

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Universite Badji Mokhtar-Annaba



جامعة باجي مختار-عنابة

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DÉPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIÈRE : HYDRAULIQUE

OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

Thème

**Modélisation hydrologique du bassin versant
de l'oued Saf Saf par HEC-HMS**

Présenté par

BENHAMIDCHA ESMA

Dirigé par

Dr. LAOUACHERIA FARES

Jury de soutenance:

Nom	Prénom	Grade	Qualité	Université
Mr.KECHIDA	Said	MCB	President	Badji Mokhtar Annaba
Mr.LAOUACHERIA	Fares	MCA	Encadreur	Badji Mokhtar Annaba
Mr.CHABI	Moncef	MAA	Examineur	Badji Mokhtar Annaba

Promotion : Juin 2019

Remerciements

Avant tout propos, nous remercions « Dieu » le tout puissant qui nous a donné sagesse et santé pour faire ce modeste travail.

J'adresser mes remerciements, et j'exprime mes reconnaissances à mon promoteur Dr Laouacheria Fares, pour ces conseils déterminants et l'aide qu'il m'a offert durant la période de réalisation de ce travail

Toute la gratitude à nos professeurs et enseignants qui nous ont guidés au cours de notre formation, et nos respects aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'apprécier ce travail.

ESMA

Dédicace

*Je dédie ce modeste mémoire qui est l'accomplissement
d'une longues années d'études, en premier lieu à :*

*Ma très chère mère Razika à qui je dois beaucoup pour
ces sacrifices, son amour, son aide et son soutien.*

*Mon père Rabah qui m'a soutenu et a su me donner le
courage à chaque instant.*

Mon Mari qui m'a encouragé pour reprendre les études

A Mes Enfants Assil Et Med Iyad

A mes très chères sœurs et frères

A ma chère cousine Amani

A tous les étudiants de l'hydraulique et surtout Leïla

Djalit

ESMA

ملخص

من الضروري فهم العلاقات المعقدة بين عمليات هطول الأمطار والجريان السطحي لتقدير كمية الجريان السطحي الناتجة في مستجمعات المياه. تم محاكاة الجريان السطحي باستخدام نظام النمذجة الهيدرولوجية HEC-HMS. حيث تم تطوير نموذج الأمطار داخل-HEC HMS من بيانات هطول الأمطار. لحساب خسارة التسرب وحجم الجريان السطحي ، تم استخدام عدد منحنيات خدمة صيانة التربة (SCS-CN) و المخطط الهيدروغرافي الودوي لنموذج SCS. وكذلك تم إجراء تقييم لسلوك وأداء النموذج الهيدرولوجي بشكل عام ، ويتم الإبلاغ عنه من خلال مقارنات التدفق المحاكي والملاحظ. في هذا العمل ، استخدمنا وظيفتين موضوعيتين هما RMSE و PEPD مع المخطط الهيدروغرافي للفيضان الملحوظ لحالة مجمع المياه "W220" للفترة من 1-2 جانفي 2019 ، لفحص حساسية هذه العوامل ، والتي يمكن استخدامها للنمذجة المستقبلية من خلال تحديد مجالات تغير هذه العوامل .

الكلمات المفتاحية: الجريان السطحي ، المخطط الهيدروغرافي الودوي ، الوظيفة الموضوعية ، HEC-HMS ، RMSE ، PEPD

Abstract

Understanding the complex relationships between rainfall and runoff processes is necessary to accurately estimate the amount of runoff generated in a catchment. Surface runoff was simulated using the Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). The meteorological model was developed within HEC-HMS from rainfall data. To account for infiltration loss, runoff estimation, the methods of the number of soil conservation service curves (SCS-CN) and the unit hydrograph of SCS were used. The assessment of the behavior and performance of the hydrological model is usually performed and reported through simulated and observed variability comparisons. In this work we used two objective functions RMSE and PEPD with the observed flood hydrograph for the case of the subcatchment “W220” for the period of January 1-2, 2019, to examine the sensitivity of these parameters, which can be used to determine preliminary estimation ranges of their values for future modeling.

Key words: Runoff, unit hydrograph, objective function, HEC-HMS, RMSE, PEPD

Résumé

La compréhension des relations complexes entre les précipitations et les processus de ruissellement est nécessaire pour estimer correctement le volume de ruissellement généré dans un bassin versant. Le ruissellement de surface a été simulé à l'aide du système de modélisation hydrologique (HEC-HMS). Le modèle météorologique a été développé au sein de HEC-HMS à partir de données pluviométriques. Pour tenir compte de la perte par infiltration, de l'estimation du volume de ruissellement les méthodes du nombre de courbes du service de conservation du sol (SCS-CN) et l'hydrogramme unitaire de SCS ont été utilisées. L'évaluation du comportement et de la performance du modèle hydrologique est généralement effectuée et rapportée par le biais de comparaisons de variables simulées et observées. Dans ce travail nous avons utilisé deux fonctions objectives RMSE et PEPD et l'hydrogramme de crue observé pour le cas du sous bassin versant W220 pour la période de 1 à 2 janvier 2019, pour examiner la sensibilité de ces paramètres, qui peuvent être utilisés pour déterminer les intervalles d'estimation préliminaire de leurs valeurs pour la modélisation future.

Mots clés : Ruissellement, hydrogramme unitaire, fonction objective, HEC-HMS, RMSE, PEPD

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I : Modélisation hydrologique

Figure I.1 :	Modèles hydrologiques	8
Figure I.2 :	Le radar météorologique	17

CHAPITRE II : Méthodologie

Figure II.1 :	Localisation de la ville de Skikda	21
Figure II.2 :	Situation géographique du bassin versant safsaf	22
Figure II.3 :	Carte hydrographique du bassin de Saf Saf	24
Figure II.4 :	Cadre morpho-structural	25
Figure II.5 :	Evolution des températures moyennes, maximales et minimales (°C)	26
Figure II.6 :	Variations de l'humidité à de Skikda	27
Figure II.7 :	Evolution de l'évaporation moyenne mensuelle (mm).	28
Figure II.8 :	Interface de logiciel ArcGIS 10.2	29
Figure II.9 :	Les composantes de l'environnement ArcGIS 10.2	29
Figure II.10 :	Les applications d'ArcGIS	30
Figure II.11 :	L'interface d'ArcMap	30
Figure II.12 :	L'interface d'ArcCatalog	31
Figure II.13 :	Les outils d'ArcToolbox.	32
Figure II.14 :	Système de projection UTM	34
Figure II.15 :	Diagramme de HEC-HMS	36
Figure II.16 :	Séparation de la pluie (P) en ruissellement (Q), pertes initiales (Ia) et les pertes par rétention (F)	37
Figure II.17 :	Facteurs de réduction des hauteurs déduits à partir des courbes HDF	41
Figure II.18 :	Hytogramme de la Pluie d la zone d'étude basée sur la fréquence	42
Figure II.19 :	Averse hypothétique SCS de type I	42

CHAPITRE III : Résultats et discussion

Figure III.1 :	La zone d'étude sous HEC-HMS	47
Figure III.2 :	Hydrogramme de crue du BV W220	49
Figure III.3 :	Hydrogramme de crue du BV W210	50
Figure III.4 :	Hydrogramme de crue du BV W200	51
Figure III.5 :	Hydrogramme de crue du BV W190	52
Figure III.6 :	Hydrogramme de crue du BV W180	53
Figure III.7 :	Hydrogramme de crue du BV W170	54
Figure III.8 :	Hydrogramme de crue du BV W160	55
Figure III.9 :	Hydrogramme de crue du BV W150	56
Figure III.10 :	Hydrogramme de crue du BV W140	57
Figure III.11 :	Hydrogramme de crue du BV W130	58
Figure III.12 :	Hydrogramme de crue du BV W120	58
Figure III.13 :	Hydrogramme de crue à l'exutoire	59
Figure III. 14 :	Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode RMSE	60
Figure III. 15 :	Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par RMSE	61
Figure III. 16 :	Débit résiduel optimisé par RMSE	62
Figure III. 17 :	Optimisation du Curve Number par RMSE	62

Figure III. 18 :	Optimisation du Lag time par RMSE	63
Figure III. 19 :	Optimisation des résultats par la méthode PEPD	64
Figure III. 20 :	Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par PEPD	64
Figure III. 21 :	Débit résiduel optimisé par PEPD	65
Figure III. 22 :	Optimisation du Curve Number par PEPD	65
Figure III. 23 :	Optimisation du Lag time par PEPD	66

Liste des tableaux

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Modélisation hydrologique

Tableau II.1 :	Différents types de modèle	8
-----------------------	----------------------------	---

CHAPITRE II : Méthodologie

Tableau II.1 :	Températures moyennes, maximales et minimales	26
Tableau II.2 :	Humidité région de Skikda	26
Tableau II.3 :	Evaporation moyenne mensuelle	27
Tableau II.4 :	Capacités initiales i_0 et finale i_f d'infiltration en fonction des classes de sols définies par le SCS	39
Tableau II.5 :	Type d'occupation de sol et son CN associé	39
Tableau V.6 :	La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN	40

CHAPITRE III : Résultats et discussion

Tableau III.1 :	Caractéristiques des sous bassins	48
Tableau III.2 :	Résultats de simulation du sous bassin W220	48
Tableau III.3 :	Résultats de simulation du sous bassin W210	49
Tableau III.4 :	Résultats de simulation du sous bassin W200	50
Tableau III.5 :	Résultats de simulation du sous bassin W190	51
Tableau III.6 :	Résultats de simulation du sous bassin W180	52
Tableau III.7 :	Résultats de simulation du sous bassin W170	53
Tableau III.8 :	Résultats de simulation du sous bassin W160	54
Tableau III.9 :	Résultats de simulation du sous bassin W150	55
Tableau III.10 :	Résultats de simulation du sous bassin W140	56
Tableau III.11 :	Résultats de simulation du sous bassin W130	57
Tableau III.12 :	Résultats de simulation du sous bassin W120	59
Tableau III.13 :	Résultats de simulation du débit à l'exutoire	59
Tableau III.14 :	Optimisation de la réponse du sous bassin « W220 » par RMSE	60
Tableau III.15 :	Optimisation des paramètres CN et Lag par RMSE	61
Tableau III.16 :	Optimisation de la réponse du sous bassin « W220 » par PEPD	63
Tableau III.17 :	Optimisation des paramètres CN et Lag par PEPD	63

Table des matières

Liste des figures	x
Liste des tableaux	xiii
Introduction générale	2
CHAPITRE I : Modélisation hydrologique	
I. Généralités sur la modélisation hydrologique	5
I.1 Introduction	5
I.2. Les modèles hydrologiques	5
I.2 .1.Définition	5
I.2. 2. Principes des modèles hydrologiques	5
I .3.Utilisation des modèles hydrologiques	5
I.4. Pourquoi du modèle hydrologique	6
I.5. Critères de qualité d'un modèle hydrologique	6
I.6. Caractéristiques intrinsèques d'un modèle hydrologique	6
I.7. Classification des modèles hydrologiques	7
I.7.1. Modèles stochastique	8
I.7.2 Modèles déterministes	9
I.7.3 Modèles boîtes noirs	9
I.7.4. Modèles à base physique	9
I.7.5. Modèles paramétriques	9
I.7.6. Modèles empiriques	9
I.7.7. Modèles analytiques	10
I.7.8. Modèles conceptuels	10
I.7.9. Modèles globaux	10
I.7.10. Modèles Spatialisés	10
I.7.11. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés	10
I.7.12 Modèles physiques spatialisés	11
I.7.13. Modèles physiques conceptuels semi spatialisés	11
I.7.14. Modèle pluie-débit	11
I.7.14.1. Classification des modèles pluie-débit	12
I.7.15. Modèle débit-débit	13
I.8. La nature des unités élémentaires	13
I .9.Calage et performance d'un modèle hydrologique	14
I.9.1. Généralité sur le calage et la performance d'un modèle	14
I.9.2. La nécessité de cette phase de calage des paramètres a plusieurs origines	14
I.9.3.Les méthodes automatiques de calage des modèles	15
I.9.4. Les méthodes locales	15
I.9.5. Calage et performance d'un modèle hydrologique	15
I.9.5.1. Généralité sur le calage et la performance d'un modèle	15
I.10. Les incertitudes en modélisation pluie-débit	16
I.10.1. Estimation de la pluie	16
I.10.1.1. Radar météorologique : fonctionnement et sources d'incertitudes	17
I.10.1.2. Réseau de pluviomètres : fonctionnement, interpolation et densité minimale	19
CHAPITRE II : Méthodologie	
II.1. Présentation de la zone d'étude	21

II.1.1. Situation géographique de la zone d'étude	21
II.1.2. Superficie	22
II.1.3. La forme du bassin	22
II.1.4. La géologie du bassin	22
II.1.5. Situation géotechnique	23
II.1.6. Réseau Hydrographique	23
II.1.7. Situation morpho-structural	24
II.1.8. Le climat	25
II.1.8.1. Température	26
II.1.8.2. Humidité Atmosphérique	26
II.1.8.3. Evaporation	27
II.2. Description du logiciel ArcGIS 10.2	28
II.3.1 Composantes de l'environnement ArcGIS	29
II.3.1.1. ArcMap	30
II.3.1.2. ArcCatalog	31
II.3.1.3. ArcToolbox	31
II.3.2. Géo-référencement	33
II.3.3. Les systèmes de projections	33
II.3.3.1. Le système de projection UTM	33
II.4. HEC-GeoHMS	34
II.5. HEC-HMS	34
II.5.1. La fonction de transfert SCS UH (Hydrogramme unitaire du SCS)	36
II.5.2. La méthode de perte par infiltration SCS- CN	37
II.5.2.1. Le concept de base	37
II.5.2.2. Développement du modèle	37
II.5.3. Représentation du modèle de la pluie	40
II.5.3.1. Pluie hypothétique basée sur la fréquence	41
II.5.3.2. Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur	42
II.5.4. Le module du débit de base	43
II.5.5. Le module de routage	43
II.5.6. La fonction objective	44
II.5.7. La fonction d'optimisation automatique	44
II.5.8. Justification du choix du modèle	45
CHAPITRE III : Résultats et discussion	
III. Introduction	47
III.1. Résultats de simulation de la zone d'étude par HEC-HMS	47
III.2.1. Caractéristiques du sous bassin W220	48
III.2.2. Caractéristiques du sous bassin W210	49
III.2.3. Caractéristiques du sous bassin W200	50
III.2.4. Caractéristiques du sous bassin W190	51
III.2.5. Caractéristiques du sous bassin W180	52
III.2.6. Caractéristiques du sous bassin W170	53
III.2.7. Caractéristiques du sous bassin W160	54
III.2.8. Caractéristiques du sous bassin W150	55
III.2.9. Caractéristiques du sous bassin W140	56
III.2.10. Caractéristiques du sous bassin W130	57
III.2.11. Caractéristiques du sous bassin W120	58
III.3. Débit à l'exutoire	59
III.4. Etude de la performance du modèle	60

III.4.1. Optimisation par la fonction objective RMSE	60
III.4.2. Optimisation par la fonction objective PEPD	63
III.5. Comparaison entre les fonctions objectives RMSE et PEPD	66
Conclusion générale	68
Références bibliographiques	70

Introduction générale

Introduction générale

Une connaissance adéquate des processus pluie-débit est essentielle pour estimer le volume de ruissellement produit dans un bassin versant. Connaître le volume de ruissellement dans un bassin versant est important pour la planification et la gestion durables de projets liés aux ressources en eau. Les activités d'estimation des volumes de ruissellement et des pics de crue peuvent être facilement simplifiées en adoptant un concept de modélisation et en comprenant la partition des précipitations et les principaux facteurs déclenchant du ruissellement (Ali et al., 2011). Le type d'approche de modélisation dépend normalement de l'objet, de la disponibilité des données et de la facilité d'utilisation (Beven, 2012). Les modèles pluie-débit sont souvent utilisés comme outils pour la modélisation des inondations, la surveillance des niveaux d'eau dans différentes conditions de l'eau et la prévision d'inondations (El Alfy, 2016). Diverses techniques de modélisation ont été utilisées pour prédire le débit, telles que les modèles distribués à base physique (Ghumman et al., 2017), les modèles stochastiques et les modèles conceptuels globaux (Pham et al., 2018 ; Anshuman et al., 2018). Bien que les modèles physiques utilisent des procédures physiques associées à la modélisation pluie-débit, leur utilisation fructueuse est limitée, principalement en raison de la difficulté d'évaluer les paramètres en jeu ainsi que de la complexité de l'équation de base. Les incertitudes associées aux résultats de ces modèles et les identités de leurs paramètres doivent être examinées (Ahmadalipour et Moradkhani, 2017 ; Bastidas et al., 1999). Dans cette étude, cette tâche est réalisée en effectuant une analyse de sensibilité à l'aide du système de modélisation hydrologique du centre d'ingénierie hydrologique (HEC-HMS). Le modèle HEC-HMS a été mis au point pour simuler le processus pluie-débit du bassin versant de l'oued SAFSAF. Ceci concerne un modèle (conceptuel) déterministe, semi-distribué, événementiel / continu et mathématique qui reconnaît d'autres modèles discrets dans l'attribution de chaque composante du processus de ruissellement (évaporation, ruissellement de surface, infiltration et recharge des nappes souterraines). Ce modèle unique comprend divers sous modèles qui calculent les pertes par infiltration, le ruissellement direct et le débit à l'exutoire (Ibrahim-Bathis et Ahmed, S.A, 2016). Le modèle HEC-HMS a été utilisé pour prédire le débit des bassins versant dans différentes régions et conditions climatiques du monde entier (Halwatura et Najim, 2013), mais de nombreuses études font état d'une incertitude concernant les résultats de ces prévisions (Yilma et Moges, 2007). Le processus d'évaluation de la performance d'un modèle hydrologique exige que l'hydrologue fasse des estimations subjectives et / ou objectives de la «proximité» du comportement simulé du modèle aux observations (généralement le débit d'un cours d'eau) effectuées dans le bassin versant. L'approche la plus fondamentale pour évaluer les performances du modèle en termes de comportements consiste à inspecter visuellement les hydrogrammes simulés et observés. Dans cette approche, on peut formuler des évaluations subjectives du comportement du modèle qui sont généralement liées au comportement systématique (par exemple, sur- ou sous-estimation) et au comportement dynamique du modèle. Toutefois, l'évaluation objective nécessite généralement l'utilisation d'une estimation mathématique de l'erreur entre la ou les variables hydrologiques simulées et observées. Les critères de performance sont définis en tant que mesures mathématiques de la performance d'un modèle par rapport aux observations disponibles (Anshuman et al., 2018). En règle générale, de nombreux critères de performance contiennent une somme du terme d'erreur

(différence entre la variable simulée et la variable observée à chaque pas de temps) normalisée par une mesure de la variabilité dans les observations. De nombreux chercheurs ont utilisé des indicateurs statistiques pour évaluer les performances des modèles (Gupta et al., 2009 ; Wang et Solomatine, 2018). L'objectif de cette étude était d'élaborer un modèle pluie-débit, évaluer le volume de ruissellement du bassin versant de l'oued SASAF et l'évaluation du comportement du bassin versant à partir de la comparaison de deux fonctions objectives à savoir RMSE et PEPD afin de connaître les paramètres qui ont une grande sensibilité sur la sortie du modèle lors de la comparaison de l'hydrogramme de crue simulé et observé. Le bassin versant de l'oued SAFSAF est un bassin non jaugé, sauf la partie du sous bassin W220 qui est doté d'une station de jaugeage de KHAMAKHAM, duquel les données des débits observés pendant la période de 1 et 2 janvier 2019 étaient employés pour les comparés aux débits simulé par HEC-HMS.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre; décrit les notions de modélisation hydrologique

Le deuxième chapitre, décrit la zone d'étude du bassin de l'oued SAFSAF à Skikda, sa localisation, la philosophie du logiciel HEC-HMS et ses fonctions objectives.

Le troisième chapitre représente les résultats de l'application du logiciel HEC-HMS et la comparaison des deux fonctions objectives pour évaluer le comportement du bassin versant. Enfin une conclusion qui a été faite résumant toutes les étapes de ce travail.

Chapitre I : Modélisation hydrologique

I. Généralités sur la modélisation hydrologique

I.1 Introduction

D'après le Dictionnaire de l'Environnement, le modèle est "une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir". La modélisation hydrologique est donc une représentation, partielle ou totale, du cycle de l'eau. Dans ce travail, on se limite à l'étude des modèles pluie-débit, qui représentent la transformation de la pluie en écoulement sur les surfaces continentales. Les applications de ces modèles sont multiples, et permettent de simuler l'impact d'aménagements anthropiques sur l'hydrologie d'un bassin versant (construction d'un barrage, imperméabilisation d'une zone par construction), de gérer les alertes de crue sur les bassins versants ou encore de reconstituer des chroniques de débits sur des bassins sur lesquels on ne dispose que de chroniques de pluies.

I.2. Les modèles hydrologiques

I.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.

I.2. 2. Principes 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 est mesurée par un 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.

I .3.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.

I.4. Pourquoi du modèle hydrologique

Les modèles hydrologiques, sont nés bien avant l'avènement de l'informatique ils sont utilisés 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. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants 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 courante des modèles hydrologiques.
- La modélisation comme outils d'extrapolation elle permettra alors la reconstitution des débits plausibles.

I.5. Critères de qualité d'un modèle hydrologique

Lors de l'élaboration d'un modèle, l'ambition de l'hydrologue est d'obtenir un outil le plus performant possible. Il est de coutume d'apprécier la qualité d'un modèle et ses aptitudes selon certains critères tels que :

- **Précision** : Il se doit de reconstituer au mieux les débits observés.
- **Robustesse** : Il doit pouvoir garder une bonne précision même dans des conditions extrêmes.
- **Généralité** : Il doit pouvoir simuler aussi bien les crues que les étiages.
- **Universalité** : Il doit pouvoir être utilisé pour des bassins versants très différents.
- **Richesse** : Il doit pouvoir intégrer un grand nombre de caractéristiques permettant de différencier le comportement d'un bassin à un autre.
- **Adaptabilité** : Il doit pouvoir être corrigé pour tenir compte de nouvelles données sur le bassin modélisé. En réalité, il est pratiquement impossible de satisfaire tous ces critères simultanément. L'objectif de l'utilisateur du modèle définira donc ceux qu'il faudra privilégier par rapport aux autres.

I.6. 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.

- **Découpage dans l'espace** : Le modèle s'applique à un bassin versant d'une superficie donnée. Ce bassin peut être considéré comme une unité ponctuelle : le modèle est donc global, ou comme une juxtaposition de sous-bassins globaux entre lesquels s'effectuent des transferts : le modèle est alors distribué

I.7. Classification des modèles hydrologiques

Il existe, dans la littérature de nombreux modèles hydrologiques de bassins versant ayant, chacun leur spécificités et leur domaines d'application et peuvent être fonction de plusieurs caractéristiques (Borah, 2011).

Une fois le modèle choisit, il faut évaluer sa capacité à représenter la réalité, ceci se fait le plus souvent en comparant les résultats du modèles avec les observations, c'est une étape très délicate. , le tableau suivant propose de classer les différents types des modèles selon leur caractéristiques (Wheater, 2002 ; Singh and Frevert, 2006 ; Wagener et al., 2007).

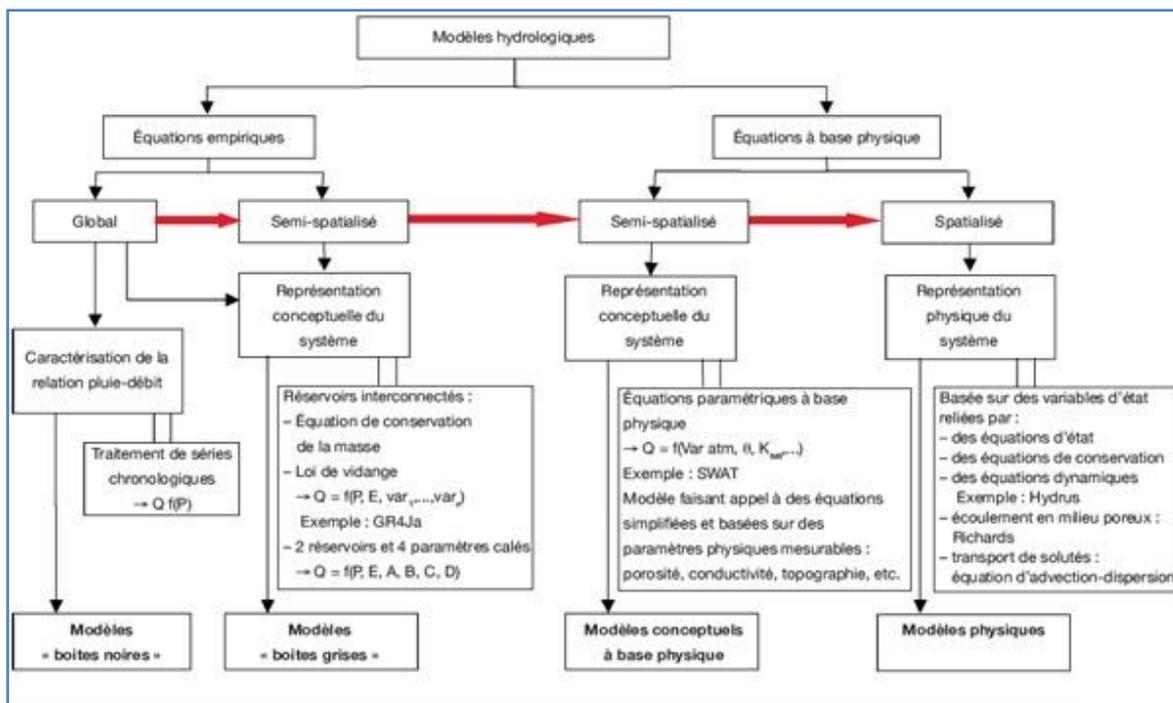


Figure I.1 : Modèles hydrologiques

Tableau I.1 : Différents types de modèle

Caractéristiques	Type de modèle
Selon la nature de la variable	Modèle déterministe (variable non aléatoires) Modèle stochastique (variable aléatoires)
Traitement de l'espace (homogénéité du bassin)	Modèle globale Modèle semi-distribué (ou semi-global) Modèle spécialisé
Fondement théorique et approche de développement	Modèle empirique Modèle conceptuelle Modèle à base physique
L'évolution temporelle	Modèle cinématique (descriptifs) Modèle dynamique (explicatifs)
Fonction objectif	Modèle de simulation Modèle de gestion

I.7.1. Modèles stochastique

La modélisation stochastique peut être envisagée dans le cas où il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu. Les modèles stochastiques utilisent des variables aléatoires pour représenter l'incertitude de processus et génèrent des résultats différents à partir d'un ensemble de données d'entrée et de valeurs de paramètres lorsqu'elles s'exécutent dans des conditions identiques «vues de l'extérieur» (Beven, 2001).

