

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE
N° :



DOMAINE : TECHNOLOGIE
FILIERE :HYDRAULIQUE
OPTION : OUVRAGES HYDRAULIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Salhi Abdessalem

Intitulé

**Modélisation Pluie – Débit par l'application du
modèle hydrologique HEC HMS dans le bassin
versant du barrage de Beni Haroun**

Soutenu devant le jury composé de:

SAHLI Youcef	Université de M'sila	Examineur
BERGHOUT Ali	Université de M'sila	Examineur
MOKHTARI Elhadj	Université de M'sila	Encadreur

Année universitaire : 2020 /2021

REMERCIEMENT

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos vifs remerciements :

Avant tous, nous remercions ALLAH le tout puissant pour nous avoir donnée le courage et la patience pour mener à terme de ce travail.

*Nous tenons à remercier notre encadreur Dr : **Mokhtari Elhadj** pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon port.*

Au membre de jury ; pour avoir accepté de juger notre travail

Au Enseignants de Département Hydraulique pour leurs contributions à ma formation Master 2 en ouvrages hydraulique.

ملخص:

في هذا العمل قمنا بتقسيم حوض التجميع بني هارون إلى أحواض جزئية و تحديد الخصائص المورفولوجية و الهيدرولوجية و الجيولوجية لكل منها ثم قمنا بالنمذجة الهيدرولوجية لبيانات تساقط الأمطار اليومية لهذه الأحواض باستخدام برنامج HEC- HMS و يعتمد مبدأ عمله على إدخال بيانات تساقط الأمطار اليومية و التدفق اليومي و كذا المعطيات الفيزيائية (النفاذية المساحة الانحدار). لفهم سيناريو تحول الأمطار إلى سيول و معرفة الخصائص و التغيرات المتعلقة بالزمان و المكان للسيول الناتجة في مصب حوض التجميع.

Résume:

Notre travail consiste en premier lieu de définir les caractéristiques morpho métriques , hydro-climatologique et géologique des sous bassin du bassin versant de Beni Haroun; en second lieu on passe à la modélisation proprement dite par logiciel HEC-HMS .Ce dernier parmi les logiciels de modélisation hydrologique et sont principe de fonctionnement basé sur l'introduction des données pluviométriques journalières et hydrométriques (débit ponctuels) ainsi que ; les paramètres physiques du bassin versant (coefficient de perméabilité, surface, pente.....), pour comprendre le scénario de transformation pluie-débit et connaitre les caractéristiques et les variations spatiales et temporeles des débits engendrés en aval.

Abstract:

Our job is primarily to determine the morphometric characteristics, climate and hydro-geological basins in the watershed of Beni Haroun; secondly we go to the actual modeling HEC-HMS software.The latter among the hydrological modeling and are operating principle based on the introduvtion of daiy raindall and data (spot rates) and ; the physical parameters of the watershed (permeability, surface, slope.....) to understand the rainfall-runoff transformation scenario and know the characteristics and the spatial and temporal changes in downstream flows generated.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Recherche bibliographique sur les modèles hydrologiques

Introduction.....	2
I.1 Cycle hydrologique.....	2
I.2 Les modèles hydrologiques.....	4
I.3 Les différentes approches de la modélisation.....	6
I.3.1 Modèles stochastiques.....	6
I.3.2 Modèles déterministes.....	7
I.3.3 Modèles à base physique.....	7
I.3.4 Modèles paramétriques.....	7
I.3.5 Modèles empiriques.....	7
I.3.6 Modèles analytiques.....	8
I.3.7 Modèles conceptuels.....	8
I.3.8 Modèles globaux.....	9
I.3.9 Modèles Spatialisés.....	9
Conclusion.....	11

Chapitre II : Etude descriptive de la zone d'étude

Introduction.....	12
II.1 Localisation géographique et topographique.....	12
II.2 Morphologie du bassin.....	13
II.2.1 Caractéristiques physiques.....	13
II.2.1.1 Géologie du bassin.....	13
II.2.1.2 Impact de la géologie sur l'hydrologie.....	14
II.2.1.3 Végétation du bassin.....	14
II.2.2 Caractéristiques climatiques	14
II.2.2.1 La température.....	15
II.2.2.2 La précipitation.....	15
II.2.2.3 L'humidité et le vent.....	17
II.2.2.4 La pluviométrie.....	17
II.2.3 Caractéristiques hydrographiques du bassin.....	17

II.2.3.1	Caractéristiques morpho-métriques	18
II.2.3.2	Caractéristiques De Forme.....	18
II.2.3.2.1	Indice de compacité ou indice de Gravélius.....	18
II.2.3.2.2	Elancement « R_e »	18
II.2.3.2.3	Rectangle équivalent	19
II.2.3.2.4	Caractéristiques du relief	19
II.3	Paramètres du réseau hydrographique.....	24
II.3.1	Densité de drainage D_d	24
II.3.2	Coefficient de torrentialité (C_t)	25
II.3.3	Dénivelée spécifique D_s	25
II.4	Conclusion.....	27

Chapitre III : Description des logiciels Arc Gis, HEC-Géo HMS et HEC-HMS et Modélisation pluies débits par HEC HMS

Introduction.....	28
III.1 Découverte de HEC-HMS sous ArcGis.....	28
III.1.1 La description du modèle ArcGis.....	28
III.1.1.1 Présentation du logiciel ArcGi.....	28
III.1.1.2 Qu'est ce qu'ArcGIS ?.....	29
III.1.1.3 Couplage ArcGIS – HEC-GeoHMS.....	29
III.1.1.4 Les étapes de répartition du bassin en sous bassin par HEC-GeoHMS.....	30
III.1.1.5 Paramètres morphologiques des sous-bassins versants.....	32
III.1.2 La description du modèle HEC-HMS.....	34
III.1.2.1 Les caractéristiques générales du modèle.....	35
III.2 Modélisation pluies-débits par le modèle HEC-HMS.....	35
III.3 Le processus de fonctionnement.....	36
III.3.1 Fonctionnalités.....	36
III.3.2 Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS.....	38
III.4 Les données de bases d'entré.....	38
III.5 La calibration du modèle	42
III.5.1 Les résultats de calibration.....	42
III.6 Calage et validation du modèle hydrologique.....	45

III.7 Prédiction du comportement futur du BENI HAROUN.....	46
III.7.1 Scénario 1.....	46
III.7.1.1 Les données d'entrée	46
III.7.1.2 Les résultats de la simulation.....	47
III.7.2 Scénario 2 : Changement dans l'occupation du sol dans un sens négatif.....	49
III.7.2.1 Les données d'entrée.....	49
III.7.2.2 Les résultats de la simulation.....	50
III.7.3 Scénario 3 : changement dans l'occupation du sol dans un sens positif.....	51
III.7.3.1 Les données d'entrée.....	51
III.7.3.2 Les résultats de la simulation.....	51
Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Références bibliographiques.....	54

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I**Chapitre II**

Tableau II.1	Températures moyennes mensuelles à la station Ain El Bey Constantine.....	15
Tableau II.2	Répartition annuelle des précipitations (mm). (1990-2012).....	17
Tableau II.3	Création d'une carte hypsométrique (Altitude).....	21
Tableau II.4	Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global Ig	24
Tableau II.5	Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.....	25
Tableau II.6	Caractéristiques géométriques et hydromorphométriques du bassin.....	26

Chapitre III

Tableau III.1	Caractéristiques géométriques des sous-bassins versants.....	32
Tableau III.2	Plus longs chemins hydrauliques.....	34
Tableau III.3	Temps de concentration retenus.....	34
Tableau III.4	Données de base des sous-bassins versants.....	38
Tableau III.5	Détermination de CN moyen pour le bassin versant.....	39
Tableau III.6	Résultats de simulation.....	41
Tableau III.7	Résultats de calibration	42
Tableau III.8	Paramètres de calage.....	44
Tableau III.9	Résultats de validation du modèle.....	45
Tableau III.10	Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du beni haroun pour différentes périodes de retour.....	46
Tableau III.11	Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 1.....	49
Tableau III.12	Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 2.....	50
Tableau III.13	La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2.....	50
Tableau III.14	Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 3.....	51

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure I.1 Le cycle hydrologique.....	3
Figure I.2 Les différentes approches de modélisation.....	6

Chapitre II :

Figure II.1 Carte de situation du bassin versant.....	13
Figure II.2 Variations interannuelles des précipitations 2003-2016 station de Beni Haroun (donnée ANBT).....	16
Figure II.3 L'évaporation ou niveau de barrage Beni Haroun (2003-2016) (donnée ANBT)	16
Figure II.4 La répartition des classes d'altitude en fonction de surface.....	20
Figure II.5 Carte d'altitude du bassin versant.....	20
Figure II.6 La Courbe hypsométrique du bassin versant.....	21
Figure II.7 La répartition des classes de pentes en fonction de surface.....	22
Figure II.8 Carte des pentes du bassin versant.....	22
Figure II.9 Réseau hydrographique du bassin versant.....	26

Chapitre III :

Figure III.1 Répartition du bassin en sous bassin par HEC-Géo HMS.....	31
Figure III.2 Découpage final des sous-bassins versants par HEC-Géo HMS.....	31
Figure III.3 Influence de la forme du bassin versant sur la réponse hydrologique.....	33
Figure III.4 Plus long chemin hydraulique par sous-bassin versant.....	33
Figure III.5 Fenêtre bassin versant Beni Haroun et ses sous bassins.....	36
Figure III.6 Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente le bassin versant et leurs sous bassins.....	37
Figure III.7 Fenêtre de donnée de Curve Number (CN) et Imperméabilité.....	39
Figure III.8 Fenêtre représente Lag time.....	40
Figure III.9 Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps.....	40
Figure III.10 Hydrogrammes des crues de l'évènement de 26déc.1992/17janv.1993.....	41
Figure III.11 Hydrogrammes des crues de l'évènement de 22nov03déc/1998.....	42
Figure III.12 Hydrogrammes des crues de l'évènement de 26déc.1992/17janv.1993 après calibration.....	43

Figure III.13 Hydrogrammes des crues de l'évènement de 22nov-03déc/1998 après calibration.....	43
Figure III.14 Hydrogrammes des crues de l'évènement de 05avr-15avr/1992 après validation du modèle.....	45
Figure III.15 Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 2 ans.....	47
Figure III.16 Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 10 ans.....	48
Figure III.17 Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 50 ans.....	48
Figure III.18 Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 100 ans.....	49

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE :

Dans un bassin versant, la transformation de la pluie en débit résulte d'un certain nombre de mécanismes complexes qui interviennent simultanément à différentes échelles spatiales et temporelles. De ce fait le modèle pluie-débit trouve sa nécessité dans la mesure où le modèle conçu à partir des chroniques de pluies observées, peut générer des débits qui soient les plus proches possibles des débits observés, c'est à dire à partir des observations de pluie tombée, on peut arriver à reproduire (ou à prédire) la réponse en débit du bassin.

