين مقاومة واطباء وكافة فئات المجتمع.

لكم الفداء...

BAHRA RABAB

"بعض الأرواح تظلّ تحيا فينا، حتى وإن غابت... وبعض القلوب تُضيء دربنا، فقط لأنها أحبتنا بصدق."

إلى روح أمي الطاهرة...

رحلتِ جسدًا وبقيتِ روحًا تسكن قلبي، كلّ خطوة خطوتها، وكلّ نجاح بلغته، كان صدى لدعائك،

وثمارًا لغرسك، هذا الإنجاز... هديتي إليك

أسأل الله أن يبلغك فرحتي ويجعل قبرك روضة من رياض الجنة.

إلى أبي الحبيب...

سندي في هذه الحياة، شكرًا لقلبك الذي احتواني، وصبرك الذي ألهمني، ودعمك الذي لم ينقطع

لكَ الفضل بعد الله في أن أقف اليوم على عتبة الحلم.

إلى إخوتي...

أنتم العائلة التي أفتخر بها... شكراً لأنكم كنتم دائمًا بجانبي بحبكم ودفئكم.

إلى خالتي وزوجها...

شكراً لقلبيكما الكبيرين، لوقفتكما الصادقة، ولكل لحظة شعرت فيها بأنني لست وحدي.

إلى صديقاتي الغاليات...

صديقات الدرب والتعب والفرح، كنتنّ البلسم في كل الأوقات

والضحكة التي تخفف ثقل الأيام.

ولكل من مرّ في طريقي بكلمة طيبة، بدعاء، بابتسامة...لكم كل الشكر من قلبي.

GUETTAF DJIHANE

SOMMAIRE

RESUME **9**

SUMMARY **9**

INTRODUCTION GENIRALE **10**

Chapitre I : **12**

Aperçu général sur les crues et la modélisation hydrologique **12**

Introduction **13**

Les Crues **13**

1.1. Définition : **13**

1.2. Les Couses : **13**

1.3. Les Conséquences : **14**

1.4. Les Crue du bassin d'Ain safra : **14**

2. Les modèles hydrologiques : **15**

2.1. Définition **15**

2.2. Principe des modèles hydrologiques : **16**

2.3. Pourquoi du modèle hydrologique : **16**

2.4. Utilisation des modèles hydrologiques : **16**

2.5. Caractéristiques intrinsèques d'un modèle hydrologique : **17**

2.6. Classification des modèles hydrologiques : **17**

2.6.1. Modèles stochastique : **18**

2.6.2. Modèles déterministes : **18**

2.6.3. Modèles à base physique : **19**

2.6.4. Modèles boites noirs : **19**

2.6.5. Modèles paramétriques : **19**

2.6.6. Modèles empiriques : **20**

2.6.7. Modèles analytiques : **20**

2.6.8. Modèles conceptuels : **20**

2.6.9. Modèles globaux : **20**

2.6.10. Modèles spatialisés : **20**

2.6.11. Modèle pluie-débit : **22**

2.7. HEC-HMS : **22**

2.8. La fonction de transfert SCS UH (Hydrogramme unitaire du SCS) : **23**

2.9. Le concept de base : **23**

2.10. Développement du modèle : **24**

2.11. Représentation du modèle de la pluie : 28
2.12. Pluie hypothétique basée sur la fréquence : 28
2.13. Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur : 29
2.14. Le module du débit de base : 29
2.15. Le module de routage : 30
2.15.1. Modèle de Muskingum : 30
2.16. La fonction d'optimisation automatique : 31
2.17. Justification du choix du modèle : 31
Conclusion : 31
Chapitre II : 33
Description de la zone d'étude 33
Introduction 34
1. Situation géographique : 34
1.1 Présentation générale de la région hydrographique 34
2. Le contexte géologique du bassin du Ain Sefra : 35
2.1 Le cadre géologique régional : 35
3. Hydrogéologie : 37
4. Le couvert végétal 38
5. Ressources en eaux : 38
6. Géomorphologie et Morphométrie : 39
6.1 Dimension du rectangle équivalent 40
6.2 Etude du relief : 41
6.3 La courbe hypsométrique 41
7. Climatologie : 44
7.1 Les précipitations : 44
7.1.1 Les précipitations moyennes mensuelles : 44
7.1.2 Variation annuelle des précipitations pour la période 1972-1999 46
7.1.3 Les précipitations saisonnières : 46
7.2 Etude de la température : 47
7.3 Le régime climatique : 47
7.3.1 Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussen : 48
7.4 Précipitation maximales : 48
7.5 Étude l'intensité _durée _fréquence (IDF) 49
7.6 Débits moyens annuels et mensuels : 51
Conclusion 53
Chapitre III : 54

Méthodologie et application du HEC-HMS **54**
Introduction **55**
1. Le processus de fonctionnement : **56**
2. Fonctionnalités : **56**
3. Les étapes de limitation des sous bassin : **57**
3.1 Première étape : Schématisation du bassin versant : **58**
3.2 Les données requises pour l'application du modèle HEC-HMS : **59**
3.3 Les données de bases d'entré : **59**
3.3.1 Utilisation des terres : **59**
3.3.2 Modélisation météorologique : **61**
3.3.3 Modèle de routage (Application du modèle de Muskingum) : **62**
3.3.4 Données des spécifications de contrôle : **63**
3.3.5 Calibration du modèle : **64**
Crue 16 novembre 1993 ……..…64
a. Nash Criterion (NASH): **66**
b. PBIAS (Relative Bias): **66**
c. Erreur quadratique (RMSE) : **67**
3.3.6 La validation du modèle : **67**
Crue 24 octobre 2024(avant validation)…… ……68
Conclusion : **70**
CONCLUSION GENERALE **71**
REFRENCES BIBLIGRAPHIQUES **72**

Liste Des figure

Figure 1.I : Confluence Oued Breidj-Oued Tirkount 19 October 2007 15
Figure 2 .I : Dégâts de la crue de 19 Octobre 2007.....15
Figure 3. I : Les différentes approches de modélisation. 18
Figure 4.I : Séparation de la pluie (P) en ruissellement (Q), pertes.....24
Figure 5. I : Averse hypothétique de type SCS.....29
Figure 6. II : Situation du secteur d'étude (Carte –Ain Sefra -1/200 000).....34
Figure 7. II : Le bassin versant et réseau hydrographique.....35
Figure 8. II : Carte géologique de la région d'Ain Sefra (Galmier 1972) (digitalisée).....36
Figure 9. II : Carte de linéaments (Galmier 1972 – Kacemi 2013) (a) et (CGG 1974) (b).....37
Figure 10. II : La coupe hydrogéologique schématique (NW-SE) 37
Figure 11. II : Essai de corrélation des coupes des forages de la région d'Ain Sefra. 38
Figure 12. II : Carte géomorphologique de la zone d'étude. 39
Figure 13. II : Variation des précipitations moyennes mensuelles du Ain Sefra.....45
Figure 14. II : Variation annuelle des précipitations du Ain Sefra (1972_1999). 46
Figure 15. II : Histogramme des précipitations saisonnières du Ain Sefra (1980, 2010). 46
Figure 16. II : Température moyenne mensuelle de la station de Ain Sefra (2005-2017). 47
Figure 17. II : Diagramme de la station d'oued Ain Sefra (1982/1983-2015/2016). 48
Figure 18. II : Courbes des pluies fréquentielles.....50
Figure 19. II : Courbes des intensités- durées- fréquences.....51
Figure 20. II : Variation des débits de pointe d'Oued Ain Sefra. 52
Figure 21. II : Ajustement par la loi de Gumbel max.....53
Figure 22. III : Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente les étapes de limitation de Bassin versant à partir de fichier MNT dans HEC_HMS. 57
Figure 23. III : Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente le Bassin versant et leurs sous bassins (propre étude). 58
Figure 24. III : Curve Number (CN) du bassin versant d'oued Ain Sefra (propre étude).....60
Figure 25. III : Fenêtres des données météorologiques de fréquence de 1%. 62
Figure 26. III : Fenêtre de caractéristiques géométriques des talwegs et cours d'eau 63
Figure 27. III : Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps. 63
Figure 28. III : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- l'exutoire……64
Figure 29. III : Fenêtre représente les résultats de simulation - l'exutoire…….. 64

Figure 30. III : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- l'exutoire……....65

Figure 31. III : Fenêtre des résultats de la fonction objectif – Calibration de la crue du 15 au 17 novembre 1993 (Nash-Sutcliffe normalisé)…… .65

Figure 32. III : Hydrogrammes des crues des évènements avant validation du modèle.....68

Figure 33. III : Fenêtre représente le volume de la crue simulée- débit de point-Critères de performance avant validation.....68

Figure 34. III : Hydrogrammes des crues des évènements après validation du modèle.....69

Figure 35. III : Fenêtre représente -Critères de performance (critère de Nash et du coefficient de détermination).....69

Liste Des Tableaux

Tableau 1 .I : Type d'occupation de sol et son CN associé. 25
Tableau 2.I : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN. 27
Tableau 3. II : les altitudes caractéristiques de sous bassin. 42
Tableau 4. II : Classement de relief à partir de la dénivelée spécifique selon la classification de L'ORSTOM.....43
Tableau 5. II : Les valeurs des précipitations mensuelles pour la station Ain Sefra.....44
Tableau 6. II : Valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles (1982/1983-2015/2016).....48
Tableau 7. II : Résultats des estimations statistiques des pluies maximales journalières (stations d'AIN SEFRA) Source : ONM, 2011 49
Tableau 8. II : Intensités maximales de durée t(h) et période de retour (ans) (station Ain Sefra).....50
Tableau 9. II : Les débits de retour après l'ajustement selon une loi de Gumbel. 52
Tableau 10. III : Données de base des sous-bassins versants.....59
Tableau 11. III : Les pluies courtes durées estimées au bassin du seggueur pour différentes périodes de retour Période de retour T (ans) _Ptc (mm). 61
Tableau 12. III : Les valeurs des paramètres calibrés sont présentées.....66

RESUME

Cette recherche a abordé les phénomènes hydrologiques en se concentrant sur la région d'Ain Sefra en Algérie, qui est sujette à des inondations fréquentes dues à des facteurs géographiques et à une infrastructure limitée. L'étude a analysé plusieurs modèles hydrologiques et a utilisé le modèle HEC-HMS comme outil principal pour analyser les flux d'eau et prédire les risques d'inondation. Une analyse approfondie des données climatiques et hydrologiques de la région a été menée, et ces données ont été intégrées dans le développement du modèle pour améliorer la précision des prévisions. Les résultats ont démontré l'efficacité du modèle pour comprendre la dynamique des inondations et élaborer des stratégies durables de gestion des ressources en eau, contribuant ainsi à atténuer les impacts des catastrophes naturelles et à améliorer la planification hydrique dans les régions arides et semi-arides.

Mots clés : inondations, modèle HEC-HMS, ressources en eau, catastrophes naturelles

SUMMARY

This study investigated hydrological phenomena in the Ain Sefra region of Algeria, which is susceptible to frequent flooding due to its geographical characteristics and limited infrastructure. The research analyzed multiple hydrological models, with the HEC-HMS model serving as the primary tool for analyzing water flows and predicting flood risks. A comprehensive analysis of climatic and hydrological data for the region was performed, and these data were incorporated into the model's development to enhance predictive accuracy. The findings demonstrated the model's efficacy in understanding flood dynamics and developing sustainable strategies for managing water resources, thereby helping to mitigate the impacts of natural disasters and improve water planning in arid and semi-arid regions.

Keywords: floods, HEC-HMS model, water resources, natural disasters

ملخص

تناولت هذه الدراسة الظواهر الهيدرولوجية مع التركيز على منطقة عين الصفراء في الجزائر، التي تعاني من فيضانات متكررة نتيجة عوامل جغرافية وبنية تحتية محدودة. قامت الدراسة بتحليل العديد من النماذج الهيدرولوجية واستخدمت نموذج HEC-HMS كأداة رئيسية لتحليل تدفقات المياه وتوقع مخاطر الفيضانات. تم إجراء تحليل معمق للبيانات المناخية والهيدرولوجية الخاصة بالمنطقة، ودمج هذه البيانات في تطوير النموذج لتحسين دقة التوقعات. أظهرت النتائج فعالية النموذج في فهم ديناميكيات الفيضانات ووضع استراتيجيات مستدامة لإدارة الموارد المائية، مما ساهم في التخفيف من تأثير الكوارث الطبيعية وتحسين التخطيط المائي في المناطق القاحلة وشبه القاحلة.

الكلمات المفتاحية: الفيضانات، نموذج HEC-HMS، الموارد المائية، الكوارث الطبيعية.

INTRODUCTION GENIRALE

Les inondations se sont classées au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde au cours de la dernière décennie (2003-2012), selon les informations de l'International Disaster Database (IDD) : la base de données en matière de catastrophes internationales) du Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres (CRED). Elles représentent 48.2% des catastrophes enregistrées en 2013 à l'échelle mondiale, causant près de 32 millions de victimes, soit 33.2 % du nombre total des personnes touchées par les catastrophes naturelles.

En l'Algérie, les inondations sont l'une des catastrophes naturelles les plus fréquentes, destructrices et dangereuses, comme l'inondation du 10 Novembre 2001 du quartier de Bab El Oued à Alger, avec un débit de crue max de 730 m3/s et un apport total de 2.600.000 m3, est la plus meurtrière avec 772 décès.

La ville d'Ain Sefra (objectif de notre étude), est considérée comme une zone sujette à des inondations fréquentes, en raison des inondations de l'oued Ain Sefra (Confluence entre oued Breidj et oued Tirkount) dont nous citons les principales :

- 10 octobre1904 (une trentaine de victimes, dont la célèbre écrivaine Isabelle Ebehardt).

- 17 mars 1941, crues exceptionnels des oueds Breidj et Tirkount, des dégats importantes ont été enregistrés au niveau de la ville d'Ain Sefra.

- 25 mars 1948, crues des oueds provoquant des dégâts aux pistes et voies ferrées.

- 20 mai 1949, crue importante des oueds, elle occasionne des dégâts a plusieurs endroits de la ville d'Ain Sefra.

- L'inondation du 5 mai 1990, des pertes humaines et des dégâts matériels considérables. Le niveau des eaux a atteint plus de 2 mètres de hauteur dans le centre-ville d'Ain Sefra.

- 24 octobre 2000 une famille de 5 personnes a trouvé la mort, et plusieurs familles sinistrées.

- 14 novembre 2004, des dégâts matériels importants.

- 19 octobre 2007, des dégâts importants au niveau du centre-ville d'Ain Sefra, beaucoup de Passerelles et ponts ont été endommagés et beaucoup de terres agricoles inondées et les récoltes ravagées.

- 1 octobre 2014, un enfant de 11 ans emporté par les crues.

L'étude des crues des oueds de l'Algérie reste un domaine inconnu, seules quelques indications très ponctuelles sont données dans les annuaires hydrologiques algériens. Partant de cette constatation,

nous nous sommes intéressés à l'étude de ce phénomène très important aussi bien pour la connaissance du comportement hydrologique de nos oueds que pour toute étude d'aménagement hydraulique dans sa conception et sa gestion.

Il est important de noter que les inondations en Algérie ne sont pas seulement la conséquence d'accidents, mais également le résultat d'un manque de planification et de préparation suffisante pour faire face à ces phénomènes.

L'objectif de cette étude était d'élaborer un modèle pluie-débit, évaluer le volume de ruissellement du bassin versant de L'oued Ain safra et l'évaluation du comportement du bassin versant.

Notre mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre : décrit les notions de modélisation hydrologique.

Le deuxième chapitre : présenté la zone d'étude ; les caractéristiques géographiques topographiques et climatiques ainsi l'analyse des pluies journalières maximales et l'établissement les courbes IDF et les débits journaliers maximaux.

Le troisième chapitre : et dernière partie sera donc réservée à l'application du modèle hydrologique HEC-HMS au bassin versant de L'oued Ain safra où on décrire l'utilisation du modèle ainsi que son application au bassin versant.

Chapitre I :

Aperçu général sur les crues et la modélisation hydrologique

I. Introduction

Selon le Dictionnaire de Environnement, un modèle est défini comme « une représentation simplifiée et semi-abstraite d'un processus ou d'un système dans le but de décrire, d'expliquer ou de prédire ». Ainsi, un modèle hydrologique est une représentation partielle ou complète du cycle de l'eau. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'étude des modèles de ruissellement représentés par la conversion des précipitations en ruissellement de surface sur terre.

Les applications de ces liens sont diverses, car ils peuvent être utilisés pour réguler les influences hydrologiques humaines sur les bains-marie (telles que la construction de barrages ou la suppression de zones d'étanchéité), fournir des alertes d'inondation dans les plantes aquatiques, ou même reconstruire des liens de données avec les débits d'eau dans les sources d'eau.

I.1. Les Crues

1.1.Définition :

La crue Écouter, est une forte augmentation, un accroissement du débit et de la hauteur d'eau en écoulement d'un fleuve, d'une rivière, d'un cours d'eau. Le mot s'utilise fréquemment quand le débordement du lit mineur du cours d'eau commence à provoquer des dommages. Ce débordement provoque une inondation de zones plus ou moins éloignées des rives, en délimitant ainsi une zone inondable. La crue est suivie par une décrue.

1.2.Les Couses :

Pluviométrie : l'intensité et/ou la durée de la pluie sur un même bassin versant génère par ruissellement et automatiquement une augmentation du débit du cours d'eau. La crue commence alors quand un seuil spécifique à chaque lieu est atteint, puis dépassé. L'ampleur du phénomène dépend aussi beaucoup de la perméabilité et de la saturation en eau des sols du bassin versant.

Fonte des neiges : au printemps, la transformation de la neige en eau liquide étant un phénomène relativement lent, l'eau issue de la fonte des neiges pénètre mieux dans le sol que l'eau de pluie, elle contribue donc plus à l'alimentation des nappes phréatiques et au régime dit nival du débit du cours d'eau. Néanmoins, les quantités d'eau stockée sous forme de neige ou de glace pouvant être considérables, et en cas de radoucissement intense, rapide et accompagné de pluies, la fonte rapide des neiges peut provoquer des inondations parfois catastrophiques. En zone de montagne, la crue est un phénomène périodique annuel entraînant rarement des inondations.

1.3.Les Conséquences :

Les grandes crues, par leur soudaineté ou par l'étendue des inondations qu'elles provoquent, sont souvent des catastrophes, avec leur lot de victimes et de dégâts matériels.
Crue du Nil en 1908 en Haute-Egypte, avec palmiers partiellement submergés.

Mais dans certaines régions du globe, les crues font partie du cycle naturel des saisons. Durant plusieurs millénaires, la crue annuelle du Nil [20], très souvent bienfaitrice en s'étendant sur une bande agricole jusqu'à environ 25 kilomètres des bords du fleuve, a fait prospérer la civilisation égyptienne. Elle était mesurée par des nilomètres comme celui d'Éléphantine. Son démarrage commençait la nouvelle année égyptienne. Parfois liés aux moussons, de nombreuses zones tropicales sont encore tributaires de ce type de crue assez régulière, qui fertilisent et irriguent les cultures, en reconstituant des réserves d'eau pour la saison sèche. [L'ASSETS archive]

1.4.Les Crue du bassin d'Ain safra :

Les crues du bassin versant d'Ain Sefra sont exclusivement d'origine pluviale. Elles résultent généralement de fortes averses. La morphologie du bassin contribue à amplifier les débits de pointe observés aux exutoires qui varient de quelques m3/s à 751 m3/s où le maximum est enregistré le 24/10/2000. Sur 16 événements enregistrés (Qmax>100 m3/s), l'automne est signalé comme saison de grand risque avec 11 crues, soit 69 % des crues de la série. Aussi, la région a connu trois crues de débits de pointe supérieure à 500 m3/s. Les crues sont généralement de courte durée, avec des temps de montée assez courts, et des décrues plus lentes, généralement suivies d'un tarissement prolongé. Toutefois, le caractère le plus redoutable des crues du bassin versant d'Ain Sefra est leur violence et la rapidité avec lesquelles elles se produisent.

Un exemple de crues, celle de 19 octobre 2007 (Figure 1), le débit a atteint un maximum (222.7 m3/s) après une intensité exceptionnelle de précipitation de 50 mm en une heure (Rappelons que la moyenne mensuelle du mois d'octobre est de 32.2 mm). Cette crue est caractérisée par un temps de montée très rapide (04 heures). Des dégâts importants ont été enregistrés au niveau du centre-ville d'Ain Sefra, beaucoup de passerelles et ponts au niveau du bassin versant ont été endommagés (Figure 2). Tous les cars, les voitures et les camions en direction du Nord comme ceux allant au Sud ont été paralysés à Ain Sefra puisque toutes les routes furent endommagées. [Derdour et al 2018]

Figure 1 .I : Dégâts de la crue de 19 Octobre 2007

Figure 2.I : Confluence Oued Breidj-Oued Tirkount 19 October 2007

I.2. Les modèles hydrologiques :

2.1.Définition

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles dérivante climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique). De nombreux modèles hydrologiques ont été développés depuis la fin des années 1960. Le choix du type de modèle à utiliser dépend généralement de l'objectif de modélisation ainsi que des données d'entrées disponibles.

2.2.Principe des modèles hydrologiques :

Les modèles hydrologiques permettent donc de transformer des séries décrivant le climat d'un bassin versant (typiquement des séries de précipitations et de températures) en une série de débits. Cette transformation est souvent divisée en deux parties :

Une première partie souvent appelée la "production", qui consiste en la détermination de bilans d'eau à l'échelle du bassin versant. Ce bilan permet notamment de répartir la pluie brute observée (la totalité de la pluie qui est tombée sur le bassin versant et qui estmesurée par un 17 ou plusieurs pluviomètres) en pluie "nette" (la proportion de la pluie brute qui participe au débit du bassin versant étudié), en quantité d'eau évapotranspirée et en quantité d'eau stockée par le bassin versant.