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.

I.7.2 Modèles déterministes

Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit de grandeurs reconstituées. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variable de forçage, de variables d'état 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).

I.7.3 Modèles boîtes noires

(« 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 floue, ARIMA, SARIMA ... etc.

I.7.4. 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. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rendent 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.

I.7.5. Modèles paramétriques

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

I.7.6. Modèles empiriques

Les modèles empiriques reposent sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydro système considéré. Ils expriment la relation entre variables d'entrée et de sortie

du système (relation pluie débit) à l'aide d'un ensemble d'équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur le système. Un modèle empirique ne cherche pas à décrire les causes du phénomène hydrologique considéré ni de ni à expliquer le fonctionnement du système, le système est vu comme une boîte noire.

I.7.7. 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 linéaires entre les variables.

I.7.8. 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.

I.7.9. 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.

I.7.10. 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 :

1. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés
2. Modèles physiques spatialisés
3. Modèles physiques conceptuels semi spatialisés.

I.7.11. 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 et du modèle HEC-HMS.

I.7.12 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. De 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.

I.7.13. 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).

I.7.14. 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 boîte 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 distribués à modèles globaux 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.

1.7.14.1. Classification des modèles pluie-débit

Les modèles diffèrent suivant la nature du modèle mathématique sous-jacent, le degré d'abstraction du modèle, la nature des unités élémentaires ou encore la nature du processus Représenté

- **La nature du modèle mathématique** : sous-jacent. Il peut être **déterministe** si la relation qui lie les variables d'entrée du modèle aux variables de sortie est phénoménologique ou probabiliste (stochastique). Les modèles statistiques ont un caractère phénoménologique ou probabiliste (stochastique). Les modèles statistiques ont un pas sur la dynamique de la crue en cours.
- **Le degré d'abstraction du modèle** : On parle de **modèles à base physique** lorsque les phénomènes sont décrits à l'aide des lois de la mécanique des fluides ou de la physique des écoulements d'eau dans les sols : loi de Richards pour le transfert en milieu non saturé, loi de Darcy pour le transfert en milieu saturé, loi de Barré-Saint-Venant pour le ruissellement de surface. Ces modèles ne nécessitent pas *a priori* de phase de calage de leurs paramètres puisqu'ils utilisent des paramètres mesurables sur le terrain.

Leur application en hydrologie opérationnelle sur des bassins versants d'une certaine taille est limitée par la méconnaissance de la variabilité spatiale des étapes de calage de leurs paramètres s'avère souvent nécessaire. Parmi les plus utilisés on trouve SHE (Abu El-Nasr et al., 2005) ou encore HEC-HMS (Laouacheria et Mansouri, 2015). Les modèles à base physique procèdent souvent d'une approche ascendante : on part des équations valables à l'échelle du volume élémentaire (équations issues de la mécanique des milieux continus le plus souvent) et on intègre ces équations à l'échelle du versant ou à l'échelle du bassin versant. On parle de modèles empiriques lorsqu'on cherche à reproduire le comportement global du bassin à partir d'une étude systémique de la relation pluie/débit à l'échelle du bassin, sans faire d'hypothèse *a priori* sur les processus qui rentrent en jeu. Dans cette catégorie, on peut ranger les modèles GR (Makhlouf, 1994 ; Fourmigué et Lavabre, 2005 ; Coron et al., 2016) .

Le modèle SCS, ou encore tous les modèles régressifs. L'utilisation de ces modèles empiriques nécessite une phase de calage des paramètres, puisque ceux-ci ont une signification qui n'est pas reliée *a priori* à des grandeurs mesurables du bassin versant.

Bien identifié de leurs paramètres. Des relations empiriques peuvent ainsi souvent être établies entre les valeurs calées des paramètres et un descripteur du bassin versant.

Entre les modèles empiriques et les modèles à base physique, on trouve les modèles **conceptuels** qui s'étudient comme les modèles empiriques (approche systémique) modèles est le modèle TOPMODEL, qui s'appuie sur un fonctionnement du bassin mais dont l'approche est à base physique. Une bonne illustration de cette catégorie de modèles est le modèle TOPMODEL, qui s'appuie sur un fonctionnement du bassin basé sur la réaction de nappes préexistantes qui réagiront plus ou moins suivant leur position sur le bassin, l'état initial du bassin et les caractéristiques locales de pente et de perméabilité.

I.7.15. Modèle débit-débit

En plus de ces modèles pluie-débit il existe des modèles débit-débit, ces modèles vont simuler un débit sortant à un point aval en fonction d'un débit entrant à un point amont. On peut classer en deux grands domaines ces modèles (Beven, 2001) :

Les modèles globaux réalisent le transfert de l'écoulement d'un point amont à un point aval. Ils ne permettent l'estimation du débit qu'au point aval.

- les modèles distribués prennent explicitement en compte la variabilité spatiale des processus, des variables d'entrée, des conditions aux limites et des caractéristiques du bassin versant. Ils permettent donc l'estimation du débit (et de la hauteur d'eau) en tout point du réseau hydrographique.

Ces modèles débit-débit négligent en général la modélisation des apports latéraux, en le traitant principalement sous deux formes : ponctuels ou uniformément réparties. Nous proposerons ici une approche permettant de traiter la quantification des apports latéraux via une modélisation pluie-débit du bassin intermédiaire alimentant le bief de rivière considéré.

Dans notre cas, cette modélisation simplifiée des écoulements présente deux avantages :

La possibilité d'être utilisée sur des biefs sans données topographiques et la possibilité d'être appliquée sur des biefs de longueur importante.

I.8. La nature des unités élémentaires

De représentation du bassin versant. Les modèles spatialisés travaillent à partir d'une unité élémentaire discrétisée qui permet de tirer partie de la variabilité spatiale des facteurs géographiques et météorologiques qui conditionnent la réponse des bassins versants. Cette unité des triangles irréguliers, des tubes de courant. L'avantage des modèles spatialisés est de pouvoir simuler l'évolution des variables internes du modèle en tout point bassin versant.

Le développement, la validation et l'utilisation des modèles spatialisés a été freiné par la limitation des capacités informatique .elle est aujourd'hui en plein développement, encouragée par l'acquisition de données spatialisées issues de l'imagerie radar ou satellite et l'augmentation des performances des processeurs informatique.

❖ Le processus représenté

En hydrologie de surface, on distingue deux grandes approches : les modèles de type nappes contributives (TOPMODEL ou TOPKAPI) et les modèles hortonien (loi de Horton, loi de Green-Ampt, loi de Smith-Parlange,...).

Ces deux approches diffèrent sur la manière dont est généré le ruissellement de surface. De multiples modèles pluie-débit existent, pour simuler les crues. Pour les applications qui nous intéressent, prédétermination ou prévision des crues rares, les modèles à base physique semblent préférables, pour mieux contrôler l'extrapolation vers les extrêmes et pour Transposer à des bassins non jaugés. Il est cependant reconnu que tous les modèles sont affectés de biais divers, qui ont pour principales conséquences d'altérer la signification physique du modèle et des paramètres qui lui sont associés. Dans ces conditions, le calage du modèle à partir d'observations est pratiquement toujours indispensable, sans pour autant garantir la qualité du modèle en extrapolation ou en transposition.

I.9. Calage et performance d'un modèle hydrologique

I.9.1. Généralité sur le calage et la performance d'un modèle

Le calage d'un modèle consiste à déterminer, sur un échantillon d'événements de référence, un ou plusieurs jeux de paramètres avec lesquels les simulations du modèle approchent au mieux les hydrogrammes de la base de données de référence.

La plupart du temps, on utilise une méthode d'optimisation qui détermine un jeu «optimal» Au sens où la distance entre les simulations du modèle et les hydrogrammes de référence est minimale

I.9.2. La nécessité de cette phase de calage des paramètres a plusieurs origines

- La schématisation du fonctionnement du bassin versant repose sur des objets conceptuels (de type réservoir) dont les paramètres n'ont pas de signification hydrologique et ne sont donc pas mesurables
- Le modèle repose sur des hypothèses physiques qui ne sont pas acceptables pour le fonctionnement du bassin considéré. Le calage aura donc tendance à identifier un comportement marginal du modèle, en forçant les paramètres vers des valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle
- L'intégration et la résolution des équations différentielles qui régissent le fonctionnement interne d'un modèle distribué peuvent être soumises à un biais
- Résolution des équations.
- La variabilité spatiale d'un descripteur du bassin versant n'est pas appréhendée par le modèle (faute de données ou mesures disponibles). Il s'agit alors de caler un paramètre qui sera représentatif de la valeur moyenne du paramètre sur le bassin.
- Les données fournies à l'entrée et à la sortie des modèles sont soumises à des Incertitudes de mesure. Le calage des paramètres du modèle doit permettre de compenser ces erreurs.

Pour caler un modèle, il faut donc choisir :

Une base de données d'événements (pluie et hydrogrammes de crue) de référence. Un critère ou indicateur pour évaluer l'ajustement des simulations du modèle aux données de calage pour un jeu de paramètre donné.

Une méthode d'exploration de l'espace des paramètres du modèle pour explorer les paramètres et pour évaluer les modélisations, on peut procéder « à la main », en testant des jeux de paramètres au hasard ou prédéfinis et en évaluant visuellement l'ajustement des simulations des modèles aux données de référence.

Cette méthode s'appliquera si on a une bonne connaissance de la sensibilité des différents paramètres du modèle et/ou si le modèle est relativement parcimonieux. Dans le cas contraire, on utilisera une méthode d'optimisation automatique associée à des critères de performance.

On propose dans le paragraphe suivant une revue des méthodes automatiques de calage des modèles.

On présentera ensuite les critères d'évaluation des performances des simulations des modèles utilisés dans cette étude.

I.9.3. Les méthodes automatiques de calage des modèles

Les critères objectifs ou métriques de calage sont également employés (Moriasi et al., 2007; Pushpalatha et al., 2012)

. Les deux grandes catégories de méthode sont les méthodes locales et les méthodes globales.

I.9.4. Les méthodes locales

Une méthode d'optimisation locale part d'un vecteur de paramètres donné par l'utilisateur et se déplace de manière itérative, par variations infinitésimales du vecteur des paramètres, vers des zones de critère de performances croissant. Elle s'arrête lorsqu'elle ne trouve plus de jeux de paramètres plus performants dans le voisinage d'un jeu de paramètres considéré alors comme optimal.

On introduit une différenciation dans la terminologie des méthodes suivant que, au cours de son itération, la méthode est basée sur la valeur seule de la fonction critère – On parle alors de méthode directe – ou si elle utilise à la fois la valeur et le gradient de la fonction critère pour décider de sa stratégie de recherche dans l'espace des paramètres : on parle alors de méthode de gradient. La stratégie de recherche de la méthode inclut sa direction de recherche – une direction peut correspondre à un déplacement suivant un paramètre par exemple – et au pas de sa recherche – variation du ou des paramètres dans la direction de recherche. Dans les méthodes du gradient, on distingue une sous-catégorie de méthodes, dites méthodes de Newton qui se servent du Hesse (dérivées du second ordre par rapport aux paramètres) de la fonction critère.

I.9.5. Calage et performance d'un modèle hydrologique

I.9.5.1. Généralité sur le calage et la performance d'un modèle

Le calage d'un modèle consiste à déterminer, sur un échantillon d'événements de référence, un ou plusieurs jeux de paramètres avec lesquels les simulations du modèle approchent au mieux les hydrogrammes de la base de données de référence.

La plupart du temps, on utilise une méthode d'optimisation qui détermine un jeu «optimal», au sens où la distance entre les simulations du modèle et les hydrogrammes de référence est minimale.

La nécessité de cette phase de calage des paramètres a plusieurs origines :

- La schématisation du fonctionnement du bassin versant repose sur des objets conceptuels (de type réservoir) dont les paramètres n'ont pas de signification hydrologique et ne sont donc pas mesurables.
- Le modèle repose sur des hypothèses physiques qui ne sont pas acceptables pour le fonctionnement du bassin considéré. Le calage aura donc tendance à identifier un comportement marginal du modèle, en forçant les paramètres vers des valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle.
- L'intégration et la résolution des équations différentielles qui régissent le fonctionnement interne d'un modèle distribué peuvent être soumises à un biais numérique qui fait dépendre la valeur du paramètre de la taille de la maille de résolution des équations.
- La variabilité spatiale d'un descripteur du bassin versant n'est pas appréhendée par le modèle (faute de données ou mesures disponibles). Il s'agit alors de caler un paramètre qui sera représentatif de la valeur moyenne du paramètre sur le bassin.
- Les données fournies à l'entrée et à la sortie des modèles sont soumises à des incertitudes de mesure. Le calage des paramètres du modèle doit permettre de compenser ces erreurs. Pour caler un modèle, il faut donc choisir :
 - Une base de données d'événements (pluie et hydrogrammes de crue) de référence.
 - Un critère ou indicateur pour évaluer l'ajustement des simulations du modèle aux données de calage pour un jeu de paramètres donné.
 - Une méthode d'exploration de l'espace des paramètres du modèle pour explorer les paramètres et pour évaluer les modélisations, on peut procéder « à la main », en testant des jeux de paramètres au hasard ou prédéfinis et en évaluant visuellement, l'ajustement des simulations du modèles aux données de référence. Cette méthode s'appliquera si on a une bonne connaissance de la sensibilité des différents paramètres du modèle et/ou si le modèle est relativement parcimonieux. Dans le cas contraire, on utilisera une méthode d'optimisation automatique associée à des critères de performance.

On propose dans le paragraphe suivant une revue des méthodes automatiques de calage des modèles. On présentera ensuite les critères d'évaluation des performances des simulations des modèles utilisés dans cette étude.

I.10. Les incertitudes en modélisation pluie-débit

Les incertitudes concernent à la fois les données d'entrée et de sortie des modèles et les structures des modèles. Leur étude est nécessaire dans la mesure où elles conditionnent l'évaluation des modélisations ainsi que leur interprétation. On présente dans ce qui suit leur origine ainsi que les stratégies adoptées pour y faire face.

I.10.1. Estimation de la pluie

L'application d'un modèle pluie/débit à l'échelle d'un bassin versant nécessite la connaissance d'une lame d'eau ou d'un champ de pluie estimés sur le pas de temps de calcul du modèle. Ces données sont fournies par le réseau de pluviomètres, et depuis une dizaine d'années, par l'imagerie radar, qui propose une caractérisation spatiale de la pluie.

Dans un premier temps, on rappelle l'origine des erreurs d'estimation liées à l'extrapolation des mesures des radars météorologiques et des réseaux de pluviomètres au sol. Dans un deuxième temps, on s'intéresse aux études qui ont été réalisées afin d'estimer l'erreur sur la pluie en fonction de la densité de postes de mesures au sol. Les difficultés d'estimation de la pluie sur une surface étendue, on évoque successivement les possibilités et les limites des deux systèmes de mesures utilisés actuellement : les radars météorologiques et les réseaux de pluviomètres au sol.

I.10.1.1. Radar météorologique : fonctionnement et sources d'incertitudes

Sans revenir sur le fonctionnement détaillé du radar météorologique (voir Andrieu, 2002 ou Atlas, 1990 pour une description détaillée de son fonctionnement), la mesure de l'intensité de pluie par le radar est une mesure indirecte qui consiste :

- à mesurer la puissance rétrodiffusée par les hydrométéores vers l'antenne du radar.
- à convertir cette puissance en intensité de pluie, à travers une relation phénoménologique qui relie les deux grandeurs et qui dépend de la distribution granulométriques des hydrométéores.

Elle permet de fournir des estimations des lames d'eau à des échelles temporelles et spatiales fines (de l'ordre du km² à un pas de temps 5 minutes) et sur une surface étendue (jusqu'à une distance de 100 km du radar en zone de plaine).

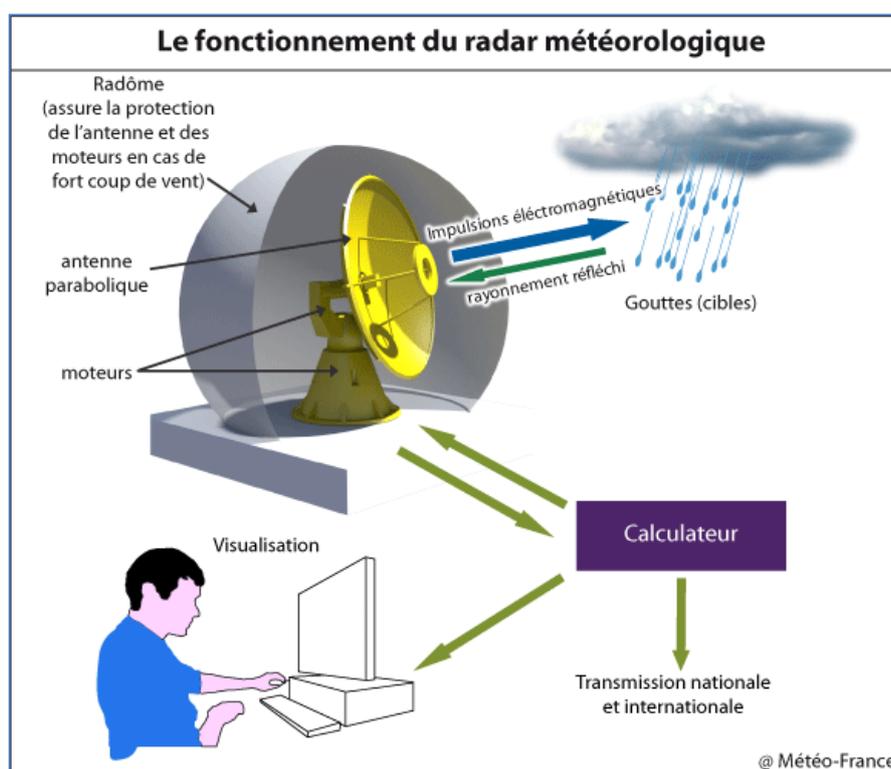


Figure I.2 : Le radar météorologique

Les principales sources d'erreur proviennent (Figure I.2):

- D'un mauvais étalonnage électronique du radar. Celui-ci peut être corrigé à l'aide d'une calibration par un ou des postes pluviométriques au sol.

- De l'advection de la pluie entre l'altitude où elle est mesurée et l'endroit où elle tombe au sol.
- Des effets de masque et des échos fixes liés au relief (notamment en zone montagneuse). Des algorithmes ont été développés afin de prendre en compte ces échos fixes.
- D'une propagation anormale du faisceau radar. En effet l'onde électromagnétique peut être déviée lors d'un changement de l'indice de réfraction du milieu. Certaines conditions atmosphériques (augmentation de la température avec l'altitude, diminution de l'humidité) peuvent conduire à un blocage du faisceau dans les basses couches et à l'observation d'échos fixes.
- De l'atténuation des ondes électromagnétiques par la pluie. Cette atténuation peut être diminuée en jouant sur la longueur d'onde du radar (on diminue l'atténuation en utilisant un radar à bande S, à longueur d'onde élevée) ou en utilisant un radar à double polarisation.
- De la relation réflectivité/intensité pour le calcul de la pluie. Les radars météorologiques se contentent souvent d'une unique relation alors que celle-ci dépend fortement de la nature de l'hydrométéore (pluie, neige ou glace) et du type de pluie (pluies convectives ou pluies stratiformes) et de la distribution granulométrique des gouttes de pluies associée (DDG).
- De l'identification imparfaite du profil vertical de réflectivité (PVR). En effet le radar « voit » la puissance moyenne renvoyée par un profil vertical d'atmosphère dont l'altitude moyenne et la longueur sont fonction de l'ouverture du faisceau et de l'angle de site du radar. Ces deux grandeurs augmentent avec la distance au radar. Les caractéristiques du profil peuvent être fortement hétérogènes ou non stationnaires si le radar vise au-dessus (partiellement ou totalement) de la zone nuageuse, si le profil contient de l'eau sous différents états (liquide, glace ou neige) ou tout simplement si la distribution des diamètres des hydrométéores n'est pas homogène ou stationnaire – cas de la superposition d'une pluie stratiforme et d'une pluie convective. On estime que la mauvaise estimation du PVR explique 36 % des erreurs de comparaison entre les lames radar et les lames pluviométriques.

La correction des deux dernières sources d'erreur a fait l'objet d'avancées récentes. Elle caractérise la variabilité statistique des DDG par un unique paramètre qui dépend du contenu en eau de chaque distribution et de son diamètre moyen. Il montre un ajustement correct de la distribution normée ainsi établie sur un nombre important de types de pluie. Il propose un modèle inverse qui relie les paramètres de rétrodiffusion, de propagation au taux précipitant, et ce indépendamment du type de distribution de la pluie. La limite de cette caractérisation vient du fait qu'elle suppose que le paramètre de normalisation est supposé constant pour un événement ou un type de pluie donnés.

L'exploration volumique, qui consiste à balayer la même zone de l'espace à des pas de temps rapprochés et avec des angles de site différents du radar, permet d'identifier avec plus de précision les PVR. Une méthodologie opérationnelle, qui consiste à identifier les

profils observés à des profils « type » a été développée. Elle permet d'améliorer les simulations d'un modèle de prévision non hydrostatique.

I.10.1.2. Réseau de pluviomètres : fonctionnement, interpolation et densité minimale

La mesure de la pluie sur une zone géographique étendue par un réseau de pluviomètres comprend :

- Une mesure locale de la pluie sur une surface d'interception réduite (400 cm pour un pluviomètre classiquement utilisé)
- Une interpolation de ces mesures locales à l'échelle du bassin versant.

La mesure locale peut être principalement biaisée par :

- Des conditions météorologiques particulières à proximité du poste de mesure, notamment un vent important qui a pour effet de donner à la pluie un angle d'incidence
- Une pente importante du terrain qui héberge le poste. C'est ainsi qu'on distingue la pluie météorologique (pluie par unité de surface horizontale) de la pluie hydrologique (pluie par unité de surface dans le sens de la pente).
- Des obstacles physiques à proximité de poste : présence d'un arbre, d'un bâtiment,....

Bien que réalistes, les sources d'erreur mentionnées précédemment sont relativement limitées (10 % à 20 % d'erreur au maximum sur des cumuls événementiels).

Afin d'estimer le champ sur la surface du bassin versant, on a recours à une méthode d'interpolation spatiale. Les paramètres de cette loi sont déterminés à partir des données disponibles aux postes.

On peut classer les méthodes d'interpolation suivant la forme donnée aux poids W . Les méthodes les plus couramment utilisées sont :

- La méthode linéaire de l'inverse distance : le cumul en un point est proportionnel à l'inverse de la distance aux différents postes du réseau
- La méthode des fonctions splines : sont alors des fonctions cubiques, continues et continûment dérivables. Le champ de pluie est assimilé à une plaque mince dont on déterminerait l'équilibre en minimisant l'énergie de flexion.
- La méthode du krigeage : Contrairement aux deux méthodes déterministes précédentes, le krigeage est une méthode statistique. Les W_i sont des mesures de covariance entre 2 points situés à une distance donnée.

La méthode du krigeage est la plus utilisée et est considérée comme la plus précise. Cependant elle est assez lourde à mettre en place et on lui préfère souvent dans la pratique la méthode de l'inverse distance ou la méthode spline. Dans une grille régulière d'échantillonnage.

Chapitre II : Méthodologie

II.1. Présentation de la zone d'étude

II.1.1. Situation géographique de la zone d'étude

La wilaya de SKIKDA est située au Nord-Est de l'Algérie. Elle est limitée au Nord par la mer méditerranée, au Sud par la wilaya de Constantine et de Guelma, à l'Est par la wilaya d'Annaba et à l'Ouest par la wilaya de Jijel (Figure II.1). Naturellement la wilaya de SKIKDA est bordée, au Nord par le littoral Méditerranéen, au Sud par la chaîne tellienne, à l'est par les plaines de l'oued Kébir Ouest et à l'ouest par la chaîne tellienne de Jijel.