La modélisation pluie-débit permet de décrire la transformation de ces pluies en débits dans les cours d'eau d'un bassin versant en tenant compte de la réalité du terrain.

La transformation pluie- débit nous permet de maîtriser la prévision des débits pour deux objectifs distincts :

- La bonne exploitation des aménagements hydrauliques. En effet, l'utilisation régulière de la prévision de débit permet d'optimiser la régulation des aménagements disposant d'une certaine accumulation, de procéder à des vidanges préventives lors des crues, d'éviter des déversements et d'augmenter les performances au sens large d'un aménagement.
- Assurer la sécurité des populations et des biens. Elle est utilisée comme une aide efficace à la décision lors de situations de crise.

Notre modélisation (pluie-débit) est appliquée au sous-bassin versant Beni Haroun. Ce dernier est un cours d'eau très important. Des événements hydrologiques extrêmes se sont produits à son niveau. Ces crues sont intéressantes à analyser tant sur l'aspect forme que sur l'aspect de leur dynamique.

Le sous-bassin versant Beni Haroun est contrôlé par des stations pluviométriques et des stations hydrométriques

Le principe de la modélisation pluie-débit par le logiciel HEC-HMS permet d'obtenir des informations sur le fonctionnement du système hydrologique du bassin versant.

Notre travail sera élaboré selon les étapes suivantes : présentation de la zone d'étude, un aperçu, présentation du modèle HEC- HMS, méthodologie et application du HEC-HMS.

Chapitre I. Recherche bibliographique sur les modèles hydrologiques

Chapitre I : Recherche bibliographique sur les modèles hydrologiques

Introduction :

La résolution des problèmes liés à la gestion des bassins versants notamment l'aménagement de ponts et de barrages, la prévision des conséquences des inondations nécessite une parfaite connaissance de leurs étiages et de leurs crues. Dans cette optique, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits et destination des eaux à l'échelle d'un bassin versant devient nécessaire.

L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse «satisfaisante» aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie à l'objet assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle. Généralement les modèles sont utilisés pour la prévision, la prédétermination (évaluation de données d'un projet), la reconstitution ou l'extrapolation de données, etc

Dans ce chapitre nous présentons les modèles les plus utilisés dans le domaine de la modélisation hydrologique ainsi que les logiciels les plus utilisés dans le domaine public. Mais avant d'entamer ces détails, il est utile de donner un rappel sur le cycle hydrologique qui est la base de toute modélisation hydrologique.

I.1 Cycle hydrologique :

Les composantes de base du cycle hydrologique (figure 1) incluent : les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, l'écoulement de surface, l'écoulement dans les cours d'eau et l'écoulement souterrain. Le mouvement de l'eau entre les différentes phases du cycle hydrologique est irrégulier dans l'espace et dans le temps pouvant produire des extrêmes d'inondations et de sécheresses. La détermination de la magnitude et l'intensité de ces éventuels extrêmes sont d'une grande importance pour l'hydrologue [1].

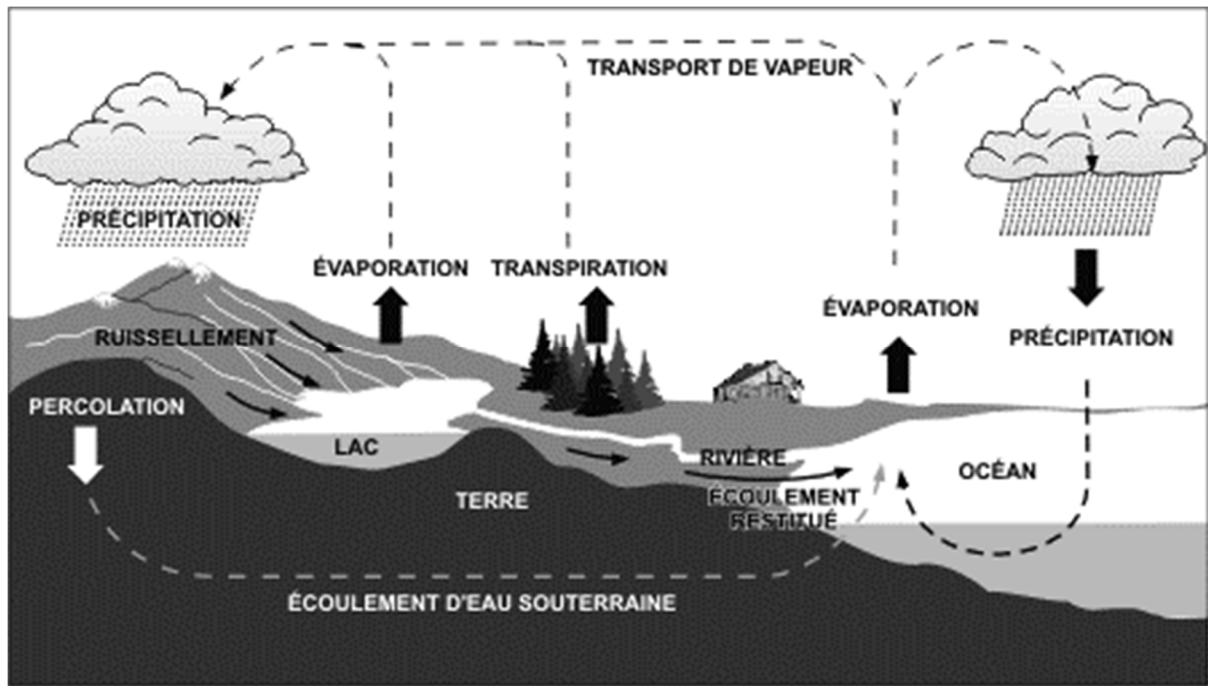


Figure I.1: Le cycle hydrologique

Le cycle hydrologique est très complexe, mais sous certaines hypothèses, la réponse d'un bassin versant pour un événement tel que les précipitations, les infiltrations ou l'évapotranspiration peut être faite. L'hydrologue doit être capable de calculer ou d'estimer l'ensemble de ces composantes pour concevoir convenablement un projet dans le domaine de la gestion des ressources en eau. Les principales préoccupations d'un hydrologue incluent [1]

- Les inondations
- L'irrigation et l'approvisionnement en eau potable durant les périodes de sécheresse
- L'effet des réservoirs, des levées ou d'autres ouvrages de contrôle des inondations dans un cours d'eau
- Effet du développement urbain sur la capacité du système de drainage
- Détermination des zones inondables suite à une éventuelle crue

Dans n'importe quel système hydrologique, le bilan hydrologique peut être développé en tenant compte des différents cours d'eau et couches de stockage. Le système le plus simplifié est une plaine inclinée et imperméable confinée en un point appelé l'exutoire [1].

L'équation de continuité hydrologique pour n'importe quel système s'écrit sous la forme suivante:

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \dots\dots\dots(I.1)$$

Avec :

I : Entrée du système en vol/temps

Q : Sortie du système en vol/temps

dS/dt : Variation de stockage du système en vol/temps.

Pour un intervalle de temps donné, le modèle mathématique du bilan hydrologique de la figure précédente s'écrit sous la forme suivante (en tenant compte de toutes les composantes du cycle hydrologique exprimées en unité de hauteur) :

$$P - R - G - E - T = \Delta S \dots\dots\dots(I.2)$$

Avec :

ΔS = Variation du stockage.

La détermination du débit de sortie d'un bassin versant est d'une grande importance pour un hydrologue, surtout quand il s'agit du contrôle de phénomène inondation, de la régulation des cours d'eau, du dimensionnement des ouvrages hydrauliques, etc. Pour répondre de façon adéquate à leurs besoins, les hydrologues ont développé des outils que l'on appelle modèles hydrologiques.

I.2 Les modèles hydrologiques :

Un modèle est une représentation d'un phénomène physique, afin d'en avoir une meilleure compréhension ou d'analyser l'influence qu'il exerce. La représentation peut être physique, analogique ou mathématique.

Dans le premier cas, le modèle est une maquette qui reproduit d'une manière adéquate la réalité. Les modèles analogiques utilisent les similitudes qui existent entre le phénomène à étudier et un autre phénomène physique.

La méthode la plus utilisée est l'analogie entre le courant électrique et le flux d'eau.

Dans ce cas, le modèle est le résultat de l'expression analytique de la complexité observée ou supposée et se présente généralement sous la forme d'un ensemble d'équations.

La modélisation mathématique est un outil essentiel pour la connaissance des phénomènes naturels, ils essayent d'établir un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques.

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassins versants, rivières, nappes, etc.), associés aux développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie [2].

- **La modélisation comme outil de recherche :** La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.
- **La modélisation comme outil de prévision :** elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.
- **La modélisation comme outil d'extrapolation :** reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un Plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié. L'utilisation de longues séries de pluies éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

La modélisation des phénomènes et comportements hydrologiques des bassins versants est incontournable dès lors qu'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire et aux différents risques hydrologiques (sécheresse, inondation). Cette modélisation est sensée décrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. Elle est sensée fournir aussi des informations sur le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (Barrages, retenues).

I.3 Les différentes approches de la modélisation :

Le terme de modèle recouvre une large variété d'outils, à la philosophie et aux objectifs différents. Les approches habituellement utilisées dans la modélisation pluie-débit apparaissent en sombre dans la figure I.2.

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

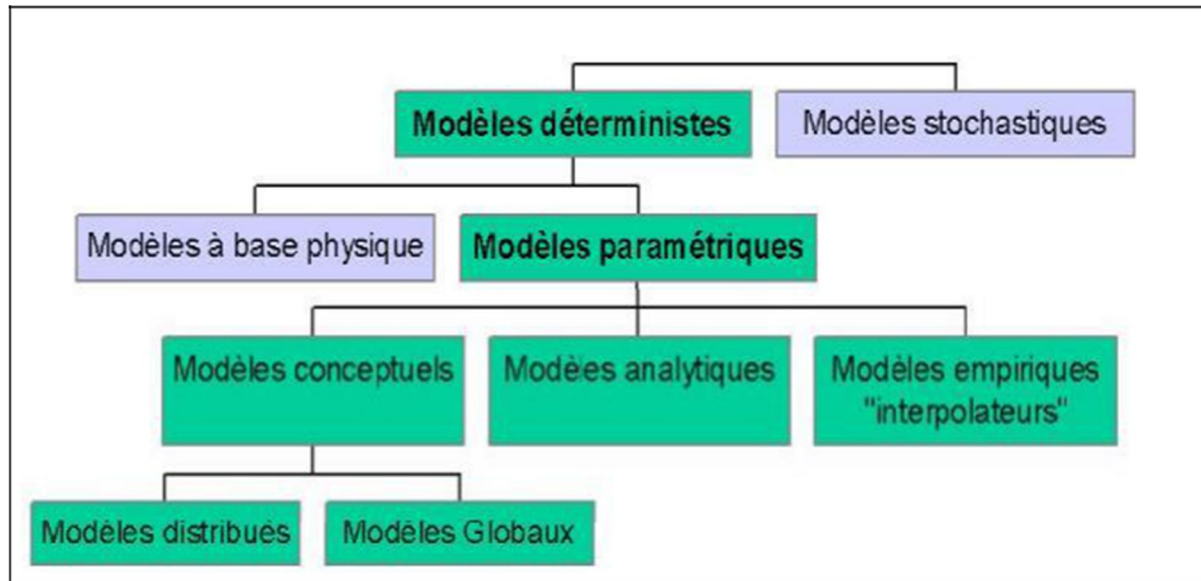


Figure I.2: Les différentes approches de modélisation

I.3.1 Modèles stochastiques :

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelquefois même sur les processus en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée, qu'il s'agisse de l'hydrologie ou de l'environnement. Ainsi Jensen (1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions.

Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments [3].

I.3.2 Modèles déterministes :

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes.

Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variables indépendantes d'entrée du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variable permettant de caractériser l'état du système modélisé, par exemple : le niveau de remplissage des différents « réservoirs » d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols...etc.) et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant) [4].

I.3.3 Modèles à base physique :

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie.

Certains modèles comme le SHE tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante [2].

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

I.3.4 Modèles paramétriques :

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

I.3.5 Modèles empiriques :

Le type de fonctions reliant les variables est fixé a priori (fonctions polynomiales, fonctions sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du

polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées [2].

I.3.6 Modèles analytiques :

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées.

L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables.

Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaire entre les variables [2].

I.3.7 Modèles conceptuels :

Ce type de modèle repose sur l'analogie remarquée entre le fonctionnement d'un bassin versant et un ensemble de réservoirs interconnectés.

Nous notons d'ailleurs qu'il serait plus judicieux de regrouper ces modèles sous la dénomination « Modèle conceptuel à réservoir ». Plus précisément, quand la structure du système et des lois le régissant sont inconnues ou lorsque la pauvreté des informations et la complexité des phénomènes en jeu prévalent, le comportement du système en question est simplifié.

Ainsi, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple.

Au travers de ce type de modélisation, sont construites des structures empiriques censées reproduire les sorties du système étudié à partir des variables d'entrée (pluie, évapotranspiration, fertilisation, pratiques agricoles).

Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement.

Le modèle CEQUEAU est un parfait exemple de modèle conceptuel que nous présenterons dans la section suivante.

I.3.8 Modèles globaux :

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.

Un exemple de ce type de modèle est le modèle IHRACRES.

I.3.9 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:

- Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés.
- Modèles physiques spatialisés.
- Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés.

a. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés :

Les modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin.

Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous-bassins) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont en aval.

Ainsi, on a la possibilité de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et la propagation des débits à l'intérieur du bassin.

C'est le cas du modèle CEQUEAU [Morin] et du modèle HEC-HMS.

b. Modèles physiques spatialisés :

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

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

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

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

A partir d'un découpage de l'espace en mailles de taille adaptée au problème à traiter, ils simulent les diverses composantes du cycle de l'eau sur chaque maille (ruissellement, infiltration, évapotranspiration) et convolent les transferts de maille à maille, jusqu'au réseau hydrographique constitué. Ces modèles sont complexes à mettre en œuvre et exigent d'importantes quantités de données. Ils sont bien adaptés à la simulation de la diversité d'un bassin.

Cependant, ces modèles ne peuvent traiter les grands bassins en raison de leur grande hétérogénéité morphologique et météorologique. Parmi ces modèles on peut citer le modèle SHE.

c. Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés :

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

- A base physique, fondée sur les processus réels mais simplifiés ;
- Semi-spatialisée, fondée sur une discrétisation en unités relativement homogènes, qui permettent de tenir compte de la variabilité spatiale de la structure du bassin versant.

Conclusion :

Parfois la description des processus qui entrent en jeu dans la réponse hydrologique d'un bassin versant n'est pas une tâche aussi facile, cette description demande la connaissance et la maîtrise d'une variété de facteurs et de paramètres. Des renseignements suffisants sur ces données ne sont pas toujours disponibles pour tous les bassins versants, d'où la nécessité de s'investir d'avantage dans l'étude de détermination de ces données pour développer des modèles qui représentent le mieux la réponse hydrologique du bassin versant.

Chapitre I. Recherche bibliographique sur les modèles hydrologiques

Chapitre II : Etude descriptive de la zone d'étude

Introduction :

Préalable et indispensable à toute étude efficace, la connaissance du milieu naturel du bassin doit s'acquérir dans de multiples domaines (topographie, géologie, climatologie, hydrologie et la biogéographie, etc.). Pour ces raisons, un choix a été fait le bassin versant de Beni Haroun a été choisi comme bassin d'application de notre travail pour la diversité des données qui y sont disponibles, et malgré la diminution d'études sur ce bassin.

Dans ce chapitre, notre étude nous a montré la situation géographique et toutes les caractéristiques de site de bassin versant sous étude localisent au Beni Haroun, la géologie (la structure du sol), l'hydrologie et le climat...etc. Ces caractéristiques affectent sur le taux d'envasement et taux d'érosion. Donc l'insuffisance de l'eau nous oblige à protéger toutes les ressources disponibles contre toutes pertes et à l'utiliser d'une manière rationnelle et scientifique, et ce, pour satisfaire les besoins des différents secteurs (AEP, l'industrie, l'irrigation).

II.1 Localisation géographique et topographique :

Le bassin versant Kèbir-Rhumel centré à 36° de latitude Nord et à 7° de longitude, est l'un des plus importants et grands bassins d'Algérie, s'étendant sur une superficie de 8815 Km², il se compose de 7 sous-bassins hydrographiques et possède une façade maritime d'environ 7 Km². Le bassin est limité :

- Au Nord par les deux bassins côtiers Constantinois Ouest et Centre.
- Au Sud, le bassin des hauts plateaux constantinois.
- À l'Ouest les bassins de l'Algérois-Hodna-Soummam.
- Est à l'Est le bassin de la Seybouse.

L'oued Kebir-Rhumel est le cours d'eau qui draine le bassin depuis la ville d'Ain M'lila (hautes plaines constantinoises) jusqu'au réservoir du barrage de Beni-Haroun. Plusieurs villes importantes sont situés dans le bassin versant tels que Constantine et El Khroub a l'Est, Mila au Nord, AM El Kebira a l'Ouest et Ain M'Lila au Sud.

Le sous-bassin versant sous étude il est le côté droit de sous-bassin versant Beni Haroun couvre une superficie de près de 1055.02 km² s'étendant sur des milieux naturels et socioéconomiques d'une grande diversité (Agence Nationale des barrages et des transferts, Beni Haroun 2006).

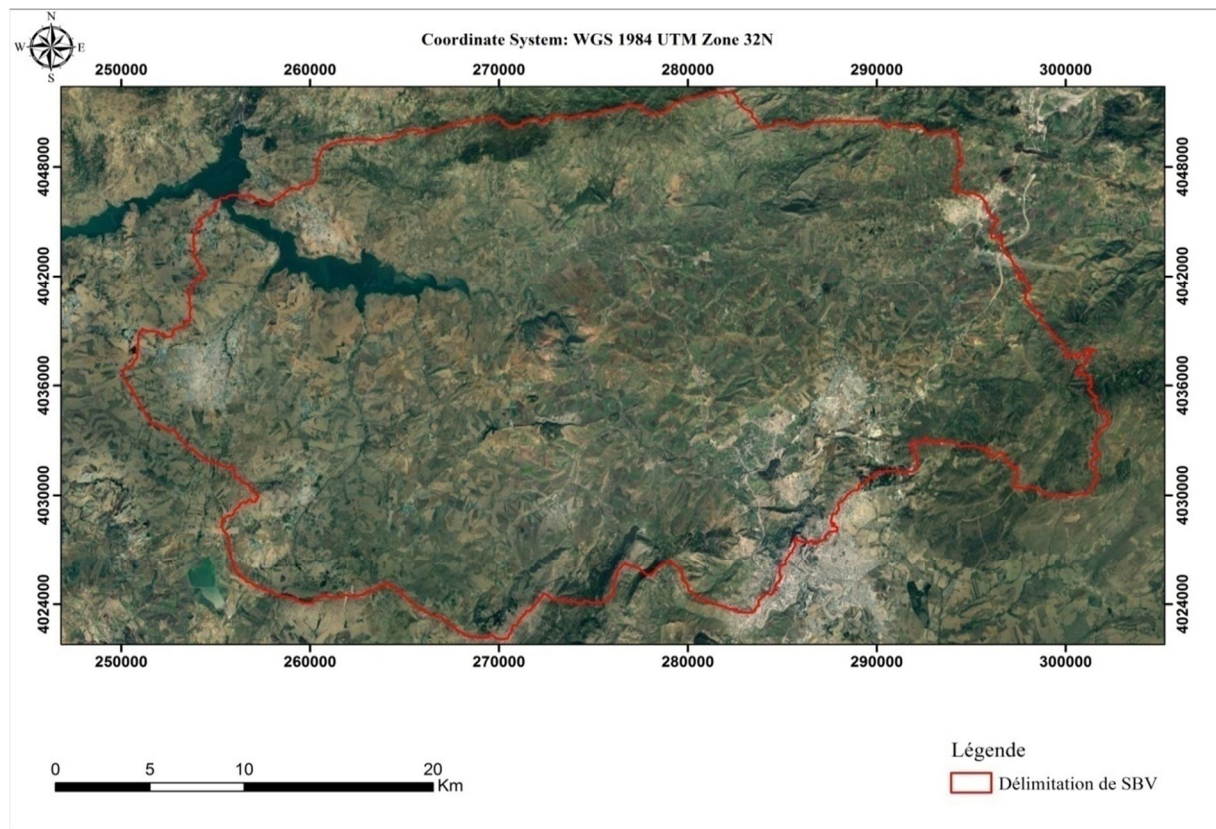


Figure II.1: Carte de situation du bassin versant

II.2 Morphologie du bassin :

II.2.1 Caractéristiques physiques :

II.2.1.1 Géologie du bassin :

Ce site localise dans une zone à relief accidenté, montrant des contrastes topographiques remarquables, avec des massifs culminants à des hauteurs élevées (Djebel Msid Aicha : 1462 m) et des ravins et talwegs sur creusés

Sa géologie est particulièrement mouvementée et marquée par un empilement d'unités structurales du Nord au Sud.

En outre, de la rive droite à la rive gauche (de barrage beniharoun), les pendages se redressent progressivement jusqu'à être verticales et même se renverser avec un léger pendage vers le Nord.