Une deuxième partie souvent appelé le "transfert" ou "le routage", qui consiste à répartir dans le temps la quantité d'eau participant au débit du bassin versant étudié.

2.3.Pourquoi du modèle hydrologique :

Les modèles hydrologiques, sont nés bien avant l'avènement de l'informatique ils sont utilisé soit pour effectuer des prévisions. Soit pour dimensionner des ouvrages ou enfin pour délimiter des zones inondables. On peut distinguer trois types d'utilisation de la modélisation hydrologique à savoir :

- La modélisation comme outils de recherche dans ce cas elle peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Déférentes scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versant peuvent alors être confrontés aux mesures.
- La modélisation comme outils de prévision elle servira alors à anticiper les évolutions futures du débit il s'agit de l'utilisation opérationnelles la plus courant des modèles hydrologiques.
- La modélisation comme outils d'extrapolation elle permettra alors la reconstitution des débits plausibles.

2.4.Utilisation des modèles hydrologiques :

Un modèle hydrologique peut être utilisé dans plusieurs contextes :

• Prévision de crues.

• Prévision d'étiages Prédétermination de débits extrêmes,

• Études d'impact anthropique sur l'hydrologie (construction d'aménagements hydrauliques (barrage par exemple), changements d'occupation du sol, etc.).

• Études d'impact de changements climatiques sur l'hydrologie.

• Simulation de débits pour combler des lacunes dans les données et reconstituer des séries de débits historiques.

2.5.Caractéristiques intrinsèques d'un modèle hydrologique :

Chaque modèle traite le problème avec un point de vue qui dépend de sa finalité. Cependant, quelques caractéristiques fondamentales concernant le découpage dans le temps et dans l'espace se retrouvent dans tous les modèles

- **Découpage dans le temps** Celui-ci est souvent fait par intervalles égaux. On différencie trois pas de temps.

- **Pas de temps de fonctionnement ou de calcul** Il correspond à celui des données d'entrée. C'est donc le plus fin et celui auquel l'on se réfère pour un modèle donné.

- **Pas de temps de calage** c'est celui utilisé pour le calcul des différents critères statistiques et pour le calage des paramètres du modèle. Il correspond généralement au pas de temps des grandeurs sorties (débits).

- **Pas de temps d'utilisation** Il peut différer des deux précédents et dépend essentiellement de l'utilisation que l'on fait du modèle.

L'utilisation de plusieurs pas de temps, mensuel, journalier et par événements, permet de mieux appréhender les phénomènes physiques. D'après Ibiza (1988), la description phénoménologique fine et complète n'est possible qu'aux petits pas de temps inférieurs à l'heure. Au pas de temps journalier, les différents écoulements rapides se sont déjà regroupés. On ne possède donc plus d'informations sur la forme de l'averse et l'on doit se baser sur une substitution par une forme moyenne d'averse pour un climat donné. Au pas de temps mensuel, la détermination des écoulements se base sur des considérations encore plus globales et les circonstances particulières de chaque événement ne sont plus apparentes. Le nombre de paramètres augmente au fur et à mesure que la description des phénomènes devient plus précise donc que le pas de temps s'affine.

2.6.Classification des modèles hydrologiques :

Le terme de modèle recouvre une large variété d'outils, à la philosophie et aux objectifs différents. Les approches habituellement utilisées dans la modélisation pluie-débit apparaissent en sombre dans la (figure3).

Quelques logiciels de modélisation hydrologiques seront présentés dans la section suivante, nous nous contentons de donner ici une simple définition des différentes approches.

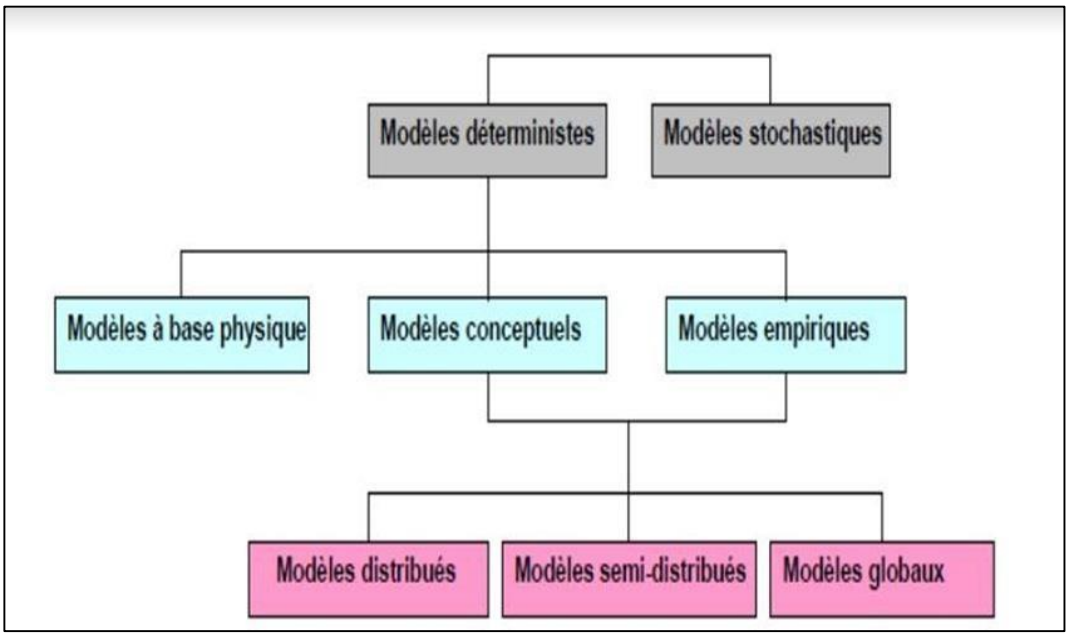


Figure 1. I : Les différentes approches de modélisation.

2.6.1. Modèles stochastique :

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelquefois même sur les processus en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée, qu'il s'agisse de l'hydrologie ou de l'environnement. Ainsi Jensen (1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments.

2.6.2. Modèles déterministes :

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variables indépendantes d'entrée du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variable permettant de caractériser l'état du système modélisé, par exemple : le

niveau de remplissage des différents « réservoirs » d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols...etc.) et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant).

2.6.3. Modèles à base physique :

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. Certains modèles comme le SHE tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante.

Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatifs de sous parties du bassin versant doivent être évaluées par calage et deviennent, de fait, des paramètres et non des données.

2.6.4. Modèles boites noirs :

(« Black Box » ou « Data-Driven » en anglais) - On ne cherche pas à identifier ou à comprendre les mécanismes - On ajuste des fonctions de transfert entre variables d'entrée et variable de sortie.

❖ Avantages - réseau de mesures minimal (longues séries temporelles, mais en peu de points) - nombre d'outils disponibles (régression, réseaux de neurones, Fourier, ondelettes, théorie du chaos) - modèles très rapides (important pour le temps réel !)

❖ Inconvénients - productivité parfois douteuse (Ex. Fourier pour la prévision des débits) - les paramètres de la fonction de transfert n'ont généralement pas de signification physique - si la physique change, il faut tout recommencer de zéro Que font intervenir l'intelligence artificielle on peut citer le réseau de neurones Les algorithmes génétiques, le datamining, neuroflou, logique flou, ARIMA, SARIMA.

… etc.

2.6.5. Modèles paramétriques :

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

2.6.6. Modèles empiriques :

Le type de fonctions reliant les variables est fixé à priori (fonctions polynomiales, fonctions sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées.

2.6.7. Modèles analytiques :

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaire entre les variables [Benhamidcha E.2019].

2.6.8. Modèles conceptuels :

Les modèles conceptuels considèrent en générale le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoirs interconnectés. Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement.

2.6.9. Modèles globaux :

Dans un modèle global le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

2.6.10. Modèles spatialisés :

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à des différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties où les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives) Nous pouvons classer les modèles spatialisés en trois grands types :

a. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés.

b. Modèles physiques spatialisés.

c. Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés

a. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés

Les modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin. Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous-bassins) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont en aval. Ainsi, on a la possibilité de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et la propagation des débits à l'intérieur du bassin. C'est le cas du modèle CEQUEAU [Morin] et du modèle HEC-HMS.

b. Modèles physiques spatialisés :

Les modèles à base physique spatialisés sont des modèles qui décrivent les mécanismes internes d'un système (bassin versant) ayant comme base les lois de la mécanique, de la physique, de la thermodynamique, etc.

Du point de vue théorique, ces modèles sont indépendants de tout calage parce que leurs paramètres sont mesurables.

Ils permettent une description théorique unifiée de la plupart des flux observés dans un bassin versant et servent à modéliser les principaux processus hydrologiques comme :

- L'écoulement de surface à partir des équations de Saint-Venant ;
- L'écoulement en milieu saturé à partir des équations de Darcy ;
- L'écoulement en milieu non saturé à partir des équations de Richards ;
- L'évapotranspiration à partir des équations de conservation ou de relations entre flux.

A partir d'un découpage de l'espace en mailles de taille adaptée au problème à traiter, ils simulent les diverses composantes du cycle de l'eau sur chaque maille (ruissellement, infiltration, évapotranspiration) et convolent les transferts de maille à maille, jusqu'au réseau hydrographique constitué. Ces modèles sont complexes à mettre en œuvre et exigent d'importantes quantités de données. Ils sont bien adaptés à la simulation de la diversité d'un bassin. Cependant, ces modèles ne peuvent traiter les grands bassins en raison de leur grande hétérogénéité morphologique et météorologique. Parmi ces modèles on peut citer le modèle SHE.

c. Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés :

Pour dépasser les limites de chacune des approches précédentes (modèles conceptuels trop peu réalistes, modèles à base physique trop complexes), il est intéressant d′′essayer une modélisation hydrologique qui peut être :

• A base physique, fondée sur les processus réels mais simplifiés.

• Semi-spatialisée, fondée sur une discrétisation en unités relativement homogènes, qui permettent de tenir compte de la variabilité spatiale de la structure du bassin versant. La méthode de discrétisation spatiale varie d′′un modèle à l'autre : mailles carrées, sous bassins versants, éléments de versant, plans versant et canal, unités Hydrologiques ou aires contributives (modèle TOPMODEL).

2.6.11. Modèle pluie-débit :

Il existe un grand nombre de modèles pluie-débit, qui vont ainsi simuler un débit à l'exutoire d'un bassin versant, en utilisant la précipitation et l'Evapotranspiration potentielle(ETP) comme données d'entrées. Plusieurs auteurs ont classé les modèles en trois catégories (Beven, 2001 ; Singh and Frevert, 2006 ; Orellana et al. 2008) :

• Les modèles conceptuels considèrent le bassin versant, comme un ensemble de réservoirs interconnectés.

• Les modèles empiriques de type boite noire, cherchent à reproduire la dynamique des variables de sortie sans tenter de décrire les processus élémentaires.

• Les modèles distribués à base physique cherchent à décrire l'ensemble des processus élémentaires en tout point du bassin versant.

La notion de modèles physiques est à opposer à celle de modèles conceptuels, ainsi que l'on Oppose modèles distribué à modèles global au niveau de la description spatiale du Bassin versant.

Il n'y a pas de conflit entre ces différents modèles qui ont été développés à des fins différentes : les modèles physiques et distribués pour une étude plus fine des processus hydrologiques, et les modèles conceptuels pour une détermination des paramètres moyens sur le bassin étudié et des débits à l'exutoire uniquement.

2.7.HEC-HMS :

Le HEC-HMS (Hydrologie Modeling System) est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un Bassin Versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par Hydrologie Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs.

HEC-HMS est un modèle distribué qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs sous-bassins, qui sont considérés comme ayant chacune des caractéristiques homogènes, Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, la réduction des effets des inondations.

Le logiciel HEC-HMS permet de traiter ou de simuler à la fois les différentes données suivantes :

- ✓ Les précipitations : Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique.
- ✓ Les pertes (par infiltration, retenue ou évapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant ;
- ✓ Les ruissellements directs qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge. [Lauacheria et Mansouri 2015]

2.8.La fonction de transfert SCS UH (Hydrogramme unitaire du SCS) :

Ce modèle repose sur l'hydrogramme unitaire normalisé (qui est la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires calculés pour différents BVs). L'hydrogramme normalisé représente le débit d'écoulement, Ut, comme une fraction du débit maximal Up, et Tp, l'instant du pic. Nous avons par ailleurs les relations empiriques suivantes :

$$\begin{cases} U_P = 2.08\dfrac{A}{T_P} \\ T_P = \dfrac{\Delta t}{2} + 0.6T_C \end{cases}$$

(Eq 01)

Ou :

Δt : est la durée de l'excès de précipitation,

Tc : est le temps de concentration du bassin. Ainsi, il suffit de connaître le temps de concentration pour remonter à Tp et Up et d'obtenir ainsi l'hydrogramme unitaire désiré par simple multiplication de l'hydrographe unitaire normalisé.

2.9. Le concept de base :

Le SCS-CN est une méthode conceptuelle développée dans les années 1950 qui repose sur une caractérisation empirique de la relation pluie-débit. Les seules données nécessaires sont le type de sol

et l'occupation du sol. Cette méthode est intégrée dans de nombreux modèles hydrologiques et d'érosion tels que SWAT, HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2011), AFFDEF, AGNPS (Agence de contrôle des pollutions du Minnesota, 1987) ou encore CNS. La méthode est applicable sur des bassins versants allant de 0.25 ha à 100 km² **(SCS, 1972).** Ce modèle simple, qu'on nomme parfois modèle avec indice de ruissellement (Curve Number model), a été développé au cours des années 1950 par le NRCS (Natural Ressources Conservation Service), autrefois appelé SCS (Soil Conservation Service). La popularité de ce modèle est attribuable essentiellement à sa simplicité, au manque de solutions alternatives et surtout à la base de données qui existe pour la sélection des paramètres en fonction des types de sols. Bien qu'à l'origine cette méthode ait été développée pour calculer des débits pour de petits bassins agricoles et pour évaluer les impacts de différentes pratiques agricoles sur le ruissellement, elle a été subséquemment élargie et appliquée à l'analyse des bassins urbains.

2.10. Développement du modèle :

Le modèle du SCS s'appuie sur le concept que la précipitation totale tombant sur un bassin peut être séparée en trois composantes (voir figure 4) : la pluie effective (Peff), la rétention qui se produit dans le bassin (F) et les pertes initiales (Ia). La relation entre la précipitation (P) et les trois composantes est assumée comme étant la suivante :

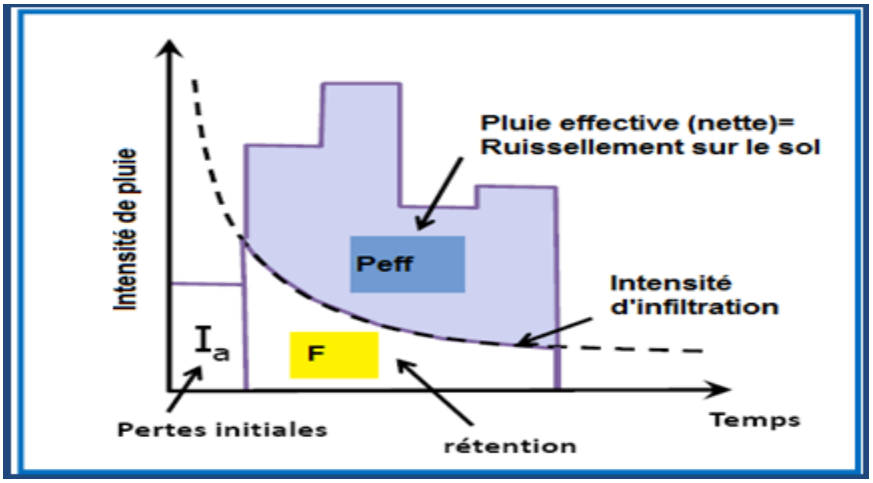


Figure 4.I : Séparation de la pluie (P) en ruissellement (Q), pertes.

Initiales (Ia) et les pertes par rétention (F) Méthode du NRCS

$$\frac{\mathbf{F}}{\mathbf{S}} = \frac{\mathbf{P_{eff}}}{\mathbf{P - I_a}} \qquad \text{(Eq 02)}$$

On appelle infiltration F la partie de la lame des précipitations P qui est absorbée par le sol et dirigée vers les couches inférieures. On appelle rétention initiale Ia (Initial abstraction) la partie des précipitations retenue dans les dépressions et absorbée par évapotranspiration. On appelle ruissellement (Peff) cette partie d'une averse qui coule à la surface du sol pendant et immédiatement après cette averse. S représente la rétention potentielle maximale. Autrement dit, le rapport entre infiltration réelle et infiltration potentielle égale le rapport entre le ruissellement réel et le ruissellement potentiel. La rétention se produisant réellement se définit avec la relation suivante :

$$\mathbf{F = (P - I_a) - P_{eff}} \qquad \text{(Eq 03)}$$

$$\frac{\mathbf{(P - I_{a)} - P_{eff}}}{\mathbf{S}} = \frac{\mathbf{P_{eff}}}{\mathbf{P - I_a}} \qquad \text{(Eq 04)}$$

$$\mathbf{P_{eff}} = \frac{\mathbf{(P - I_a)^2}}{\mathbf{(P - I_a) + S}} \qquad \text{(Eq 05)}$$

Soulignons que tous ces paramètres sont exprimés en unités identiques (en millimètres pour le système SI ou en pouces pour le système impérial). Cette équation contient une quantité connue (P) et deux inconnues (Ia et S). On pose ensuite, en se basant sur les résultats de simulations, que la perte initiale Ia=0,2S. Ceci donne donc en transposant dans l'équation on obtient :

$$\boldsymbol{P_{eff}} = \frac{\boldsymbol{(P - 0.2S)^2}}{\boldsymbol{(P + 0.8S)}} \qquad \text{(Eq 06)}$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de Peff au début et à la fin du pas de temps.

Cette relation est l'équation de base permettant de calculer le ruissellement (Q) à partir de la précipitation P. Pour pouvoir évaluer la seule inconnue, S, on a développé le concept d'un indice de ruissellement CN (run off Curve Number). L'indice CN est relié au stockage S par la relation suivante:

$$\mathbf{h_{eff}} = \frac{(\mathbf{h} - \frac{\mathbf{1270}}{\mathbf{CN_{II}}} + \mathbf{12.7})^2}{\mathbf{h} + \frac{\mathbf{24130}}{\mathbf{CN_{II}}} - \mathbf{241.3}} \quad \text{(Eq 07)}$$

La combinaison des équations (Eq 05 et Eq06) donne naissance à une équation permettant de calculer la hauteur de la pluie effective :

Le CN est donc simplement une transformation non-linéaire de S qui est un paramètre de stockage ; il est déterminé en considérant essentiellement les types de sol en présence dans le bassin et le couvert végétal. Il est important de noter toutefois que les quantités de ruissellement pour des durées autres que 24 h. Elle est par ailleurs moins la méthode du NRCS a été développée à l'origine comme un indice de ruissellement pour des précipitations de 24 h et qu'elle doit être utilisée avec précaution pour analyse appropriée pour l'analyse de petites précipitations et il est reconnu qu'elle devient moins précise pour des quantités de pluie inférieures à 10mm.

Le NRCS a par ailleurs classé les sols en quatre catégories en ce qui concerne le potentiel d'infiltration:

Pour un bassin versant composé de plusieurs classes d'occupation du sol et de type de sols, un CN composite doit être calculé par la formule :

$$\mathbf{CN_{composite}} = \frac{\sum \mathbf{A_i} \times \mathbf{CN_i}}{\sum \mathbf{A_i}} \quad \text{(Eq 08)}$$

Soulignons que les valeurs présentées au tableau (VI.5) sont valides pour des conditions antécédentes d'humidité moyennes (CNII).

Tableau 1 .I *:* Type d'occupation de sol et son CN associé.

Occupation de sol	Classe des sols			
	A	B	C	D
Bâtis	77	85	90	92
Chaussées	98	98	98	98
Trottoirs	98	98	98	98
Espace vert	67	78	85	89
Terres agricoles	67	78	85	89
Forêt	36	60	73	79

Alors que pour intégrer l'influence de l'humidité antécédente, on fait appel à la hauteur de pluie tombée pendant les cinq derniers jours précédant l'événement decrue (NRCS). Ensuite, on définit soit un CN normal, sec ou humide, tout en respectant le tableau ci-après :

Tableau 2.I : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN.

Types de CN	**Hauteur de pluie (mm) sur les 5 jours antérieurs**		
	Base annuelle	**Base saisonnière**	
		Période de végétation	**Période hivernale**
CN(I) : Conditions sèches	H< 12.5	H< 35	H< 12.5
CN(II) : Conditions normales	12.5<H<37.5	35<H<53	12.5<H<27.5
CN(II) : Conditions humides	H>37.5	H>53	H>27.5

En général, la perte initiale (Ia) tient compte de l'interception, du stockage dans les dépressions et de l'infiltration pendant la première partie de l'averse, avant que le ruissellement ne commence. En pratique, il n'y a pas d'écoulement superficiel jusqu'à ce que la pluie cumulée P, dépasse la perte initiale (Ia). Après le commencement du ruissellement l'infiltration réduit la rétention potentielle de la quantité d'eau infiltrée pendant l'événement.