Figure II.1 : Localisation de la ville de Skikda

Le bassin versant du Saf-Saf, appartient au bassin côtier constantinois centre et se situe entre le bassin de l'oued Guebli à l'Ouest et celui de l'oued Kebir ouest à l'Est. Il est limité au Sud par Djebel El Hadjar et Djebel Oucheni, à l'Est par Djebel El Alia et Djebel Tengout, à l'Ouest par les massifs de Collo et Djebel Boukhallouf, et la mer méditerranéenne au Nord où se déverse le principal cours d'eau de ce bassin à l'Est de la ville de Skikda, drainant une surface de 1165.82 km².

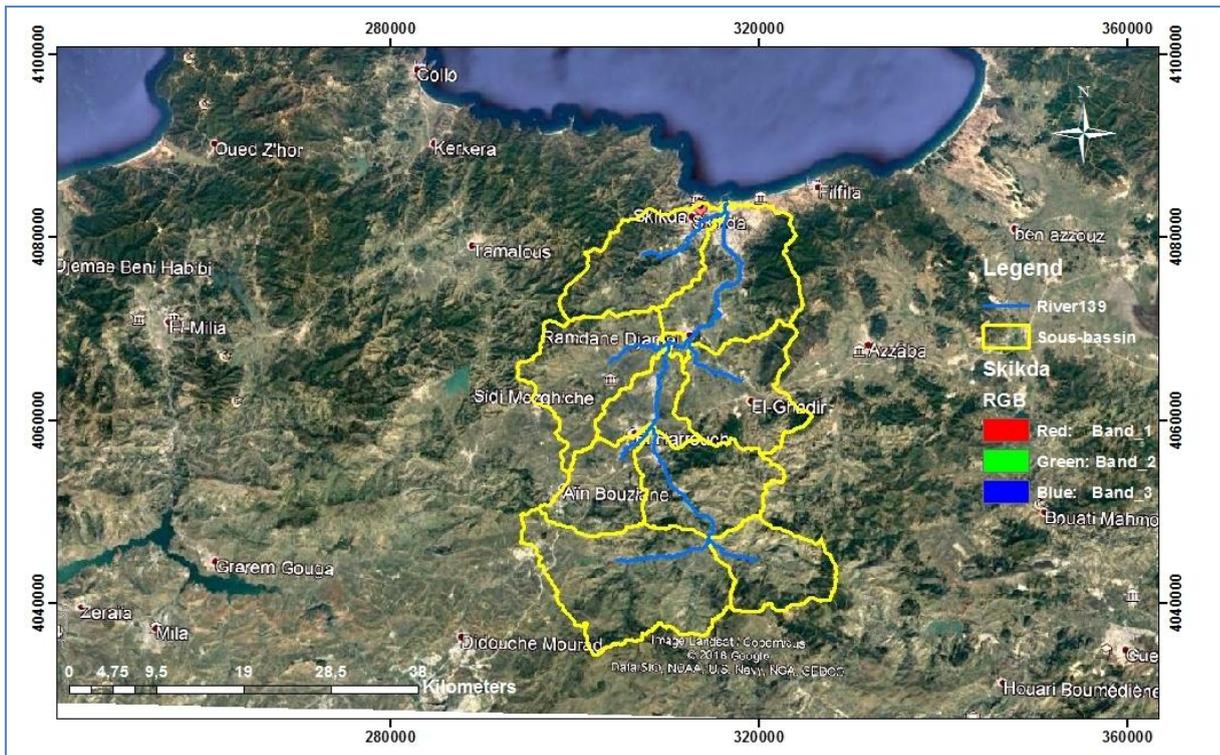


Figure II.2 : Situation géographique du bassin versant safsaf

II.1.2. Superficie

Avec une superficie planimètrique de 1165,82 km² le bassin versant du Saf-Saf est le plus grand bassin des côtiers Constantinois (10 % des 11570 km²). Cette superficie est délimitée par une ligne de partage des eaux de 150 km qui est le périmètre du bassin.

II.1.3. La forme du bassin

Cet élément peut être traduit par le paramètre $C(1)$: Indice de compacité de Gravelus ayant une influence certaine sur l'écoulement. La forme du bassin détermine l'allure de l'hydrogramme de crue. Un bassin allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme ramassée. Pour le bassin du Saf-Saf, l'indice C a été estimé à 1,24 ; traduisant une compacité faible (bassin allongé) de 46,65 km sur 24,75 km.

II.1.4. La géologie du bassin

L'objectif recherché, par l'étude géologique et géotechnique, est d'identifier la nature des faciès affleurant et leur impact sur le comportement des ouvrages et du système d'assainissement vis-à-vis de leur stabilité.

la ville de SKIKDA est de formation stratigraphique ancienne composée par des roches métamorphiques, précambriennes et paléozoïques, sous l'influence d'érosion intense, ces roches sont très altérées et recouvertes d'une couche d'altération superficielle argileuse d'une épaisseur variant de 0 à 2 mètres.

Les alluvions de vallées qui sont formées d'argiles limoneuses, d'argiles sableuses et de vases, remplissent les vallées de ZERAMNA et Saf-Saf, leurs épaisseurs dépassent parfois

les 30 mètres. Cette zone d'alluvions s'étend de la limite sud de la commune à l'embouchure de l'Oued Saf-Saf.

La zone des dunes intérieures (provenant des dépôts éoliens anciens et des dépôts marins anciens), d'une largeur de 1 à 2 km, se prolonge parallèlement au bord de la mer, de la vallée du Saf-Saf à l'Oued K'Sob.

II.1.5. Situation géotechnique

Compte tenu de la géomorphologie de la structure géologique de la commune de Skikda, on distingue les zones suivantes :

Alluvions de la vallée ZERAMNA et Saf-Saf, c'est une zone de sols cohérents ; vases limons, argiles, la force portante est variable de 0 à 1,5 bars, cette valeur dépend de la teneur en eau, de la plasticité et de granulométrie, c'est une zone moyennement favorable.

Les dunes littorales, ce sont des dépôts éoliens peu denses à moyennement denses de force portante de 0,5 à 1,5 bars, c'est une zone favorable à moyennement favorable.

Les dunes anciennes, ce sont des dépôts éoliens anciens et des dépôts marins anciens, parfois cimentés, la force portante est presque de 30 bars ; Zone donc favorable.

Les terrains précambriens et paléozoïques correspondant à une zone de glissement et d'équilibre instable, elle est défavorable mais pas inconstructible.

Compte tenu des conditions géomorphologiques, on distingue en plus, la zone sommet des collines aux pentes de moins de 25% et non recouvertes de colluvions, c'est une zone favorable à l'urbanisation.

II.1.6. Réseau Hydrographique

La topographie contrastée, l'agressivité du climat et la lithologie tendre (marnes et argiles) ont permis l'installation d'un réseau hydrographique dense.

Le bassin du Saf-Saf résulte de la jonction de deux cours d'eau importants : l'Oued Bou Adjeb et l'Oued Khemakhem où a été construit le barrage des Zardézas. Il franchit la chaîne numidique entre les monts M'souna (620 m) et Sébargoud (609 m), avant de se jeter dans la mer près de Skikda.

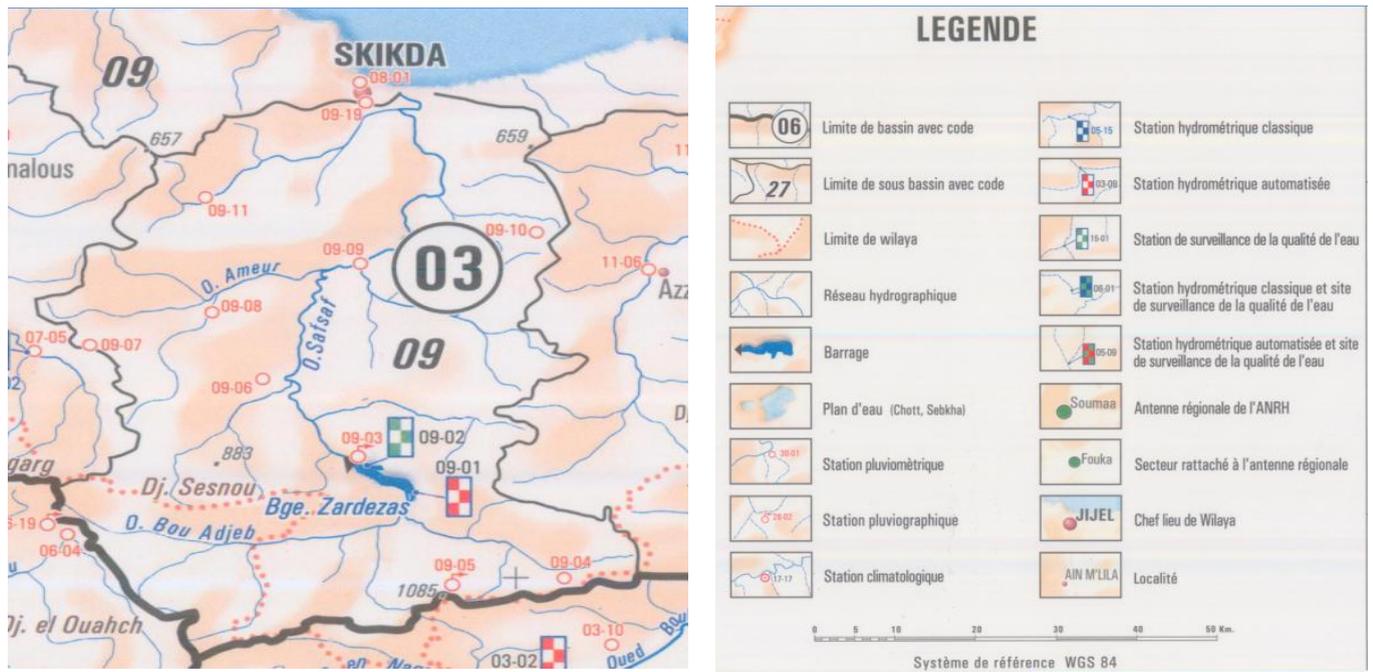


Figure II.3 : Carte hydrographique du bassin de Saf Saf

II.1.7. Situation morpho-structural

Le massif géologique du bassin versant du Saf-Saf se confond avec l'ensemble de la géologie Alpine de la petite Kabylie.

Sur le plan régional, on doit à J.F.RAOULT (1974), J.P.BOUILLIN (1977) et J.M.VILA (1980) les premières études complètes permettant d'identifier les ensembles structuraux de cette région.

L'immensité de sa taille (1165.82 Km²) et la complexité de sa structure ont fait que le bassin du Saf-Saf présente un grand ensemble morpho-structural comportant plusieurs milieux morphologiques.

Ainsi donc, il s'étend du piedmont sud tellien (au sud), à la mer méditerranée (au nord), il est respectivement limité à l'Est et à l'Ouest par les bassins versants du Seybouse et du Kébir Rhumel.

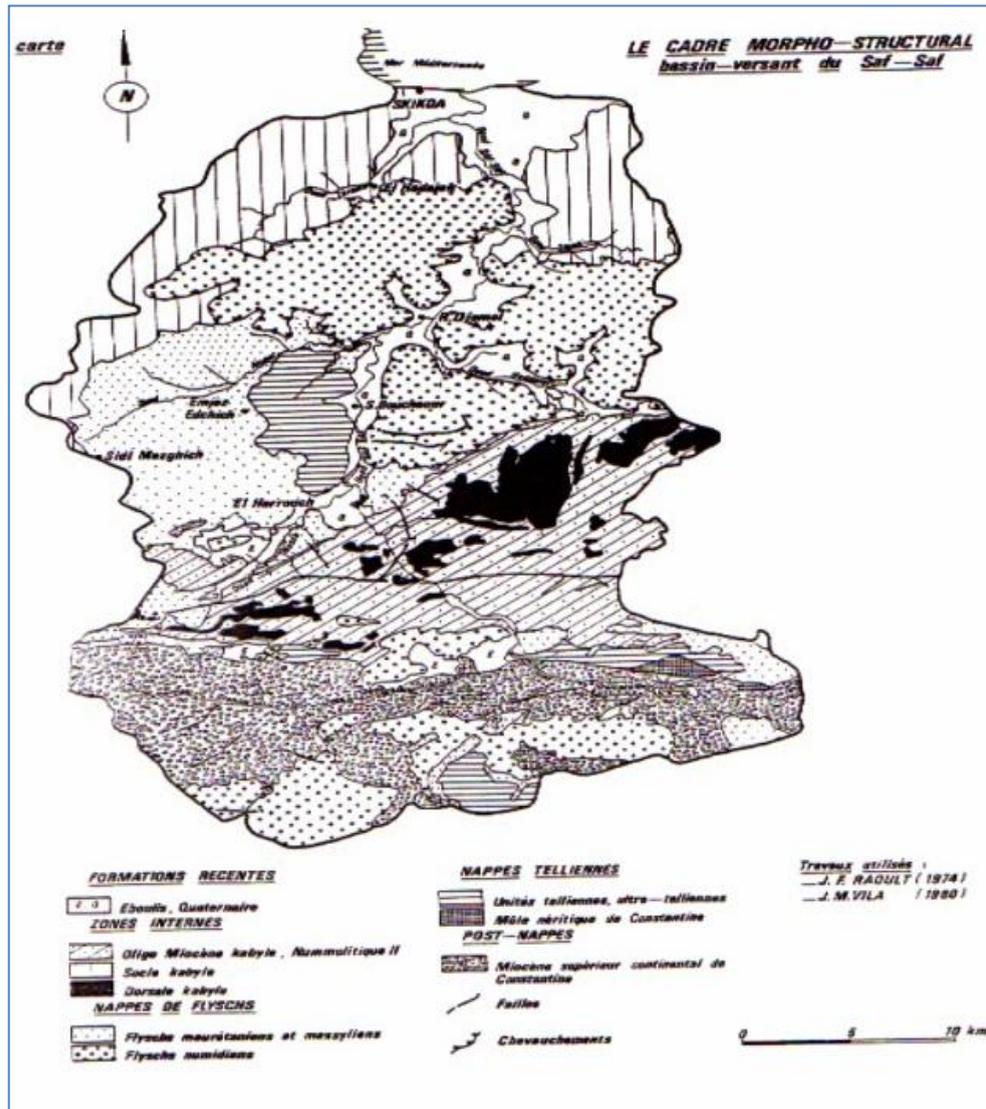


Figure II.4 : Cadre morpho-structural.

II.1.8. Le climat

Le climat de la zone d'étude appartient au régime méditerranéen tel qu'il est défini par G. Réménieras dans son ouvrage «L'hydrologie de l'Ingénieur» : «Le climat méditerranéen est caractérisé par une saison froide relativement tempérée durant laquelle les perturbations cycloniques apportent des pluies souvent substantielles surtout sur les reliefs, suivie d'une période sèche. Les précipitations sont relativement abondantes avec un maximum pendant les mois de décembre et une saison aride qui va de juin à septembre avec quelques rares orages. Suite à l'effet de cuvette fermée sous le vent qu'au sirocco qui ne souffle que 25 jours par an, les températures d'été sont particulièrement élevées. Pendant la période hivernale.

II.1.8.1. Température

Les températures mesurées à la station météo de Skikda sont les suivantes :

Le tableau ci-dessus montre que la valeur la plus élevée de la température se focalise entre les mois de juin, juillet et août (mois d'été) avec des valeurs avoisinant les 30°.

Tableau II.1 : Températures moyennes, maximales et minimales

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Moyenne annuelle
Température Moyenne (°C)	11,82	12,16	15,18	16,8	19,76	23,84	26,34	26,64	24	22,1	17,22	13,54	19,12
Température max (°C)	15,32	15,22	18,68	19,98	22,86	26,98	29,04	29,4	26,68	25,52	20,5	17,02	22,27
Température Min (°C)	8,9	8,84	12,06	13,58	16,56	20,5	23,42	23,62	21,08	18,88	14,24	12,36	16,17
A°C	6,42	6,38	6,62	6,4	6,3	6,48	5,62	5,78	5,6	6,64	6,26	4,66	6,1

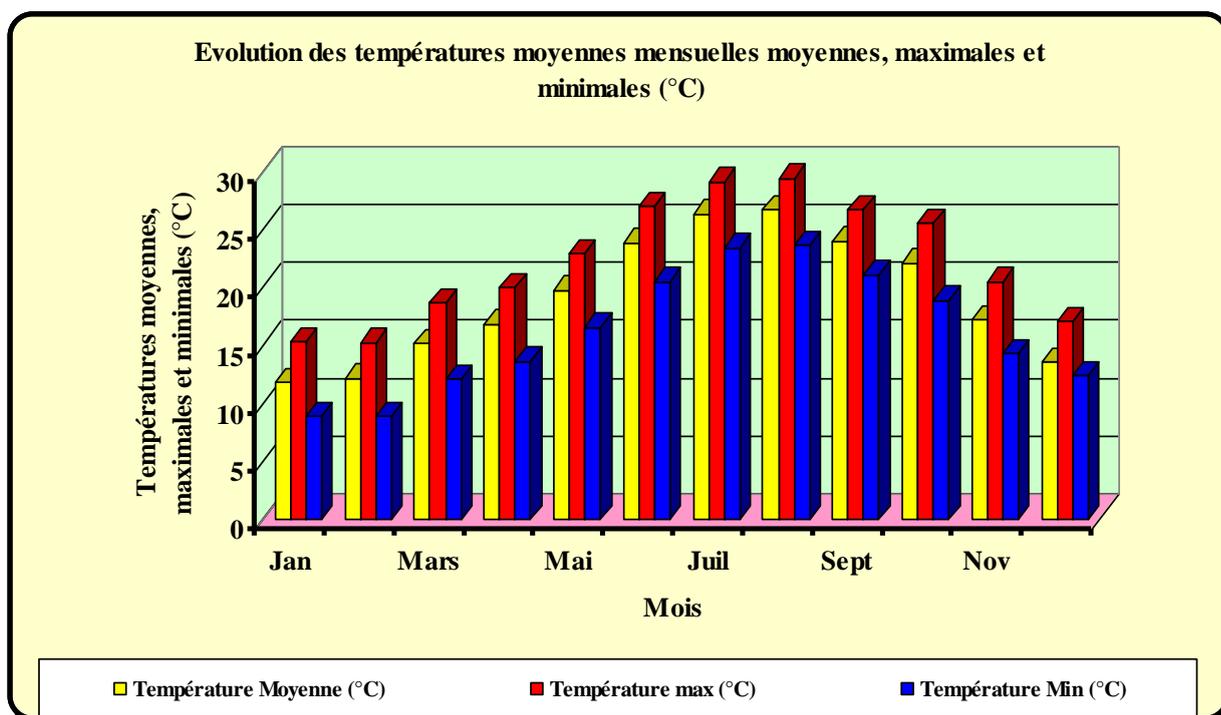


Figure II.5 Evolution des températures moyennes, maximales et minimales (°C)

II.1.8.2. Humidité Atmosphérique

L'humidité est la base de toute précipitation. L'humidité relative à Skikda représentée par le tableau ci-dessous :

Tableau II.2 : Humidité région de Skikda

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
H (%)	72.3	72.84	72.3	74.75	74.75	74.73	73.73	74.01	73.61	73.0	70.61	73.69

D'après le tableau ci dessus la région de Skikda se caractérise par une forte humidité, une faible variation annuelle de celle-ci. L'importance de l'humidité atmosphérique dans la basse Seybouse peu entraîner la l'apparition de précipitations occultes par condensation à la surface du sol et des plantes.

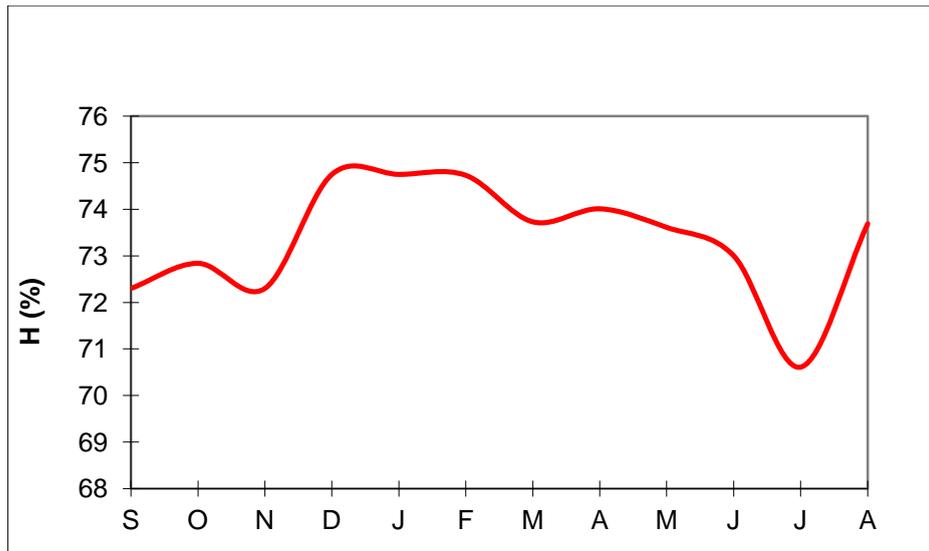


Figure II.6 : Variations de l'humidité à de Skikda

II.1.8.3. Evaporation

L'évapotranspiration est mesurée à la station météorologique de Skikda.

Tableau II.3 : Evaporation moyenne mensuelle

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Evaporation mensuelle moyenne (mm)	53,8	52,8	87,2	79,6	83	106,4	107,2	113,2	85,6	84,8	75,6	72,2

Le tableau ci-dessus montre également que l'évaporation atteint son maximum durant la période estivale d'été. L'évaporation suit une progression identique à celle de la température.

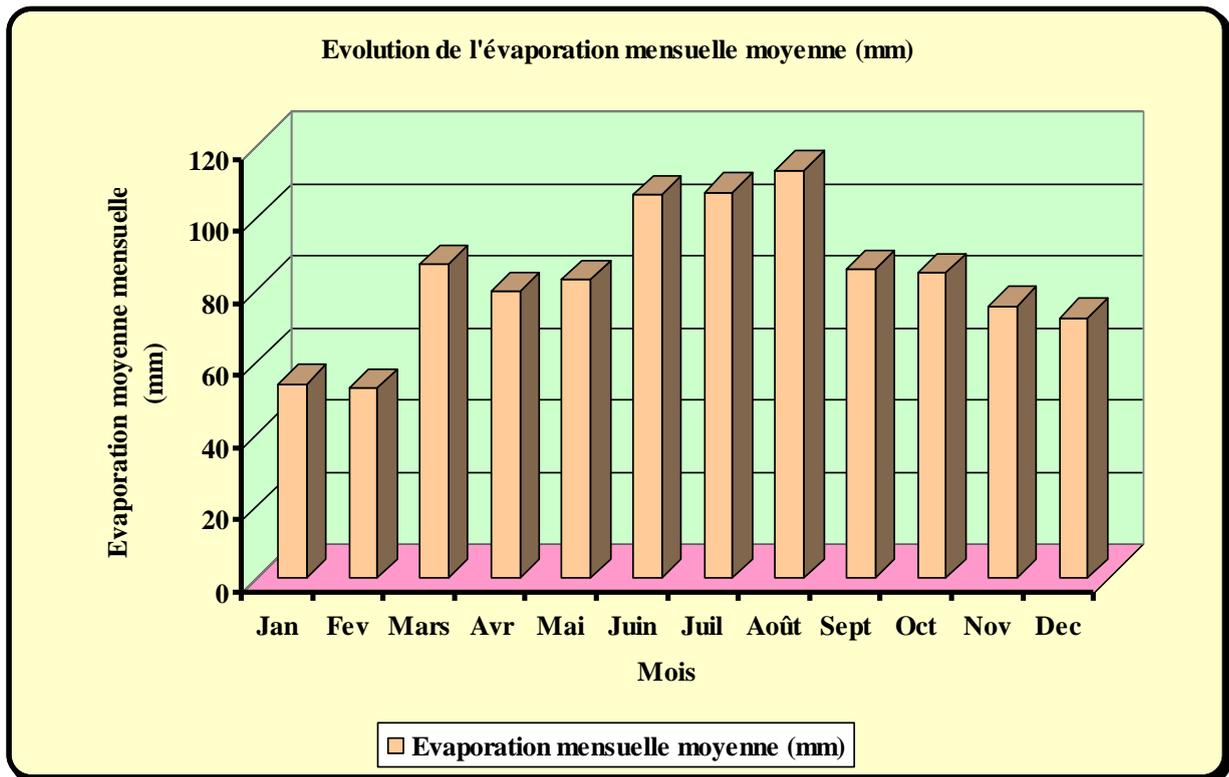


Figure II.7 : Evolution de l'évaporation moyenne mensuelle (mm).

II.2. Description du logiciel ArcGIS 10.2

Le logiciel ArcGIS 10.2 est l'un des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) les plus utilisés. Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales.

Différentes couches d'informations spatiales peuvent être manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à-dire, l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées.

Les différentes couches d'informations sont descriptives d'un espace géographique terrestre déterminé. Elles peuvent correspondre à des documents cartographiques représentant des objets thématiques géographiquement identifiés (carte de type IGN, photographies aériennes, images satellitaires, etc.) ou issus des analyses et des procédures de spatialisation (carte de la teneur en eau du sol, carte topographique, carte de la hauteur des arbres dans un peuplement forestier, etc.).