Les terrains meubles sont constitués principalement de dépôts alluviaux sablo-graveleux dans le lit des oueds et sur plusieurs niveaux de terrasses, de colluvions provenant en grande partie de l'érosion des formations terrigènes et d'éboulements au pied des formations rocheuses.

Par ailleurs, il est clair que l'activité tectonique à rejeu continu dans le temps affecte aussi bien les formations du substratum. [07]

II.2.1.2 Impact de la géologie sur l'hydrologie :

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en général une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

II.2.1.3 Végétation du bassin :

Le couvert végétal de la région d'étude est réduit. Il se résume à des surfaces recouvertes majoritairement d'herbes et quelques arbres d'eucalyptus, ce faible couvert végétal a considérablement favorisé le phénomène d'érosion du sol.

II.2.2 Caractéristiques climatiques :

Le climat est l'ensemble des actions de l'atmosphère : humidité, pluie, température et vents. C'est l'élément naturel sur lequel l'homme n'a aucune influence directe (sauf les cas particuliers des irrigations). C'est un facteur essentiel du développement des plantes, de la formation et de l'évolution des sols. Ses principales composantes ont une influence importante sur l'érosion.

La connaissance des conditions climatiques de notre zone d'étude et de ses caractéristiques va nous permettre de mieux comprendre le comportement hydrologique des cours d'eaux. D'une manière générale, le climat de la région est de type continental, semi-aride au Sud et subhumide au Nord avec un hiver pluvieux et froid et un été Sec et chaud.[02] Le climat d'une région est influencé par de nombreux paramètres climatologiques qui sont :

- La température
- La précipitation
- L'humidité et le vent
- Pluviométrie

La climatologie a essentiellement pour but :

- L'analyse complète des éléments météorologiques qui déterminent le climat.
- La recherche des causes qui expliquent les différents climats et les fluctuations qui les accompagnent.

II.2.2.1 La température :

C'est l'un des éléments les plus importants de la radiation solaire. Un certain nombre de phénomènes physiques tels-que l'évaporation, le dégel de l'eau, la gelée blanche. La dilatation et la concentration de certains matériaux : phénomène physiologique ou pathologique tel que la transpiration sont liées à la température de l'air. La température dont il s'agit est la température de l'air mesuré à l'ombre dans un abri météorologique.

Les données de température se limitent à celles fournies à l'ANRH par la station météorologique de l'aéroport d'Ain El Bey à Constantine. La température moyenne saisonnière varie entre 10°C en hiver et 25°C en été. Par contre la moyenne annuelle et de l'ordre de 17.06 °C Tableau.

Tableau II.1:Températures moyennes mensuelles à la station Ain El Bey Constantine

MOIS	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
Température °C	22.60	18.82	14.80	11.70	10.89	11.35	12.30	14.40	17.70	21.10	24.10	24.74

(Données ANRH 20 ans).

II.2.2.2 La précipitation :

La pluie est un facteur climatique très important qui conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères. La région d'étude est considérée parmi les régions les plus arrosées. Elles sont relativement importantes, variables et irrégulières d'une année à une autre.

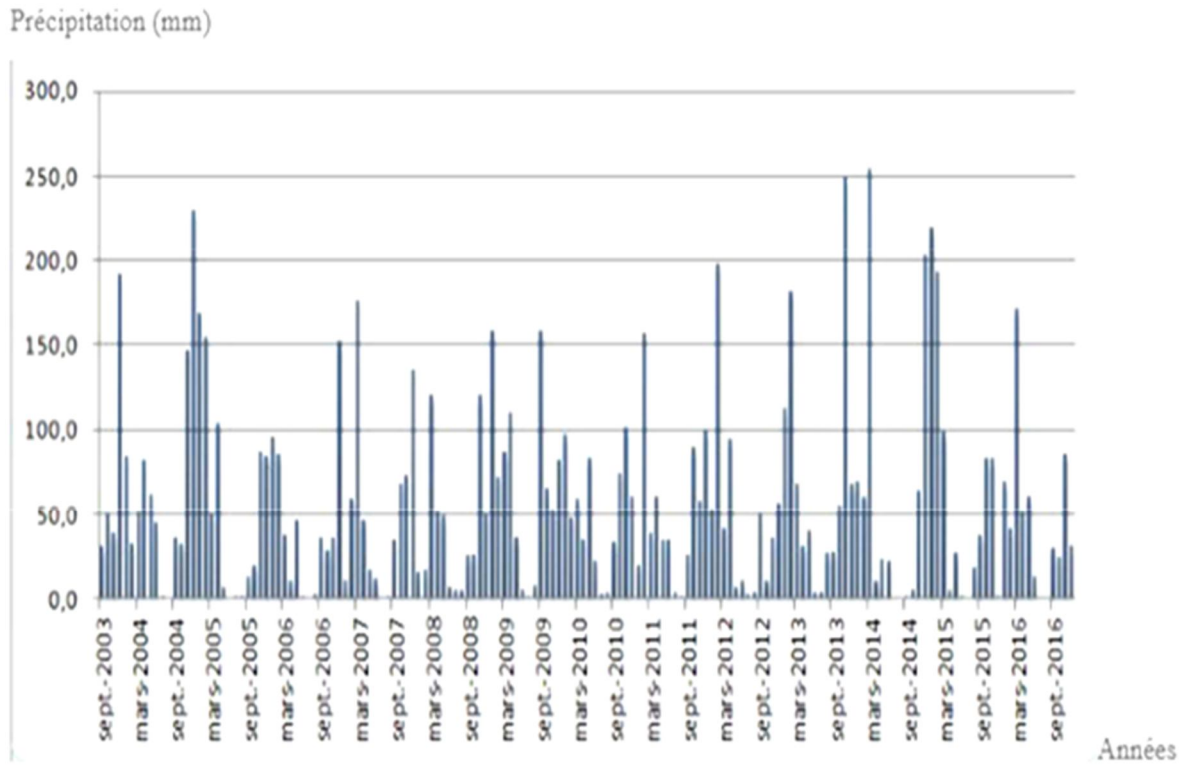


Figure II.2: Variations interannuelles des précipitations 2003-2016 station de Beni Haroun (donnée ANBT).

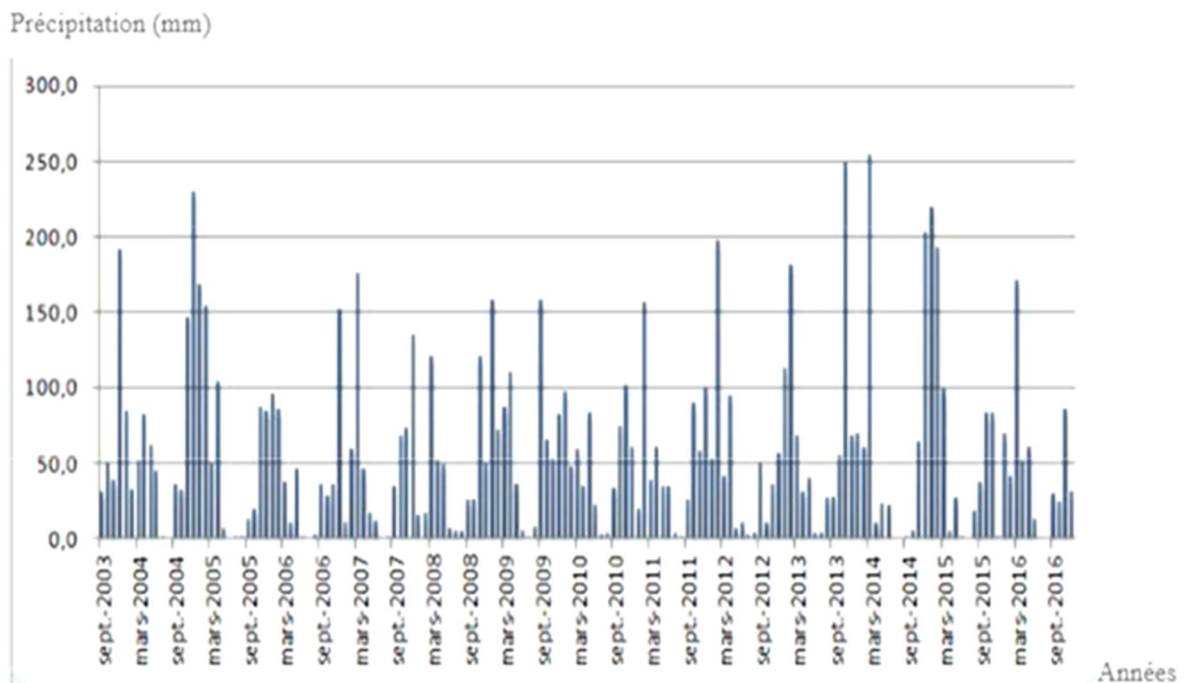


Figure II.3: L'évaporation ou niveau de barrage Beni Haroun (2003-2016) (donnée ANBT).

II.2.2.3 L'humidité et le vent :

L'humidité est plus élevée de l'année, s'étalent de juin jusqu'à septembre qu'en été, le taux d'humidité moyen au cours de l'année est de 70%.

Le vent est un facteur important du climat, il influe sur la température, l'humidité et l'évaporation. La direction, la fréquence et la vitesse des vents sont variables au cours de l'année. En générale, la connaissance de la vitesse et de la direction des vents est primordiale pour la mise en place d'un ouvrage quelconque. Les vents dominants dans la région sont ceux du Nord-Ouest avec une vitesse assez constante au cours de l'année, entre 1.9 et 2.5 m/s.

II.2.2.4 Pluviométrie :

La moyenne annuelle des précipitations ne reflète nullement la réalité .Des années très sèches peuvent succéder à des données exceptionnellement pluvieuse.

Comme nous le montre le tableau ci-dessous, la variation des quantités annuelles de pluieàprécipitationatteintsonmaximumde603.10mmen2002.Elleaeuundeuxième de 543.2 mm en 1991 avec deux années sèches : 213 mm en 1996, et 219.40 mm en 2000.[02]

Tableau II.2:Répartition annuelle des précipitations (mm). (1990-2012)

Années	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Quantités	498.20	543.20	358.80	277.90	449.40	503.10	213.00	407.10	394.70	306.60	219.40	262.10
Années	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
Quantités	603.10	541.50	391.10	368.21	310.80	297.70	464.05	429.00	410.10	356.86	433.70	

II.2.3 Caractéristiques hydrographiques du bassin :[8 ;11]

Le milieu physique dans lequel évolue le cycle hydrologique varie d'un bassin à l'autre en fonction d'un certain nombre de paramètres physiques, morphologiques et géométriques qui interviennent, et souvent de façon combinée, dans les modalités de l'écoulement fluvial. L'analyse de ces paramètres permet une meilleure compréhension des causes de variation des régimes hydrauliques d'un bassin. Le bassin de Kèbir-Rhumel se compose de Sept 7 sous bassins dont les limites correspondent à celles des unités hydrologiques contrôlées par des stations hydrométriques, c'est pourquoi l'étude des caractéristiques physique se fait pour chaque partie contrôlée par les stations de jaugeage.