Si l'infiltration cumulée tend vers S, l'infiltration tend vers zéro, et l'intensité de la pluie et le taux de la pluie excédentaire sont à peu près égaux. On a cherché par la suite une expression numérique des relations entre les CN pour les différentes classes d'humidité du sol. Une fois le CN connu pour ces conditions moyennes, on peut utiliser les équations (Eq.9 et Eq.10) pour évaluer le CN pour des conditions sèches (CNI) ou pratiquement saturées (CNII) :

$$\mathbf{CN_I} = \frac{\mathbf{CN_{II}}}{\mathbf{2.334 - 0.01334 CN_{II}}} \qquad \text{(Eq 09)}$$

$$\mathbf{CN_{III}} = \frac{\mathbf{CN_{II}}}{\mathbf{0.4036 + 0.005964 CN_{II}}} \quad \text{(Eq 10)}$$

2.11. Représentation du modèle de la pluie :

Les données de précipitation existent sous plusieurs formes. Le modèle HEC-HMS prend en compte cette variété de présentation des données de précipitations. Pour cela, il propose sept types d'événements pluvieux, la plupart sont spécifiques aux réseaux américains de mesure des précipitations.

On peut créer avec le logiciel HEC-HMS des évènements pluvieux hypothétiques, c'est-a- dire réaliser une simulation à partir de données qui ne sont pas issues de relevés réels. Cela peut s'avérer utile en particulier lorsqu'on veut connaître les volumes d'écoulements pour dimensionner des ouvrages d'art. On peut créer trois types d'évènements pluvieux standards :

- ✓ Pluie hypothétique basée sur la fréquence.
- ✓ Pluie de projet standard : cette méthode fait intervenir des paramètres définis uniquement pour le territoire américain par certains organismes.
- ✓ Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur.

2.12. Pluie hypothétique basée sur la fréquence :

L'objectif de cette méthode est de définir un événement pour lequel la hauteur et la durée des précipitations sont déterminées pour une probabilité de dépassement donnée. Pour définir cet évènement avec HEC-HMS l'utilisateur doit spécifier la hauteur de précipitation en chaque pas de temps pour une probabilité de dépassement choisi. Les hauteurs des précipitations peuvent être déduites à partir des courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence). HEC-HMS applique un coefficient de correction de surface aux hauteurs données par les courbes HDF. Généralement, la distribution de l'intensité des précipitations est non uniforme sur le bassin versant, la hauteur moyenne sur la surface du bassin est inférieure à la hauteur donnée par les courbes HDF. Pour remédier à ce problème, l'U.S. Weather Bureau, a défini des facteurs qui permettent d'ajuster les hauteurs données par les courbes HDF à la hauteur moyenne. Ces facteurs, exprimés en pourcentage, sont fonction de la surface du bassin et de la durée de la pluie (figure 5).

HEC-HMS fait une interpolation linéaire pour calculer les hauteurs d'eau en pas de temps régulier. Ensuite, il détermine un histogramme à partir des valeurs incrémentales des hauteurs de précipitations par la méthode dite en « Bloc ». Cette méthode positionne la hauteur maximale en milieu de l'hyétogramnme. Les blocs restants sont arrangés alors dans l'ordre décroissant, alternativement avant et après le bloc central.

2.13. Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur :

Cette option donne à l'utilisateur la possibilité de définir la hauteur et la distribution de la pluie hypothétique. On peut aussi donner la quantité totale d'eau tombée sur le bassin versant et la fraction

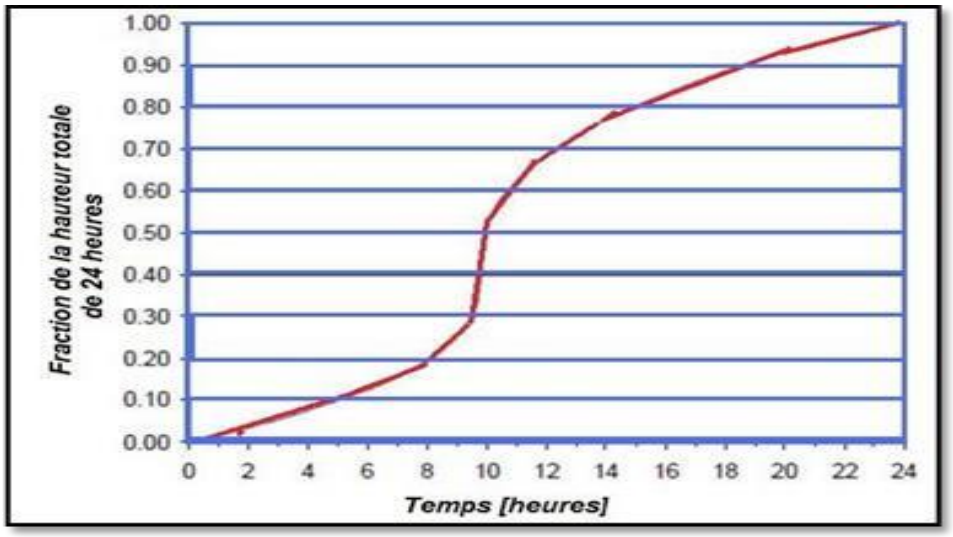


Figure 7. I : Averse hypothétique de type SCS.

de cette quantité à chaque instant. Parmi les pluies hypothétiques les plus utilisées dans les simulations, figurent les pluies SCS. La (figure 6) illustre le cas d'une pluie SCS de type I.

Lorsque les méthodes de distribution d'intensité pour différentes durées de précipitations sont introuvables pour la zone d'étude, la méthode de la pluie hypothétique basée sur la fréquence inclus dans HEC-HMS a été utilisée pour créer les pluies de projet avec des périodes de retour spécifié. Cette méthode est basée sur la méthode bloc alternatif. Par la présente, les pluies de projet sont générées sur la base de courbes IDF d'une manière que les quantités de précipitations pour n'importe quel intervalle de temps de la pluie, centrée autour de l'intensité du pic, ont une période de retour cohérente.

2.14. Le module du débit de base :

Celui-ci est l'un des deux modules complémentaires du modèle, à défaut duquel le HEC- HMS peut tourner, mais sa présence améliore la compréhension des mécanismes qui contrôlent le ruissellement dans le bassin sujet d'étude. Le débit de base est la contribution du réservoir souterrain dans l'écoulement, sa connaissance est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme avant et après la pointe de débit et pour mieux estimer le volume de crue. Trois formalismes sont proposés par le modèle :

- « Constant Monthey » : Constante mensuelle. Il considère l'écoulement souterrain comme fixe pendant des durées d'un mois. Ce débit de base mensuel est donc ajouté au ruissellement direct issu des précipitations nettes. Cette méthode est très simple, mais non adaptée au contexte semi- aride où la variation des conditions de saturation des bassins versants se fait en moins d'un mois.
- « Linear Réservoir » : Réservoir linéaire. Il simule le stocke souterrain à un réservoir, ainsi il est toujours associé à la fonction de production type SMA.
- « Récession » : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est utilisée pour les bassins sou les volumes de crues ont influencés par les événements pluvieux.

2.15. Le module de routage :

C'est le deuxième des deux modules complémentaires, il permet de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces formalismes utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement pour la simulation (USACE, 1994).

- « Lag ».
- « Muskingum ».
- « Modified Puls ».
- « Kinematic-wave ».
- « Muskingum Cunge».

2.15.1. Modèle de Muskingum :

Ce modèle utilise une approximation simple en différences finies de l'équation de continuité :

$$\left(\frac{\mathbf{I_{t-1}+I_t}}{\mathbf{2}}\right)-\left(\frac{\mathbf{O_{t-1}+O_t}}{\mathbf{2}}\right)=\left(\frac{\mathbf{S_t-S_{t-1}}}{\mathbf{\Delta_t}}\right) \quad \text{(Eq 11)}$$

On écrit ensuite que le volume d'eau stocké est la somme d'un volume stocké constant et d'une variation du stock :

$$\mathbf{S_t=T_pQ_t+T_pX(I_t-Q_t)=T_p(XI_t+(1-X)Q_t)} \quad \text{(Eq 12)}$$

Avec Tp : Temps de parcours ; X : paramètre permettant une pondération (0<X<0,5)

Ainsi, si le stockage d'eau dans la rivière est contrôlé par les conditions aval, on met X=0 (On retrouve alors le modèle de réservoir linéaire présenté plus haut). Au contraire, on prendra X=0.5, pour donner un poids similaire aux débits entrants et sortants.

2.16. La fonction d'optimisation automatique :

Elle sert à rechercher, sans intervention de l'utilisateur, le jeu de paramètres optimal donnant à la fonction objective sa valeur la meilleure possible. Pour exécuter cette tâche, le HEC-HMS propose 2 méthodes :

- « 6 Mead » : utilise une approche qui consiste à optimiser tous les paramètres simultanément.

En conclusion, on peut dire que la diversité des formalismes dont dispose HEC- HMS, le positionne en tête des modèles les plus robustes dans la simulation des ruissellements au sein du bassin, les plus complets dans l'intégration des différentes composantes d'écoulement et les moins exigeants de point de vue données d'entrée. En outre, sa diversité en matière de combinaisons modulaires possibles, laisse à son utilisateur la capacité de l'adapter à ses données, ses objectifs, ses besoins mais surtout à son expérience.

2.17. Justification du choix du modèle :

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix. Parmi ceux les plus importants :

- Les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles, donc, le modèle peut donc tourner sans soucis.
- Possibilité d'intégrer les majeurs facteurs affectant la transformation pluie-débit (morphométrie du bassin versant, occupation du sol, types de sols et humidité antérieure), et donc les résultats seront plus réalistes.

Le SCS-CN a été validée sur plusieurs bassins versants dans le monde, et ses résultats sont fiables et similaires aux modèles complexes. [Benhamidcha E.2019). (Motevalli et aI .2012)]

I. Conclusion :

Sur la base de cette étude des modèles analysés, notre choix s'est porté sur un modèle hydrologique qui traite de la modélisation des écoulements dans les régions arides et semi-arides, en mettant l'accent sur la gestion et l'utilisation rationnelle des ressources en eau. Ce modèle est le HEC-HMS. Notre choix pour simuler le comportement d'un bassin versant avec HEC-HMS est justifié par les raisons suivantes :

- Le modèle HEC-HMS est un modèle complet, donc théoriquement adapté à tout type de climat, y compris celui des zones arides. En outre, ce modèle a la capacité de simuler les pertes, l'écoulement de surface, l'écoulement souterrain et l'écoulement fluvial.
- La fiabilité des résultats obtenus lors de son application aux bassins versants américains nous a encouragés à appliquer ce modèle aux bassins versants méditerranéens.
- L'un des avantages de ce modèle est sa capacité à prendre en compte la complexité géographique des bassins versants, en particulier lorsqu'il est utilisé dans un système intégré combinant la télédétection, les SIG et les modèles hydrologiques.

Chapitre II :

Description de la zone d'étude

II. Introduction

Ce chapitre vise à examiner les éléments constituant notre zone d'étude. Nous commencerons par situer précisément la zone d'étude dans un contexte géographique, avant de procéder à une analyse du cadre physico-géographique. Nous aborderons la géomorphologie générale, le contexte géologique et les conditions climatiques du bassin de Ain Sefra.

II.1. Situation géographique :

1.1 Présentation générale de la région hydrographique

La région hydrographique Ain Sefra s'étend sur une superficie de 1957km², elle regroupe deux bassins hydrographiques :

- Le bassin Tirkount (1120km²))
- Et le bassin Breidj (548km²)

La région d'étude se situe dans le Sud-Ouest algérien (Fig.7.). Elle appartient au domaine atlasique occidental, chaîne montagneuse formant l'extrémité occidentale de l'Atlas Saharien appelée « *Monts des Ksour* ». Elle se situe dans le fond d'un couloir montagneux séparant les deux grands Djebels parallèles : Aissa – Mekter et Morhad – Hairech orientés Nord Est, Sud-Ouest.

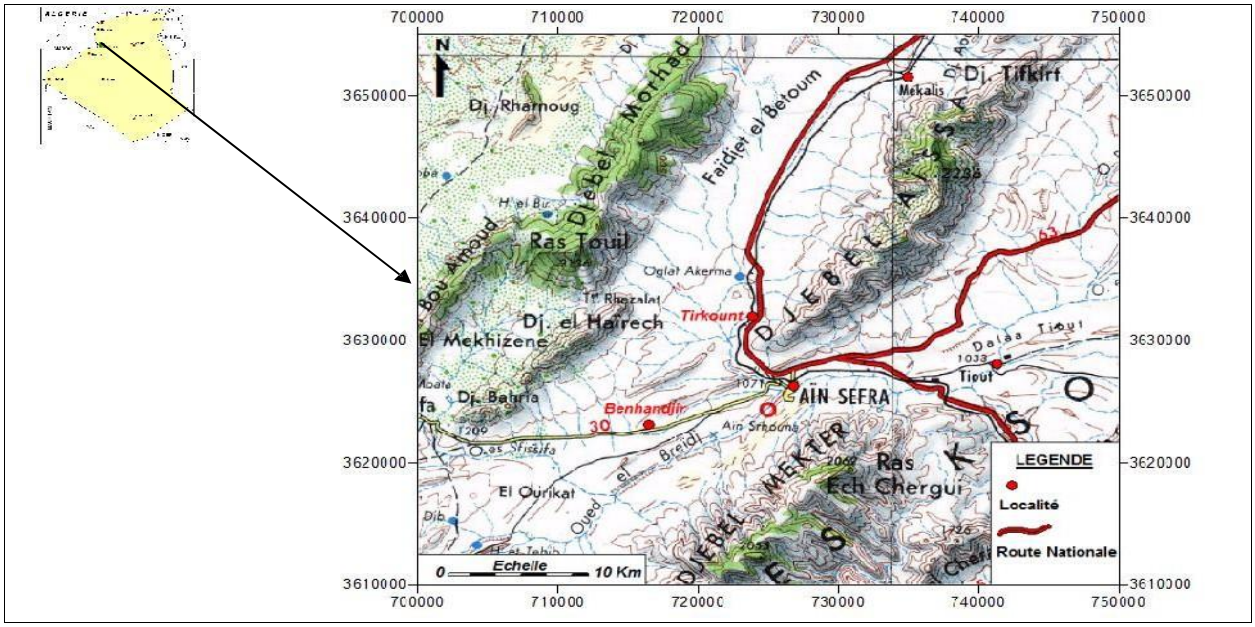


Figure 10. II *:* Situation du secteur d'étude (Carte –Ain Sefra -1/200 000).

Avec une moyenne interannuelle des précipitations de 176 mm à Ain Sefra sur 32 années de mesures (1981 – 2012) et une température moyenne annuelle de 17.2 °C, la région d'Ain Sefra jouit d'un climat de type semi-aride à aride avec influence désertique, et une évaporation intense de l'ordre de 900 mm/an.

Ces bassins versants d'Oued Breidj et Tirkount d'une superficie respective de 1120 et 548 Km^2 font partie du grand ensemble hydrologique d'Oued Namous (Fig.8). Les principaux oueds sont, Oued Breidj qui draine les versants Nord du Djebel Mzi et Mekter, reçoit les eaux d'Oued Sfissifa et d'Oued Benikrou, Oued Tirkount qui draine les eaux du Djebel Morhad et Aissa. Ces deux oueds se rencontrent au centre d'Ain Sefra pour former Oued Ain Sefra qui se dirige vers le Sud tout en recevant d'autres oueds comme Oued Tiout et Sam, formant un seul Oued celui de Rhouiba, pour former à la fin Oued Namous qui se perd dans le grand Erg occidental. Ils présentent, dans l'ensemble une forme assez ramassée (Kc= 1,54), favorisant à priori, le temps de concentration des eaux de ruissellement (Tc = 14 h). Les indices de pentes calculés (indice de pente de Roche Ip = 0.08 et indice de pente global Ig = 4.75 m/km) montrent qu'on est en présence d'un relief relativement plat, homogène, favorisant l'infiltration.

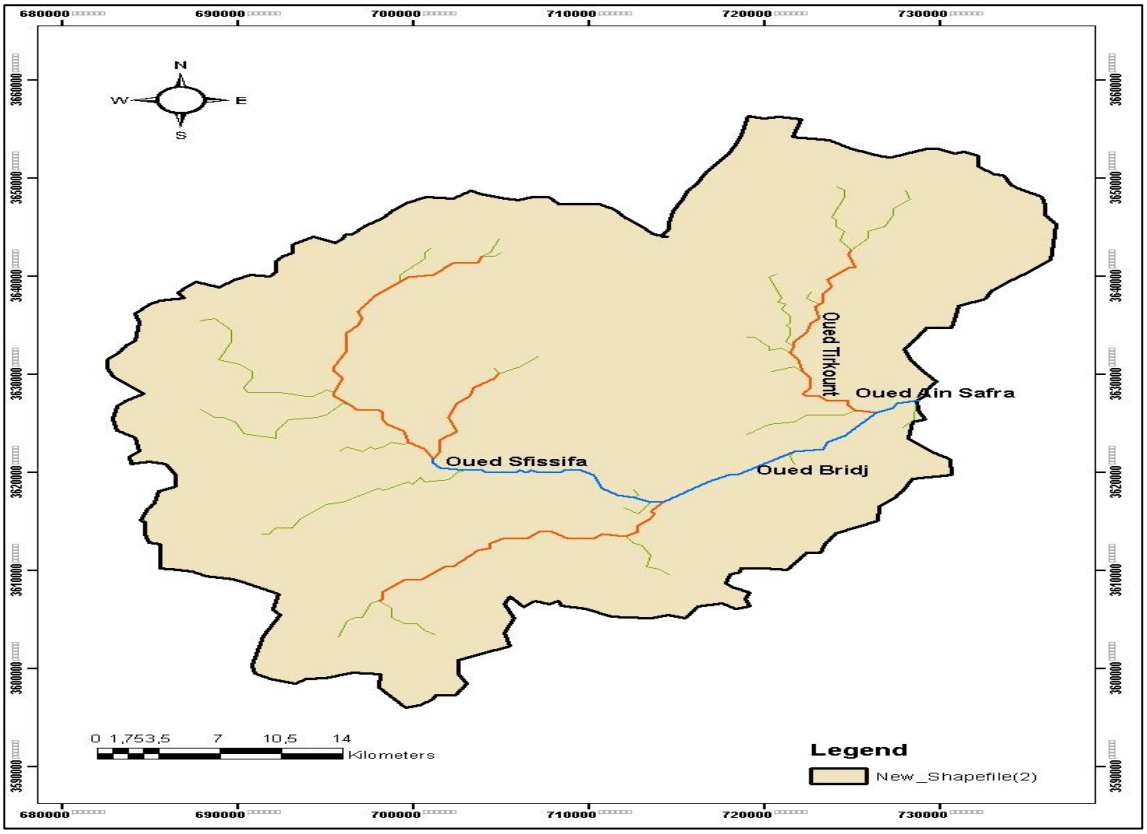


Figure 13. II : Le bassin versant et réseau hydrographique.

II.2. Le contexte géologique du bassin du Ain Sefra :

2.1 Le cadre géologique régional :

La série stratigraphique de la région d'Ain Sefra s'étend du Trias au Quaternaire récent.

- Le Trias est constitué d'argiles multicolores avec du gypse et du sel. On y trouve généralement des grès et des argiles.

- Le Jurassique est composé d'argiles.
- Le Néocomien ou Formation de Tiloula (Membre inférieur supérieur) est formé d'argiles blanches et verdâtres avec des intercalations d'argiles gypseuses.
- Le Barrémien-Aptien appelé Formation de Tiout, d'une épaisseur moyenne de 1065 m, est principalement composée de grès qui présentent des faciès caractéristiques, mais pas toujours différenciables des autres étages gréseux.

Ce sont des grès lenticulaires à stratifications obliques, avec parfois des niveaux riches en quartz, entrecoupés de couches argileuses gypseuses, occupant les plis synclinaux de l'Atlas saharien occidental.

Cette formation se divise en trois niveaux : inférieur, médian et supérieur.

- Le Cénomanien-Turonien est composé d'argiles gypseuses et d'une unité de calcaires ocre verdâtres massifs et de marnes blanchâtres.
- Le Tertiaire continental appartient au Mio-Pliocène, constitué de couches argileuses-sableuses intercalées de niveaux gypseux.
- Le Quaternaire est formé d'alluvions et de formations dunaires.

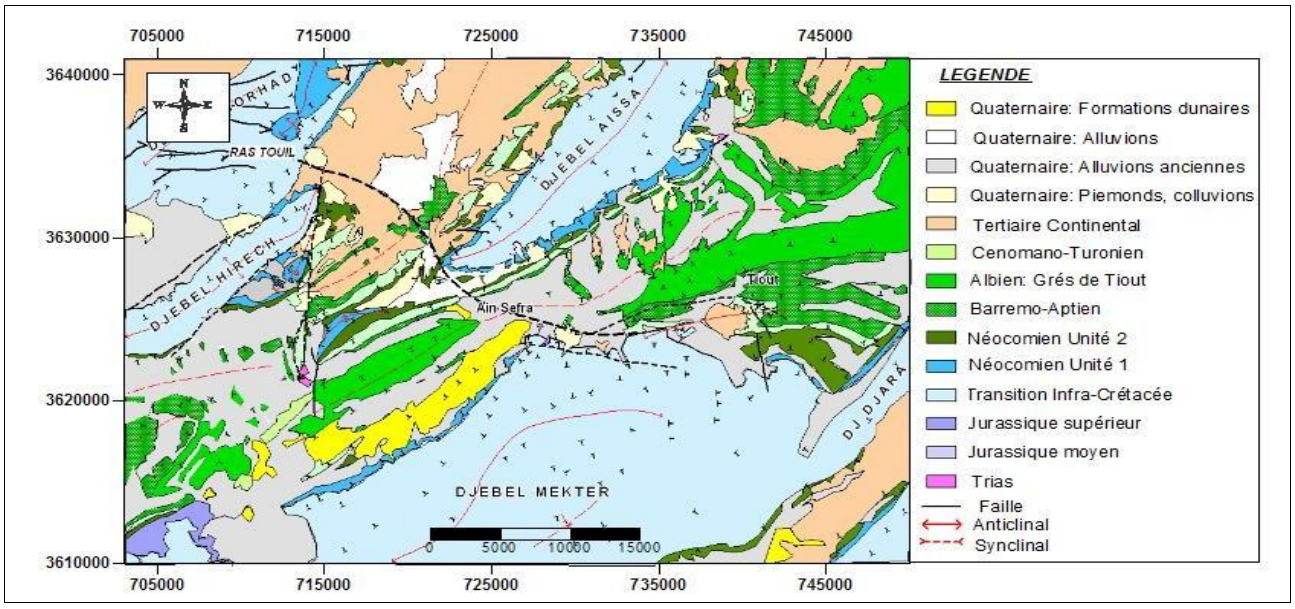


Figure 16. II : Carte géologique de la région d'Ain Sefra (Galmier 1972) (digitalisée).