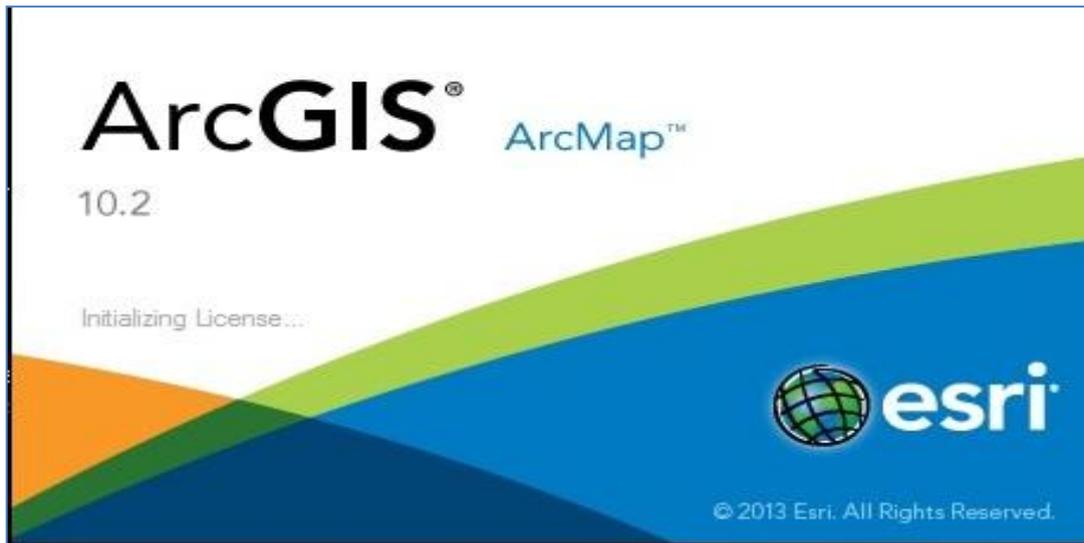


Figure II.8 : Interface de logiciel ArcGIS 10.2

II.3.1 Composantes de l'environnement ArcGIS

ArcGIS 10.2 comprend trois applications principales : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox



Figure II.9 : Les composantes de l'environnement ArcGIS 10.2

A l'aide de ces trois applications, on peut effectuer toutes les tâches SIG, de la plus simple à la plus avancée, y compris la cartographie, la gestion des données, l'analyse géographique, la mise à jour des données et le géotraitement....etc.

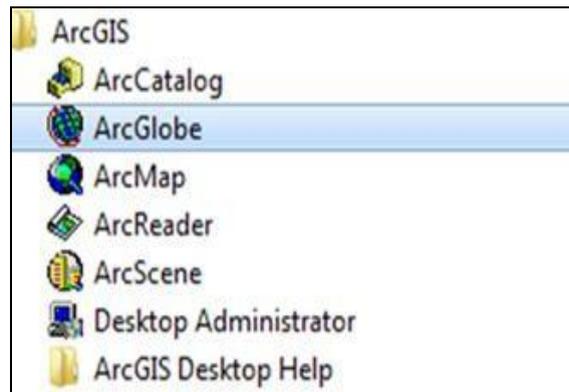


Figure II.10 : Les applications d’ArcGIS

II.3.1.1. ArcMap

Il est utilisé pour toutes les tâches de cartographie et de mise à jour ainsi que pour les analyses associées aux cartes. ArcMap montre, questionne, édite, crée ou analyse des données, sous forme de Tables ou de cartes. ArcMap facilite la disposition des cartes lors de la mise en page pour l’impression, l’intégration dans d’autres documents et l’édition de documents électroniques. L’interface du logiciel est présentée ci-dessous :

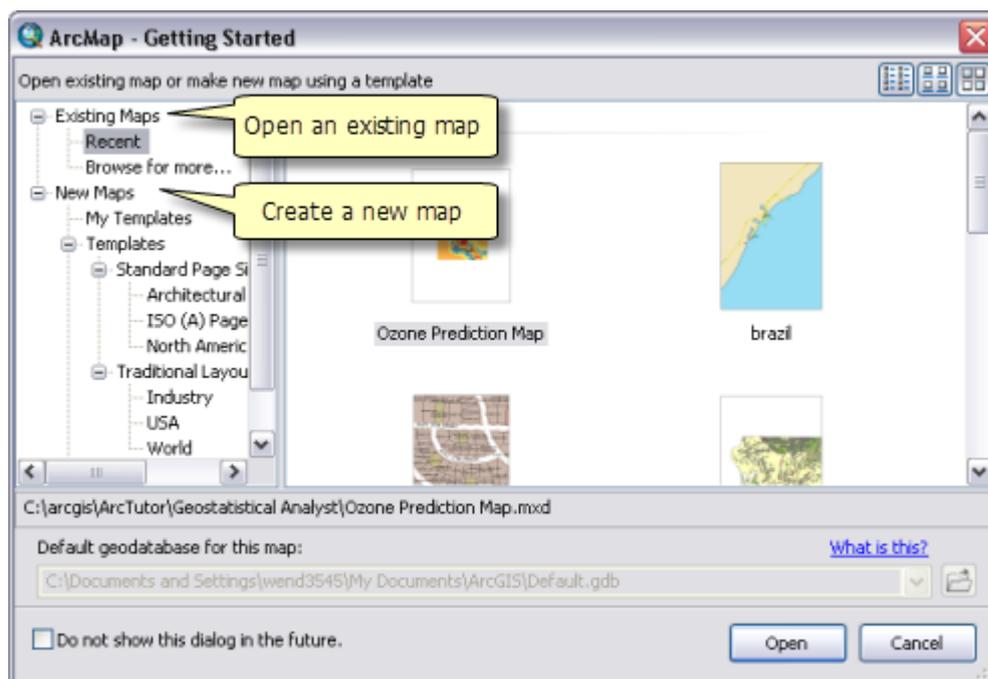


Figure II.11 : L’interface d’ArcMap

La barre générale d’outils se décline comme suit :



La barre d’outils permet d’effectuer certaines opérations tout en restant dans ArcCatalog. Par ordre, de gauche à droite : Zoomer (+) et de zoomer (-), se déplacer sur une couche pour afficher une portion, revenir à l’affichage initial de la carte (tout à

l'écran), identifier les données tabulaires rattachées d'un polygone quelconque, créer un icône d'une couche.

II.3.1.2. ArcCatalog

ArcCatalog est un explorateur de données tabulaires et cartographiques offrant des outils de gestion et d'organisation analogues à ceux offerts par les systèmes d'exploitation comme WINDOWS ou DOS (copier, renommer, effacer, créer des icônes, etc.). Il est vivement conseillé d'utiliser ArcCatalog pour effacer les fichiers car ces fichiers sont accompagnés d'autres fichiers que l'explorateur de Windows, s'il est utilisé, ne permet pas de les effacer automatiquement. ArcCatalog permet aussi de visualiser les données tabulaires et des couches géographiques ainsi qu'une exploration des différents thèmes qui les constituent.

Permet de gérer les fichiers de données et l'organisation des bases de données ainsi que d'enregistrer et de visualiser les métadonnées.

ArcCatalog vous permet de passer en revue, organiser, distribuer et modifier les éléments de propriétés des données géographiques. L'interface permet d'employer des méthodes graphiques ou textuelles pour passer en revue, contrôler ou modifier l'ensemble des données.

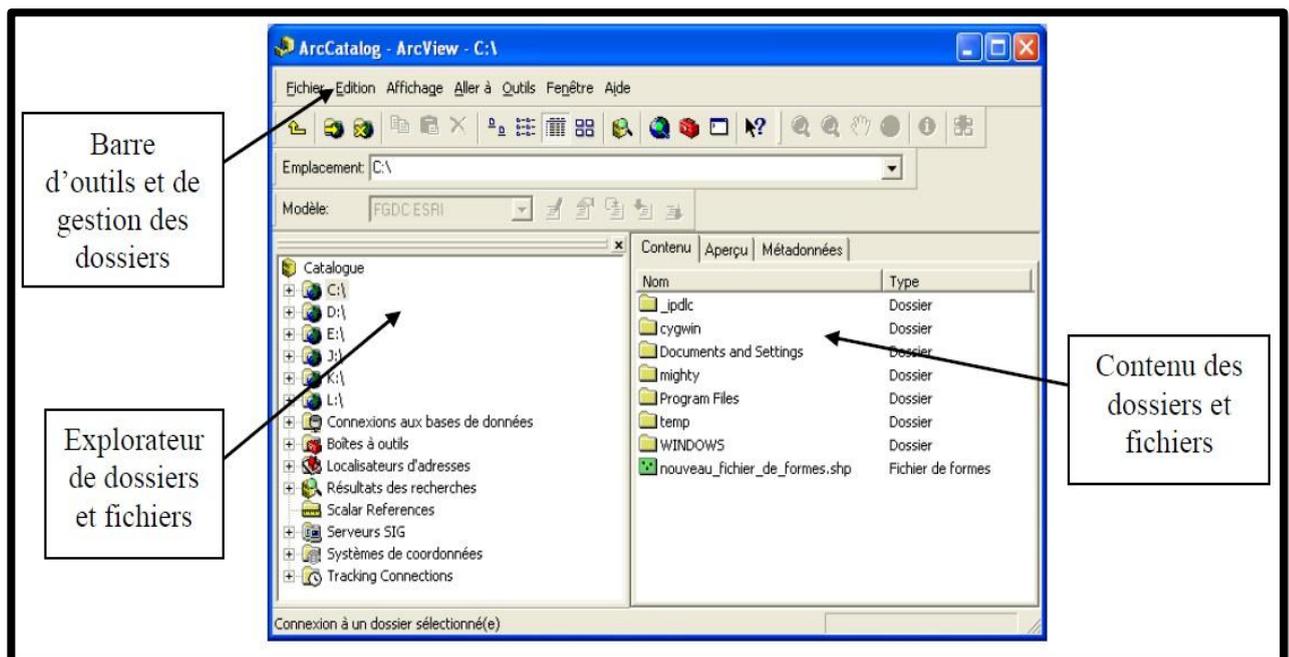


Figure II.12 : L'interface d'ArcCatalog

II.3.1.3. ArcToolbox

ArcToolbox est une boîte à outils permettant d'effectuer des conversions et de transferts de format et aussi de projection. ArcToolbox est le module dans ArcGIS 10.2 qui permet à toutes les fonctionnalités puissantes de traitement et d'analyse. La boîte à outils fournit un ensemble très riche de fonctions de géotraitement. Il converti aussi les formats

de données pour l'importation ou l'exportation de fichiers, ainsi que les changements de projection.

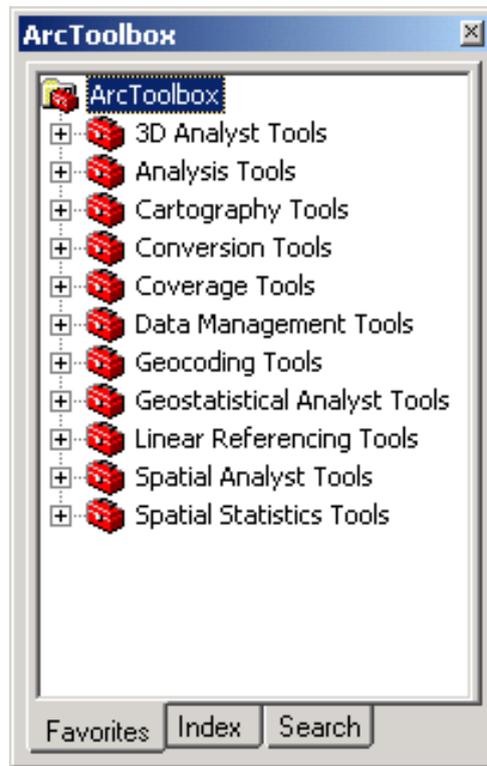
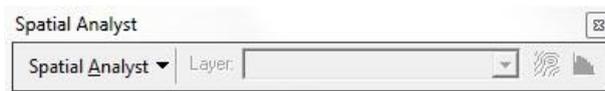


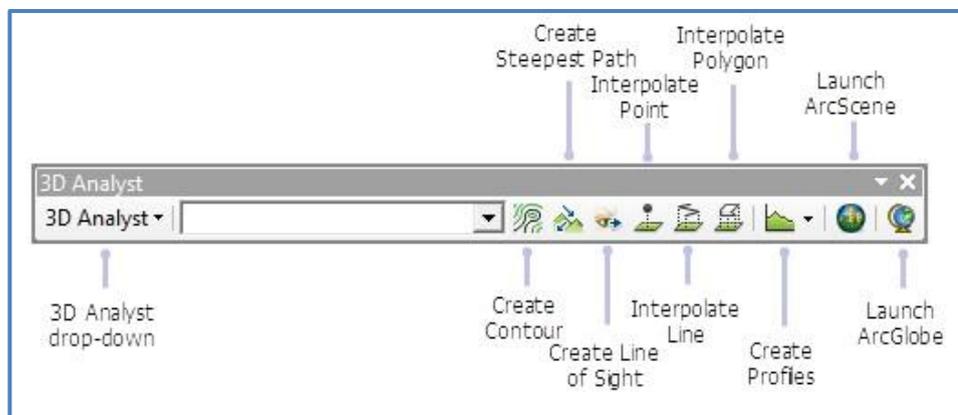
Figure II.13 : Les outils d’ArcToolbox.

Les extensions les plus connues d’ArcGIS sont les suivantes :

- **Spatial Analyst:** Modélisation spatiale avancée.



- **3D Analyst :** Modélisation 3D



- **GéoStatistical Analyst** : Analyses et cartographie avancée.



- **Tracking Analyst** : Analyses des données temporelles.



II.3.2. Géo-référencement

Le géo-référencement est un processus permettant d'établir une relation entre les entités affichées dans votre système d'information géographique et leur position dans le monde réel. La terre est sphérique, et les cartes étant plates, la conversion de positions géographiques sur une surface de la terre en une surface plate nécessitant une formule mathématique appelée projection cartographique. Pour bien exploiter les données sur votre SIG on utilise un système de coordonnées projetées (UTM) ou géographiques (WGS 84). Le géo-référencement transforme des données spatiales en données géographiques.

Le géo-référencement peut correspondre à trois types d'opérations différentes :

- La transformation des données spatiales en données géographiques par la déclaration d'un système de coordonnées.
- La transformation d'un système de coordonnées géographiques à un autre.
- La transformation des données spatiales en coordonnées géographiques par transformation algébrique.

II.3.3. Les systèmes de projections

II.3.3.1. Le système de projection UTM

C'est notre système de projection utilisé dans notre projet et pour notre zone d'étude on choisit la zone 32 du Nord Sahara. Le système de projection UTM est schématisé dans la figure (II.14) ci- dessous :

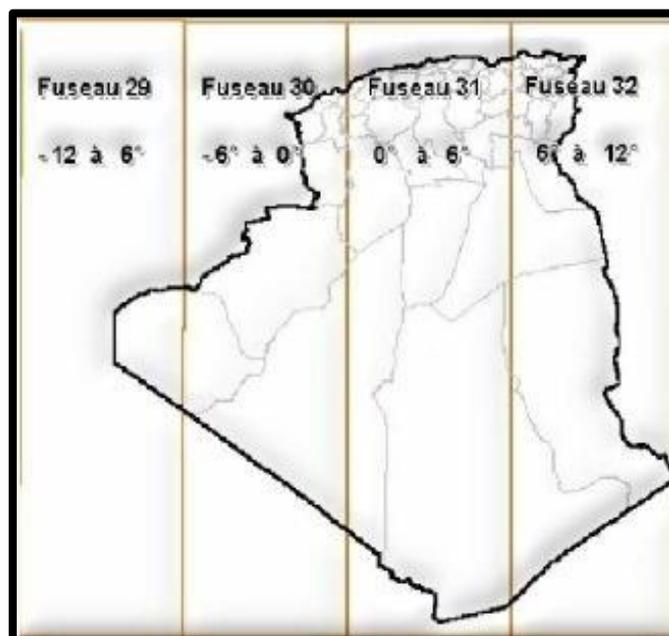


Figure II.14 : Système de projection UTM

Sont séparées par la ligne indiquée par des tirets. Le HEC-GeoHMS assure le raccordement entre ces deux domaines, il traduit ainsi l'information spatiale des SIG en une information hydrologique. Si les données radar de précipitations sont utilisées, l'utilisation des grilles de SHG ou de HRAP peut assurer un plus grand alignement et la compatibilité entre les précipitations et les grilles de chaque sous bassin.

II. 4. HEC-GeoHMS

Pour déterminer les paramètres des bassins versants physiques exigés par le modèle HEC-HMS, le logiciel USACE Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GeoHMS), est utilisé. Le logiciel prend avantage d'ArcGis pour délimiter le bassin, puis en déduire différents paramètres. Pour une description complète du logiciel, le lecteur, est appelé à télécharger et consulté le Manuel d'utilisation de HEC-GeoHMS (USECE, 2011).

HEC-GeoHMS est sélectionné pour cette étude en raison de sa facilité d'utilisation avec HEC-HMS. Bien que, il y a d'autres outils de délimitation des bassins versants, HEC-GeoHMS a été développé spécifiquement, à utiliser en association avec HEC-HMS.

II. 5. HEC-HMS

Le modèle hydrologique distribué HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) a été développé par l'*Hydrologic Engineering Center* (HEC) du « *US Army Corps of Engineers* » (USACE, 2011).

Le modèle hydrologique déterministe et conceptuel HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) a pendant longtemps été un modèle essentiellement appliqué à la simulation d'un événement donné. Les versions récentes permettent de simuler en continu sur une longue période grâce à l'intégration de modules de calculs des différents processus d'évapotranspiration, d'humidité du sol et d'accumulation/fonte de neige.

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. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins versants non urbanisés. Le HEC-HMS permet également de simuler et d'incorporer des réservoirs et des dérivations.

Le modèle hydrologique HEC-HMS comprend une interface graphique conviviale, des capacités pour la manipulation des données, résultats et graphiques, un système spécifique de gestion et de stockage de données (DSS View), ainsi que des possibilités d'affichage et d'impression de résultats, et des outils de gestion.

Il est conçu pour résoudre une panoplie de problèmes tels l'hydrologie des crues et le ruissellement sur de petits bassins naturels ou plus encore, sur de petits bassins urbains (Laouacheria et Mansouri, 2015).

Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues, la conception des réservoirs et la réduction des effets des inondations.

Le programme dispose d'un environnement de travail entièrement intégré, y compris une base de données, les outils de saisie de données, le moteur de calcul, et les outils de présentation des résultats (Laouacheria et Mansouri, 2015).

Les modules de modèles développés sous HEC-HMS permettent la prise en charge des quatre processus hydrologiques essentiels : Modèles pour le calcul des précipitations, du volume de ruissellement, du ruissellement direct et des écoulements souterrains.

Dans cette rubrique, l'accent sera mis sur le modèle HEC-HMS dont nous allons se servir pour la modélisation de la zone d'étude, de point de vue générale, en traitant des points tels que : sa création, son mode de fonctionnement, ses capacités, ses modules, ses formalismes,etc. Notez bien que cette description ne portera que sur l'aptitude de modélisation événementielle du HEC- HMS, vu que c'est elle qui nous intéresse dans notre étude. Une description détaillée de HEC-HMS et sa documentation complète peuvent être consultées et téléchargés gratuitement sur le site internet de l'USACE pour Windows, à <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/download.html>.

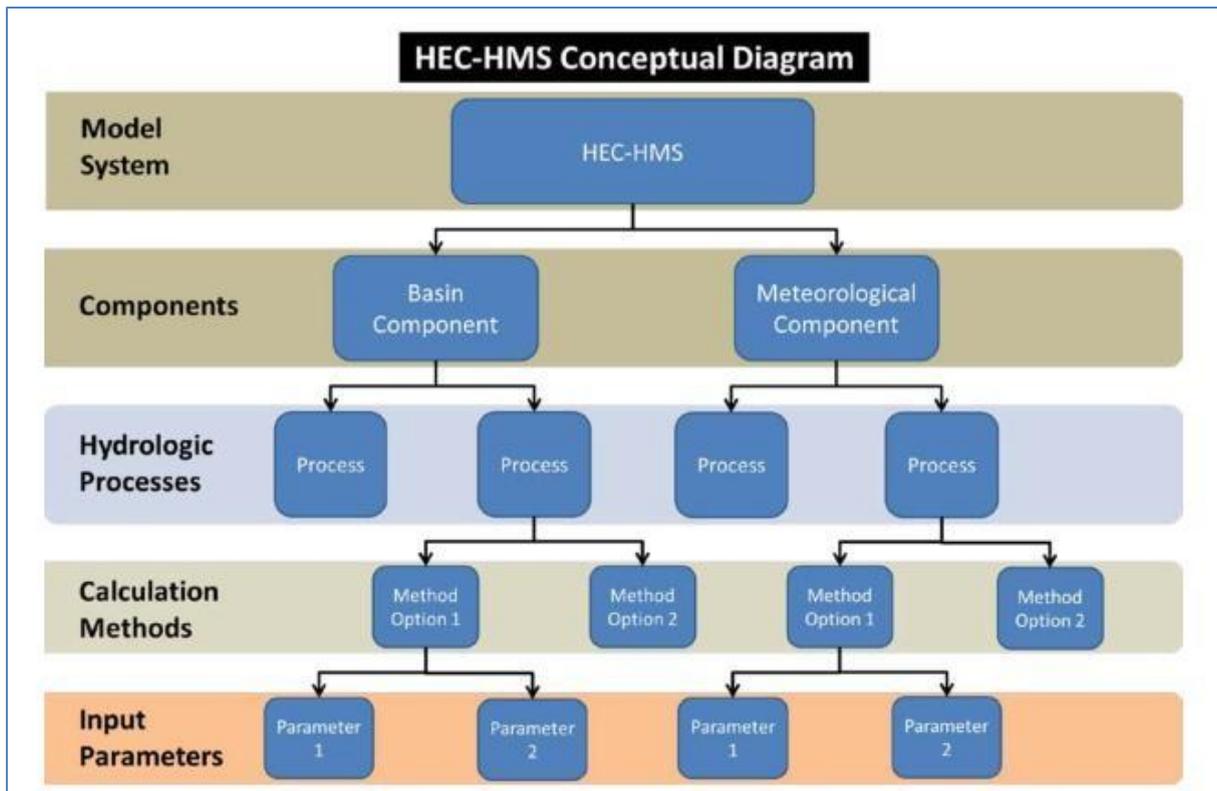


Figure II.15: Diagramme de HEC-HMS

Le système de modélisation comporte deux volets principaux. Au sein de chaque élément existe différents processus du cycle hydrologique. Pour représenter chaque processus hydrologique, il existe une variété de méthodes de calcul à choisir. Enfin, pour chaque méthode de calcul, les paramètres d'entrée spécifiques, sont nécessaires.

II.5.1. 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, U_t , comme une fraction du débit maximal U_p , et T_p , l'instant du pic. Nous avons par ailleurs les relations empiriques suivantes:

$$\begin{cases} U_p = 2.08 \cdot \frac{A}{T_p} \\ T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6 \cdot T_c \end{cases} \quad (\text{Eq III. 1})$$

Où

Δt est la durée de l'excès de précipitation,

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

II.5.2. La méthode de perte par infiltration SCS- CN

II.5.2.1. 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 Resources 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.

II.5.2.2. 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 II.16) : la pluie effective (P_{eff}), la rétention qui se produit dans le bassin (F) et les pertes initiales (I_a). La relation entre la précipitation (P) et les trois composantes est assumée comme étant la suivante :

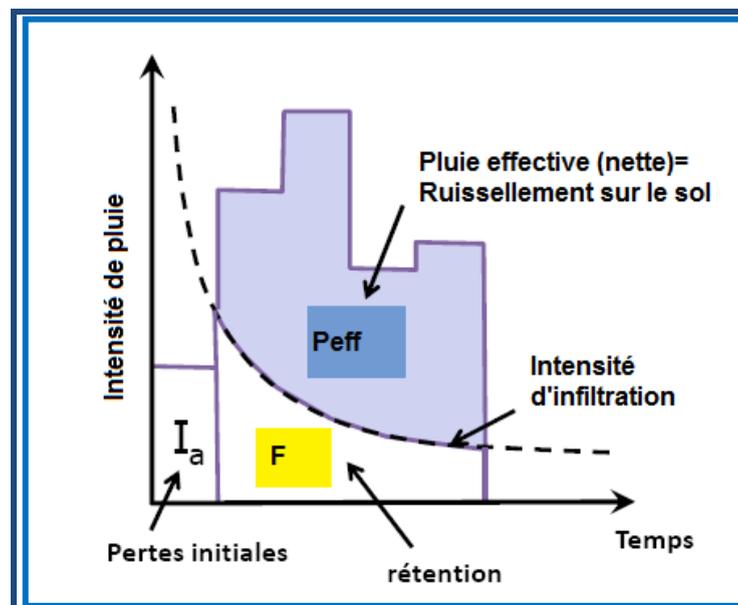


Figure II.16: Séparation de la pluie (P) en ruissellement (Q), pertes initiales (I_a) et les pertes par rétention (F)
Méthode du NRCS

$$\frac{F}{S} = \frac{P_{\text{eff}}}{P - I_a} \quad (\text{Eq III. 2})$$

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 I_a (Initial abstraction) la partie des précipitations retenue dans les dépressions et absorbée par évapotranspiration. On appelle ruissellement P_{eff} 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 :

$$F = (P - I_a) - P_{\text{eff}} \quad (\text{Eq III. 3})$$

Substituant (Eq II.2) dans l'équation (Eq II.3) on obtient :

$$\frac{(P - I_a) - P_{\text{eff}}}{S} = \frac{P_{\text{eff}}}{P - I_a} \quad (\text{Eq III. 4})$$

En réarrangeant pour P_{eff} on trouve finalement

$$P_{\text{eff}} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (\text{Eq III. 5})$$

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 (I_a et S). On pose ensuite, en se basant sur les résultats de simulations, que la perte initiale $I_a=0,2S$. Ceci donne donc en transposant dans l'équation (Eq II.5) on obtient:

$$P_{\text{eff}} = \frac{(P - 0.2 S)^2}{(P + 0.8 S)} \quad (\text{Eq III. 5})$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de P_{eff} 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 (runoff curve number). L'indice CN est relié au stockage S par la relation suivante:

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (\text{Eq III. 6})$$

S : en (mm)

La combinaison des équations (Eq II.5 et Eq II.6) donne naissance à une équation permettant de calculer la hauteur de la pluie effective :

$$h_{\text{eff}} = \frac{\left(h - \frac{1270}{\text{CN}_{\text{II}}} + 12.7\right)^2}{h + \frac{24130}{\text{CN}_{\text{II}}} - 241.3} \quad (\text{Eq III. 7})$$

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 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 analyser les quantités de ruissellement pour des durées autres que 24 h. Elle est par ailleurs moins appropriée pour l'analyse de petites précipitations et il est reconnu qu'elle devient moins précise pour des quantités de pluie inférieures à 10 mm.