II.2.3.1 Caractéristiques morpho-métriques :

Les paramètres morphologiques d'un bassin versant (forme, altitudes, pente, relief, etc.) jouent un rôle essentiel dans son comportement hydrologique. Ils ont l'avantage de se prêter à une analyse quantifiée qu'il convient de préciser autant que possible, dès le début de toute étude. La forme des bassins versant qui peut être traduite par l'indice de compacité de Gravelius a également une influence certaine sur l'écoulement. Les différentes grandeurs déterminantes de la forme d'un bassin versant sont les suivantes :

II.2.3.2 Caractéristiques De Forme :

La forme du bassin versant est la configuration géométrique telle qu'elle est projetée sur un plan horizontal. Elle influence directement le temps de réponse du bassin, c'est à dire sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent sur l'hydrogramme de crue.

II.2.3.2.1 Indice de compacité ou indice de Gravelius :

Il est défini par la relation (II.1) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \dots \dots \dots (II.1)$$

Avec :

P: Périmètre du bassin en Km

S: Surface du bassin en Km²

Si ; $K_G = 1$: Le BV est de forme circulaire.

Si ; $K_G = 1,12$: le BV est un carré.

Si ; $K_G < 1$: le bassin est de forme compacte ou arrondi.

Si ; $K_G > 1$: le bassin est de forme allongée.

II.2.3.2.2 Elancement « R_e » :

Ce rayon de circulation entre la superficie du bassin et celle du cercle dont la circonférence est égal au périmètre du bassin, soit:

$$R_e = \frac{\alpha P A}{p^2} = 12.56 \frac{A}{p^2} \dots \dots \dots (II.2)$$

Sa valeur est 1 pour un bassin circulaire et de 0.78 pour un bassin carré.

II.2.3.2.3 Rectangle équivalent :

Il est défini par sa longueur "L" et sa largeur "l" et par la même surface du bassin versant "S".

Les dimensions de ce rectangle sont données par les formules suivantes :

$$\text{Longueur : } L_R = \frac{K_G \sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (II.3)$$

$$\text{Largeur : } l_R = \frac{K_G \sqrt{S}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (II.4)$$

II.2.3.2.4 Caractéristiques du relief :

La région fait partie de l'Atlas tellien. Le relief est constitué de plaines et de vallées fertiles irriguées par des cours d'eaux, de collines à pentes régulières, de montagnes (Djebel Elgrar 1078 m, Djebel Bouaslouge 879 m etc..).

➤ Hypsométrie des bassins :

La variation d'altitude à l'intérieur d'un bassin ainsi que l'altitude moyenne sont des données essentielles aux études de la température et des précipitations.

La description détaillée de l'élévation d'un bassin est donnée par les courbes hypsométriques, et à partir de celles-ci, nous pouvons déterminer les caractéristiques de relief, à savoir :

- L'altitude maximale (H_{\max}).
- L'altitude minimale (H_{\min}).
- L'altitude médiane correspond à 50% de la surface ($H_{50\%}$).
- L'altitude moyenne (H_{moy}).
- L'altitude correspond à 5% de la surface ($H_{5\%}$).
- L'altitude correspond à 95% de la surface ($H_{95\%}$).
- La dénivelée ($D = H_{5\%} - H_{95\%}$).

La carte d'altitudes :

La carte d'altitudes est obtenue suite au traitement effectué en utilisant la carte MNT téléchargées gratuitement à partir du site <http://glovis.usgs.gov/> de l'USGS.

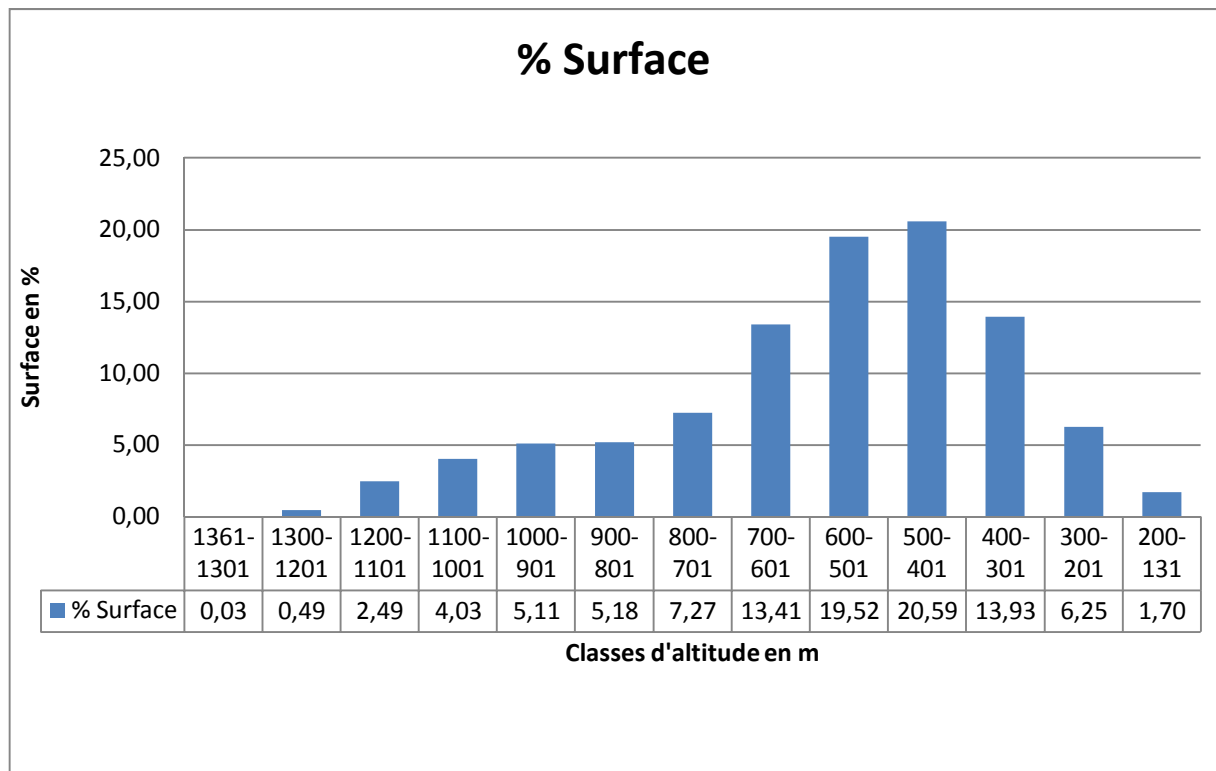


Figure II.4: La répartition des classes d'altitude en fonction de surface

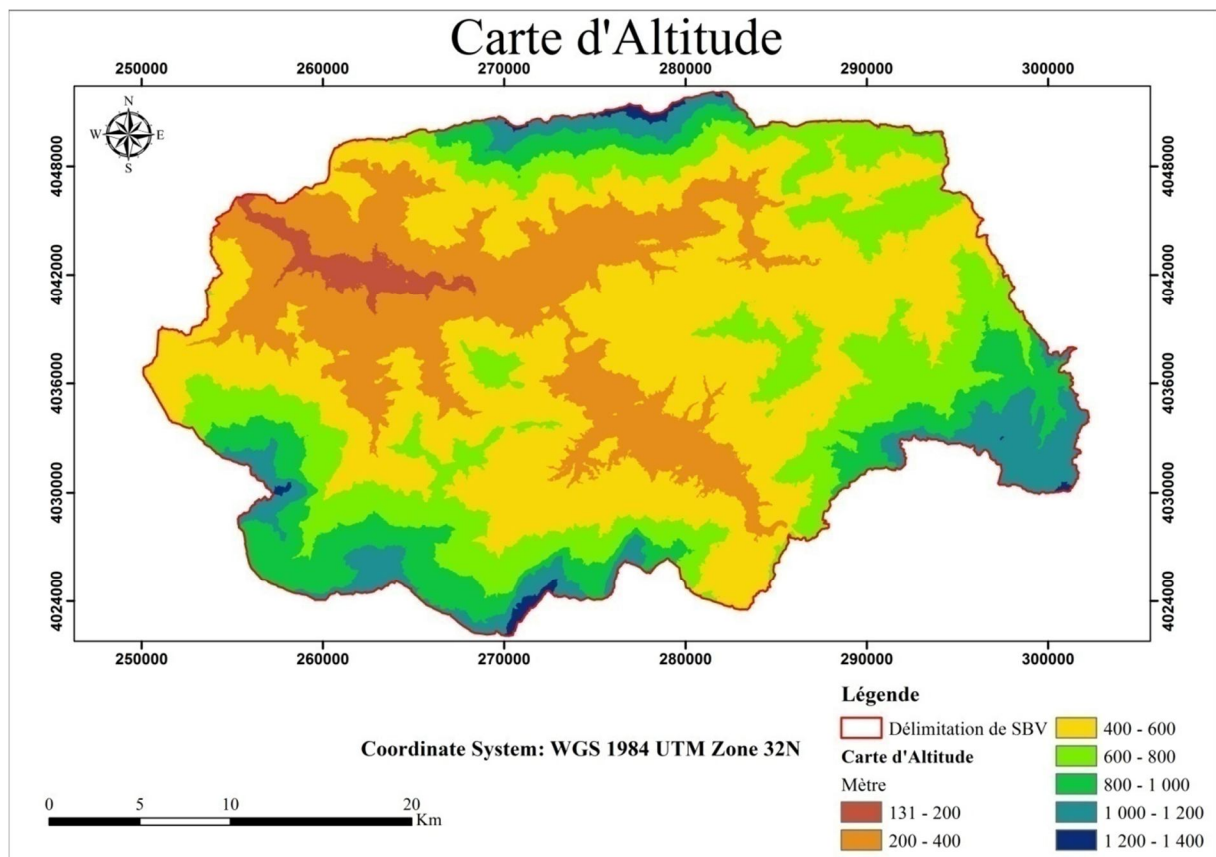


Figure II.5: Carte d'altitude du bassin versant.

Pour estimer ces paramètres on doit présenter la répartition hypsométrique après planimétrie des aires partielles comprises entre les courbes de niveau maîtresses et les différentes cotes.