Aux différents alignements et les linéaments (Fig.10a), s'ajoute l'accident « Ras Touil – Ain Sefra », décelé par l'étude géophysique (Fig. 10b). Cette faille normale de direction moyenne N150 qui a fonctionné à la fin du Jurassique, recoupe transversalement deux grandes structures anticlinales orientées SW-NE celle de Djebel Hirech – Morhad à l'ouest, et celle de Dir Hirech – Djebel Aissa à l'est. Ces deux grands anticlinaux d'âge Jurassique sup. sont séparés par le grand et large synclinal

de Tirkount – Garet Kheil - Benhandjir à sédimentation détritique et terrigène d'âge Crétacé inférieur.

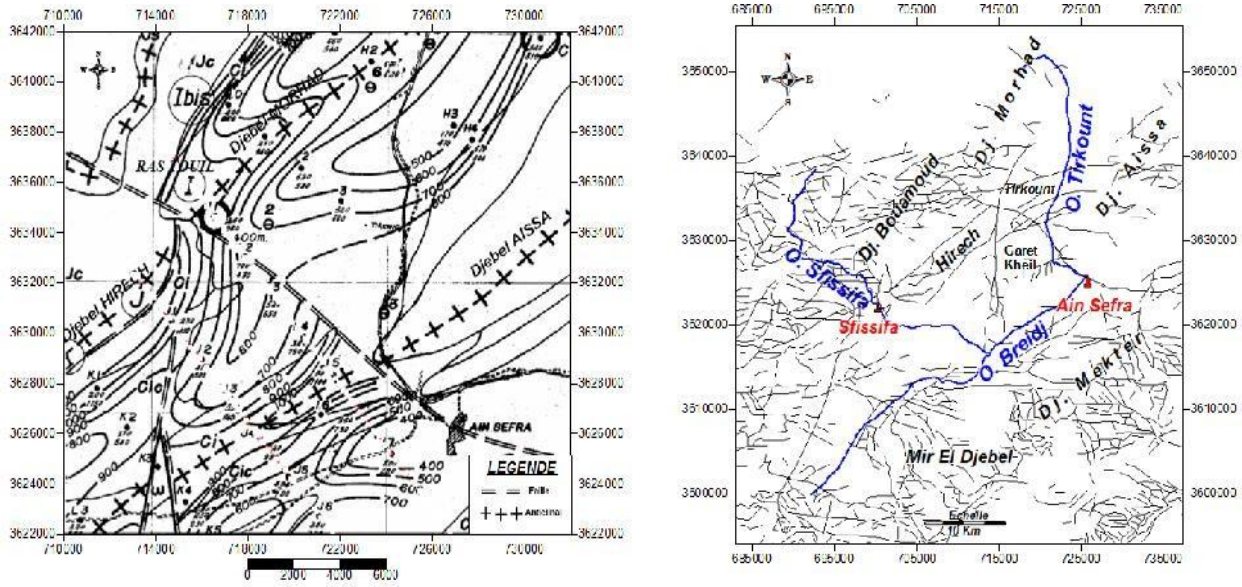


Figure 19. II : Carte de linéaments (Galmier 1972 – Kacemi 2013) (a) et (CGG 1974) (b).

II.3. Hydrogéologie :

La coupe hydrogéologique schématique (Fig.11) établie sur la base de l'étude géophysique, montre l'existence de deux systèmes aquifères potentiels.

Les grès du Jurassique supérieur : affleurant généralement aux piedmonts des Djebels (Aissa – Mekter – Hirech - Morhad).

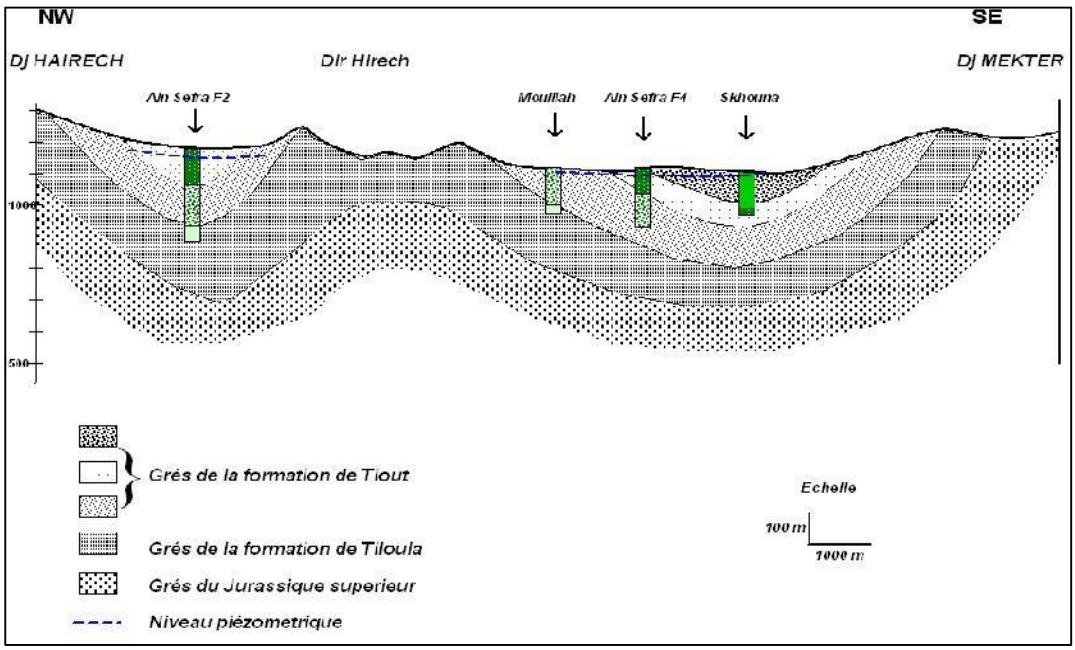


Figure 22. II : La coupe hydrogéologique schématique (NW-SE)

Les grès massifs du Crétacé inférieur : captés par les forages de la région d'étude (Fig.12), dont leur interprétation révèle deux niveaux, les grès de la formation de Tiloula (membre supérieur), avec intercalations argileuses, et les grès massifs de la formation de Tiout (membre supérieur et médian) : à porosité d'interstices et de fissures, intercalés par des passées argileuses rougeâtres, conférant une semi captivité à la nappe, et où l'alimentation par drainance joue un rôle important.

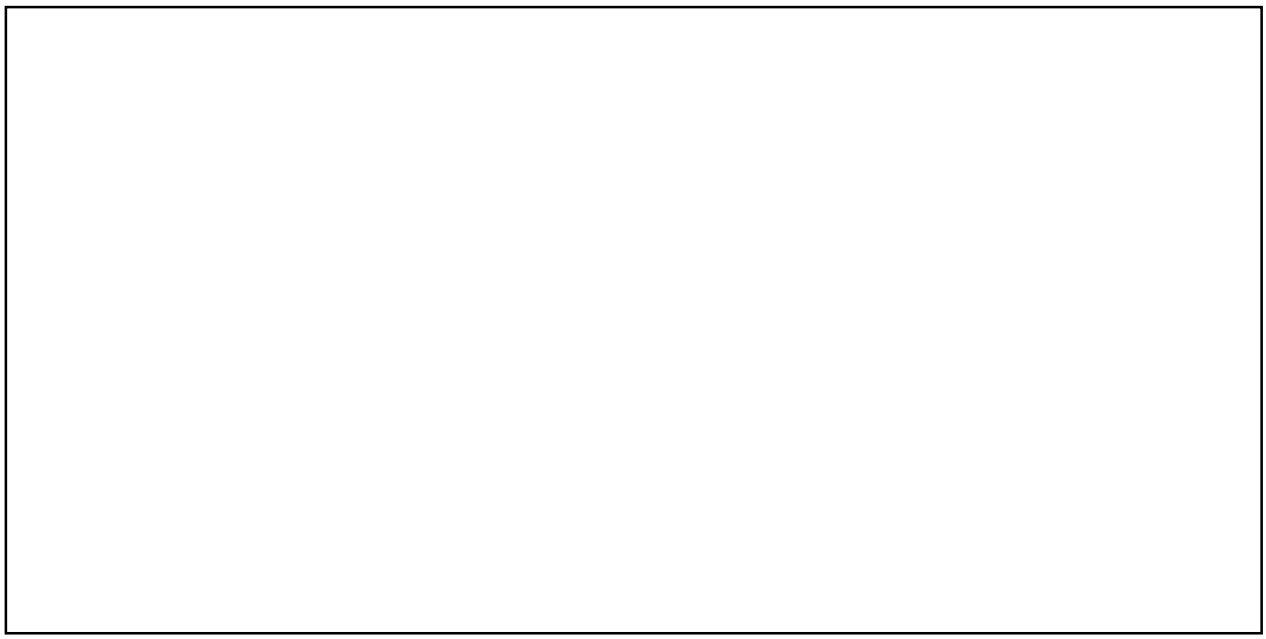


Figure 25. II : Essai de corrélation des coupes des forages de la région d'Ain Sefra.

II.4. Le couvert végétal

La vallée d'Ain Sefra, située dans la wilaya de Naâma en Algérie, se caractérise par une couverture végétale modeste en raison du climat semi-aride qui prédomine dans la région. La végétation présente est généralement adaptée aux conditions désertiques et arides, comprenant des espèces telles que :

1. Les plantes désertiques comme l'acacia (talh) et le genêt (retama).
2. Les plantes herbacées saisonnières qui apparaissent pendant les courtes périodes de pluie.
3. L'alfa (Stipa tenacissima), qui est bien adaptée aux sols sableux et rocheux.

Cette couverture végétale joue un rôle important dans la réduction de l'érosion des sols et le maintien de l'équilibre écologique local.

II.5. Ressources en eaux :

Les bassins versants des oueds Tirkount et Breidj sont situés au sud-ouest du territoire algérien, à l'ouest de la ville de Ain Sefra. Les deux oueds, traversant la ville de Ain Sefra, se rejoignent pour former, en plein centre de la zone urbaine, l'oued Sefra, puis plus en aval l'oued et Rhouïba, formant la partie amont du grand bassin versant saharien du Namous qui décharge ses eaux dans le grand erg

occidental. Les parties montagneuses, sources d'écoulement du grand oued Namous.

- Bassin de l'oued Tirkount on note deux grands affluents rive droite, suivant une direction Ouest Est.
- Bassin de l'oued Breidj, l'affluent le plus important est l'oued Es Sfissifa à écoulement de direction Nord-Ouest – Sud-Est. Un autre affluent d'importance moyenne est l'oued Djeliba qui s'écoule suivant la direction Sud-Ouest – Nord.

Sur la rive gauche on a l'oued Es Sfissifa drainant la plus grande partie du bassin versant de l'oued Breidj.

II.6. Géomorphologie et Morphométrie :

L'étude des caractéristiques topographiques et morphologiques, telles que la forme du terrain, le relief, la disposition du réseau hydrographique, la nature du sol et le couvert végétal, est essentielle pour comprendre le comportement hydrologique d'un bassin versant, notamment l'écoulement, l'infiltration et d'autres processus associés.

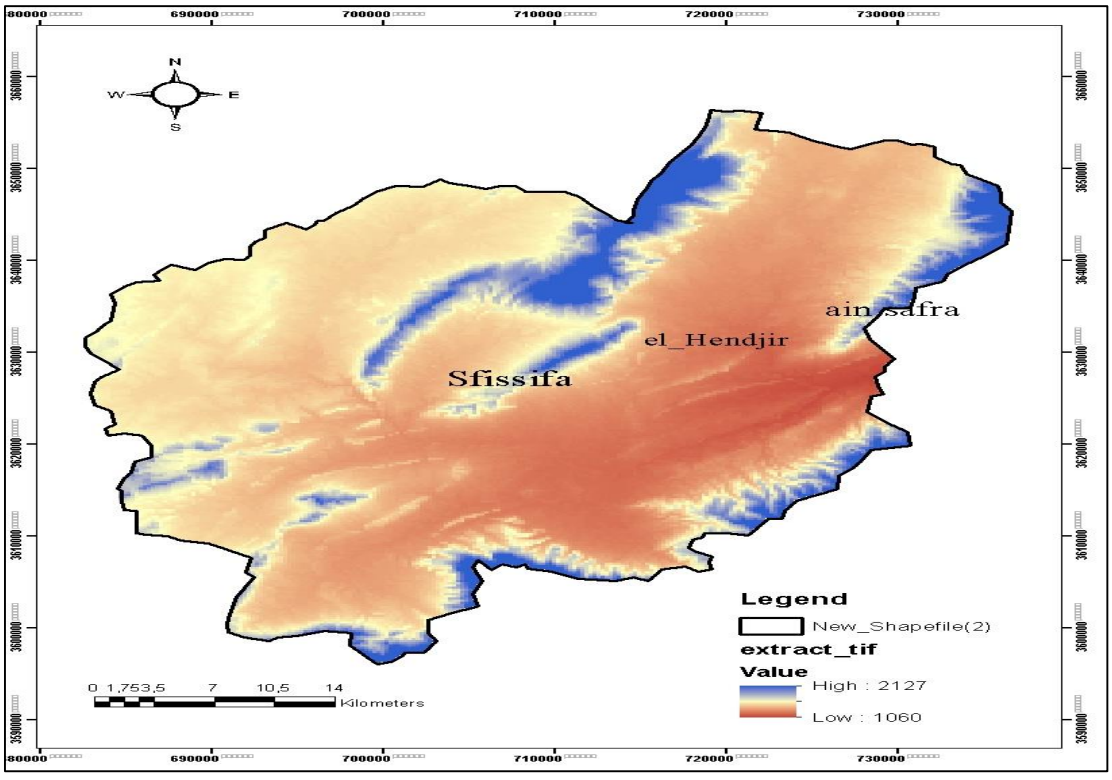


Figure 28. II : Carte géomorphologique de la zone d'étude.

Paramètres géométriques

Les limites du bassin versant ont été définies, suivies d'une analyse planimétrique pour calculer sa superficie et son périmètre. Le bassin de l'oued Ain Sefra couvre une superficie de 1957km² et un périmètre de 236 km.

a. Caractéristiques de forme

1. Indice de compacité selon Gravelius (Kc)

La forme du bassin versant joue un rôle déterminant dans les caractéristiques de l'hydrogramme résultant des précipitations dirigées vers l'exutoire. Un bassin allongé réagit différemment d'un bassin plus compact, en raison des variations des conditions physiques et du relief.

$$\mathbf{K_C = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}} \quad \text{(Eq 13)}$$

Avec :

Kc : Indice de compacité de GRAVELIUS

P : Périmètre du bassin en km ;

A **:** Surface du bassin en km^2

KG = 1 ……bassin circulaire

1<KG< 1.3 …… bassin compact.

KG > 1.3 …… bassin allongé.

Le coefficient Kc est supérieur à 1 et d'autant plus voisin de cette valeur que le bassin est compact. Avec Kc = 1,49, le bassin versant du l'oued Ain Sefra correspond à un moyennement allongé.

6.1.Dimension du rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est un modèle de représentation développé par *ROCHE*. Ce modèle permet la comparaison entre les bassins du point de vue caractéristiques tel que l'écoulement ; le bassin devient similaire à un rectangle de même périmètre, les courbes de niveau deviennent parallèles à sa largeur. La longueur et la largeur du rectangle sont calculées à l'aide des relations suivantes :

A- La longueur (L) :

$$\boldsymbol{L = \frac{K_C\sqrt{A}}{1.12}\left(I + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C}\right)^2}\right)} \quad \text{(Eq 14)}$$

B- La largeur (l) :

$$L = \frac{K_C\sqrt{A}}{1.12}\left(I - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C}\right)^2}\right) \quad \text{(Eq 15)}$$

Avec :

L : La longueur du sous bassin versant, en Km.

l : La largeur du sous bassin versant en Km.

A : La superficie du sous bassin versant en Km².

Kc : Indice de compacité de GRAVELIUS.

Le bassin versant d'Ain Sefra occupe une superficie de 1957 km2pour un périmètre de 236 km, avec un indice de compacité de 1.49, ce qui caractérise un bassin moyennement allongé. Il correspond à une région montagneuse assez élevée avec certains sommets qui culminent à plus de 2000 mètres d'altitude. La présence de massifs montagneux favorise la concentration des eaux de ruissellement vers les dépressions. Avec 67 Km de long, [Derdour et al. 2013]

6.2.Etude du relief :

La partie occidentale de l'Atlas saharien constitue une zone montagneuse à chaines allongées de direction Sud- Ouest Nord –Est, séparée par de larges dépressions.

Morphologiquement, les Monts des Ksour correspondent à une région montagneuse assez élevée avec certains sommets qui culminent à plus de 2000m d'altitude. On peut citer le Djebel Aïssa (2236m), le Djebel M'Zi (2145m), le Mir El Djebel (2109m) le Djebel Mekther (2020m).

Le bassin hydrologique de la région d'étude s'étend sur une superficie de 1120 km², et s'organisent en un bassin versant « Oued Breidj ».

6.3. La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique du bassin « Oued Breidj » montre une accentuation progressive des altitudes vers l'amont et vers le point culminant au fur et à mesure que les pourcentages des surfaces cumulés diminuent.

On peut constater les altitudes caractéristiques comme suit :

H5%= 1730m.

H50%= 1350m.

H95%= 1130m.

Les principales caractéristiques altimétriques correspondent à :

1. L'altitude moyenne (H) : c'est le rapport entre la somme des surfaces élémentaires par l'altitude moyenne correspondante et la surface totale du bassin versant (A).

$$H_{moy} = \frac{\sum a_i h_i}{A} \quad \text{(Eq 16)}$$

***a_i* :** Surface élémentaire entre deux courbes de niveau (Km^2)

***h_i* :** Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

***A* :** Surface totale du bassin versant (Km^2)

2. L'altitude maximale (H_{max}) traduite par le point le plus haut du bassin.

3. L'altitude médiane ($H_{méd}$) correspondant à 50% de la surface cumulée.

4. L'altitude minimale (H_{min}) caractérisant le point le plus bas du bassin.

Les résultats obtenus pour les trois (03) sous bassins de l'étude sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau 3. II : les altitudes caractéristiques de sous bassin.

Sous-bassins versants	Hmin (m)	Hmax (m)	Hméd (m)
Ain Sefra	1130	1730	1350

L'altitude maximale (1730m) caractérise le sous bassin de Ain Sefra alors que l'altitude minimale (1130m).

b. Indice de pente et dénivelée :

1. Indice de pente globale (Ig) :

Cet indice représente la pente moyenne de 90% de la superficie du bassin, il est obtenu à partir de la courbe hypsométrique, en prenant la dénivelée (D) entre les altitudes H5%-H95%.

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \text{(Eq 17)}$$

Avec :

D : la dénivelée égale à H5%-H95% (m)

L : la langueur du rectangle équivalent (Km)

2. La dénivelée spécifique (Ds) :

$$D_S = I_g\sqrt{A} \quad \text{(Eq 18)}$$

Le dénivelée spécifique (D_S= 264.04 m) et en se référant ou (tableau 2), nous pouvons dire que ce bassin versant est d'un relief fort.

Tableau 4. II : Classement de relief à partir de la dénivelée spécifique selon la classification de L'ORSTOM.

Relief	Valeur de Ds (m)
Relief très faible	Ds<10
Relief faible	10<Ds<25
Relief assez faible	25<Ds<50
Relief modéré	50<Ds<100
Relief assez fort	100<Ds<250
Relief fort	250<Ds<500
Relief très fort	500<Ds

II.7. Climatologie :

Les plaines du Ain Sefra, en général, ont un climat spécial, de type continental semi - aride, avec des étés secs et chaud où les précipitations sont quasiment absentes et l'évaporation particulièrement forte. Les hivers sont frais et parfois très froids, avec des intensités des précipitations souvent importantes en automne. [Mémoire de Faycel 2017]

7.1.Les précipitations :

Précipitations Sur les plans physique et naturel, les précipitations constituent le premier facteur de contrainte pour toute la région des Hauts Plateaux. En effet, le régime pluviométrique se caractérise par des précipitations annuelles très faibles (comprises entre 100 et 300 mm en moyenne), souvent à caractère orageux et présentant une grande variabilité inter-mensuelle et interannuelle.

7.1.1 Les précipitations moyennes mensuelles :

La répartition mensuelle des précipitations influe considérablement sur le régime hydrologique des cours d'eau et sur répartition mensuelle et saisonnière de leur écoulement. Le tableau 5 donne les valeurs des précipitations mensuelles pour la station Ain Sefra.