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

Tableau II.4: Capacités initiales i_0 et finale i_f d'infiltration en fonction des classes de sols définies par le SCS

Type de sol	Groupe	I_0 (mm/h)	I_f (mm/h)
Sable, silt	A	250	12-8
Limon sableux	B	200	8-4
Limon argileux	C	130	4-1
Argile, sols salins	D	75	1-0

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 :

$$\text{CN}_{\text{composite}} = \frac{\sum A_i * \text{CN}_i}{\sum A_i} \quad (\text{Eq III. 8})$$

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

Tableau II.5: Type d'occupation de sol et son CN associé

Occupation de sol	Classes 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 de crue (NRCS). Ensuite, on définit soit un CN normal, sec ou humide, tout en respectant le tableau ci-après :

Tableau II.6 : 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 II.9 et Eq II.10) pour évaluer le CN pour des conditions sèches (CN_I) ou pratiquement saturées (CN_{II}) :

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.334 - 0.01334 CN_{II}} \quad (\text{Eq III. 9})$$

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

II.5.3. 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 événements pluvieux hypothétiques, c'est-à-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.

II.5.3.1. 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 événement 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, le 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 II.17).

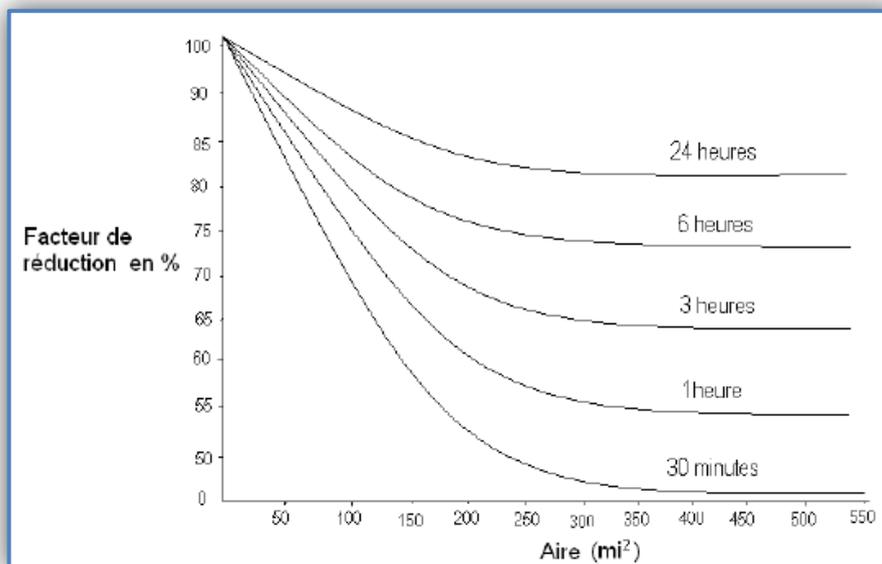


Figure II.17: Facteurs de réduction des hauteurs déduits à partir des courbes HDF

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'hyétogramme. Les blocs restants sont arrangés alors dans l'ordre décroissant, alternativement avant et après le bloc central. Cette méthode a été appliquée pour le cas de notre zone d'étude. Les données pluviométriques utilisées pour l'élaboration de l'hyetogramme de la zone d'étude sont issues de la station pluviométrique

de Skikda pour la période de 1999- 2018. La méthode de Gumbel a été appliquée pour la détermination de la hauteur d'eau pour différentes périodes de retour. La figure (II.18) illustre l'hétyogramme de pluie issu à partir de la méthode de pluie basée sur la fréquence pour la période de retour de 50 ans.

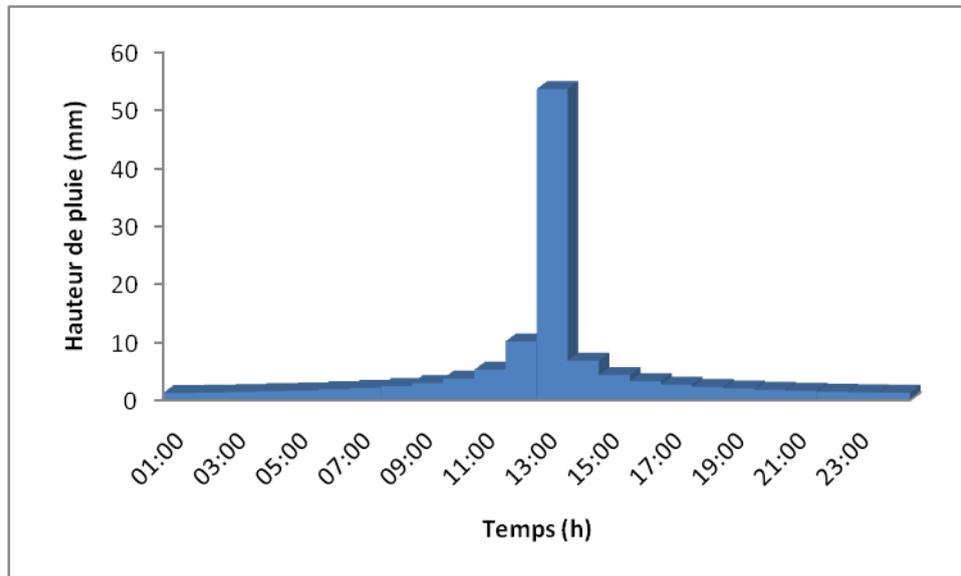


Figure II.18: Hétyogramme de la Pluie d la zone d'étude basée sur la fréquence

II.5.3.2. 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 de cette quantité à chaque instant. Parmi les pluies hypothétiques les plus utilisées dans les simulations, figurent les pluies SCS. La figure (II.19) illustre le cas d'une pluie SCS de type I.

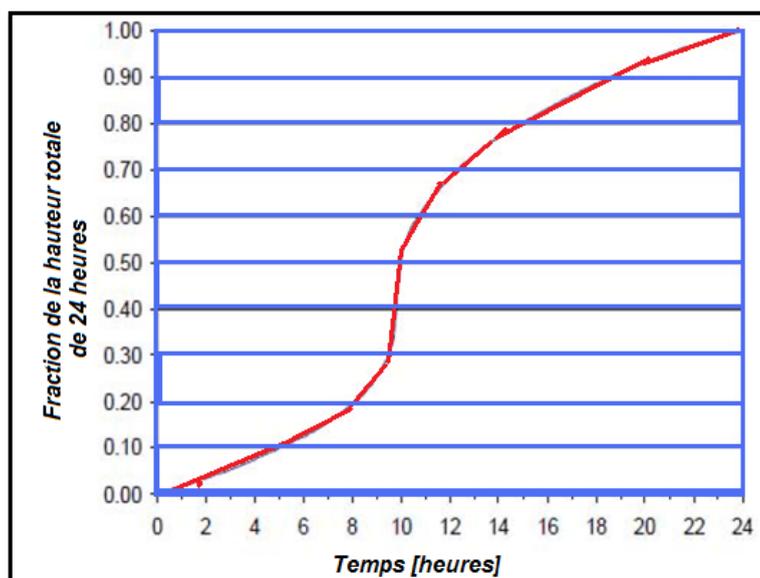


Figure II.19 : Averse hypothétique SCS de type I

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 spécifiées. 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.

Les données d'entrée de pluie pour une pluie de projet basée sur la fréquence sont les hauteurs de pluies pour différentes durées de pluie avec une période de retour 50 ans qui peuvent être tirées de courbes IDF. Courbes IDF sont créées sur la base de données d'un événement pluvieux de longueur de 31 ans d'une station pluviométrique et représentent les caractéristiques des pluies à long terme de la zone autour de la station pluviométrique.

II.5.4. 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 Monthly » : 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 Reservoir » : Réservoir linéaire. Il simule le stocke souterrain à un réservoir, ainsi il est toujours associé à la fonction de production type SMA.
- « Recession » : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est utilisée pour les bassins où les volumes de crue sont influencés par les événements pluvieux.

II.5.5. 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 ».

II.5.6. La fonction objective

Elle mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé que ce soit en termes de débit, de volume ou du temps. Le HEC-HMS en compte 7 fonctions objectives à savoir :

- « Peak weighted RMS error » : modification de la fonction objective largement utilisée qui est l'erreur sur la racine moyenne des carrés de débit. Cette méthode donne plus de poids aux débits en dessus de la moyenne et moins de poids aux débits en dessous.
- « Sum of squared residuals » : la somme des résidus au carré, attribue plus de poids aux larges erreurs et moins aux petits erreurs.
- « Sum of Absolute Residuals » : la somme des résidus absolus, qui ne différencie pas entre les erreurs larges et celles restreintes.
- « Percent Error in Peak Flow » : le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe, qui se focalise sur l'ajustement des débits de pointe.
- « Percent Error in Volume » : le pourcentage d'erreur sur le volume, qui se focalise sur l'ajustement des volumes de ruissellement.
- « RMS Log Error » : utilise l'erreur sur la moyenne de la racine carrée des log des débits pour mettre en phase les débits faibles et forts.
- « Time weighted » : donne du poids aux erreurs proches de la fin de l'événement et moins aux erreurs du début.

Le choix de telle ou telle fonction est dicté par la problématique étudiée et/ou les objectifs de la modélisation. Par exemple, si on est amené à faire une délimitation des zones inondables, la fonction objective sur le volume est appréciée, si par contre l'objectif étant de déterminer le débit de projet d'un ouvrage quelconque, la fonction objective conseillée est celle jouant sur le débit de pointe. De l'autre coté si on est en présence d'une modélisation continue pour comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin, il sera préférable d'opter par exemple à la première fonction qui va s'intéresser plutôt aux grands pics de débits. Ainsi, on choisit la fonction qui nous aidera à résoudre notre problématique et atteindre nos objectifs.

II.5.7. 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 :

- ✓ « Univariate Gradient » : le gradient univarié, ajuste un seul paramètre à la fois en gardant les autres constants.
- ✓ « Nelder et 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.

II.5.8. 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 (Motevalli et al., 2012).

Chapitre III : Résultats et discussion

III. Introduction

Ce chapitre représente les résultats de simulation du bassin versant de l'oued SAFSAF à Skikda par HEC-HMS. Les données nécessaires pour l'obtention des résultats sous HEC-HMS sont la hauteur de pluie tirée des courbes IDF de la station pluviométrique de Skikda pour la période de 1999-2018. L'occupation de sol était traitée à partir de Google-Earth.

III.1. Résultats de simulation de la zone d'étude par HEC-HMS

Les fichiers d'entrée du projet HEC-HMS ont été développés à l'aide de HEC-GeoHMS, ce qui permet de copier toutes les données de prétraitement du terrain dans le projet HEC-HMS, l'extraction des caractéristiques des bassins et des cours d'eau telles que la longueur, les élévations en amont et en aval et les pentes de l'oued et l'estimation des paramètres hydrologiques, tels que le nombre de courbes, le pourcentage des valeurs initiales de la zone imperméable et du temps de concentration tels que le traitement du bassin.

L'extension HEC-GeoHMS d'ArcGIS a été utilisée pour délimiter le bassin versant de l'oued SAFSAF en considérant le point de sortie du bassin versant de l'oued SAFSAF. Le traitement ultérieur du modèle numérique de terrain (MNT) par HEC-GeoHMS a produit Onze sous-bassins, cinq tronçons de routage, cinq jonctions et les principales caractéristiques physiographiques du bassin versant, comme illustré sur la figure (III.1) et sur le tableau (III.1).

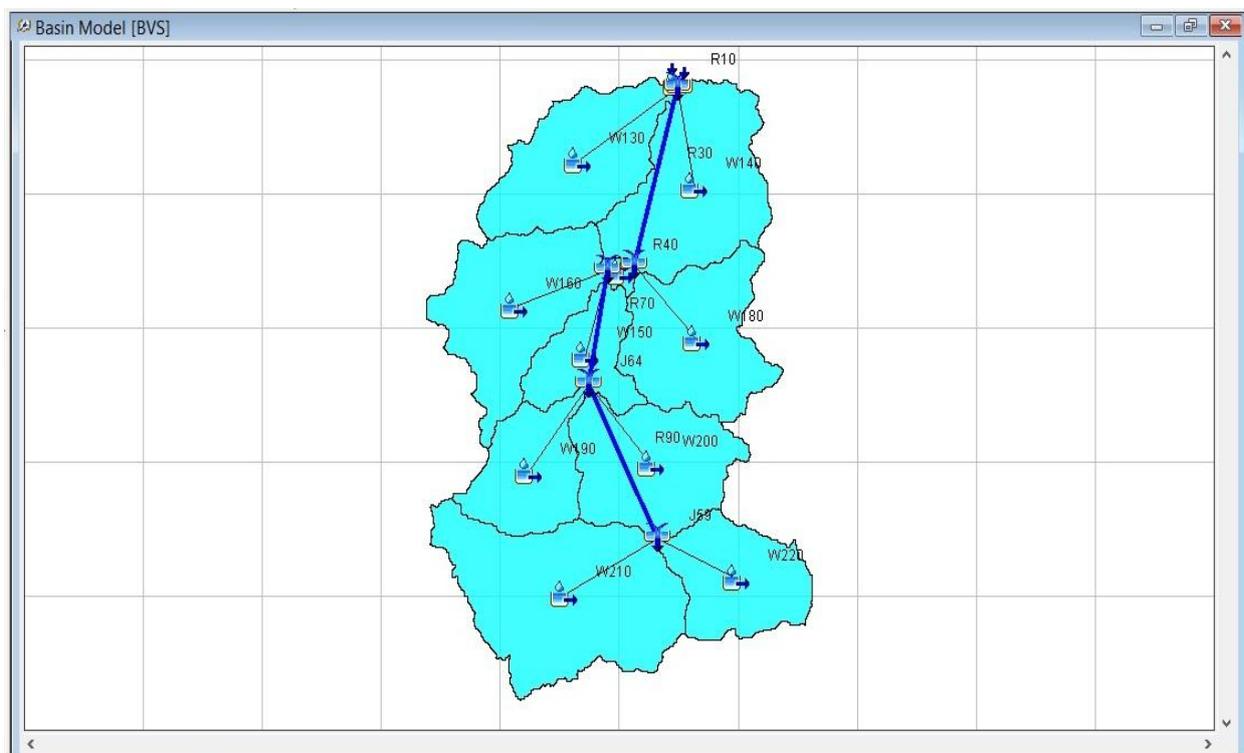


Figure III.1 : La zone d'étude sous HEC-HMS

Tableau III.1: Caractéristiques des sous bassins

Sous bassin	Surface (km ²)	CN	Lag - time (min)	Pente (%)
W 220	96.02	61.59	176.541416	6.36
W 210	221.57	61.75	195.057838	18.99
W 200	128.94	59.57	243.376927	14.68
W 190	84.90	62.35	260.76073	10.038
W 180	131.95	68.37	234.275068	10.76
W170	5.34	72.10	252.70933	7.29
W 160	142.39	66.90	233.645903	15.01
W 150	63.26	70.45	69.9075106	17.74
W 140	158.65	69.35	244.717295	22.13
W 130	131.78	67.92	239.426216	19.02
W 120	0.51	82.05	21.74998	21.68

III.2.1. Caractéristiques du sous bassin W220

Les résultats de simulation obtenus après l'application du modèle de perte par infiltration SCS-CN et la méthode de transfert d'hydrogramme unitaire de SCS sont illustrés ci-dessous

Tableau III.2 : Résultats de simulation du sous bassin W220

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
15h 30	125.5	118,66	86,95	31.71

On remarque une perte qui agence les 73 % ce qui donne l'impression que le sous bassin n'est pas urbanisé duquel le CN est de 61.59. La figure (III.2) illustre l'hydrogramme de crue du sous bassin W220. L'allure de la courbe d'ascension est plat pendant 12h de temps, après une ascension rapide de la courbe ce qui signifié une saturation de sol, le pic atteint un débit de 125.50 m³/s avec un temps de pic de 15h30. La courbe de la décrue n'est pas rapide et lente à partir 23h de temps.

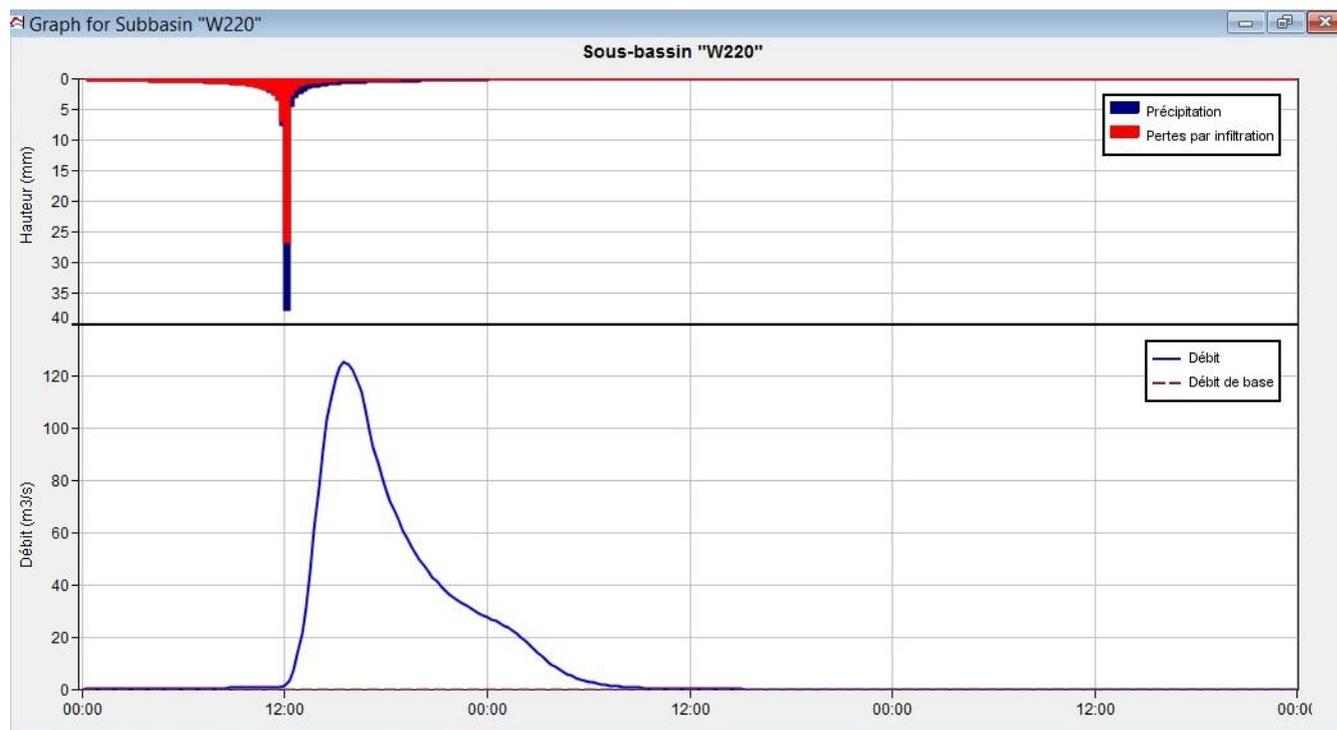


Figure III.2 : Hydrogramme de crue du BV W220

III.2.2. Caractéristiques du sous bassin W210

Les pertes par infiltration atteignent 86.69 mm (Tableau III.3), ce qui représente 73.05 % de la pluie totale, le sol du sous bassin W210 a une grande capacité d'infiltration à cause de sa nature agricole et forestière où CN est de 61.75. La figure (III.3) illustre l'hydrogramme de crue du sous bassin W210. L'allure de la courbe d'ascension est plat pendant 12h de temps, après une ascension rapide de la courbe ce qui signifie une saturation de sol, le pic atteint un débit de 271.40 m³/s avec un temps de pic de 15h45. La courbe de la décrue n'est pas rapide et lente à partir de 23h de temps.

Tableau III.3 : Résultats de simulation du sous bassin W210

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
15h 45	271,40	118,66	86.69	31.97

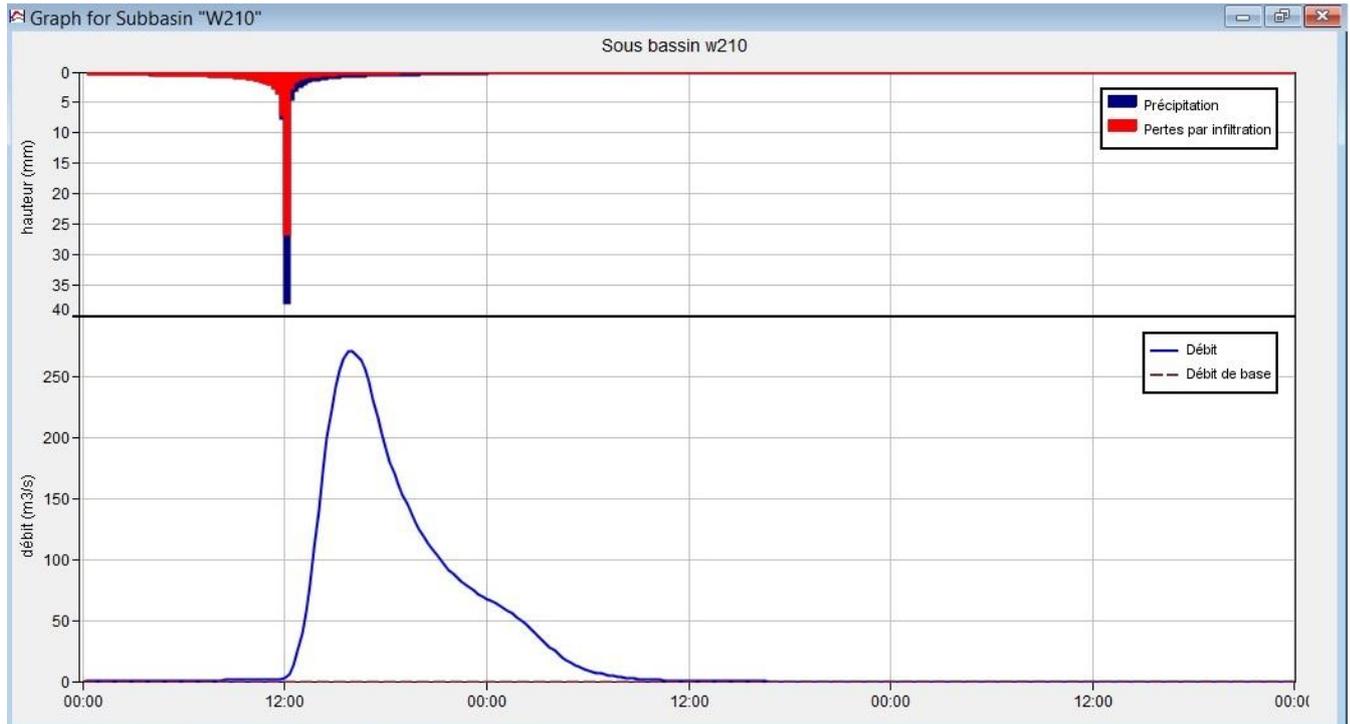


Figure III.3 : Hydrogramme de crue du BV W210

III.2.3. Caractéristiques du sous bassin W200

Les pertes par infiltration atteignent 88.31 mm (Tableau III.4), ce qui représente 74.42 % de la pluie totale, le sol du sous bassin W200 a une grande capacité d'infiltration à cause de sa nature agricole et forestière où CN est de 59.57. La figure (III.4) illustre l'hydrogramme de crue du sous bassin W200. L'allure de la courbe d'ascension est plat pendant 12h de temps, après une ascension rapide de la courbe ce qui signifie une saturation de sol, le pic atteint un débit de 125.50 m³/s avec un temps de pic de 16h45. La courbe de la décrue n'est pas rapide et lente à partir de 23h de temps. Le temps de pic du sous bassin W200 est plus grand d'une 1h du temps de pic du sous bassin W210 et 1h15 du sous bassin W220.