Tableau II.3:Création d'une carte hypsométrique (Altitude)

classes	Altitudes (m)	Surface (Km ²)	Surface (%)	surface cumulée (%)
1	1361-1301	0.34	0.03	0.03
2	1300-1201	5.14	0.49	0.52
3	1200-1101	26.28	2.49	3.01
4	1100-1001	42.51	4.03	7.04
5	1000-901	53.95	5.11	12.15
6	900-801	54.67	5.18	17.34
7	800-701	76.68	7.27	24.60
8	700-601	141.45	13.41	38.01
9	600-501	205.93	19.52	57.53
10	500-401	217.22	20.59	78.12
11	400-301	146.93	13.93	92.05
12	300-201	65.94	6.25	98.30
13	200-131	17.98	1.70	100.00
Total		1055.02	100	

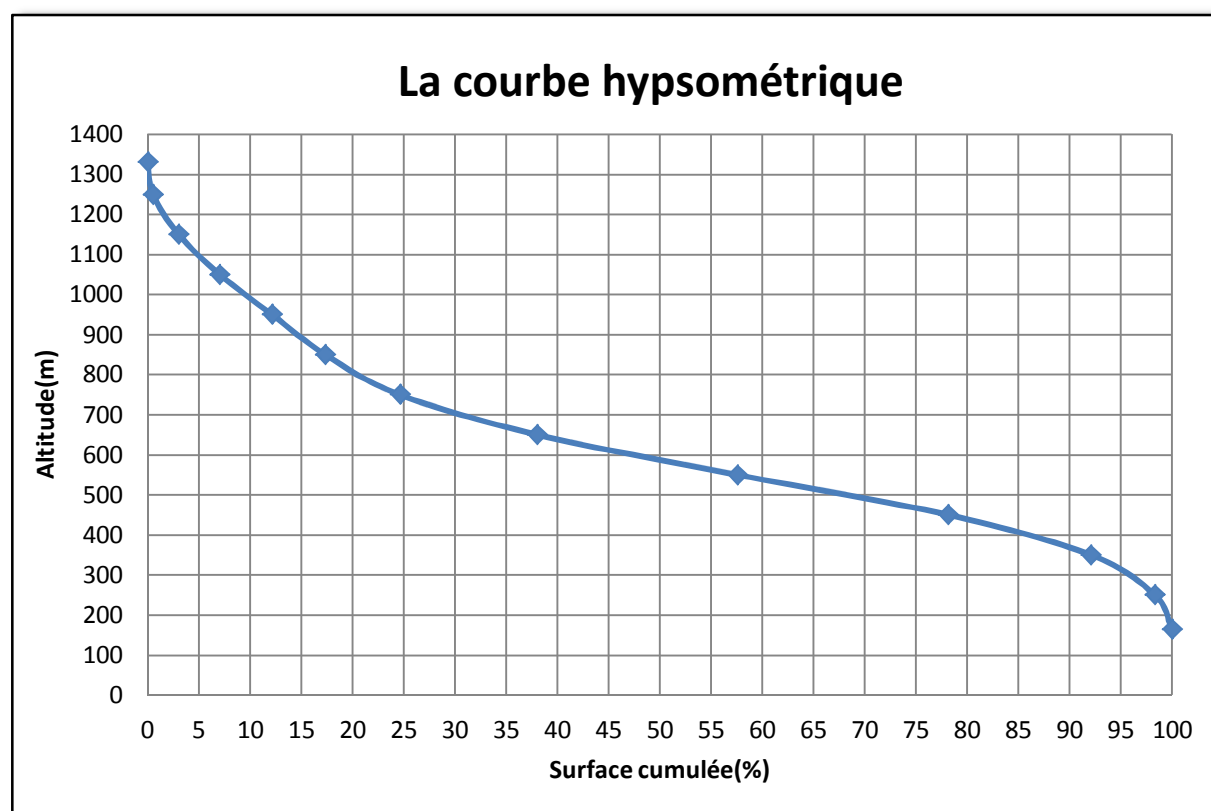


Figure II.6: La Courbe hypsométrique du bassin versant

La carte des pentes :

A partir du modèle numérique de terrain on a déduit la carte des pentes. En tenant compte de l'effet de la pente, le bassin versant de montre une forte susceptibilité à l'érosion. En effet, est assez contrasté avec des déférentes pentes (fortes et moyennes).

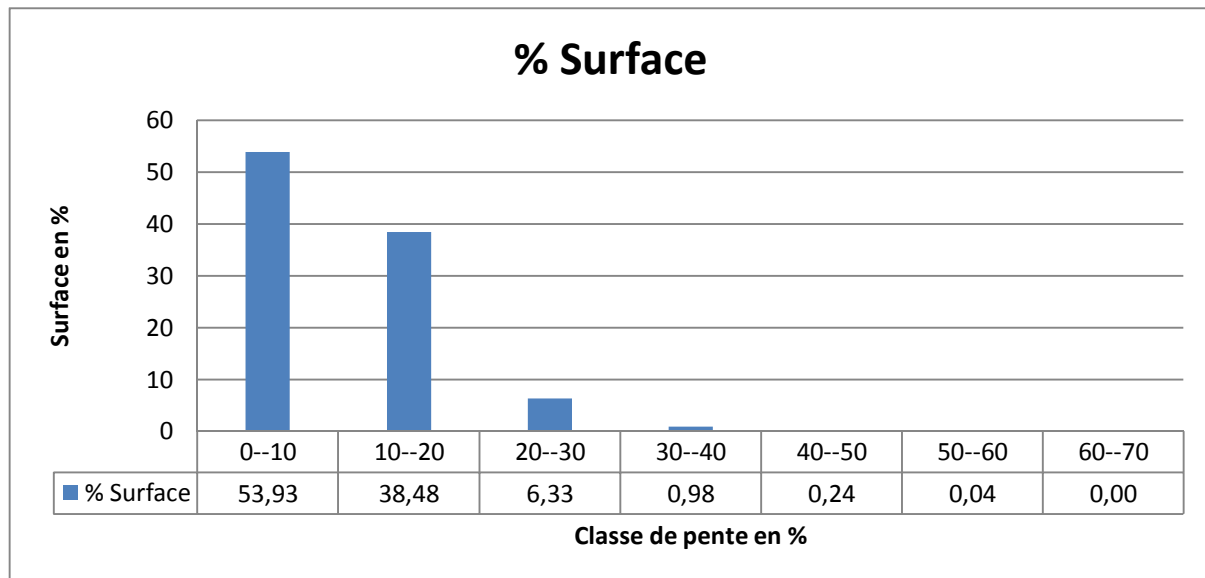


Figure II.7:La répartition des classes de pentes en fonction de surface

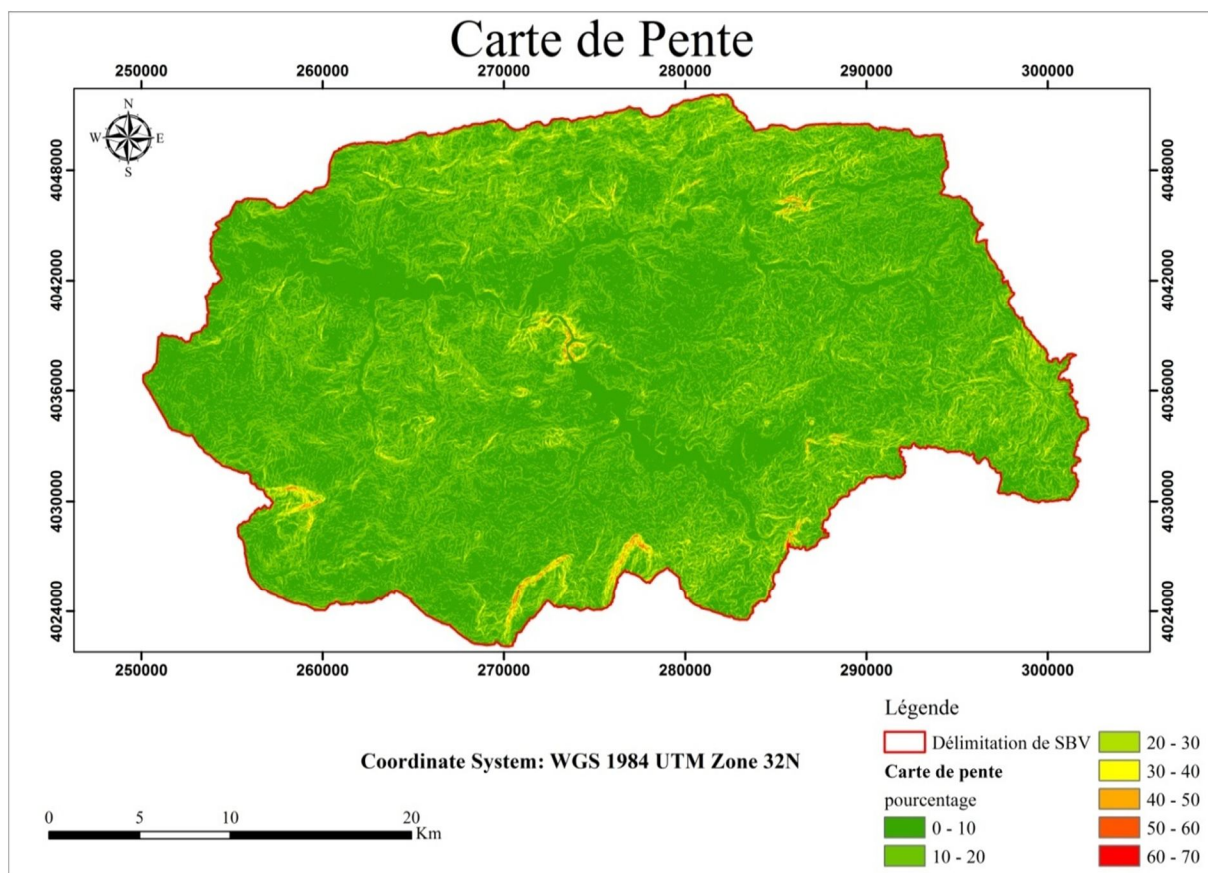


Figure II.8: Carte des pentes du bassin versant

*** Dénivelée simple :**

On définit comme étant la différence de cote entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \dots \dots \dots (II.5)$$

*** Altitude moyenne de BV :**

$$H_{\text{moy}} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i H_i}{A} \dots \dots \dots (II-6)$$

Avec :

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

S_i : Surface comprise entre deux courbes de niveaux i et $i+1$ (Km^2).

H_i : Altitude entre ces deux courbes de niveaux (m).

A : Surface totale du bassin versant en Km^2 .

*** Indice de pente :**

Selon Dubreuil (1974), le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant pour permettre des comparaisons et des classifications entre bassins. Ils sont déterminés à partir de la connaissance des courbes hypsométriques.

*** Indice de pente de roche I_p :**

Il permet de déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant, il est calculé par l'expression 2.8 :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i (H_i - H_{i-1})} \dots \dots \dots (II.7)$$

Avec :

I_p : indice de pente de roche en %.