Tableau 5. II : Les valeurs des précipitations mensuelles pour la station Ain Sefra.

MOIS	September	October	November	December	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Moyenne
(mm)	12,8	16,7	13,8	7,24	15	11,7	22,2	19	16,4	7,54	3,16	4,82	150
%	8,5	11,1	9,2	4,8	10,0	7,8	14,8	12,6	10,9	5,0	0,75	3,2	100

Nous avons vu utile de présenté les variations mensuelles des précipitations au niveau de la stationconsidérée, il en ressort les constations suivantes :

1. Les mois avec les précipitations les plus élevées :

Le mois de mars enregistre les précipitations les plus importantes, dépassant 20 mm.

Les mois comme avril et janvier présentent également des précipitations élevées, mais moins importantes qu'en mars.

2. Les mois avec les précipitations les plus faibles :

Les mois d'été (juillet et août) enregistrent des précipitations presque nulles, avoisinant 0 mm.

Juin montre une baisse significative par rapport aux autres mois.

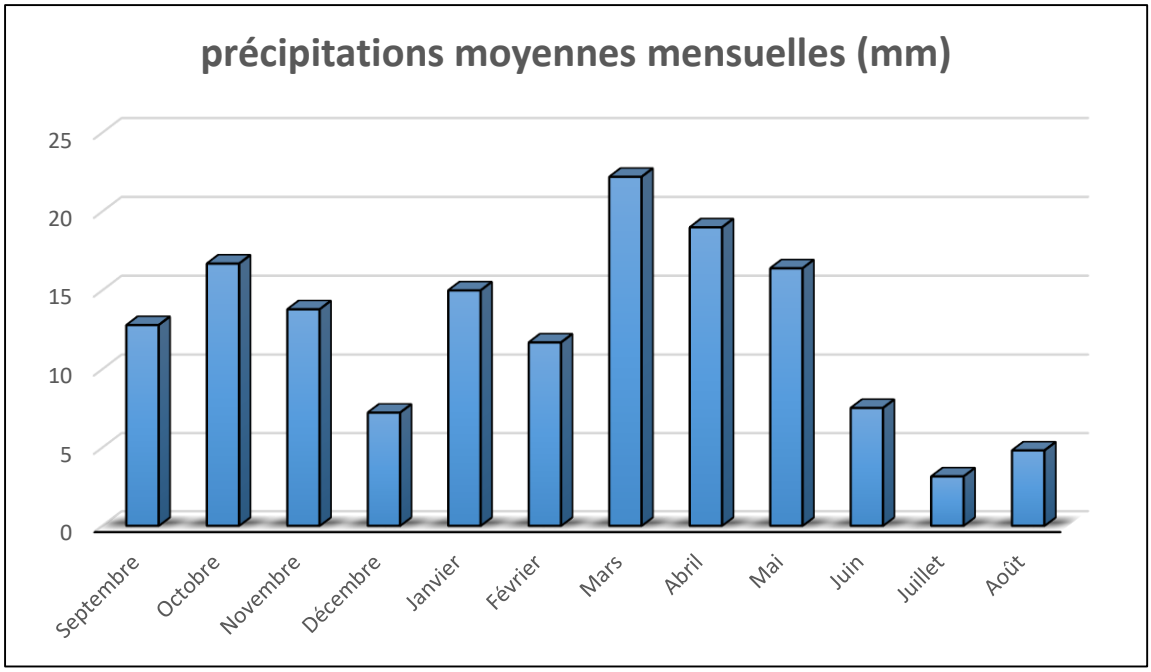


Figure 31. II : Variation des précipitations moyennes mensuelles du Ain Sefra

Hiver (décembre - janvier - février) : Les précipitations sont modérées, avec un pic en janvier.

Printemps (mars - avril - mai) : C'est la saison avec les précipitations les plus importantes.

Été (juin - août) : Les précipitations sont très faibles durant cette période.

Automne (septembre - novembre) : Les précipitations sont relativement élevées en septembre, mais diminuent progressivement.

La région de Ain Sefra se caractérise par un climat semi-aride à aride, avec des précipitations variables selon les saisons.

Le printemps est la période la plus arrosée, tandis que l'été est quasiment sec.

7.1.2 Variation annuelle des précipitations pour la période 1972-1999

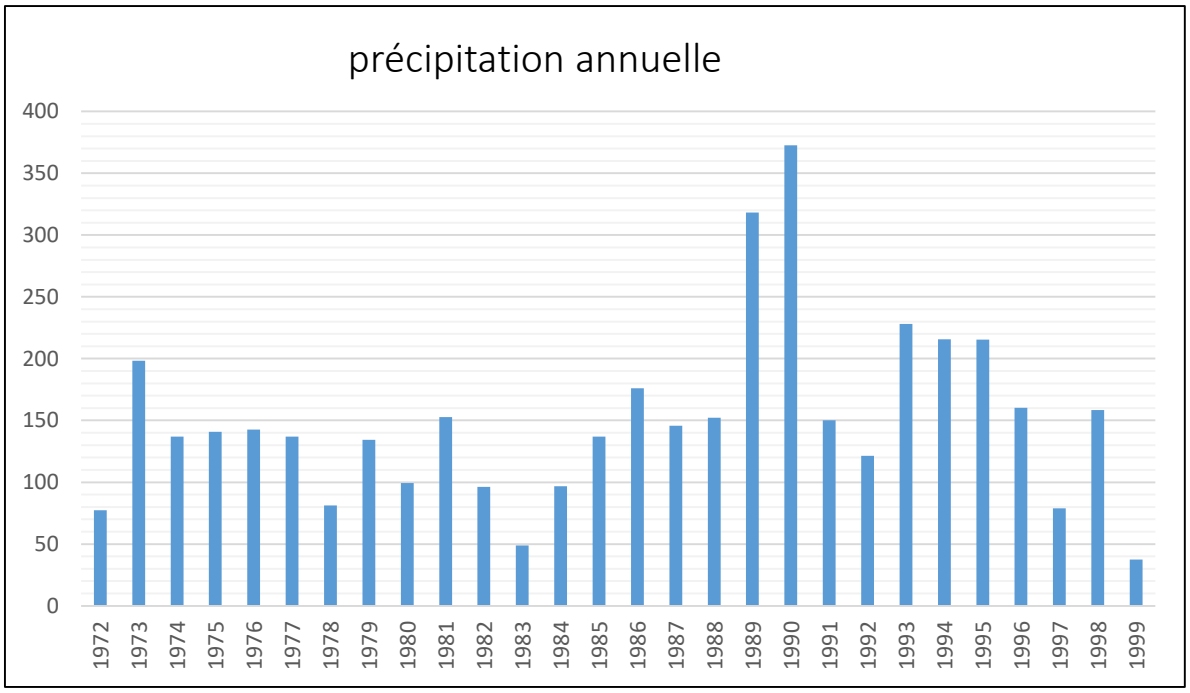


Figure 34. II : Variation annuelle des précipitations du Ain Sefra (1972_1999).

On a enregistré la quantité la plus élevée vers l'année 1990, atteignant environ 372 mm, tandis que cette quantité diminue depuis l'année 1996 pour enregistrer des quantités avoisinant 160,2 mm.

7.1.3 Les précipitations saisonnières :

Pour illustrer les variations saisonnières des quantités de précipitations enregistrées dans la station, nous avons calculé les moyennes des précipitations comme indiqué dans la figure suivante :

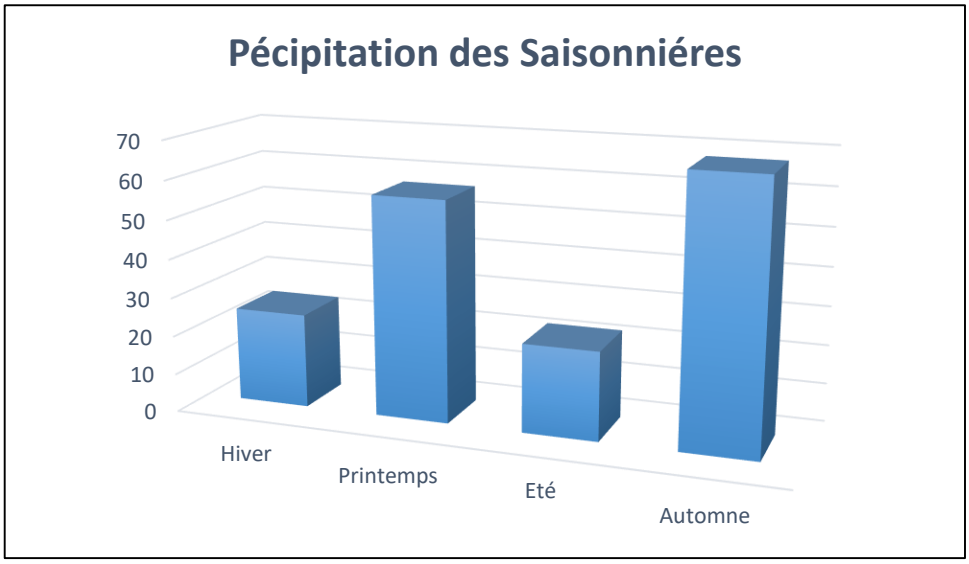


Figure 37. II : Histogramme des précipitations saisonnières du Ain Sefra (1980, 2010).

Dans cette station, le taux le plus élevé de précipitations a été enregistré pendant l'automne avec une quantité de 68 mm, suivi d'une baisse notable au printemps et en hiver, tandis que le taux le plus bas a été observé en été.

7.2 Etude de la température :

Les températures traduisent la prépondérance des influences continentales sur les influences maritimes. Elles varient selon l'altitude, la vitesse et la direction des vents.

Selon les données enregistrées par l'Office National de la Météorologie (ONM)2017, on note les valeurs suivantes concernant la station de Ain Sefra.

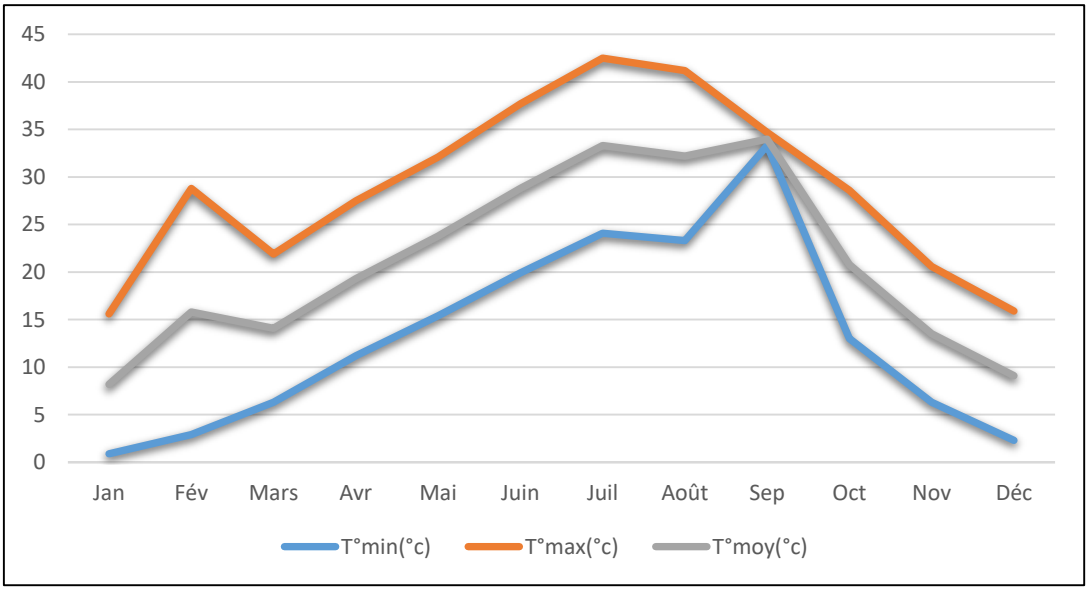


Figure 40. II : Température moyenne mensuelle de la station de Ain Sefra (2005-2017).

La température, second facteur constitutif du climat influe sur le développement de la végétation. Ce sont les températures extrêmes plus que les moyennes qui ont une influence sur la végétation, sauf si elles sont exceptionnelles et de courte durée.

La répartition de la température moyenne mensuelle de station permet de considérer le mois de Janvier comme le plus froid (8.2°C à Ain Sefra,) et le mois de Juillet comme le plus chaud de l'année (33.3 °C à Ain Sefra) comme le montre le (figure 17) Les moyennes annuelles des températures pour la station de (21.18°C Ain Sefra).

7.3 Le régime climatique :

L'étude du climat nous à permet à caractériser le type du climat de la région étudié grâce à les calculs et l'interprétation des indices climatique (tableau 6).

Tableau 6. II : Valeurs des précipitations et des températures moyennes mensuelles (1982/1983-2015/2016).

Mois	S	O	N	D	j	F	M	A	M	J	J	A
P(m)	14,5	21,29	32,91	13,57	9,87	13,84	9,28	5,07	16,58	4,77	4,02	14 ,88
T(°c)	25,09	20,6	13,04	8,61	8,846	10,05	12,65	18,84	22,68	26,19	30,09	29,98

7.3.1 Diagramme pluvio-thermique de Bagnouls et Gaussen :

Les diagrammes pluviothermique de Bagnouls et Gaussen sont établis selon la relation P=2T, les précipitations sont reportées à l'échelle double des températures. Cette relation permet d'établir le diagramme pluvio-thermique sur la période (1982/1983-2015/2016) :

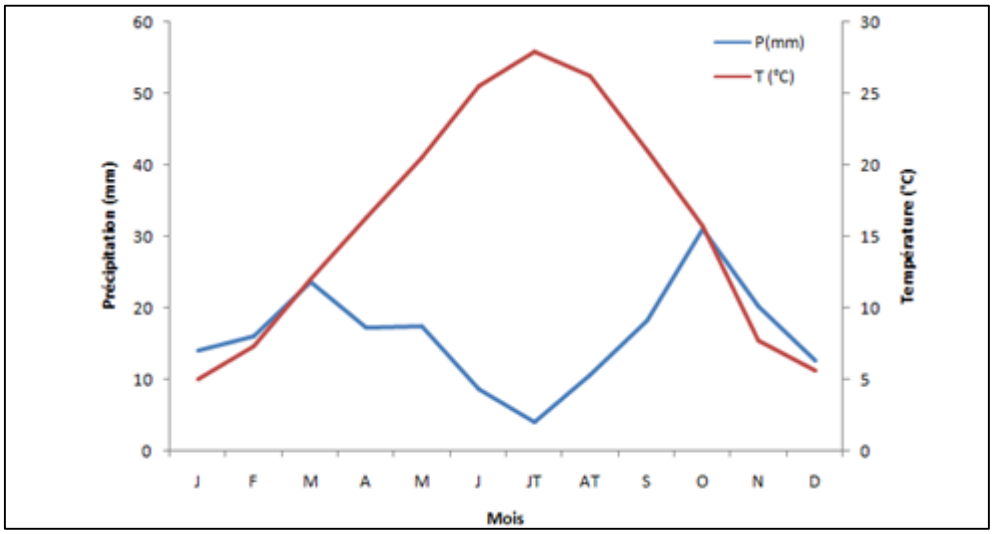


Figure 43. II : Diagramme de la station d'oued Ain Sefra (1982/1983-2015/2016).

Le diagramme ombrothermique de la station d'Ain Sefra (Figure 17) fait ressortir une aridité étalée sur sept mois du mars à septembre où le total pluviométrique mensuel en mm est dépassé par le double des températures en °C.

7.4 Précipitation maximales :

Le traitement statistique de la série de pluie maximum journalière à l'échelle de mois donne les résultats suivants dans le tableau

Tableau 7. II : Résultats des estimations statistiques des pluies maximales journalières (stations d'AIN SEFRA) Source : ONM, 2011

Effective N°	Moyenne (mm)	Ecart type (mm)	Coef de variation	Coef d'asymétrie	Pjmax 0.1%	Pjmax 1%	Pjmax 10%
336	7.04	11.21	1.59	4.78	149	57.1	19.1

7.5 Étude l'intensité _durée _fréquence (IDF)

Intensités de courtes durées Afin d'étudier le caractère intensif des précipitations dans le bassin, il est nécessaire de formuler à partir du paramètre pluviométrique journalier, une expression mathématique déterminant les intensités de courtes durées significative. Pour cela, on dispose d'un fichier d'observation standard, relevant les pluies quotidiennes maximales annuelles dont il est possible d'extrapoler, d'une zone à l'autre en utilisant des méthodes statistiques appropriées. Ainsi, la quantité de pluie tombée, en une durée d'intensité donnée, est admise si on la lie à la pluie maximale journalière par la formule décrite par Montana, et corrigée statiquement selon les coefficients climatiques adéquats. Compte tenu des études réalisées dans les régions proches de notre bassin, les intensités-durées-fréquences sont déterminées par la formule régionale élaborée pour les zones des hauts plateaux, et affinée notamment en fonction du relief de l'Atlas saharien. Cette formule se définit en relation avec les pluies maximales quotidiennes fréquentielles. Statistiquement déterminées, et ce par l'expression :

$$\mathbf{P(t)\% = a * } \boldsymbol{Pjmax\ tb}$$

Où :

a et **b** : Coefficients climatique ajustées convenablement au bassin projeté. (Dans ce cas, a=0.347 et b=0.173 par extrapolation régionale) $\boldsymbol{Pjmax}$: Pluie de 24 h pour une fréquence donnée. **P(t)** : pluie de durée (t) pour la même fréquence.

Tableau 8. II : Intensités maximales de durée t(h) et période de retour (ans) (station Ain Sefra).

Source : ONM, 2011.

temps h	pjmax(100 ans)	Intensité	pjmax 10 ans	intensité	pjmax 1000 ans	Intensité
0,25	15,65	62,6	5,2475	20,99	40,85	163,38
0,5	17,61	35,22	5,895	11,79	45,96	91,91
1	19,81	19,81	6,63	6,63	51,70	51,7
2	22,28	11,14	7,46	3,73	58,16	29,08
3	23,88	7,96	7,98	2,66	62,31	20,77
6	26,88	4,48	9	1,5	70,08	11,68
12	30,24	2,52	10,08	0,84	78,84	6,57
24	34,08	1,42	11,28	0,47	88,80	3,7

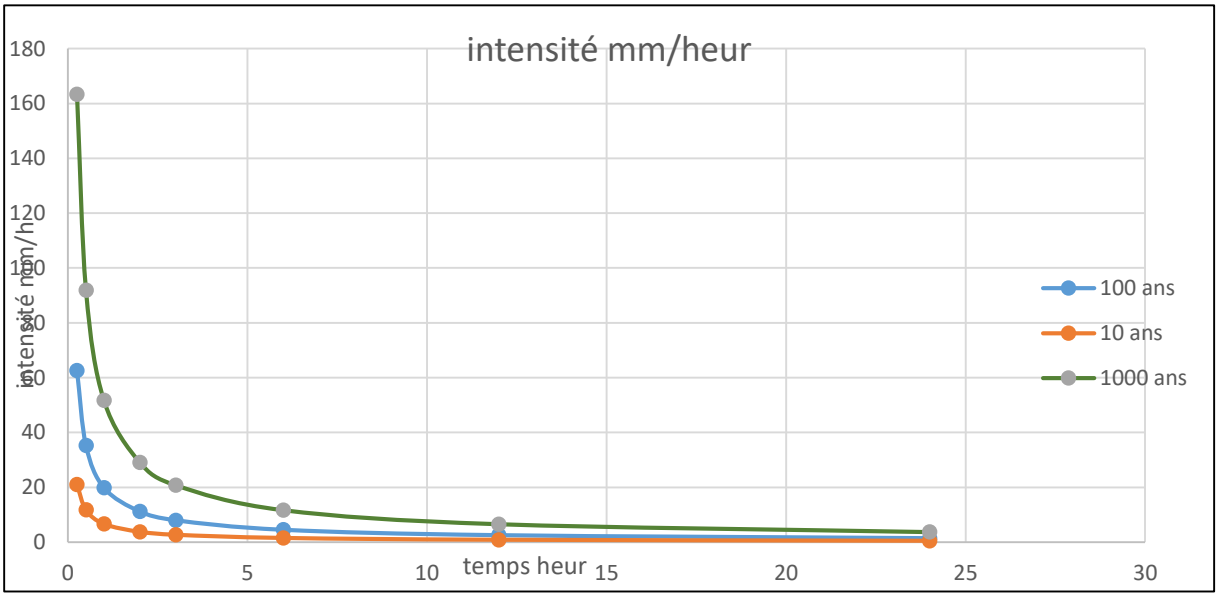


Figure 46. II : Courbes des pluies fréquentielles

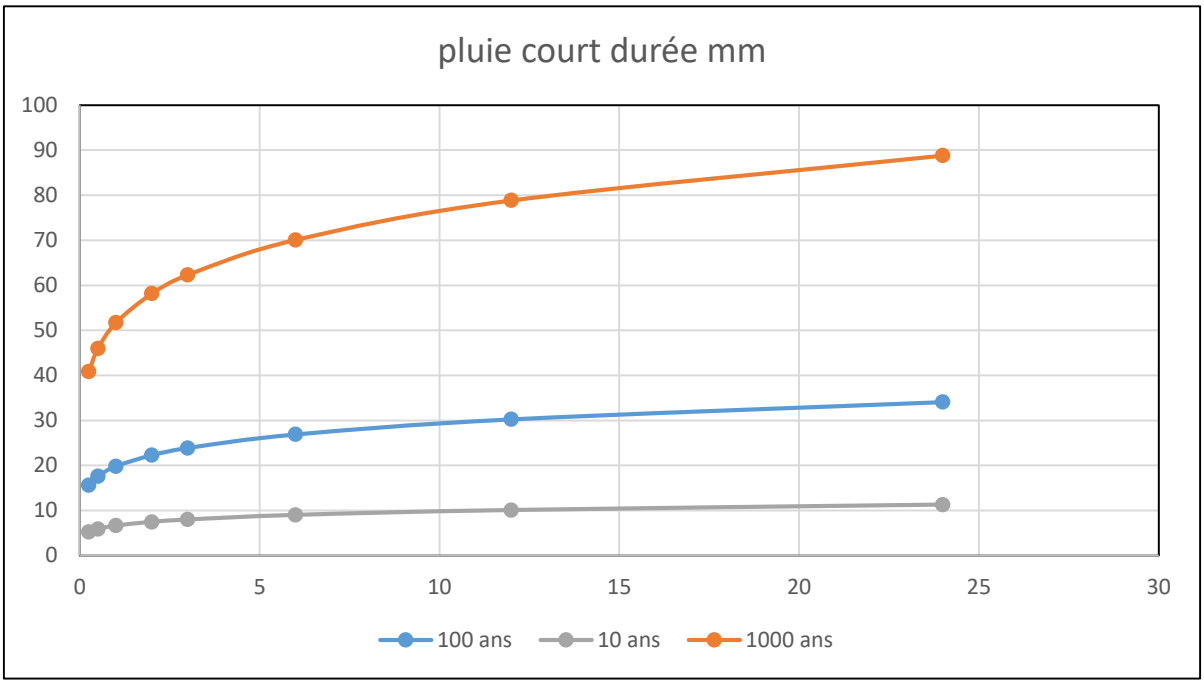


Figure 49. II : Courbes des intensités- durées- fréquences.