Tableau III.4 : Résultats de simulation du sous bassin W200

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
16h45	125.50	118,66	88,31	30,35

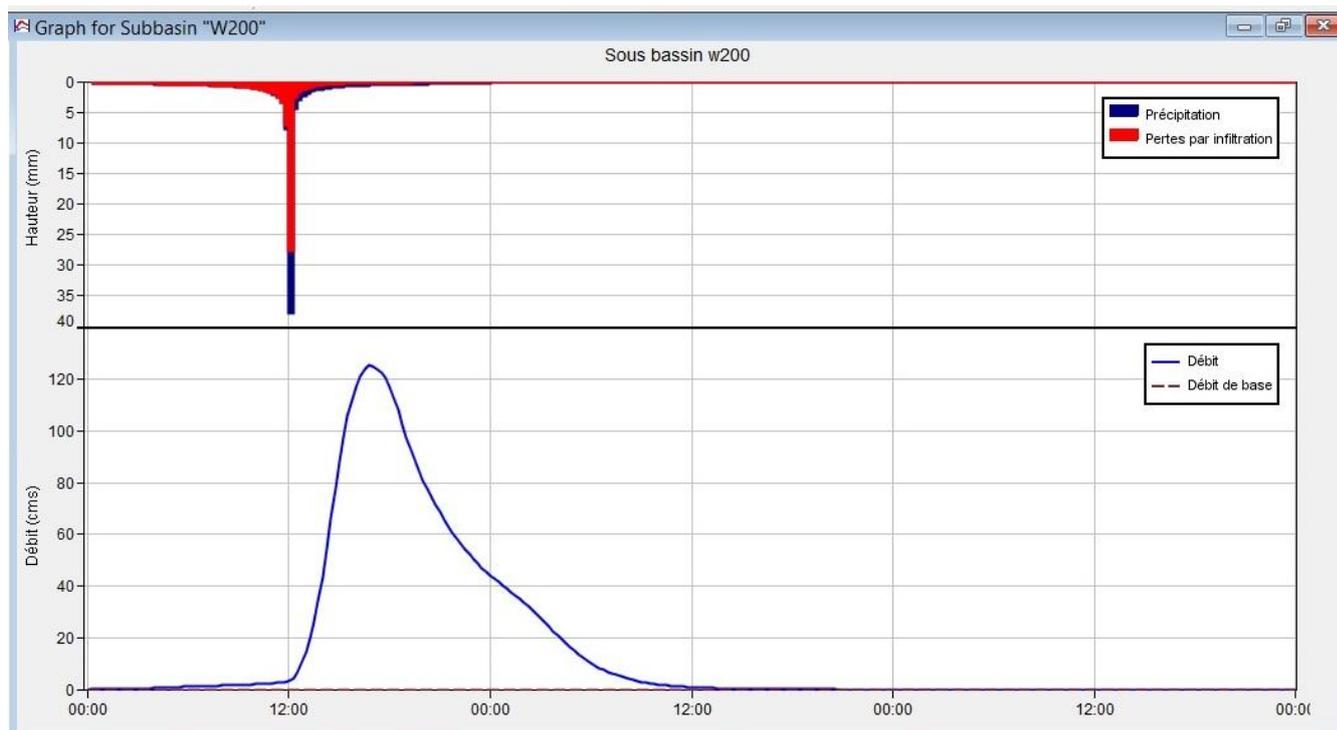


Figure III.4 : Hydrogramme de crue du BV W200

III.2.4. Caractéristiques du sous bassin W190

Les pertes par infiltration du sous bassin W190 représente 69.32 % de la pluie totale, donc une perte de 82.26 mm (tableau III.5), le sol du sous bassin W210 a une grande capacité d’infiltration à cause de sa nature agricole et forestière où CN est de 62.35. La figure (III.5) illustre l’hydrogramme de crue du sous bassin W190. L’allure de la courbe d’ascension est plat pendant 12h de temps, après une ascension rapide de la courbe ce qui signifié une saturation de sol, le pic atteint un débit de 96.40 m³/s avec un temps de pic de 17h00. La courbe de la décrue n’est pas rapide et lente à partir de 23h de temps. Le temps de pic du sous bassin W190 est plus grand de 15 minutes du temps de pic du sous bassin W200

Tableau III.5 : Résultats de simulation du sous bassin W190

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
17h00	96.40	118,66	82.26	36.40

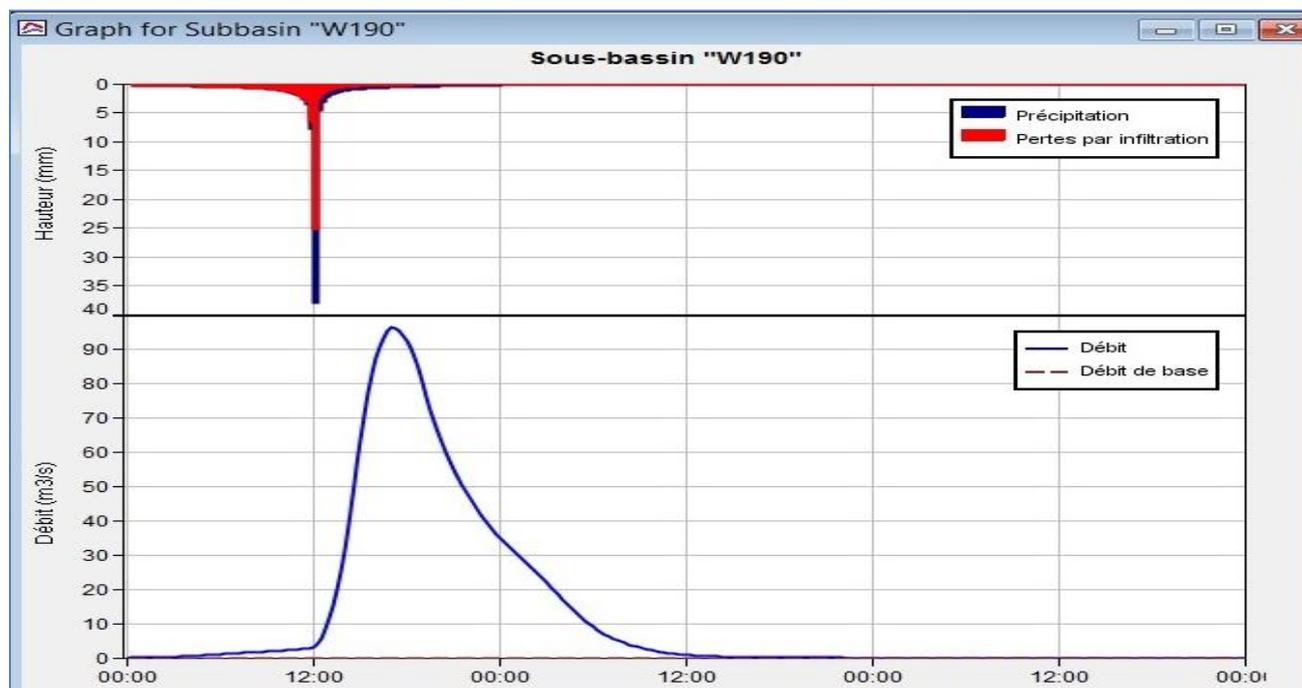


Figure III.5 : Hydrogramme de crue du BV W190

III.2.5. Caractéristiques du sous bassin W180

Les pertes par infiltration du sous bassin W180 représente 62.19 % de la pluie totale, donc une perte de 73.80 mm (tableau III.6), le sol du sous bassin W180 a une grande capacité d'infiltration à cause de sa nature agricole où CN est de 68.37. La figure (III.6) illustre l'hydrogramme de crue du sous bassin W180. L'allure de la courbe d'ascension est plat pendant 12h de temps, après une ascension rapide de la courbe ce qui signifié une saturation de sol, le pic atteint un débit de 208.80 m³/s avec un temps de pic de 17h00. La courbe de la décrue n'est pas rapide et lente à partir de 23h de temps. Le temps de pic du sous bassin W180 est plus petit de 30 minutes du temps de pic du sous bassin W190

Tableau III.6 : Résultats de simulation du sous bassin W180

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
16h 30	208.80	118,66	73.80	44.86

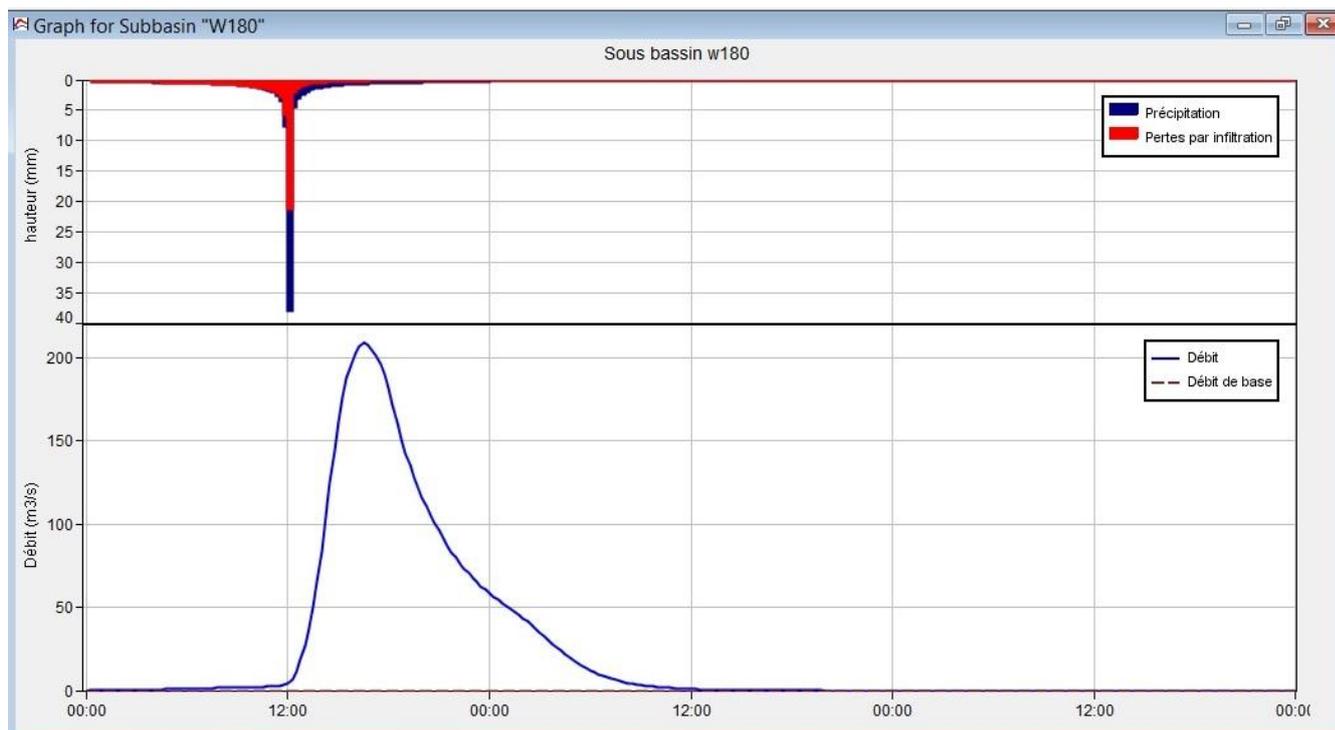


Figure III.6 : Hydrogramme de crue du BV W180

III.2.6. Caractéristiques du sous bassin W170

Les pertes par infiltration du sous bassin W170 représente 52.13 % de la pluie totale, donc une perte de 62.08 mm (tableau III.7), le sol du sous bassin W170 a une moyenne capacité d’infiltration à cause de sa nature agricole et urbaine où CN est de 72.10. La figure (III.7) illustre l’hydrogramme de crue du sous bassin W170. L’allure de la courbe d’ascension est plat pendant 12h de temps, après une ascension rapide de la courbe ce qui signifié une saturation de sol, le pic atteint un débit de 11.10 m³/s avec un temps de pic de 16h45, ce bassin est d’une superficie de 5.34 km². La courbe de la décrue n’est pas rapide et lente à partir de 23h de temps.

Tableau III.7 : Résultats de simulation du sous bassin W170

Temps pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
16h 45	11.10	118,66	62.08	56.58

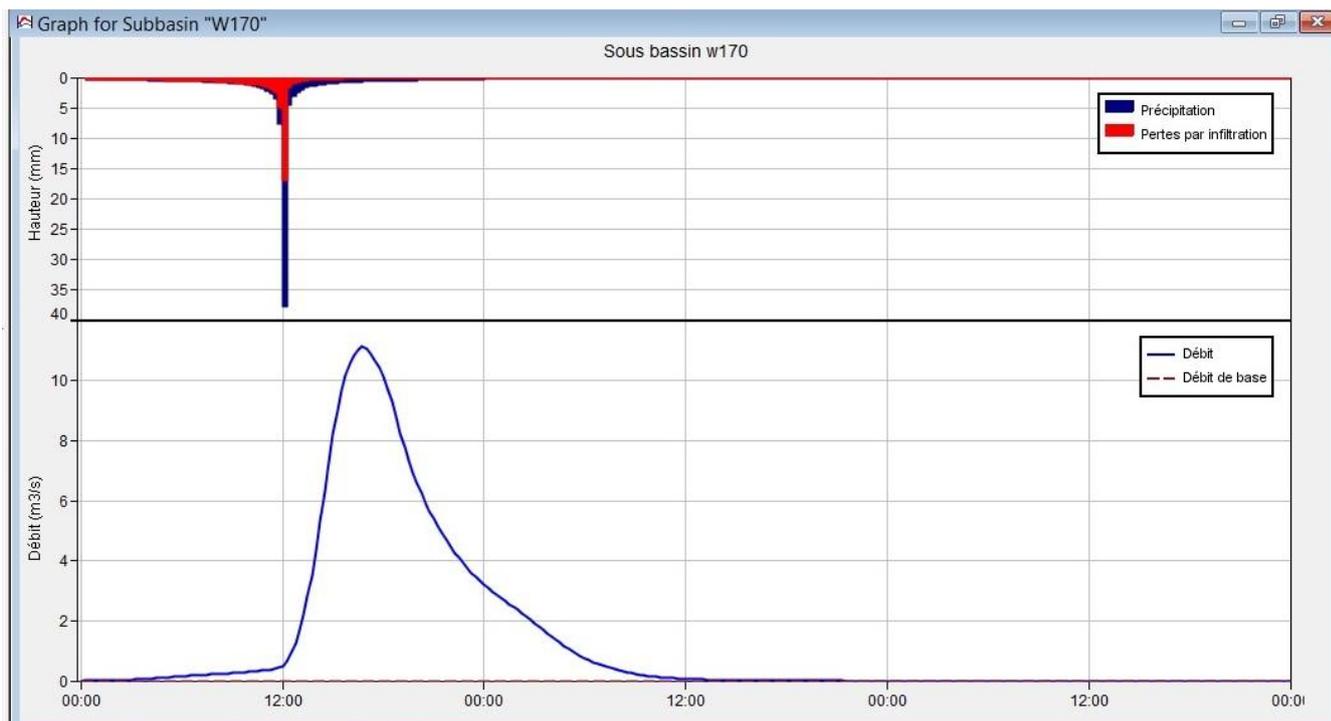


Figure III.7 : Hydrogramme de crue du BV W170

III.2.7. Caractéristiques du sous bassin W160

Les pertes par infiltration du sous bassin W160 représente 65.04 % de la pluie totale, donc une perte de 77.18 mm (tableau III.8), le sol du sous bassin W160 a une moyenne capacité d’infiltration à cause de sa nature agricole où CN est de 66.90. La figure (III.8) illustre l’hydrogramme de crue du sous bassin W160. L’allure de la courbe d’ascension est plat pendant 12h de temps, après une ascension rapide de la courbe ce qui signifié une saturation de sol, le pic atteint un débit de 207.70 m³/s avec un temps de pic de 16h30, ce bassin est d’une superficie de 142.39 km². La courbe de la décrue n’est pas rapide et lente à partir de 23h de temps.

Tableau III.8 : Résultats de simulation du sous bassin W160

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
16h 30	207.70	118,66	77.18	41.48

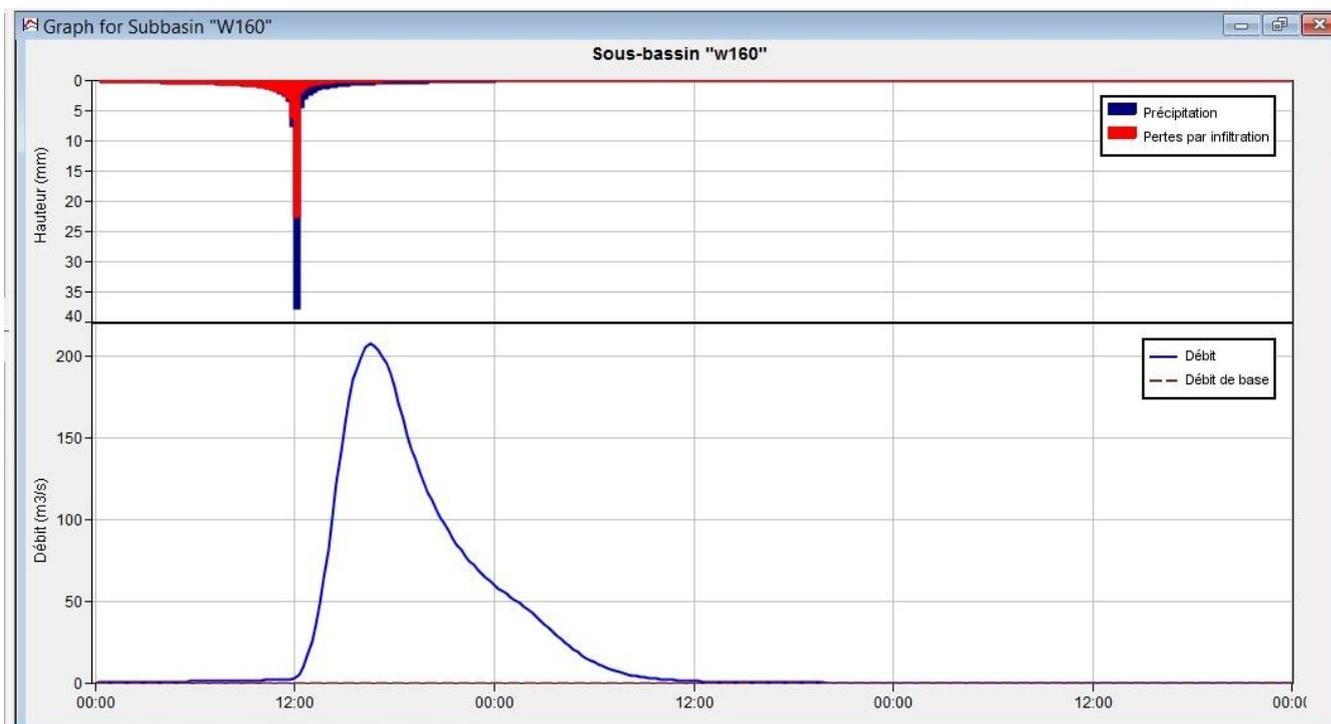


Figure III.8 : Hydrogramme de crue du BV W160

III.2.8.Caractéristiques du sous bassin W150

Les pertes par infiltration du sous bassin W150 représente 59.00 % de la pluie totale, donc une perte de 70.01 mm (tableau III.9), le sol du sous bassin W150 a une moyenne capacité d’infiltration à cause de sa nature agricole et urbaine où CN est de 70.45. La figure (III.9) illustre l’hydrogramme de crue du sous bassin W150. L’allure de la courbe d’ascension est plat pendant 12h de temps, après une ascension très rapide de la courbe ce qui signifié une saturation de sol, le pic atteint un débit de 266.10 m³/s avec un temps de pic de 13h30. La courbe de la décrue est rapide jusqu’à 18h de temps à cause de la nature urbaine de cette partie du sous bassin et lente au-delà de 18h de temps.

Tableau III.9 : Résultats de simulation du sous bassin W150

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
13h 30	266.10	118,66	70.01	48.65

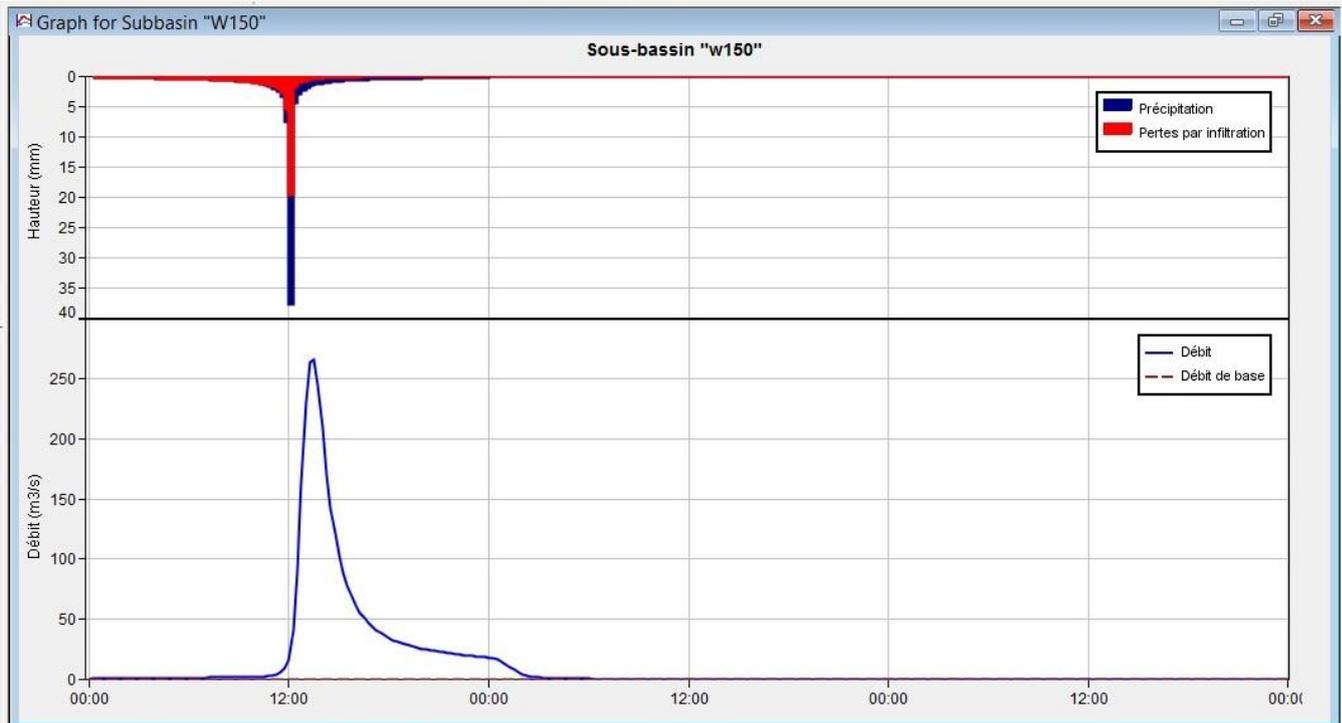


Figure III.9: Hydrogramme de crue du BV W150

III.2.9.Caractéristiques du sous bassin W140

Les pertes par infiltration du sous bassin W140 représente 46.93 % de la pluie totale, donc une perte de 55.69 mm (tableau III.10), le sol du sous bassin W140 a une moyenne capacité d’infiltration à cause de sa nature agricole et urbaine et sa topographie très accidentée qui est de 22% de pente où CN est de 69.35. La figure (III.10) illustre l’hydrogramme de crue du sous bassin W140. L’allure de la courbe d’ascension est en ascension faible jusqu’ à 12h de temps, après une ascension très rapide de la courbe ce qui signifié une saturation de sol, le pic atteint un débit de 336.40 m³/s avec un temps de pic de 15h30. La courbe de la décrue moyennement rapide jusqu’à 23h de temps à cause de la nature urbaine de cette partie du sous bassin et lente au-delà de 23h de temps.