H_i : fraction de surface comprise entre l'altitude a_i et a_{i+1} (a_i , a_{i+1}) altitude des courbes de niveau du bassin (m).

L : longueur du rectangle équivalent en Km.

H_{i+1} , H_i : Côtes de ligne de niveaux du bassin en m.

*** Dénivelée brute :**

On définit comme étant la différence de cote entre H_{max} et H_{min} : $D_b = H_{\text{max}} - H_{\text{min}}$

*** Indice de pente globale I_g :**

Il est utilisé pour la classification des bassins versants, cet indice est déterminé par la formule :

$$I_g = \frac{D}{L_R} \text{ en \%} \dots\dots\dots (II.8)$$

Avec :

D : Dénivelée en m.

L_R : Longueur du rectangle équivalent en Km.

Tableau II.4: Classification ORSTOM du relief à partir de l'indice de pente global **I_g**.

Relief	Valeur de I_g
Très faible	$I_g < 0.002$
Faible	$0.002 > I_g > 0.005$
Assez faible	$0.005 > I_g > 0.01$
Modéré	$0.01 > I_g > 0.02$
Assez Modéré	$0.02 > I_g > 0.05$
Fort	$0.05 > I_g > 0.1$
Très fort	$0.1 < I_g$

*** Pente moyenne d'un bassin versant I_m :**

La pente moyenne d'un bassin versant peut se calculer par l'expression suivant :

$$I_m = \frac{H(0,5L_1 + L_2 + L_3 + \dots + 0,5L_n)}{S} \dots\dots\dots (II.9)$$

Avec : **I_m** : pente moyenne du bassin en (%).

H : hauteur entre deux courbes de niveaux consécutives (m).

L_i : longueur de la courbe de niveau en (Km).

S : superficie du bassin versant (Km²).

L : longueur du rectangle équivalent en (Km).

II.3 Paramètres du réseau hydrographique : [06]

II.3.1 Densité de drainage **D_d** :

C'est le rapport de la longueur totale des talwegs à la surface du bassin versant, elle est exprimée en Km/Km², soit :

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{S} \dots\dots\dots (II.10)$$

Avec : $\sum_{i=1}^n l_i$: Longueur totale cumulée des talwegs (km).

S : Surface du bassin versant (Km²).

II.3.2 Coefficient de torrentialité (C_t) :

$$C_t = F_t \cdot D_d \dots \dots \dots (II.11)$$

Avec :

F_t: Fréquence des talwegs élémentaires : $F_t = \frac{N}{S}$

N : Nombre des talwegs d'ordre 1.

II.3.3 Dénivelée spécifique D_s :

L'indice « I_g » décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique « D_s » permet d'utiliser la classification de l'O.R.S.T.O.M. qui permet définir les différents types de relief des bassins versants quelque soient leurs superficies. La dénivelée spécifique est donnée par la formule suivante :

$$D_s = I_g * \sqrt{S_{bv}} \dots \dots \dots (II.12)$$

Tableau II.5: Classification des reliefs d'après l'O.R.S.T.O.M.

R1	$D_s < 10 \text{ m}$	Relief très faible
R2	$10 \text{ m} < D_s < 25 \text{ m}$	Relief faible
R3	$25 \text{ m} < D_s < 50 \text{ m}$	Relief assez faible
R4	$50 \text{ m} < D_s < 100 \text{ m}$	Relief modéré
R5	$100 \text{ m} < D_s < 250 \text{ m}$	Relief assez faible
R6	$250 \text{ m} < D_s < 500 \text{ m}$	Relief fort
R7	$500 \text{ m} < D_s$	Relief très fort

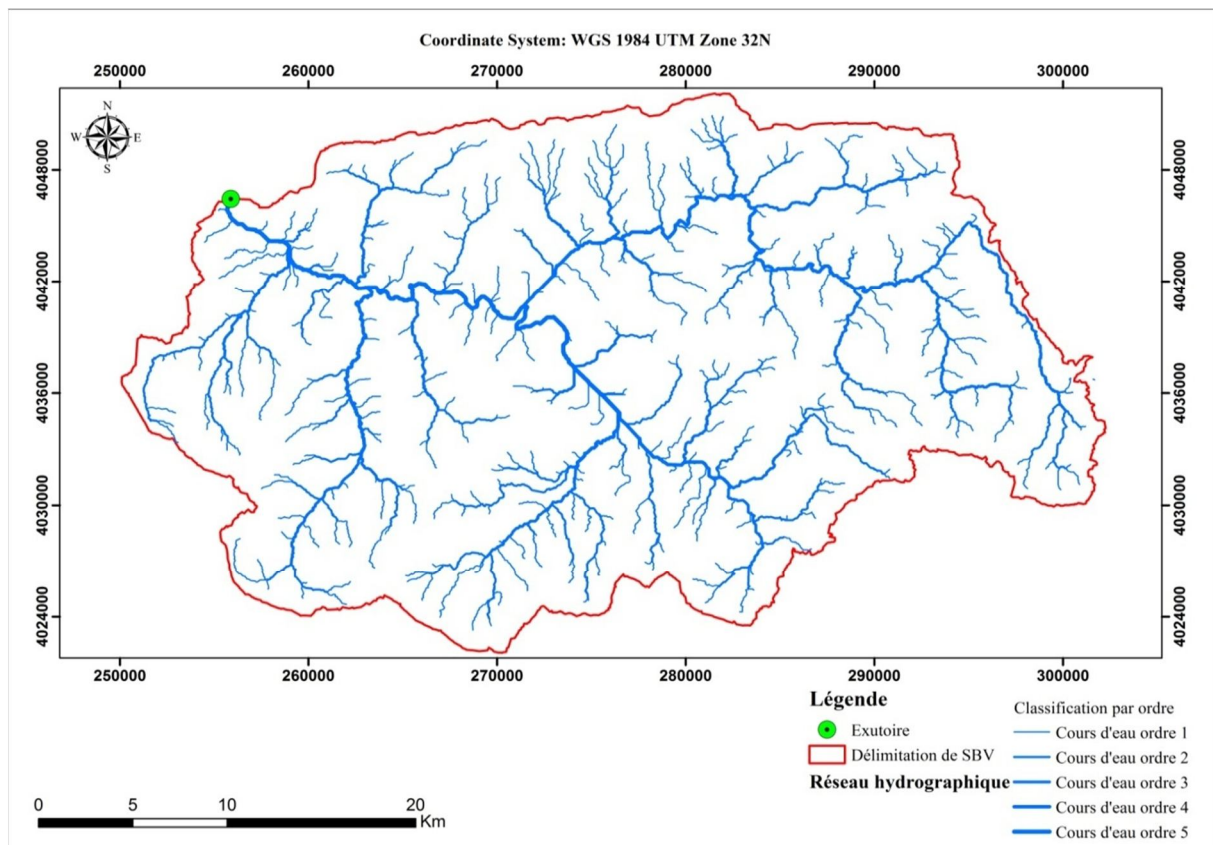


Figure II.9: Réseau hydrographique du bassin versant.

Tous les résultats de calcul sont résumés dans le tableau II.6

Tableau II.6: Caractéristiques géométriques et hydromorphométriques du bassin

Paramètres	Symbole	Unité	Valeur
Superficie	A	Km ²	1055.02
Périmètre	P	Km	174.2
Indice de compacité	K _G	/	1.5
Longueur du rectangle équivalent	L _R	Km	72.44
Largeur du rectangle équivalent	l _R	Km	14.56
Indice de pente global	I _g	%	10.84
Dénivelée spécifique	D _S	m	352
Indice de pente de Roche	I _p	%	7.7
Altitude moyenne	H _{moy}	m	579
Altitude maximale	H _{max}	m	1361
Altitude minimale	H _{min}	m	131
Altitude à 5%	H _{5%}	m	1095
Altitude à 95%	H _{95%}	m	310
Pente moyenne de l'oued	I _{moy}	m/m	37.87
Temps de concentration	t _c	Heures	6.27
Densité de drainage totale	D _d	Km/Km ²	0.81
Coefficient de torrentialité	C _t	/	0.54
Longueur de cours d'eau principale	L _{cp}	Km	33.49
Longueur des thalwegs totales	L _{pt}	Km	854.84
Classification de Horton	Ordre	/	5

Conclusion :

L'étude des différentes caractéristiques de sous bassin nous avons pu tirer les synthèses suivantes :

- Un climat n'est pas uniforme, car nous avons pu distinguer trois types de climat : climat littoral tempéré, climat de l'Atlas Tellien et climat des hautes plaines.

- Un réseau hydrographique très développé (ordre 5). Oued principale et leurs affluents constituent son squelette hydrographique.

- Une altitude maximum est de 1361 m au pic et un temps de concentration de 6.27heures.

Chapitre III. Modélisation pluie débit par HEC HMS

Chapitre III : Modélisation pluie débit par HEC HMS

Introduction

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

Toutefois, dans le cadre du cours Ressources hydriques, le modèle sera utilisé sur une base événementielle. HEC-HMS est un modèle distribué qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs parties, appelées sous-bassins, qui sont considérées comme ayant chacune des caractéristiques homogènes. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins versants non urbanisés. HEC-HMS permet également de simuler et d'incorporer des réservoirs et des dérivations. [07,08,09,10,11]

III.1 Découverte de HEC-HMS sous ArcGis

III.1.1 La description du modèle Arc Gis

III.1.1.1 Présentation du logiciel ArcGis

ArcGis est un logiciel permettant d'exploiter un Système d'Information Géographique (SIG) ; Un logiciel SIG permet l'acquisition, le stockage, la mise à jour, la manipulation, et le traitement de données géographiques. De plus, il permet de faire de la cartographie et de l'analyse spatiale de façon précise en fonction de l'échelle désirée.

Le principe directeur d'un SIG est le suivant : nous avons d'un côté les données géométriques et de l'autre les données attributaires. Ces données sont stockées sous format numérique et organisées par couches (appelées aussi « shapefiles » dans ArcGis). [07,08,09,10,11]

Petit point de détail : ArcGis est en réalité une suite, qui se décline en trois versions (ArcView, ArcEditor et ArcInfo).

La différence entre ces versions est le nombre d'options supplémentaires disponibles, ArcView en possédant le moins. Ceci est indépendant des extensions (Spatial Analyst, 3D Analyst... que l'on peut acheter en supplément de chaque suite).

Chacune de ces trois versions de la suite ArcGis est constituée d'une interface ArcMap et d'une interface ArcCatalog (accessoirement d'une interface ArcToolBox séparée pour les versions antérieures à la version 9.0).

La version 10.3 apporte la possibilité de gérer ArcCatalog et ArcToolBox directement depuis l'interface d'ArcMap.

III.1.1.2 Qu'est ce qu'ArcGIS ?

ArcGIS est un système regroupant des logiciels clients (ArcView, ArcEditor, ArcInfo et ArcExplorer) et des logiciels serveurs (ArcSDE et ArcIMS).