7.6 Débits moyens annuels et mensuels :

L'analyse des débits mesurés sur une période de 32 ans (de 1977 à 2008) à la station d'Ain Hadjadj (20 Km en aval d'Ain Sefra) est basée sur les données recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) figure (20). A l'échelle annuelle, l'oued d'Ain Sefra reçoit un débit moyen de 0.7 m3/s pour une surface drainée de 1957 km2, le débit moyen est très faible justifié par la nature peu fréquente de l'écoulement, de courte durée et de type orageux ; ainsi, 12 années sur 32 présentent des débits supérieurs au débit moyen interannuel. Le maximum moyen annuel de 2.8 m3/s a été observé en 1991, alors que le minimum moyen annuel de 0.013 m3/s a été remarqué en 2006 ce qui confirme la grande variabilité interannuelle de débits dans la région d'étude. Le débit maximum mensuel de 2.4 m3/s est enregistré en octobre. Il correspond au mois le plus pluvieux de l'année avec une précipitation moyenne mensuelle de 30.6 mm, ce qui justifie la grande fréquence de formation de crues pendant cette période de l'année. Le mois de juillet est considéré comme le plus sec de l'année. [Derdour et al 2018]

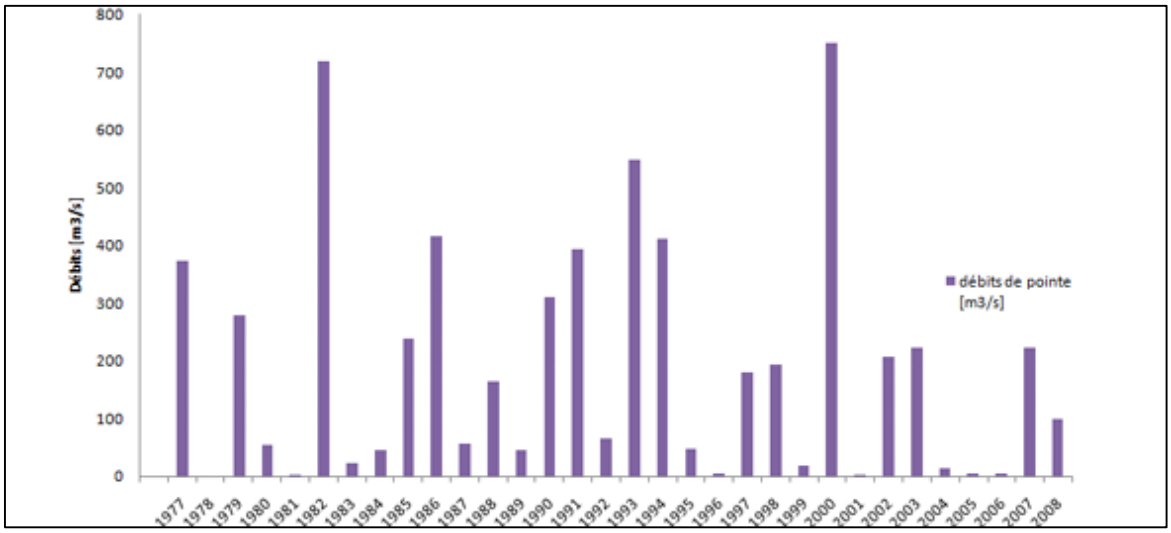


Figure 52. II : Variation des débits de pointe d'Oued Ain Sefra.

Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles :

L'analyse fréquentielle en hydrologie est une approche statistique de prédiction basée sur des calculs probabilistes utilisant l'historique des événements pour prédire des fréquences d'apparitions futures. Cette analyse devra permettre, d'estimer les quantiles correspondant aux périodes de retour, retenues dans le cadre de la présente étude : 10, 20, 50, 100 et 200 ans. Après avoir testé plusieurs lois (Exponentiel, GEV, Gamma, Gumbel, Normal, Log-Normal),

L'échantillon de 32 années de débits max de l'Oued d'Ain Sefra s'adapte bien à la loi de Gumbel qui est fréquemment utilisée pour rendre compte des valeurs extrêmes en hautes eaux (Fig.21). L'analyse fréquentielle de la série de débits maximaux de l'Oued d'Ain Sefra permet d'estimer les probabilités d'occurrence des crues et leurs périodes de retour.

Tableau 9. II : Les débits de retour après l'ajustement selon une loi de Gumbel.

Période de retour T	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	200 ans
Débit (m^2/s)	463	580	731	845	958

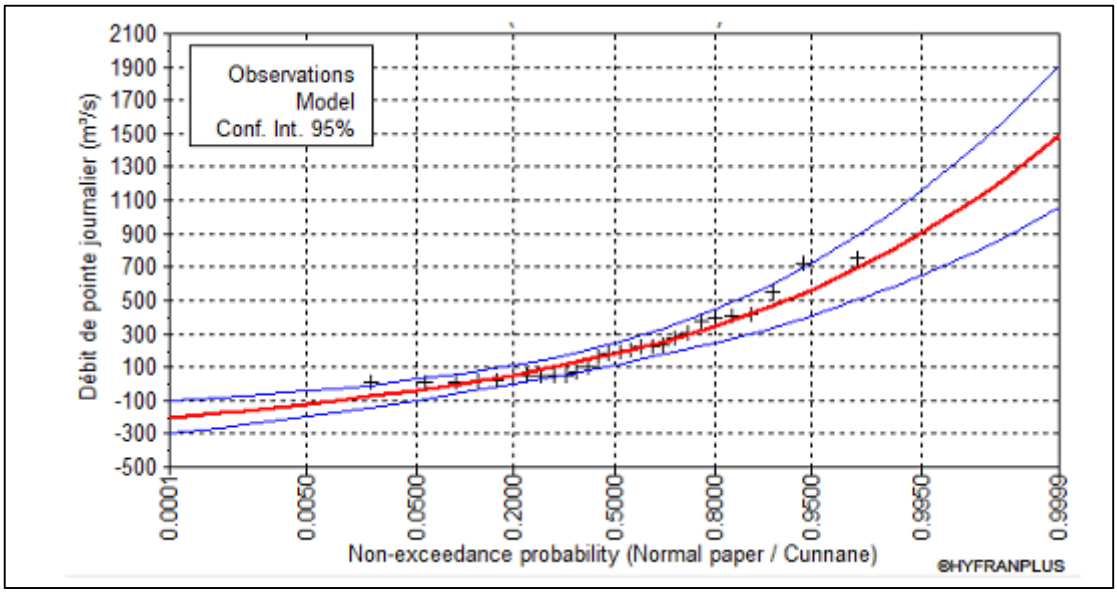


Figure 55. II : Ajustement par la loi de Gumbel max.

II. Conclusion

Le bassin versant d'Ain Sefra occupe une superficie de 1957 km2 pour un périmètre de 236 km, avec un indice de compacité de Gravelius de 1.49, ce qui caractérise un bassin moyennement allongé. Il correspond à une région montagneuse assez élevée avec certains sommets qui culminent à plus de 2000 mètres d'altitude. La région est caractérisée par un climat semi-aride, avec des étés secs et chaud où les précipitations sont quasiment absentes et l'évaporation particulièrement forte. Les hivers sont frais et parfois très froids, avec des intensités des précipitations souvent importantes en automne.

Le débit annuel moyen du bassin versant d'Ain Sefra est de l'ordre de 0.7 m3/s calculé d'après les observations hydrométriques à la station d'Ain Hadjadj. Quant au maximum moyen annuel, il est de 2.8 m3/s en 1991 alors que le minimum moyen annuel de 0.013 m3/s a été remarqué en 2006 ce qui confirme la grande variabilité interannuelle de débits dans la région d'étude.

Chapitre III :

Méthodologie et application du HEC-HMS

III. Introduction

"Le modèle hydrologique HEC-HMS est un outil mathématique avancé utilisé pour simuler les processus hydrologiques dans un bassin versant. Ce modèle repose sur le principe de la distribution, qui permet de diviser le bassin versant en plusieurs sous-parties, permettant ainsi de simuler le comportement hydrologique d'un bassin versant non urbain.

"Le modèle HEC-HMS peut être utilisé dans de nombreuses applications pratiques, telles que :

- La simulation du comportement hydrologique d'un bassin versant non urbain
- L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les processus hydrologiques
- La conception et la mise en œuvre de projets d'ingénierie hydrologique
- L'évaluation de l'impact des activités humaines sur les processus hydrologiques.

"Le modèle HEC-HMS présente plusieurs avantages, tels que :

- La capacité à simuler les processus hydrologiques dans un bassin versant non urbain
- La capacité à évaluer l'impact des changements climatiques sur les processus hydrologiques
- La capacité à concevoir et à mettre en œuvre des projets d'ingénierie hydrologique
- La capacité à évaluer l'impact des activités humaines sur les processus hydrologiques

"Cependant, le modèle HEC-HMS nécessite des données précises et fiables pour garantir l'exactitude des résultats. Il est essentiel d'analyser et d'évaluer soigneusement les données avant de les utiliser dans le modèle. De plus, il est nécessaire de perfectionner et de mettre à jour régulièrement le modèle pour garantir son exactitude et son efficacité."

III.1. Le processus de fonctionnement :

Le système HEC-HMS repose sur une méthode d'analyse composée de plusieurs étapes, dans laquelle chaque module individuel est attribué à une étape spécifique du processus de conversion des précipitations en débit. Les résultats produits par chaque module sont ensuite combinés avec ceux des autres modules, ce qui conduit à la génération de l'hydrogramme final. Cette méthode permet d'étudier le processus de conversion des précipitations en débit de manière exhaustive et précise."

III.2. Fonctionnalités :

"Le 07système HEC-HMS se caractérise par sa capacité à recevoir des données d'entrée pour les différentes parties d'un bassin versant, telles que les sous-bassins et les tronçons de cours d'eau, ou pour des groupes d'éléments analogues. Les tableaux et formulaires pour l'introduction des données nécessaires sont accessibles à partir d'un schéma visuel du bassin versant.

"Pour effectuer une première simulation, il est nécessaire de créer une base de données pour caractériser le bassin versant et déterminer les précipitations qui seront employées comme données d'entrée du modèle. Les principales étapes de la simulation sont les suivantes :

1. Création d'un nouveau projet.
2. Définition du modèle de bassin versant.
3. Définition du modèle de précipitation.
4. Définition des paramètres de contrôle de la simulation.
5. Création et exécution d'une simulation.
6. Visualisation des résultats.

"En suivant ces étapes, les utilisateurs peuvent créer un modèle de simulation précis pour un bassin versant spécifique, qui peut être utilisé pour prédire le comportement hydrologique et évaluer les impacts des changements climatiques et des activités humaines sur les processus hydrologiques."

III.3. Les étapes de limitation des sous bassin :

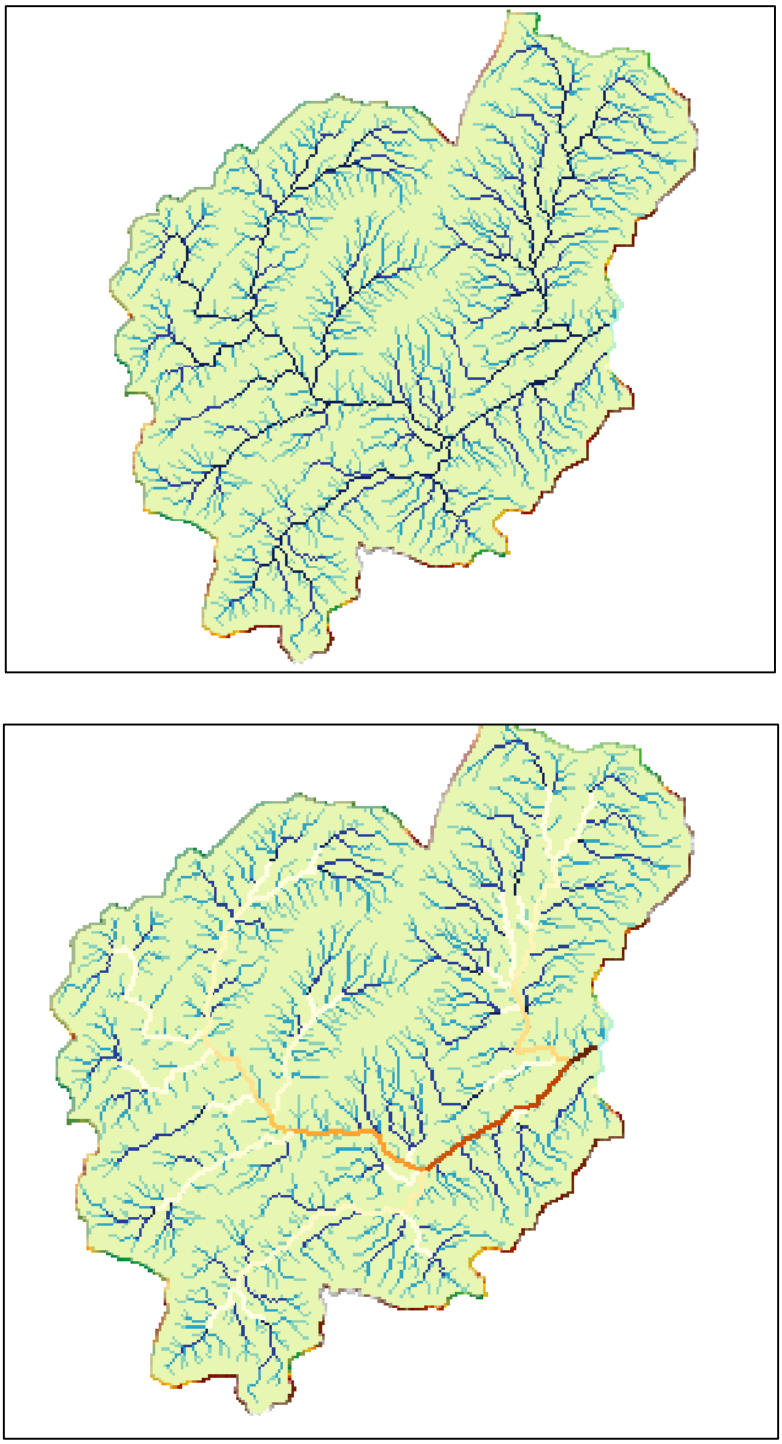


Figure 58. III : Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente les étapes de limitation de Bassin versant à partir de fichier MNT dans HEC_HMS.

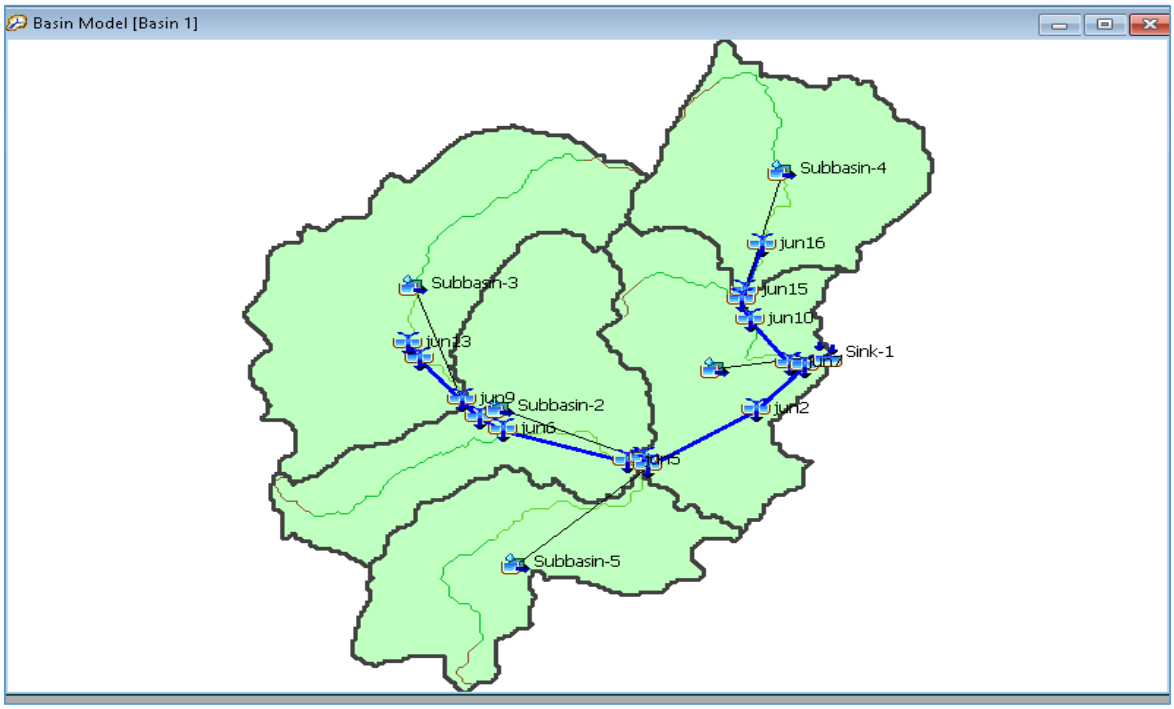


Figure 61. III : Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente le Bassin versant et leurs sous bassins (propre étude).

3.1.Première étape : Schématisation du bassin versant :

La première étape consiste à diviser le bassin versant étudié en composants fondamentaux connectés sous la forme d'un arbre ramifié. Le logiciel HEC-HMS offre la possibilité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles présentes dans le bassin et influençant la transformation des précipitations en écoulements. Ces éléments incluent les sous-bassins, les exutoires, les canaux des rivières, les canaux de dérivation, les réservoirs, les barrages, etc.

Les rôles de ces éléments dans la représentation de l'état du bassin versant sont les suivants :

Élément "Subbasin" :

Représente le bassin dans le cas d'une modélisation globale, ou les sous-bassins dans une modélisation semi-distribuée. Ses attributs de base incluent la superficie, la fonction de production associée, et la fonction de transfert.

Élément "Reach" :

Représente généralement la rivière et sert de lien entre les différents éléments. Sa fonction principale est le routage.

Élément "Reservoir" :

Décrit les réservoirs, les retenues des barrages, etc. Ses caractéristiques permettent de définir les conditions de stockage et de déstockage.

Dans cette étude, cette étape sera réalisée intégralement et automatiquement à l'aide des logiciels

ARC GIS & WMS lors de la phase de caractérisation physique.

3.2.Les données requises pour l'application du modèle HEC-HMS :

Pour utiliser efficacement le modèle HEC-HMS, il est nécessaire de disposer d'un ensemble de données spécifiques au bassin versant ou au site étudié. Ces données sont essentielles pour configurer le modèle et obtenir des résultats réalistes. Voici une description de ces données et de leur importance:

a. Caractéristiques des bassins versants (morphométriques) :

Les propriétés physiques du bassin influencent les processus hydrologiques. Elles incluent :

Surface des sous-bassins versants : Utilisée pour estimer les volumes d'eau générés par les précipitations.

Type de sol : Affecte les taux d'infiltration et de ruissellement.

Couverture végétale : Influence les pertes en eau dues à l'évaporation et à la transpiration.

b. Données climatiques :

Ces informations couvrent les facteurs météorologiques qui impactent les processus hydriques :

Précipitations : Quantité de pluie tombée sur le bassin.

Évapotranspiration : Perte d'eau causée par l'évaporation et la transpiration des plantes.

c. Données de contrôle temporel :

Ces données déterminent le cadre temporel et la précision de la simulation :

Dates de début et de fin : Définissent la période d'étude.

Intervalle de temps des calculs : Assure la précision des résultats (par exemple, horaire ou journalier).