Tableau III.10 : Résultats de simulation du sous bassin W140

Temps de pic	Débit de pointe (m³/s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
15h 30	336.40	118,66	55.69	62.97

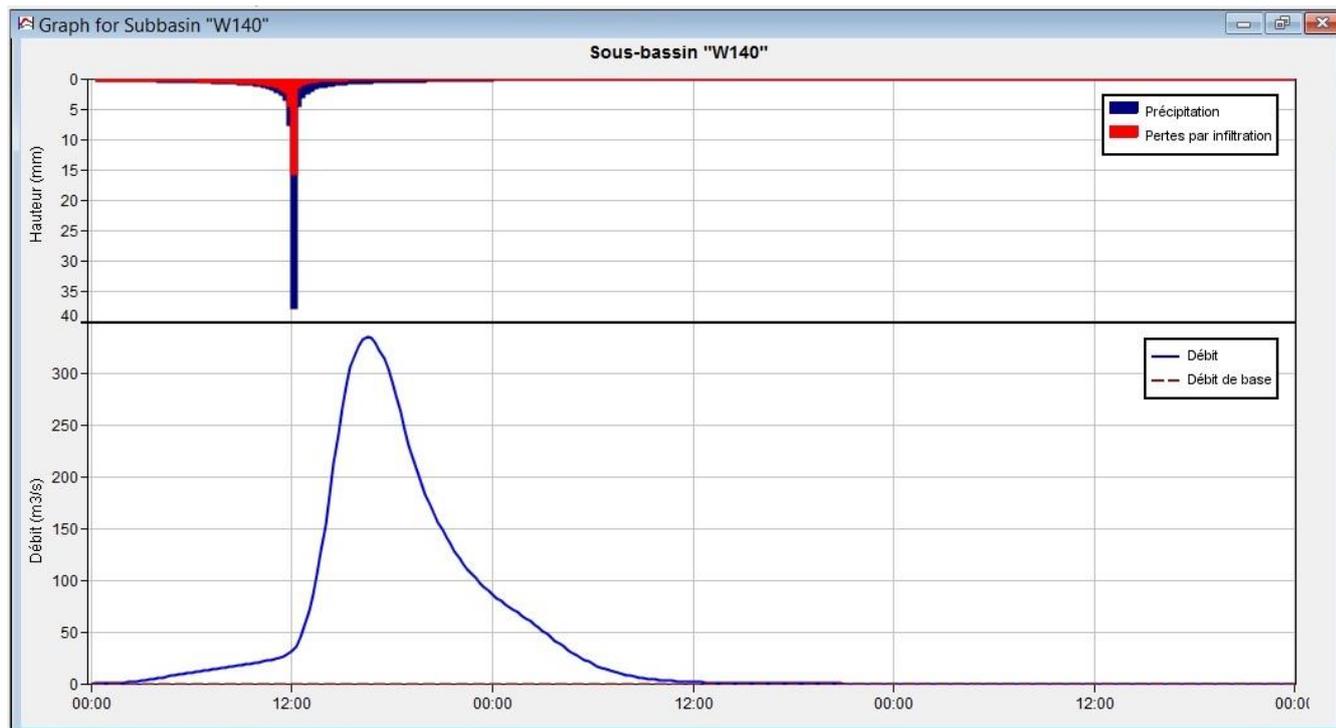


Figure III.10 : Hydrogramme de crue du BV W140

III.2.10. Caractéristiques du sous bassin W130

Les pertes par infiltration du sous bassin W130 représente 51.85 % de la pluie totale, donc une perte de 55.69 mm (tableau III.11), le sol du sous bassin W130 a une moyenne capacité d’infiltration à cause de sa nature agricole, forestière et urbaine où CN est de 67.92. La figure (III.11) illustre l’hydrogramme de crue du sous bassin W130. L’allure de la courbe d’ascension est en ascension faible jusqu’ à 12h de temps, après une ascension très rapide de la courbe ce qui signifié une saturation de sol, le pic atteint un débit de 257.00 m³/s avec un temps de pic de 16h30. La courbe de la décrue moyennement rapide jusqu’à 23h de temps à cause de la nature urbaine de cette partie du sous bassin et lente au-delà de 23h de temps.

Tableau III.11 : Résultats de simulation du sous bassin W130

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
16h 30	257.00	118,66	61.53	57.13

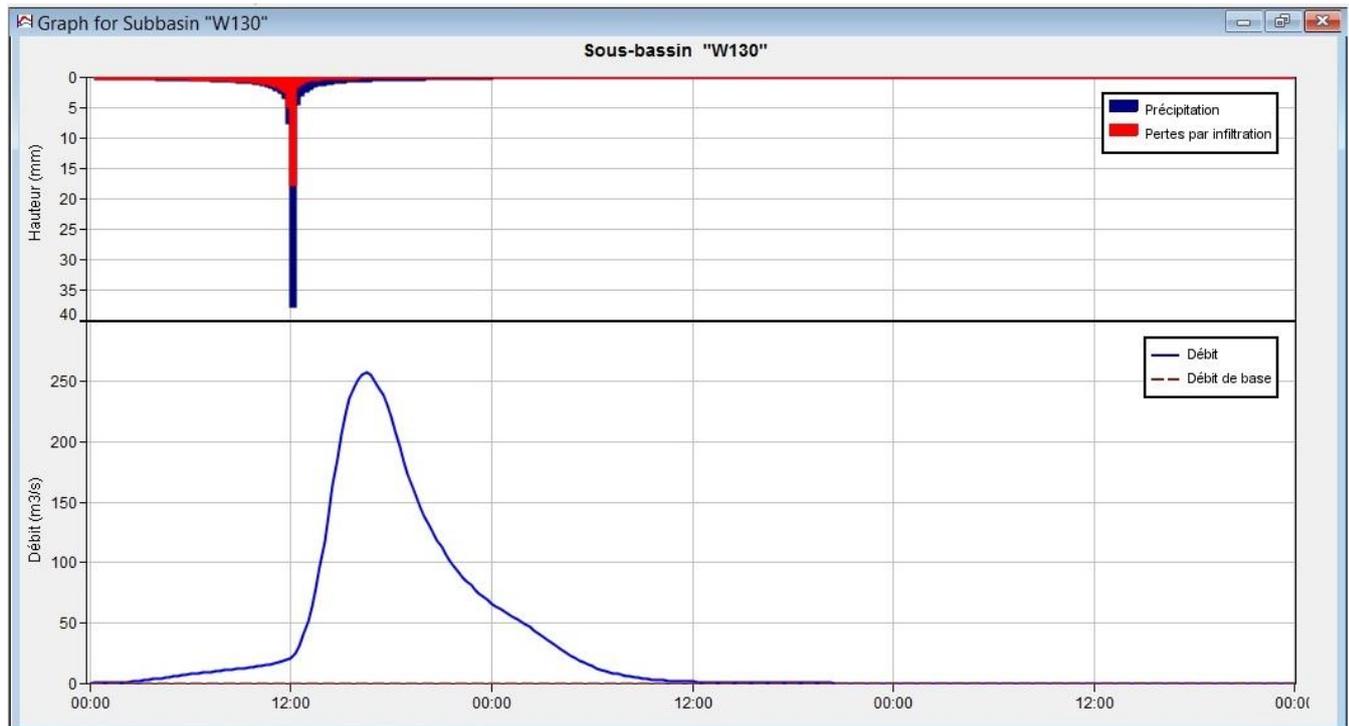


Figure III.11: Hydrogramme de crue du BV W130

III.2.11. Caractéristiques du sous bassin W120

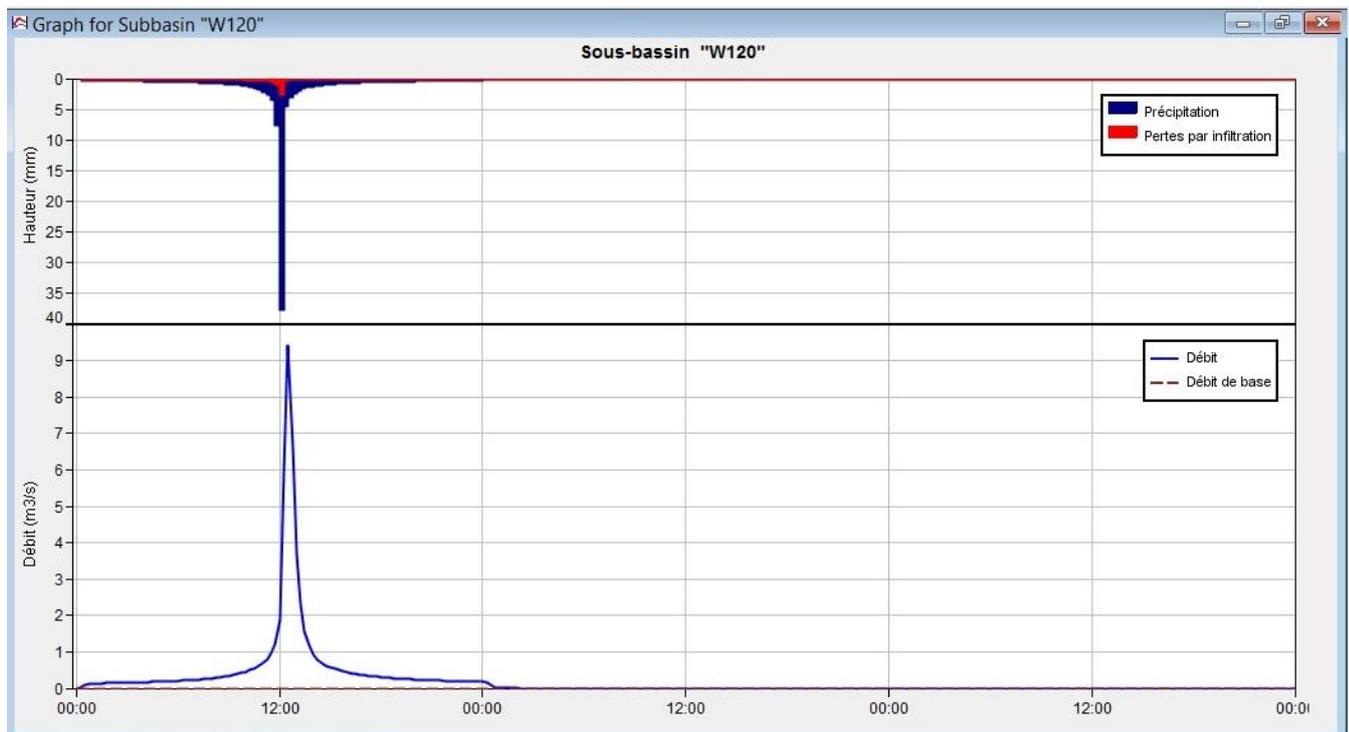


Figure III.12 : Hydrogramme de crue du BV W120

Les pertes par infiltration du sous bassin W120 représente 10.06 % de la pluie totale, donc une perte de 11.94 mm (tableau III.12), le sol du sous bassin W120 a une très faible capacité

d'infiltration à cause de sa nature urbaine qui représente 75 % du sous bassin où CN est de 82.05. La figure (III.12) illustre l'hydrogramme de crue du sous bassin W120. L'allure de la courbe d'ascension est très rapide ce qui signifié une grande saturation de sol, le pic atteint un débit de 9.40 m³/s avec un temps de pic de 12h30. La courbe de la décrue est très rapide.

Tableau III.12 : Résultats de simulation du sous bassin W120

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Précipitation totale (mm)	Perte totale (mm)	Pluie nette (mm)
12h30	9.40	118,66	11.94	106.72

III.3. Débit à l'exutoire

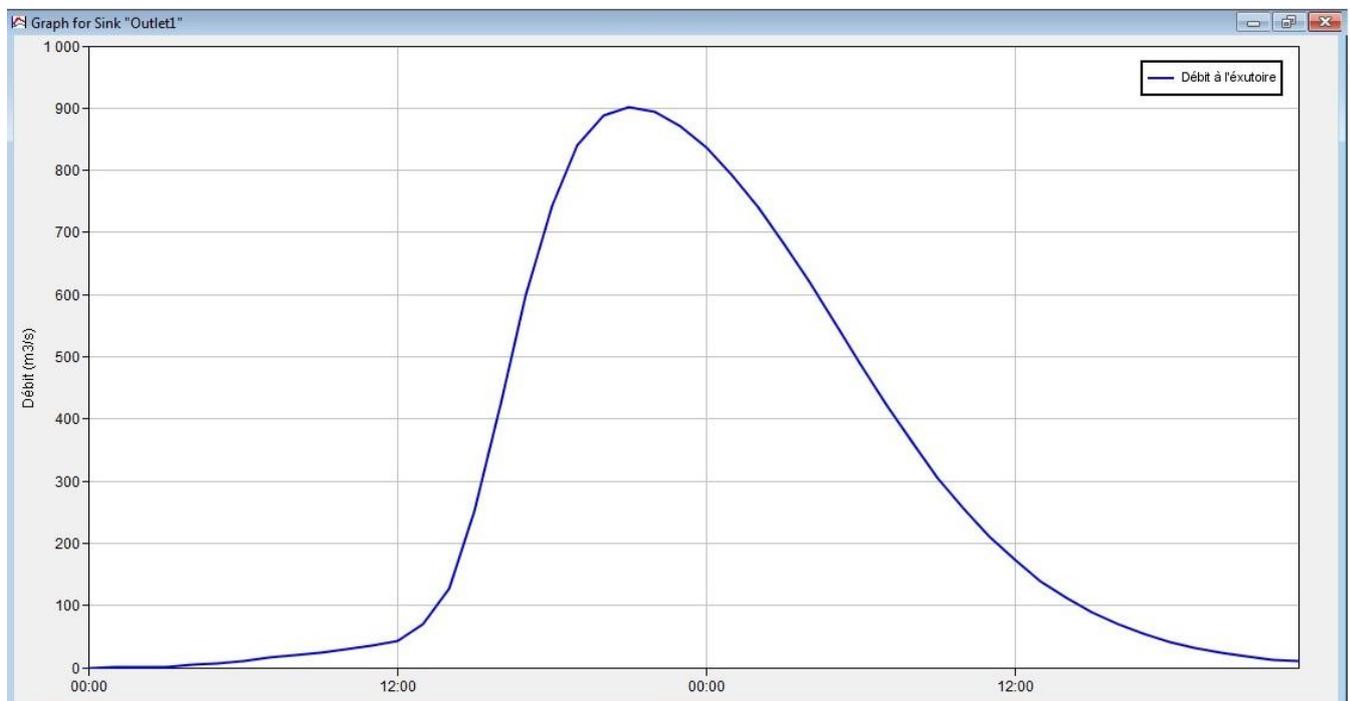


Figure III.13 : Hydrogramme de crue à l'exutoire

Tableau III.13 : Résultats de simulation du débit à l'exutoire

Temps de pic	Débit de pointe (m ³ /s)	Volume ruisselé (mm)
21h00	901.50	42.74

La figure (III.13) illustre l'hydrogramme de crue à l'exutoire. Le débit simulé est de l'ordre de 901.5 m³/s avec un temps de pic très important de 21h qui indique la grande surface du bassin de l'oued de SAFSAF qui est de 1165,82 km²

III.4. Etude de la performance du modèle

Deux fonctions objectives ont été utilisées dans l'optimisation des paramètres du modèle hydrologique (CN et lag time) à savoir : L'erreur moyenne quadratique (RMSE) et le pourcentage d'erreur du débit de pointe (PEPD). Dans cette partie l'optimisation a été appliquée sur le sous bassin versant W220 qui est doté d'une station de jaugeage de KHMAKHAM. A partir de cette station nous avons pu construire l'hydrogramme de crue observé pendant la période de 1 et 2 janvier 2019.

III.4.1. Optimisation par la fonction objective RMSE

La figure (V.14) illustre une optimisation des données de l'hydrogramme simulé et l'hydrogramme observé ; la différence entre débit simulé et observé (Tableau III.14) est estimée à 17 m³/s (17.30 %), et le volume ruisselé est de - 6 mm (- 17.65 %), avec une différence de temps de pic estimée à 30 minutes.

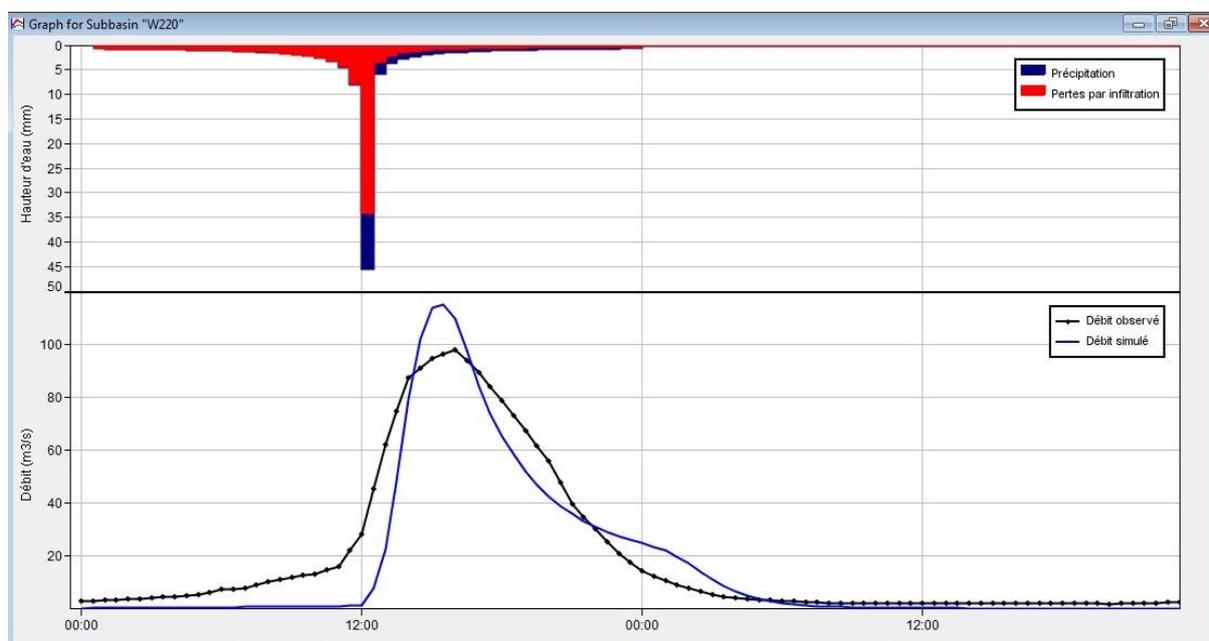


Figure III. 14 : Optimisation des résultats des débits simulés et observés par la méthode RMSE

Dans la modélisation pluie-débit de la zone d'étude, les paramètres de nombre de courbes (CN), Lag time montrent une grande variabilité. Ces résultats démontrent l'impact de la topographie du bassin, du type de sol, de l'occupation des sols et d'autres caractéristiques du bassin versant (tableau III.15).

Tableau III.14 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W220 » par RMSE

Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume (mm)	28	34	-6	-17.65
Débit de pointe (m³/s)	115	98	17	17.3
Temps de pic (h)	15h30	16h00		

Tableau III. 15 : Optimisation des paramètres CN et Lag par RMSE

Elément	Paramètre	Unité	Valeur initiale	Valeur optimisée	Différence	Différence %
W220	SCS-CN		61.59	59.46	2.13	3.46
W220	Lag time	Min	176.54	157.14	19.40	11.00

La comparaison de l'hydrogramme observé et simulé et de la performance du modèle (NSE = 0,85) a montré que le modèle était approprié pour les simulations hydrologiques dans le bassin versant de l'oued SAFSAF (Figure III.15).

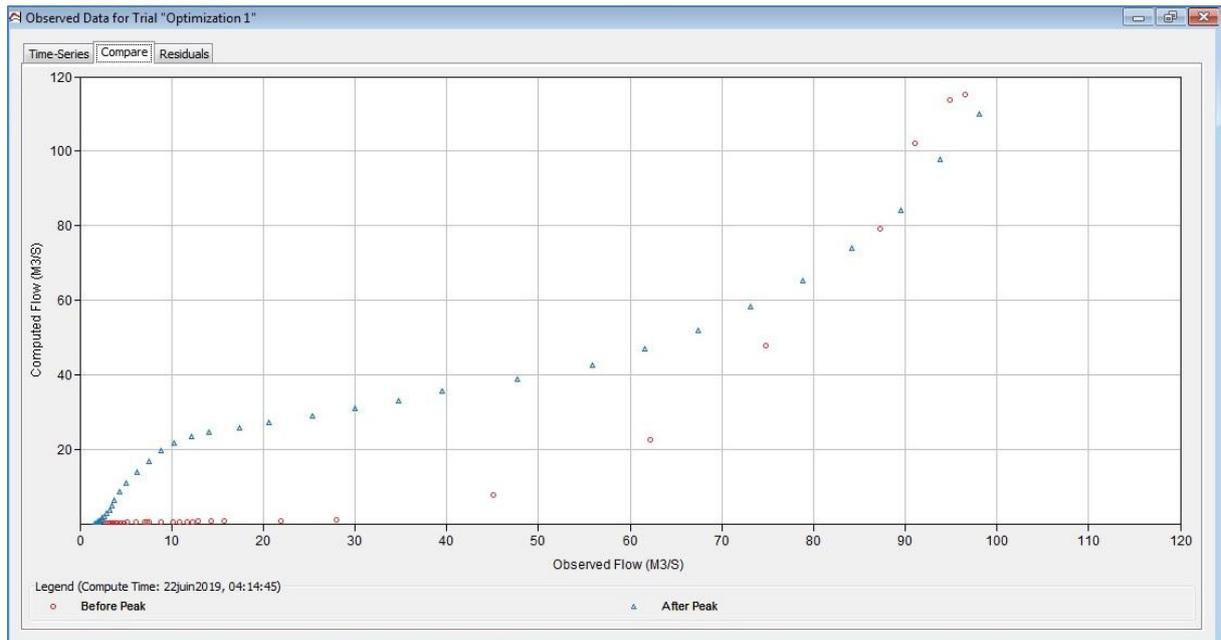


Figure III. 15: Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par RMSE

La variation du débit résiduel (Figure III.16) montre que la différence entre les débits observés et simulés varie entre des valeurs négatives et positives, duquel la valeur maximale est de 17.30 m³/s (Tableau III.14).

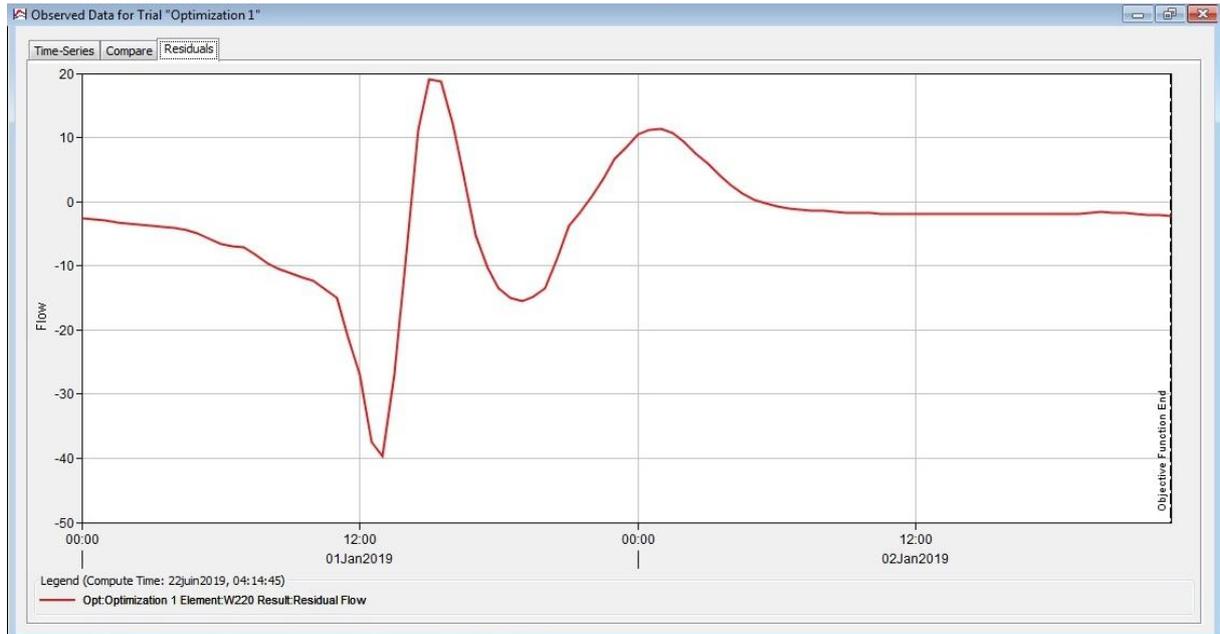


Figure III. 16: Débit résiduel optimisé par RMSE

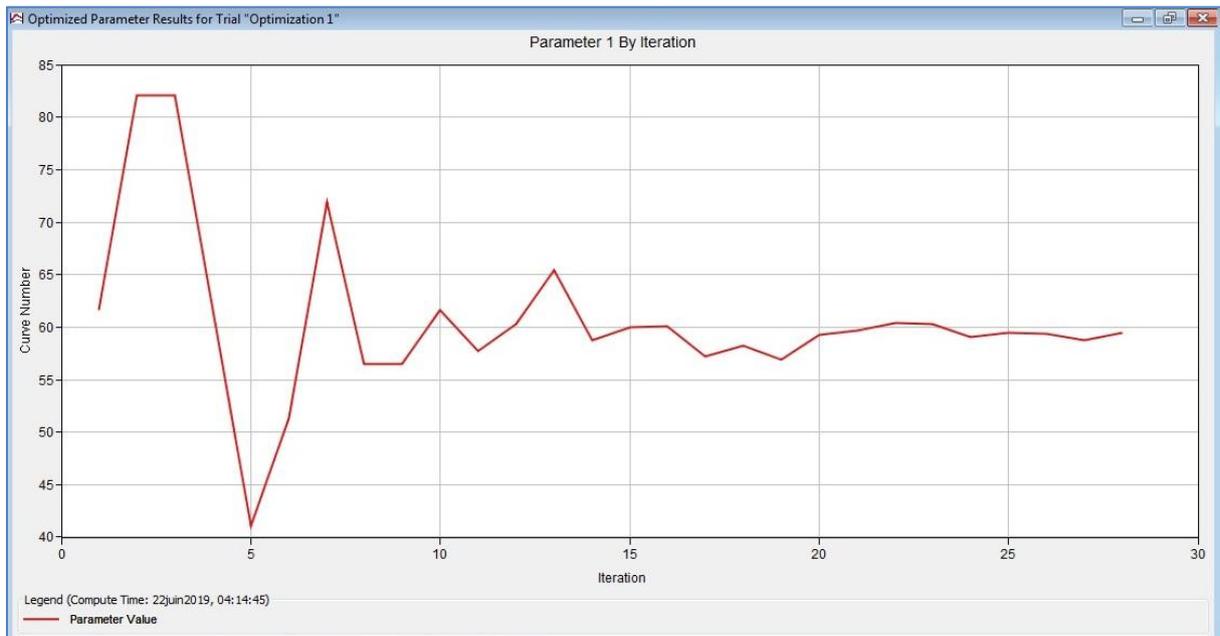


Figure III. 17: Optimisation du Curve Number par RMSE

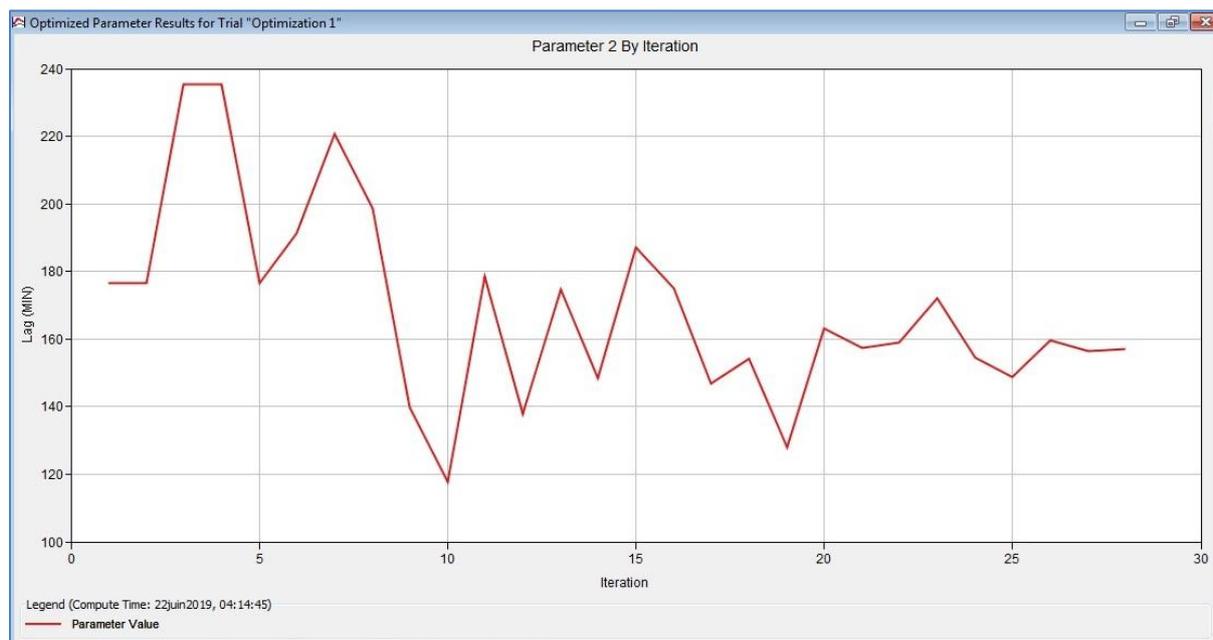


Figure III. 18: Optimisation du Lag time par RMSE

L’optimisation par la fonction objectif RMSE pour le paramètre de nombre de courbes (CN) montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 59.46 pour un lag time optimisé de 157.14 min (tableau III.15)