3.3. Les données de bases d'entré :

Les données nécessaires à la modélisation des sous-bassins sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau 10. III : Données de base des sous-bassins versants.

sous bassin	area km2	CN	S	tc(scs)hr	lag hr	lag min	Ia=0,2*s
Subbasin-1	**317,17**	**89**	**1,24**	**1,41**	**0,85**	**50,78**	**0,25**
Subbasin-2	**389,91**	**88**	**1,36**	**2,08**	**1,25**	**75,04**	**0,27**
Subbasin-3	**477,37**	**85**	**1,76**	**2,93**	**1,76**	**105,52**	**0,35**
Subbasin-4	**324,46**	**79**	**2,66**	**1,56**	**0,94**	**56,13**	**0,53**
Subbasin-5	**305,59**	**86**	**1,63**	**1,49**	**0,89**	**53,46**	**0,33**

3.3.1. Utilisation des terres :

Pour répondre aux exigences de l'association type choisie, et notamment pour appliquer la méthode du Service de Conservation des Ressources Naturelles (NRCS CN) dans l'évaluation de la productivité, il était essentiel de créer une carte précise de l'utilisation des terres pour chaque zone d'étude. Cela a nécessité de garantir que les données utilisées dans ces cartes soient fiables et

conformes aux classifications approuvées par le NRCS, ce qui a impliqué une correspondance minutieuse entre les catégories du NRCS et les données disponibles dans les références scientifiques. Pour calculer la valeur de CN, il était nécessaire de commencer par une classification hydrologique des sols ainsi qu'une classification de l'utilisation des terres. Des tableaux de référence permettent d'estimer les valeurs de CN en fonction des catégories d'utilisation des terres et des groupes hydrologiques des sols.

Ces valeurs ont été établies à partir de nombreuses études sur les précipitations et le ruissellement dans les bassins versants agricoles des États-Unis.

Valeur CN :

Elle varie entre 100, représentant les surfaces aquatiques, et 30, correspondant aux sols à forte perméabilité et à une capacité élevée d'infiltration. Cette valeur est déterminée par l'interaction entre le type d'utilisation des terres et les propriétés hydrologiques des sols.

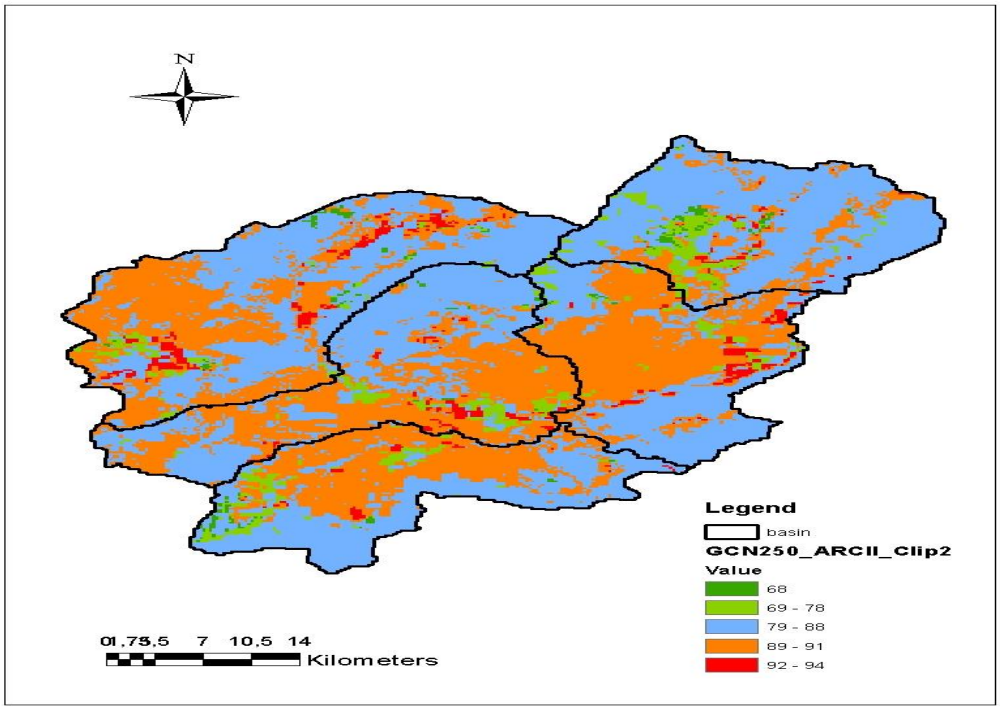


Figure 64. III : Curve Number (CN) du bassin versant d'oued Ain Sefra (propre étude).

Le texte explique un processus de modélisation hydrologique visant à représenter la perte des précipitations et leur transformation en ruissellement, tout en supposant l'absence d'écoulement de base. Voici une reformulation plus structurée :

Les paramètres des sous-bassins et des tronçons de rivière sont configurés à l'aide de l'éditeur, en utilisant les onglets Loss (perte), Transform (transformation), Baseflow (écoulement de base), Subbasin (sous-bassin) et Routing (acheminement). Chaque sous-bassin est traité comme un système indépendant, et trois processus principaux sont analysés :

1) **Perte (Loss)** : Une partie des précipitations s'infiltre dans le sol pour devenir un écoulement

souterrain ou une infiltration profonde. Cette quantité est estimée à l'aide de méthodes spécifiques.

2) **Transformation (Transforme)** : La partie des précipitations qui ne s'infiltre pas est transformée en ruissellement. Ce processus inclut des modèles qui simulent la genèse de l'écoulement dans les cours d'eau.
3) **Écoulement de base (Base flow)** : Dans ce cas, il est supposé qu'il n'y a pas de débit permanent ou d'écoulement de base (None).

Les données relatives aux écoulements en rivière dépendent elles aussi de la méthode choisie. Donc les données nécessaires à la méthode de Muskingum sont récapitulées.

Les données ainsi entrées pour chaque tronçon permettent d'obtenir le modèle complet du bassin versant étudié. Ce logiciel nous amène donc à passer à la deuxième phase de la modélisation : la composante météorologique.

3.3.2. Modélisation météorologique :

Différentes méthodes sont utilisées pour modéliser un événement pluvieux, qu'il soit connu ou non. Parmi ces méthodes, nous utilisons les précipitations hypothétiques basées sur la fréquence (Frequency Storm). Pour chaque fréquence donnée, nous avons calculé les quantités de précipitations correspondant à différentes périodes de temps (15 minutes, 30minute, 1 heure, 2 heures, 3 heures, 6 heures, 12 heures, 24 heures, etc.).

En nous basant sur les courbes intensité-durée-fréquence (IDF), nous avons obtenu des séries de données représentant les précipitations pour chaque période de temps et pour chaque fréquence. Ces données météorologiques sont utilisées dans le modèle HEC-HMS.

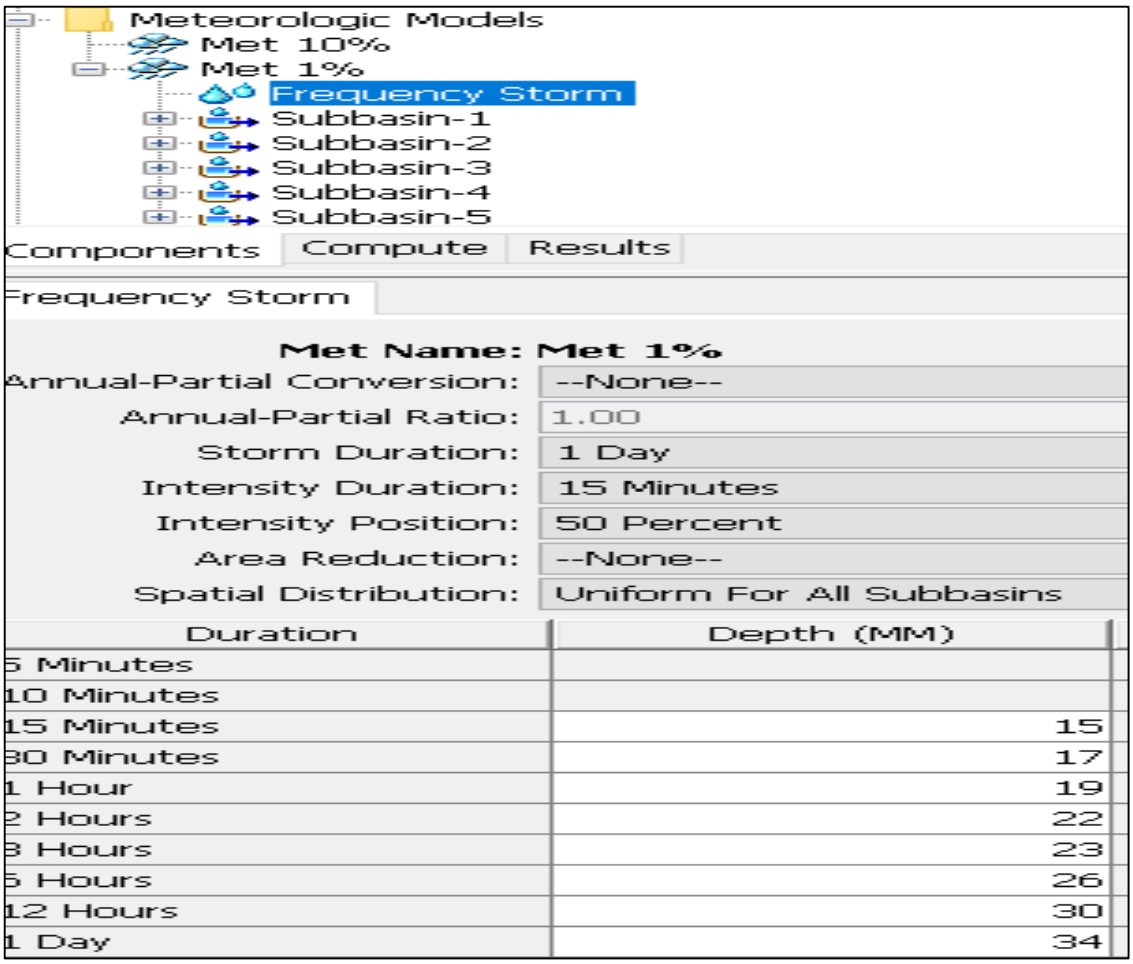
Le tableau suivant résume les valeurs estimées des précipitations de courte durée pour différentes périodes de retour qui seront utilisées dans les simulations.

Tableau 11. III : Les pluies courtes durées estimées au bassin du seggueur pour différentes périodes de retour Période de retour T (ans) _Ptc (mm).

Periode de retour, Années	15min	30min	1heure	2heure	3heure	6heure	12heures	24heures
10	5,25	5,89	6,63	7,46	7,98	9	10,08	11,28
100	**15,65**	**17,61**	**19,81**	**22,28**	**23,88**	**26,88**	**30,24**	**34,08**
1000	40,85	45,96	51,70	58,16	62,31	70,08	78,84	88,80

Chaque hauteur de pluie sera additionnée au jeu de paramètres optimisés définis dans le tableau (11) pour configurer un fichier de simulation distinct. Par conséquent, nous aurons à comparer quater fichiers de simulation, en plus des résultats simulés.

Les données pluviométriques de fréquence 1% sont insérées dans la figure suivante :



Duration	Depth (MM)
5 Minutes	
10 Minutes	
15 Minutes	15
30 Minutes	17
1 Hour	19
2 Hours	22
3 Hours	23
6 Hours	26
12 Hours	30
1 Day	34

Figure 67. III : Fenêtres des données météorologiques de fréquence de 1%.

Remarque :

Le modèle calcule l'évapotranspiration en utilisant une seule méthode basée sur des valeurs mensuelles et un coefficient de correction. Les pertes par évaporation sont considérées comme négligeables pendant la période de crue, ce qui explique l'exclusion du facteur évapotranspiration des calculs.

3.3.3. Modèle de routage (Application du modèle de Muskingum) :

Le dynamique de transformation de l'hydrogramme de la crue entre Ain Sefra et Ain El Hadjaj a été étudié par le modèle de Muskingum. Dans ce modèle on a considéré l'entrée à Ain Sefra et la sortie à Ain El Hadjaj. Connaissant les mesures hydrométriques au niveau de Ain El Hadjaj on a par méthode indirecte estimé itérativement les hydrogrammes de crue correspondants à Ain Sefra. Le temps de concentration entre les deux sections est égal à 1heure. La transformation étant pris égal à

0.2 pour le modèle de Muskingum, valeur moyenne pour ce type d'oued. Cette valeur varie entre 0 et 0.5 (0 pas de transformation ou laminage, 0.5 transformation totale).

La méthode de Muskingum utilise une relation linéaire entre l'emmagasinement et les débits entrée et sortie. Cette considération suppose une relation univoque entre les débits et les hauteurs d'eau. Cette univocité n'est toujours observée surtout en période de fortes crues. Aussi nous avent considéré au autre modèle celui de

Reach	Initial Type	Initial Discharge (M3/S)	Muskingum K (HR)	Muskingum X	Number of Subreaches
R13	Discharge = Inflow		1	0,2	1
R12	Discharge = Inflow		1	0,2	1
R9	Discharge = Inflow		1	0,2	1
R8	Discharge = Inflow		1	0,2	1
R6	Discharge = Inflow		1	0,2	1
R5	Discharge = Inflow		1	0,2	1
R4	Discharge = Inflow		1	0,2	1

Figure 70. III : Fenêtre de caractéristiques géométriques des talwegs et cours d'eau

3.3.4. Données des spécifications de contrôle :

Les spécifications de contrôle constituent un élément essentiel pour l'exécution du programme, incluant un modèle de bassin versant et un modèle climatique. La date et l'heure de début, ainsi que celles de fin, sont spécifiées dans la fenêtre "Spécifications de contrôle" (Control Spécification), comme indiqué dans la figure. L'intervalle de temps, appelé également pas de calcul, est également défini et influence la précision des résultats. Les intervalles disponibles vont d'une minute à 24 heures et sont présentés comme suit :

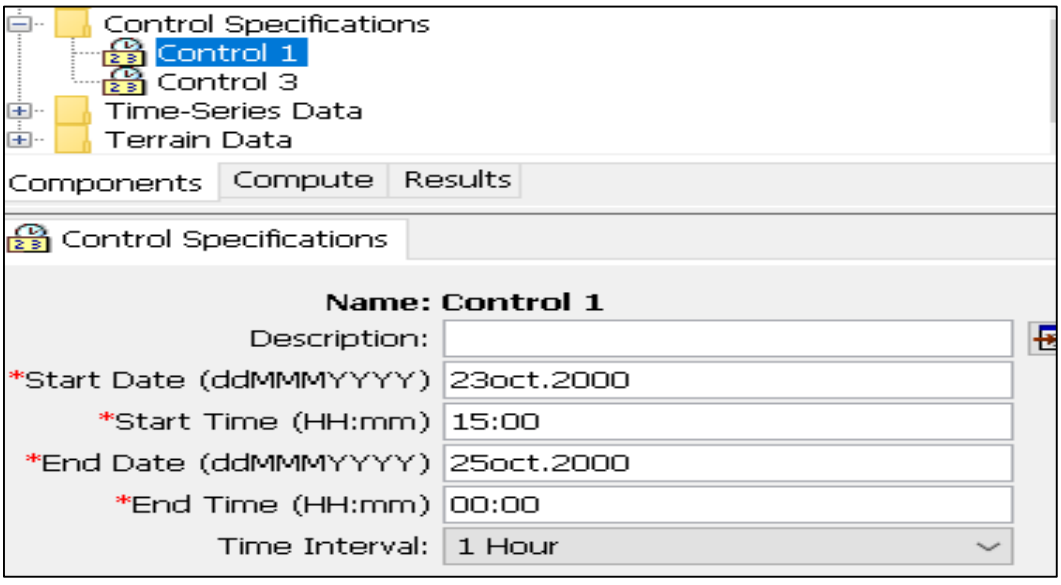


Figure 73. III : Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps.

3.3.5. Calibration du modèle :

Le modèle est calé par l'évènement du 15/11/1993à 17/11/1993. Le débit maximal instantané enregistré le 16 novembre 1993 est de 558m3/s. Les paramètres estimés auparavant sont à optimiser de manière à faire correspondre convenablement les hydrogrammes observés et simulés. « Le but du calage est de trouver le jeu de paramètres qui permet la reproduction la plus fidèle possible du fonctionnement du système étudié ». Les paramètres à caler sont les suivants :

-numéro de courbe (CN) (curve number) utilisé dans le modèle d'infiltration.

-Le temps de concentration et le temps de décalage (Tlag) (lag time).

-La perte initiale (Ia) (initial abstraction).

- **Crue 16 novembre 1993 :**

a) Avant calibration

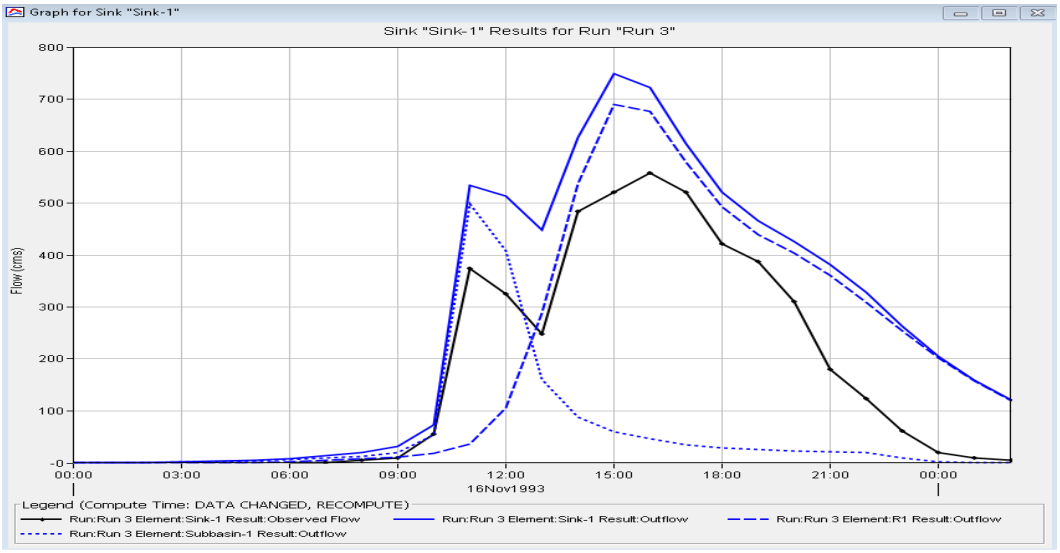


Figure 28. III : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- l'exutoire.

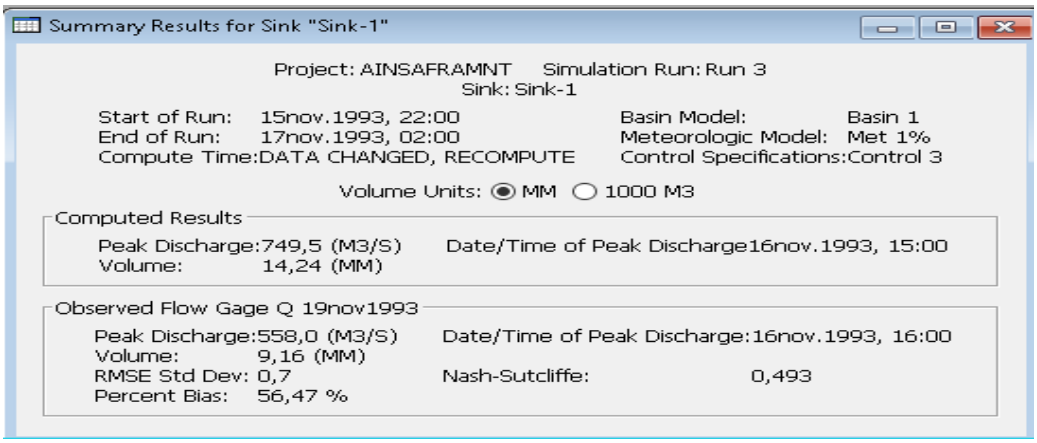


Figure 29. III : Fenêtre représente les résultats de simulation - l'exutoire.

b) Après calibration :

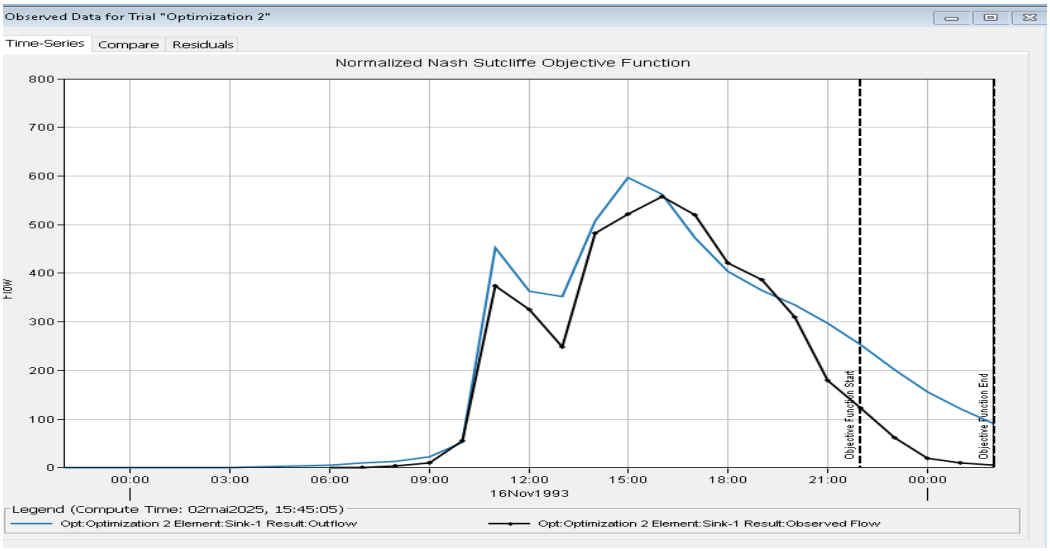


Figure 30. III : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- l'exutoire.

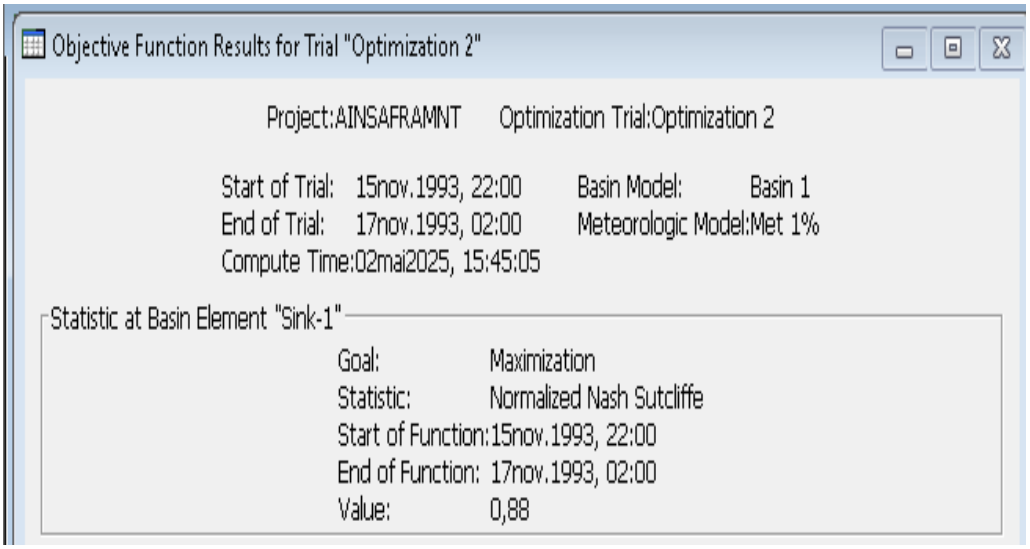


Figure 31. III : Fenêtre des résultats de la fonction objectif – Calibration de la crue du 15 au 17 novembre 1993 (Nash-Sutcliffe normalisé).

Les résultats du modèle hydrologique ont montré une adéquation raisonnable entre la forme de l'hydrogramme simulé et observé. Les Figures (29,31) et présentent une comparaison des séries temporelles du débit des cours d'eau simulé et observé à l'exutoire du bassin versant durant les périodes de calibration.

Pour chaque paramètre à optimiser nous pouvons entrer une valeur de départ et des valeurs limites à ne pas franchir. Nous avons aussi le choix entre quatre critères de convergences dont deux ont donné des résultats satisfaisants au niveau du volume de crue. Les valeurs des paramètres optimisés comparées avec les valeurs de départ sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 12. III : Les valeurs des paramètres calibrés sont présentées.

Sous basin	Sous bassin	Valeur initiale	Valeur optimisée
Subbasin-**1**	Numéro de courbe SCS - Numéro de courbe	89	82,840
Subbasin-**4**	Numéro de courbe SCS - Numéro de courbe	79	73,981
Subbasin-**2**	Numéro de courbe SCS - Numéro de courbe	88	81,954
Subbasin-**3**	Numéro de courbe SCS - Numéro de courbe	85	79,296
Subbasin-**5**	Numéro de courbe SCS - Numéro de courbe	86	80,182
Subbasin-**1**	Numéro de courbe SCS - Abstraction initiale	0,25	0,22160
Subbasin-**4**	Numéro de courbe SCS - Abstraction initiale	0,53	0,46966
Subbasin-**2**	Numéro de courbe SCS - Abstraction initiale	0,27	23,931
Subbasin-**3**	Numéro de courbe SCS - Abstraction initiale	0,35	0,31019
Subbasin-**5**	Numéro de courbe SCS - Abstraction initiale	0,33	0,29247
Subbasin-**1**	Hydrogramme unitaire SCS - Temps de latence	50,78	44,999
Subbasin-**4**	Hydrogramme unitaire SCS - Temps de latence	56,13	49,739
Subbasin-**2**	Hydrogramme unitaire SCS - Temps de latence	75,04	66,491
Subbasin-**3**	Hydrogramme unitaire SCS - Temps de latence	115,2	93,495
Subbasin-**5**	Hydrogramme unitaire SCS - Temps de latence	53,46	47,373

❖ **Performance Evaluation Criteria:**

a. Nash Criterion (NASH):

This criterion assesses the accuracy of the simulation by measuring the degree of agreement between observed and simulated values. The NASH coefficient ranges from negative infinity to 1. The model is considered good if the NASH coefficient approaches 1 and is positive. A negative NASH value indicates poor simulation quality.

b. PBIAS (Relative Bias):

PBIAS expresses the percentage of average bias between observed and simulated data (Gupta et al., 1999; Dawson et al., 2007).

- A negative value indicates underestimation of flow.
- A positive value indicates overestimation of flow.
- A zero value indicates a perfect match between observed and simulated data.
- According to Moriasi et al. (2007), the calibration is considered satisfactory for liquid flow simulations if PBIAS falls within the acceptable range.

c. Erreur quadratique (RMSE) :

Pour ce qui est de cette (RMSE), les faibles valeurs expriment respectivement les faibles écarts entre les simules et les observés.

Les valeurs des paramètres ajustés sont considérées comme satisfaisante lorsque les 0.5 ; PBIAS=±0.25 pour une simulation des débits liquides≥0.5 R^2≥valeurs de NASH (Moriasi et al, 2007).

- Les valeurs de critères PBIA et RMSE respectent ces conditions. De ce fait nous pouvons dire que le modèle est performant sur tout l'ensemble du calage et validation et très performant pour la période de validation de l'averse 29/09/2016 au 02/10/2016.
- Pour les valeurs de critères Nash et R, les résultats obtenus sont insuffisants ; Ceci peut s'expliquer par l'irrégularité des précipitations et surtout de l'état du sol et des conditions géologiques (saturation et occupation) dans les zones arides et semi-arides en Algérie.

3.3.6. La validation du modèle :

Un modèle calé permet de reproduire fidèlement les événements avec lesquels a été effectué le calage, mais pas nécessairement tous les événements, avant de pouvoir exploiter le modèle, il doit être validé à l'aide d'une autre crue.

La validation des paramètres issus du calage sera effectuée à l'aide des pluies et débits observés en 23octobre 2000au 25 octobre 2000. Le débit maximal instantané enregistré le 24 octobre 2000 a 8 :00 h est de 749.5 m3 /s. « La validation consiste à tester la performance du modèle en utilisant le jeu de paramètres obtenu par calage pour simuler un événement observé différent de ceux utilisés pour le calage ». Le modèle est validé, si les paramètres obtenus par calage permettent de reproduire l'événement de validation. Il peut alors être exploité pour simuler des événements variés. En appliquant le jeu de paramètre défini dans le tableau aux événements nous arrivons aux résultats suivants :

- **Crue 24 octobre 2024(avant validation) :**

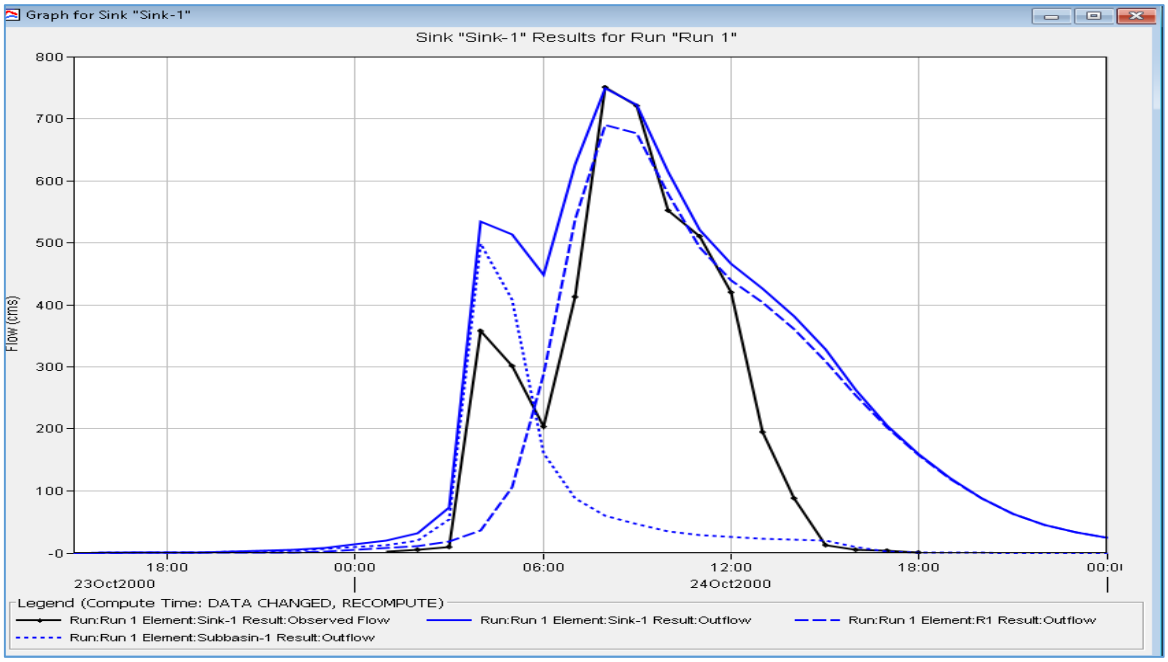


Figure 76. III : Hydrogrammes des crues des évènements avant validation du modèle.

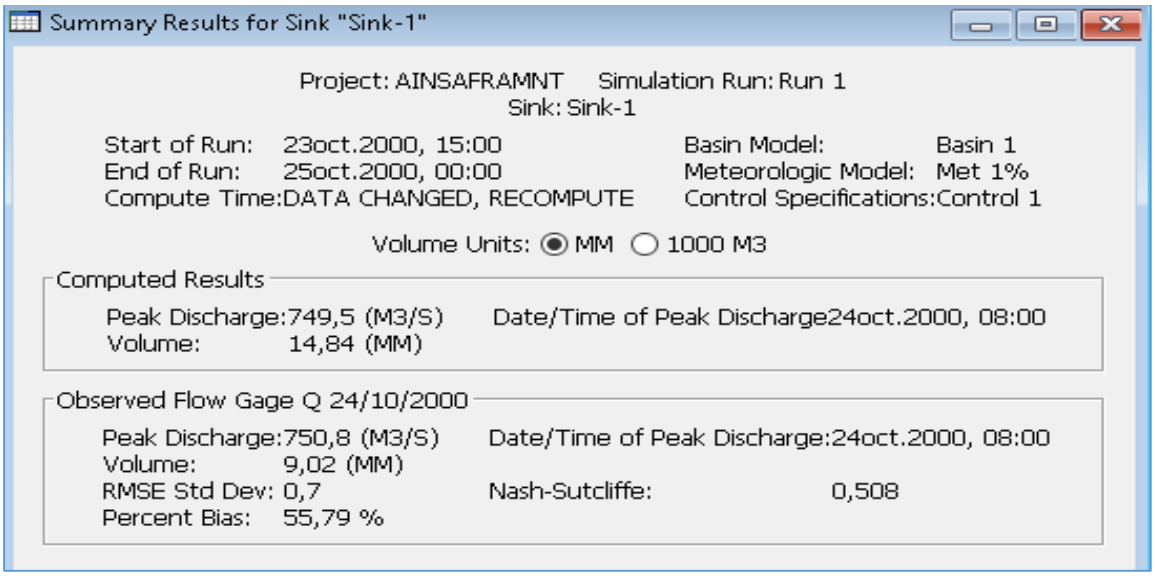


Figure 79. III : Fenêtre représente le volume de la crue simulée- débit de point-Critères de performance avant validation.

Après validation :

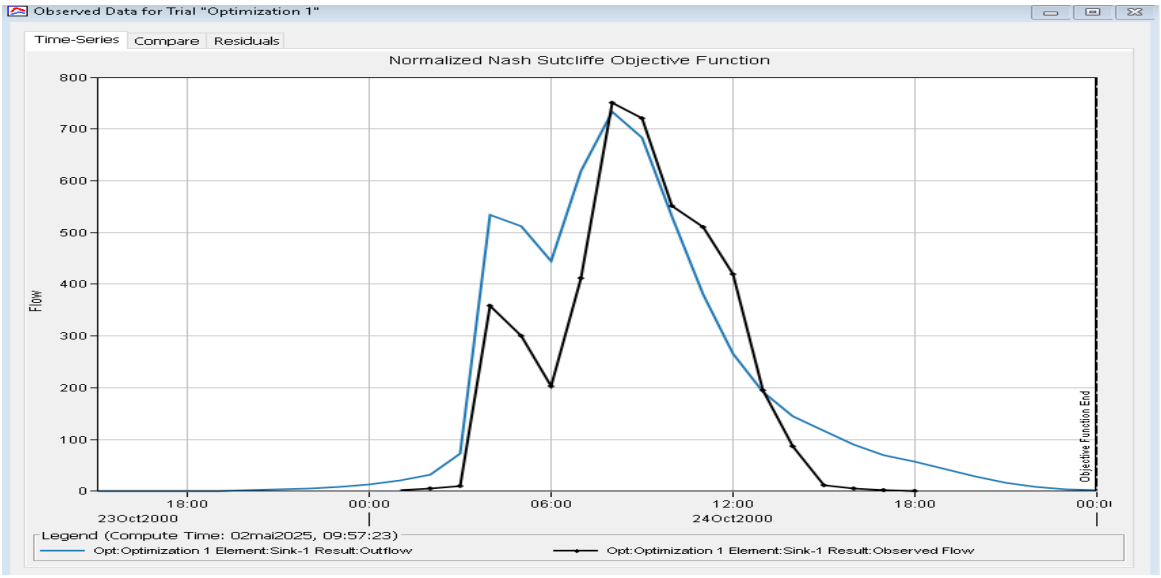
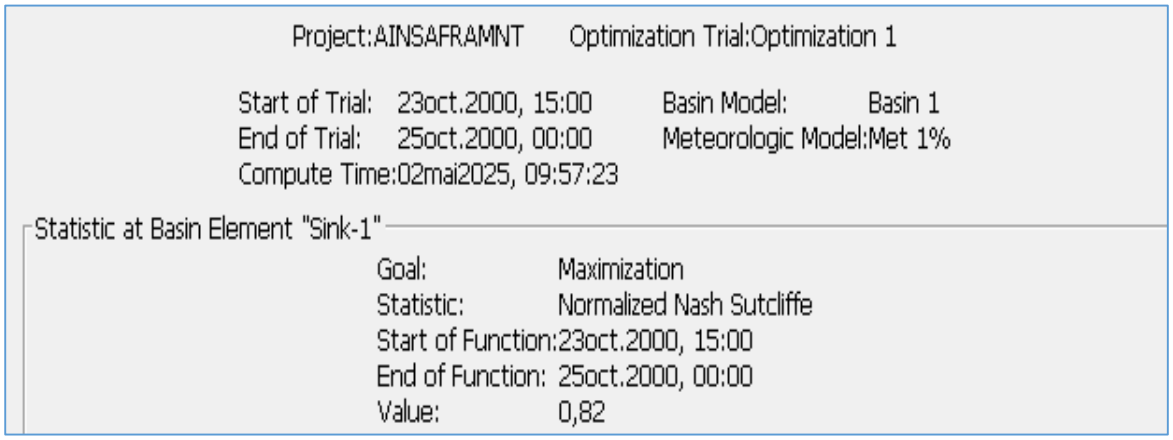


Figure 82. III : Hydrogrammes des crues des évènements après validation du modèle.



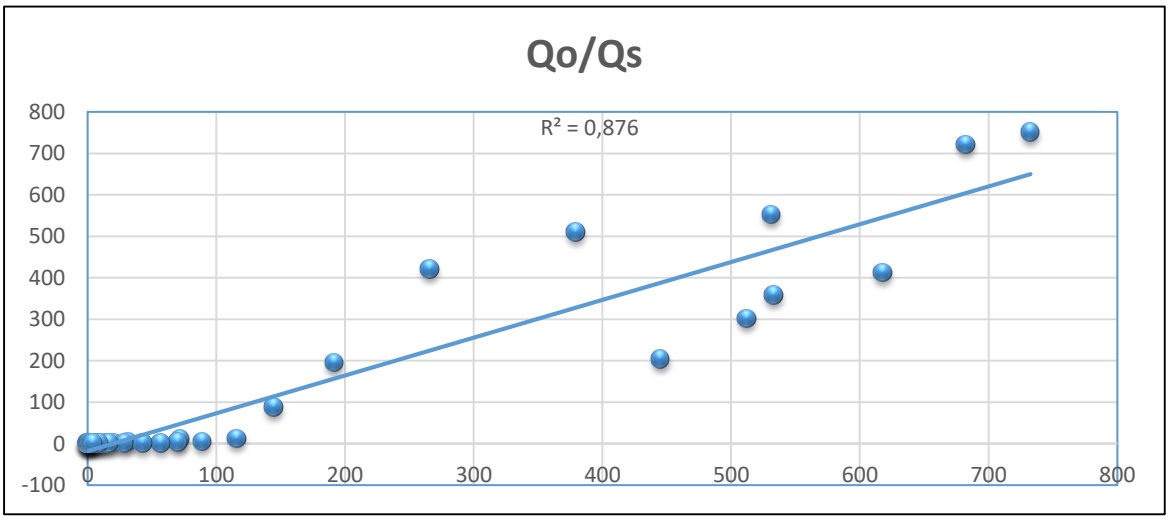


Figure 85. III : Fenêtre représente -Critères de performance (critère de Nash et du coefficient de détermination).

D'après les valeurs du critère de Nash (Ns=0,82) et les coefficients de détermination (R2 = 0,88), ainsi que la superposition des courbes des lames d'eaux écoulées calculés et simulés, le calage parait correct juste pour le sous bassin de l'Oued, d'Ain safra.

III. Conclusion :

Le modèle HEC-HMS est une solution avancée pour l'analyse hydrologique des bassins versants non urbains, permettant d'évaluer les impacts climatiques et humains et de concevoir des projets hydrologiques efficaces. Son succès repose sur la précision des données d'entrée et la calibration adéquate, comme démontré par les validations des crues de16 novembre 1993 et de 24 octobre2000. Utilisé efficacement, il offre des résultats fiables pour la gestion durable des ressources en eau, particulièrement dans les régions arides et semi-ari.

CONCLUSION GENERALE

Le modèle HEC-HMS a été retenu pour analyser le comportement hydrologique de la région d'Ain Sefra, en raison de sa souplesse et de son adaptabilité aux conditions climatiques arides et semi-arides. Ce modèle s'est avéré efficace pour simuler les écoulements de surface et les flux hydriques, en se basant sur un étalonnage précis des données locales telles que les précipitations et les caractéristiques hydrologiques de la zone étudiée.

Les résultats obtenus pour cette étude s'avèrent intéressants. Leur optimisation a été obtenue pour des valeurs élevées des critères de qualité. Les deux phases (calage et validation) ont donné de très bons résultats exprimés par le critère de Nash qui reste supérieur à 70% pour Les deux périodes de crues, confirmant la performance de Ce modèle qui constitue un outil efficace pour la planification hydrique et la gestion des catastrophes dans les zones arides et semi-arides.

Perspectives :

- Durant l'élaboration de ce projet on s'est confronté au problème lié à nos données et au calage de notre modèle.
- Les ressources en sont très faibles et vulnérables, pour leur bonne gestion nous recommandons d'augmenter le nombre des stations pluviométriques et hydrométriques et un contrôle permanent de pompage au niveau de l'oued.
- On recommande aussi l'utilisation de modèle HEC-HMS et d'autre modèles précis pour mieux quantifier et mieux simuler l'écoulement au niveau des bassins.

REFRENCES BIBLIGRAPHIQUES

[1]. LAOUACHERIA F., MANSOURI R. **2015.** Comparison of WBNM and HEC-HMS for runoff hydrograph prediction in a small urban catchment. Water Resources Management. Vol. 29 p. 2485–2501. DOI 10.1007/s11269015-0953-7.

[2]. A. Derdour*, A. Bouanani, K. Baba Hamed Laboratoire de recherche n°25.Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. BP 119, 13000 Tlemcen, Algérie Received: 21 April 2017 / Accepted: 28 June 2018 / Published online: 01 September 2018.

[3]. APS. Algérie Presse Service, article Naâma : le corps d'un enfant emporté par les crues repêchées à Oued El ksar à Ain-Sefra publié le 30 Nov. 2014.

[4]. BENHAMIDCHA ESMA (2019). Modélisation Hydrologique Du Bassin Versant De L'oued SafSaf Par Hec-Hms Mémoire de Master 2. University Badji Mokhtar-Annaba.

[5]. Beven, K.J. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley & Sons: Chichester, UK; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2012.

[6]. Brunet–Morety.1971 : Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses.

[7]. Derdour A, Bouanani A and Babahamed K. Floods typology in semiarid environment: case of Ain Sefra watershed (Ksour Mountains, Saharian Atlas, SW of Algeria). J. Fundam. Appl. Sci., 2018, 10(3), 430-447.

[8]. DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE NAAMA : Données des analyses

Histoire de la lutte contre les crues en Suisse (209 pages), par

[9]. Ibiza (D). 1988.Note complémentaire pour l'utilisation du modèle MODQJ (MODIBI). ORSTOM, Montpellier, multigr .5p

[11]. L'ASSETS archive], Repères de crues sur le site de l'association Bouclier bleu.

[12]. MEMOIRE FAYCAL 2017 Etude géologique et environnementale de la Sebkha de Nâama : modèle de fonctionnement d'un système endoréique sous climat aride (Algérie Sud-ouest physicochimique et les essais de pompage des forages.