III.4.2. Optimisation par la fonction objective PEPD

La figure (III.19) illustre une optimisation des données de l’hydrogramme simulé et l’hydrogramme observé ; la différence entre débit simulé et observé (Tableau III.16) est estimé à zéro, et le volume ruisselé est de - 5 mm (- 14.71 %), avec une différence de temps de pic estimée à 30 minutes.

Tableau III. 16 : Optimisation de la réponse du sous bassin « W220 » par PEPD

Mesures	Simulé	Observé	Différence	Différence %
Volume (mm)	29	34	-5	-14.71
Débit de pointe (m3/s)	98	98	0	0
Temps de pic (h)	16h30	16h00		

Tableau III.17 : Optimisation des paramètres CN et Lag par PEPD

Elément	Paramètre	Unité	Valeur initiale	Valeur optimisée	Différence	Différence %
W220	SCS-CN		61.59	60.32	1.27	2.06
W220	Lag time	Min	176.54	217.10	-40.56	-18.68

Dans la modélisation pluie-débit de la zone d'étude, le paramètres de nombre de courbes (CN), Lag time montrent une grande variabilité. Ces résultats démontrent l'impact de la

topographie du bassin, du type de sol, de l'occupation des sols et d'autres caractéristiques du bassin versant (tableau III.17).

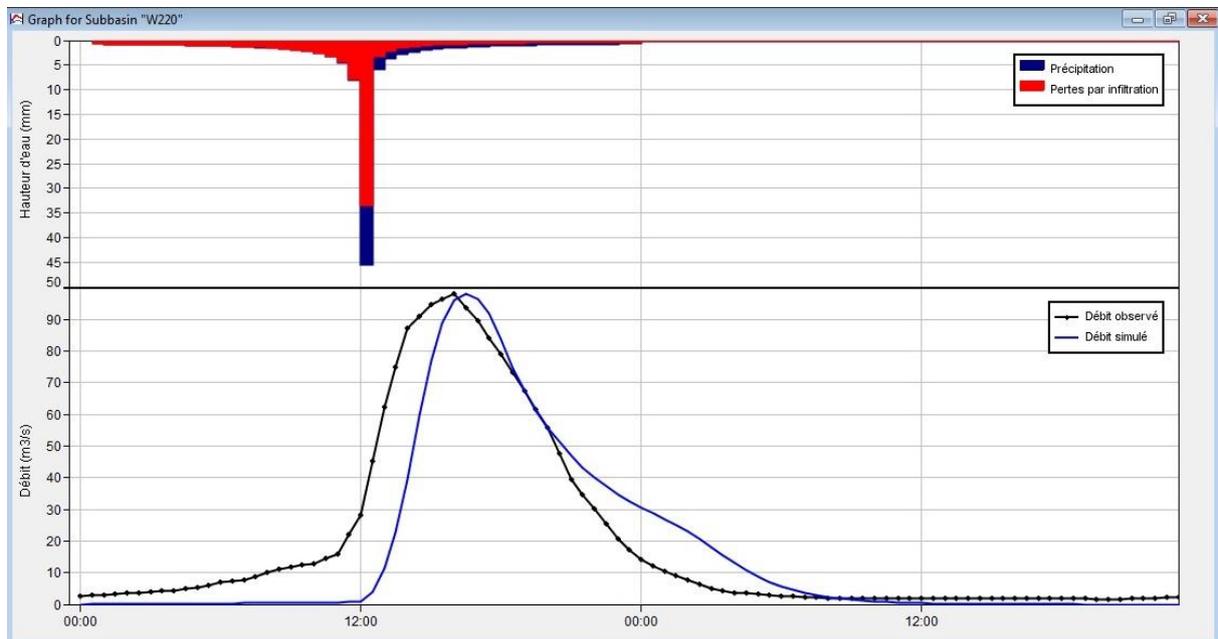


Figure III. 19 : Optimisation des résultats par la méthode PEPD

La comparaison de l'hydrogramme observé et simulé et de la performance du modèle (NSE = 0,85) a montré que le modèle était approprié pour les simulations hydrologiques dans le bassin versant de l'oued SAFSAF (Figure III.20).

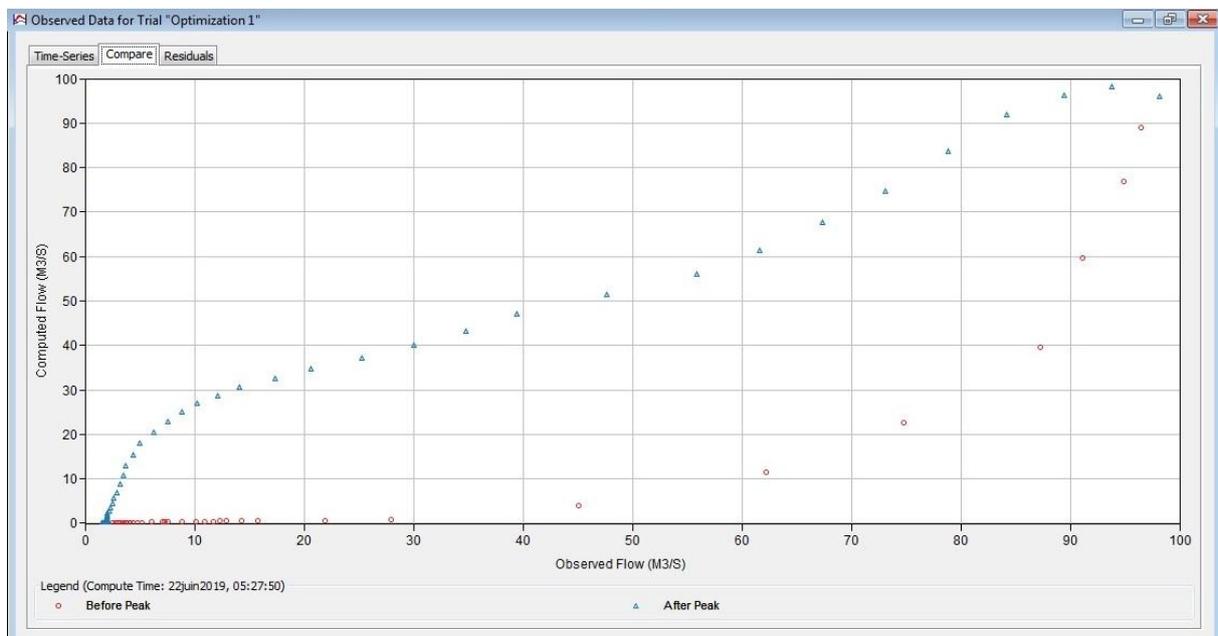


Figure III. 20: Corrélation entre le débit observé vs débit simulé par PEPD

La variation du débit résiduel (Figure III.21) montre que la différence entre les débits observés et simulés variée entre des valeurs négatives et positives, duquel la valeur maximale est de zéro (Tableau III.16).

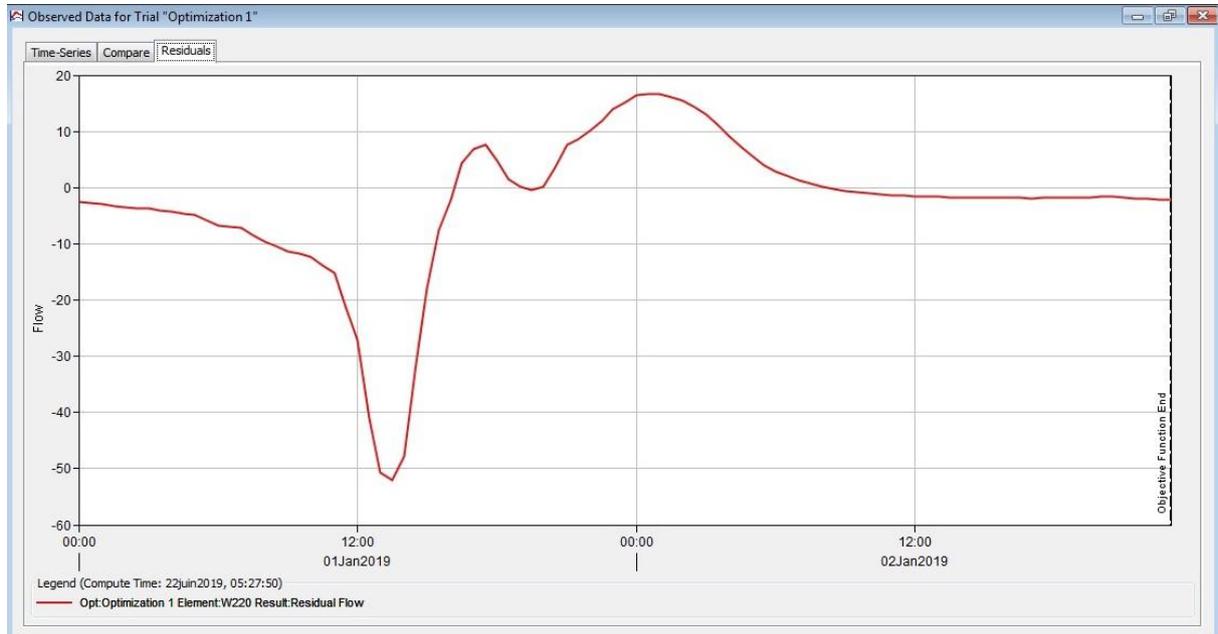


Figure III. 21: Débit résiduel optimisé par PEPD

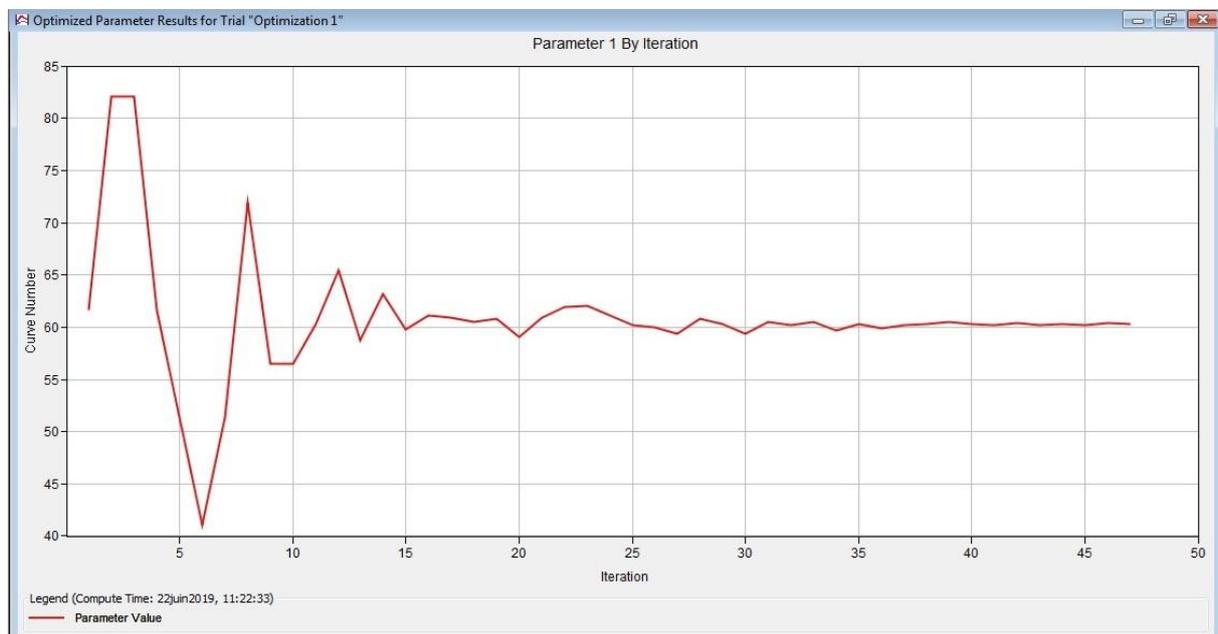


Figure III. 22: Optimisation du Curve Number par PEPD

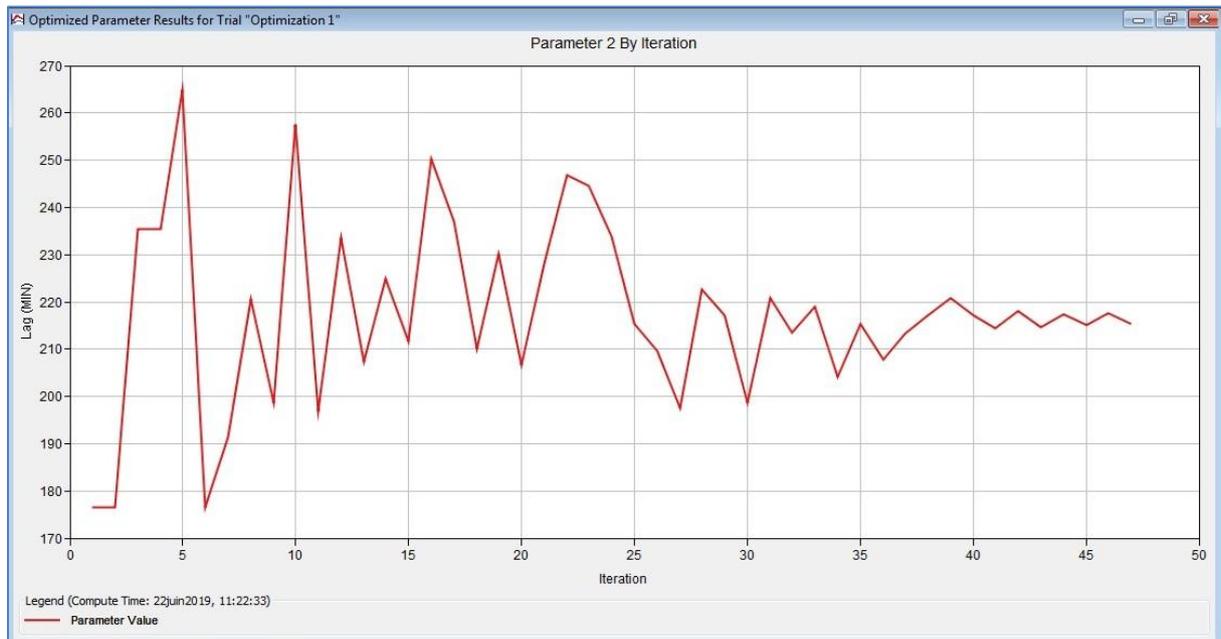


Figure III. 23: Optimisation du Lag time par PEPD

L'optimisation par la fonction objectif PEPD pour le paramètre de nombre de courbes (CN) montre que la valeur optimisée du CN est idéale à la valeur 60.32 pour un lag time optimisé de 217.10 min (tableau III.17).

III.5. Comparaison entre les fonctions objectives RMSE et PEPD

L'optimisation des paramètres CN et lag time par les deux fonctions objectifs RMSE et PEPD a montré que le CN est très sensible dans le cas de la fonction objectif PEPD (2.06 %) illustrée dans le tableau (III.17) par rapport à la fonction objectif RMSE (3.46 %) illustrée dans le tableau (III.15). Par contre Lag time est très sensible dans le cas de la fonction objectif RMSE (11.00 %) illustrée dans le tableau (III.15) par rapport à la fonction objectif PEPD (-18.68) illustrée dans le tableau (III.17).

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail traite la simulation pluie-débit dans le bassin versant de l'oued SAFSAF par le modèle HEC-HMS. Le modèle se base sur les caractéristiques hydrologiques, la topographie, le type de sol et l'occupation de sol de la zone d'étude. Les caractéristiques du bassin et les valeurs initiales ont été analysées à l'aide de HEC-GeoHMS dans ArcGIS afin de démarrer l'étude de performance de modèle. La simulation pluie-débit a été réalisée à l'aide d'événements extrêmes. Les premiers résultats ont montré qu'il existait une nette différence entre les débits et les volumes maximaux observés et simulés dans la zone d'étude. Par conséquent, la performance du modèle a été effectuée pour optimiser les paramètres. Pour connaître le paramètre le plus sensible dans la simulation, une analyse de sensibilité a été réalisée. Le modèle pluie-débit a été évalué en fonction de deux fonctions objectives à savoir le pourcentage d'erreur du débit de pointe (PEPD) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Les résultats de comparaison entre les débits simulés et les débits observés ont montré que le CN est très sensible dans le cas de la fonction objective PEPD (2.06 %) par rapport à la fonction objective RMSE (3.46 %). Par contre Lag time est très sensible dans le cas de la fonction objective RMSE (11.00 %) par rapport à la fonction objective PEPD (-18.68). Après optimisation, le débit de pointe et le volume de ruissellement optimisés par RMSE sont moins proches des observations avec une erreur de pic de (- 17.30 %) et une erreur de volume (- 17.65 %) . Par contre le débit de pointe optimisé par PEPD représente une erreur de pic de (0%) et le volume de ruissellement optimisé par PEPD est moins proche des observations avec une erreur de volume (-14.71 %). Enfin, la méthodologie développée dans ce travail peut également être appliquée dans d'autres bassins versants non jaugés et régions présentant des caractéristiques similaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

1. Abu El-Nasr, A., Arnold, J.G., Feyen, J. and Berlamont, J., 2005. Modeling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi distributed model. *Hydrological Processes* 19, 573–587.
2. Ahmadalipour, A.; Moradkhani, H. Analyzing the uncertainty of ensemble-based gridded observations inland surface simulations and drought assessment. *J. Hydrol.* 2017, 555, 557–568.
3. Ali, M.; Khan, S.J.; Aslam, I.; Khan, Z. Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of LaiNullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landsc. Urban Plan.* 2011, 102, 271–279.
4. Anshuman, A.; Eldho, T.I.; Poovakka, A.K. Performance Evaluation of SWAT with a Conceptual Rainfall Runoff Model GR4J for a Catchment in Upper Godavari River Basin; Indian Institute of Technology Bombay: Powai, India, 2018.
5. Bastidas, L. A., Gupta, H. V., Sorooshian, S., Shuttleworth, W. J., and Yang, Z. L.: Sensitivity analysis of a land surface scheme using multicriteria methods, *J. Geophys. Res.*, 104, 19 481–19 490, 1999.
6. Beven K., (2001), *Rainfall-Runoff modelling. The Primer.* John Wiley and Sons, Chichester, UK, 1-360 pp.
7. Beven, K.J. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer.* John Wiley & Sons: Chichester, UK; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2012.
8. Borah, D.K., 2011. Hydrologic procedures of storm event watershed models: A comprehensive review and comparison. *Hydrol. Processes* 25, 3472–3489
9. *Catchment Lake Res.* 2007, 6, 1–200.
10. Coron, L., Perrin, C., Michel, C., 2016. airGR: suite of GR hydrological models for precipitation-runoff modelling.
11. El Alfy, M. Assessing the impact of arid area urbanization on flash floods using GIS, remote sensing, and HEC-HMS rainfall-runoff modelling. *Hydrol. Res.* 2016, 47, 1142–1160.
12. forecasting on upland catchments of Blue Nile River Basin, a case study of Gilgel Abbay catchment.
13. Fourmigué, P. et Lavabre, J., 2005. Prédiction de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. *Revue des Sciences de l'Eau* 18(1), 87-102.
14. Ghumman, A.R.; Al-Salamah, I.S.; AlSaleem, S.S.; Haider, H. Evaluating the impact of lower resolutions of digital elevation model on rainfall-runoff modelling for ungauged catchments. *Environ. Monit. Assess* 2017, 189, 54.
15. Gupta, H.V.; Kling, H.; Yilmaz, K.K.; Martinez, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 2009, 377, 80–91.
16. Halwatura, D.; Najim, M.M.M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environ. Model. Softw.* 2013, 46, 155–162.
17. Ibiza (D.), 1988. Note complémentaire pour l'utilisation du modèle MODQJ (MODIBI). ORSTOM, Montpellier, multigr. 5 p.
18. Ibrahim-Bathis, K.; Ahmed, S.A. Rainfall-runoff modelling of Doddahalla watershed—An application of HEC-HMS and SCN-CN in the ungauged agricultural watershed. *Arab. J. Geosci.* 2016, 9, 170.
19. 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.
20. Makhoulouf, Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.
21. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L. and Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007). « Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations ». *Transactions of the ASABE*, Volume 50, n°3, p. 885-900.

22. Orellana B., Pechlivanidis I.G., McIntyre N., Wheeler H.S. and Wagener T., (2008), A toolbox for the identification of parsimonious semi-distributed rainfall-runoff models: Application to the Upper Lee catchment, in *iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software*, 1, 670-677, 7-10 July, Barcelona, Spain.
23. Pham, M.T.; Vernieuwe, H.; Baets, B.D.; Verhoest, N.E.C. A coupled stochastic rainfall–evapotranspiration model for hydrological impact analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018, 22, 1263–1283.
24. Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Andréassian, V. (2012). « A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations ». *Journal of Hydrology*, Volume 420-421, p. 171-182. DOI:10.1016/j.jhydrol.2011.11.055.
25. Singh V.P. and Frevert D., (2006), *Watershed models*. Boca Raton, Taylor & Francis.
26. US Army Corps of Engineers (2011) *Sustainable Solutions to America's Water Resources Needs*. Department of the Army, Corps of Engineers, Civil Works Strategic Plan 2011-2015. (May 2011).
27. Wagener T., Sivapalan M., Troch P. and Woods R., (2007), Catchment classification and hydrologic similarity, *Geography Compass*, 1(4), 901-931.
28. Wang, A.; Solomatine, D.P. Practical experience and framework for sensitivity analysis of hydrological models: six methods, three models, three criteria. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2018.
29. Wheeler H.S., (2002), Progress in and prospects for fluvial flood modelling. 360 (1796), *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*.
30. Yilma, H.M.; Moges, S.A. Application of semi-distributed conceptual hydrological model for flow