ArcView 9 est un Système d'Information Géographique permettant de visualiser, d'interroger, d'analyser et de mettre en page les données. Il fournit des outils interactifs pour explorer, sélectionner, afficher, éditer, analyser, symboliser et classifier les données ou pour créer automatiquement, mettre à jour ou gérer les métadonnées.

ArcView 9 comprend ArcCatalog, ArcMap et une version allégée d'ArcToolBox.

ArcCatalog fournit à l'utilisateur des fonctions de :

- Manipulation des données (créer, définir, déplacer, renommer,...)
- Consultation des données (affichage, interrogation,...)
- Documentation des données (métadonnées)

ArcMap est l'application centrale d'ArcView. Elle permet de réaliser les tâches suivantes :

Visualiser des données spatiales et attributaires (Etiquetage, symbologie, filtrage d'entités,...) [07]

III.1.1.3 Couplage ArcGIS – HEC-Géo HMS :

Les extensions HEC-Géo HMS et HEC-Géo RAS permettent de faciliter le travail de modélisation. Ces extensions sont gratuites, par contre il faut disposer d'un logiciel de système d'information géographique (SIG) ainsi que des extensions Spatial Analyst et 3D Analyst.

Pour la présente étude les versions suivantes ont été utilisées :

- ArcGIS 10.3 logiciel de système d'information géographique
- HEC-Géo HMS 10.3 outil hydrologique géo-spatial
- HEC-HMS 4.4.1 modélisation hydrologique

HEC-Géo HMS a été développé comme un outil hydrologique géo-spatial pour les ingénieurs et hydrologues. Il assiste l'utilisateur pour la délimitation en sous bassins versants, ainsi que la détermination des paramètres hydrologiques qui seront directement employées par HEC-HMS (le logiciel de modélisation hydrologique). [07,08,09]

III.1.1.4 Les étapes de répartition du bassin en sous bassin par HEC-Géo HMS :

A partir du MNT, sont réalisées neuf opérations qui permettent d'obtenir la schématisation du modèle de bassin :

1. Correction du MNT par un remplissage des cuvettes (**FillSinks**) afin de pouvoir déterminer le sens d'écoulement dans l'étape suivante.
2. Sens de l'écoulement (**Flow direction**). Lors de cette étape la direction de chaque cellule est définie selon les 8 directions possibles (nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest, nord-ouest).
3. Accumulation de l'écoulement (**Flow Accumulation**). Cette étape détermine le nombre de cellules ascendantes'écoulant dans une cellule donnée.
4. Définition du cours d'eau (**Stream Definition**). Cette étape classe toutes les cellules dont l'accumulation d'écoulement est plus grande qu'un seuil défini par l'utilisateur.
5. Segmentation du cours d'eau (**Stream Segmentation**). Cette étape divise les cours d'eau en des segments. Les segments de cours d'eau sont des sections d'un cours d'eau qui relient deux jonctions successives ou une jonction et un exutoire ou une jonction et une diffluence.
6. Délimitation en sous-bassins (**Catchment Grid Delineation**). Cette étape trace les limites des sous-bassins pour chaque segment de cours d'eau.
7. Polygones des sous-bassins (**Catchment Polygone Processing**). Cette étape convertit la représentation en grille des sous-bassins en représentation vectorielle.
8. Traitement des segments de cours d'eau (**Drainage Line Processing**). Cette étape convertit les ruisseaux de la représentation en grille en représentation vectorielle.
9. Agrégation des lignes de partage (**Adjoint Catchment Processing**). Cette étape agrège les sous-bassins à chaque confluence de ruisseaux. [07]

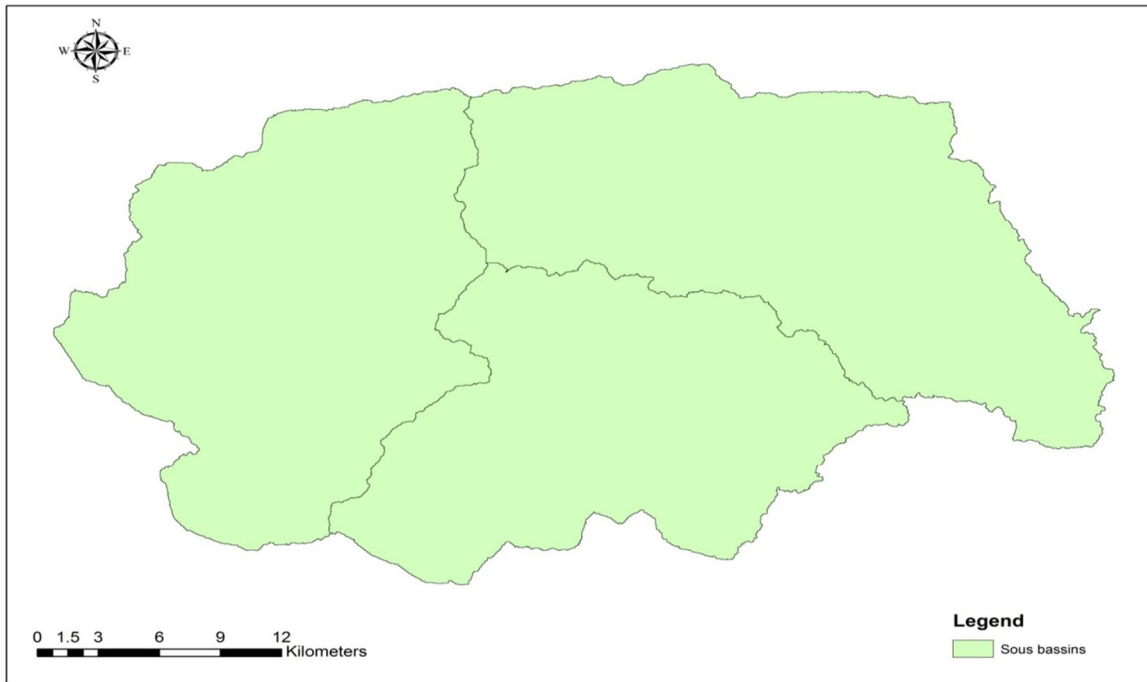


Figure III.1: Répartition du bassin en sous bassin par HEC-Géo HMS

La définition des cours d’eau ne semble donc pas satisfaisante. La résolution spatiale du MNT est probablement insuffisante pour tenir compte des rectifications de cours d’eau.

Le découpage initial en sous-bassins peut être amené par l’utilisateur. Pour ce faire, il faut d’abord créer un nouveau projet et définir la zone d’étude en indiquant l’exutoire du bassin versant. Cours d’eau principaux

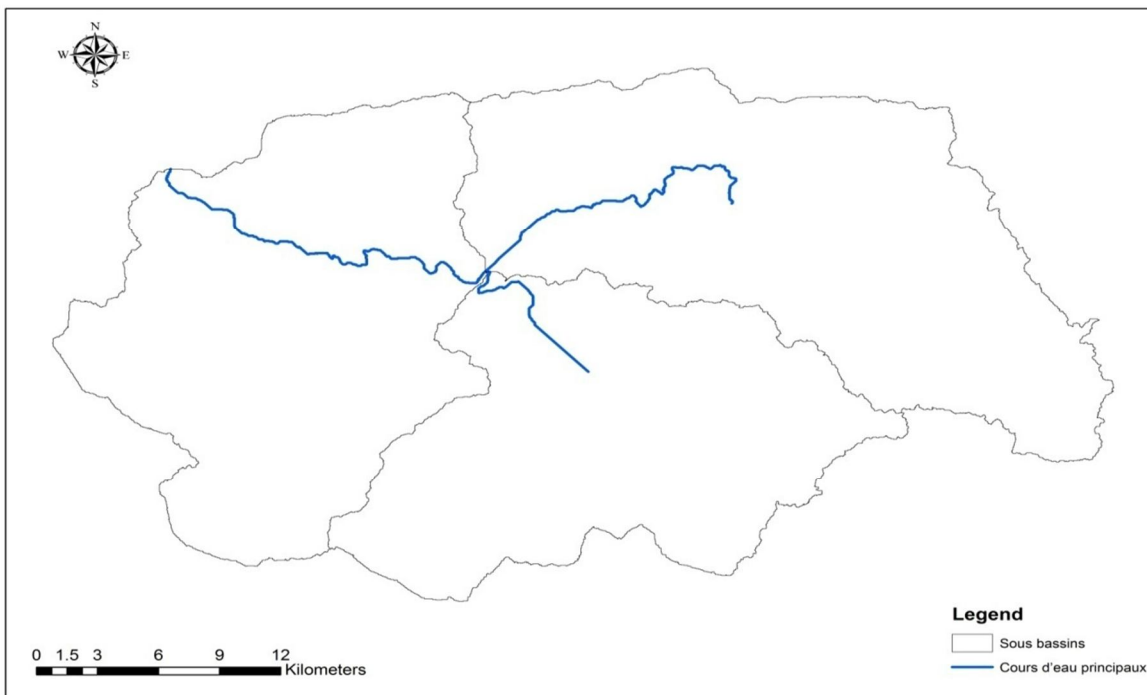


Figure III.2 : Découpage final des sous-bassins versants par HEC-Géo HMS

L'étude hydrologique doit permettre d'estimer les débits de ruissellement de chaque sous- bassin versant. Ces débits seront injectés dans le modèle hydraulique. Nous distinguons deux types d'apports latéraux. Selon le type d'apports latéraux, l'injection dans le modèle hydraulique sera différente :

- Les apports latéraux ponctuels, provenant des affluents de la kotone et begrats, sont injectés à la confluence entre la kotone et l'affluent en question,
- les apports latéraux diffus, provenant des bassins intermédiaires drainés par la BV, sont uniformément répartis sur le tronçon de rivière correspondant à l'apport.

III.1.1.5 Paramètres morphologiques des sous-bassins versants :

Plusieurs outils dans HEC-Géo HMS permettent de définir les caractéristiques des sous-bassins.

- La forme d'un bassin versant influe sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Cette forme est caractérisée par l'indice de Gravelius, donné par la formule suivante :

$$K_G = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}} \dots \dots \dots (III.1)$$

P : Périmètre du bassin (km)

S : Surface du bassin (km²)

- L'ensemble des coefficients de Gravelius calculés sont supérieures à 1, donc les bassins sont plutôt de forme allongée que circulaire ou compacte. Cet indice a une influence sur la réponse hydrologique du bassin versant.

Tableau III.1: Caractéristiques géométriques des sous-bassins versants

Name de SBV	Périmètre (km)	Surface (km ²)	coefficient de Gravelius
W40	113.2	386.64	1.61
W50	95.89	358.52	1.42
W60	98.95	309.86	1.57
BV total	174.2	1055.02	1.5

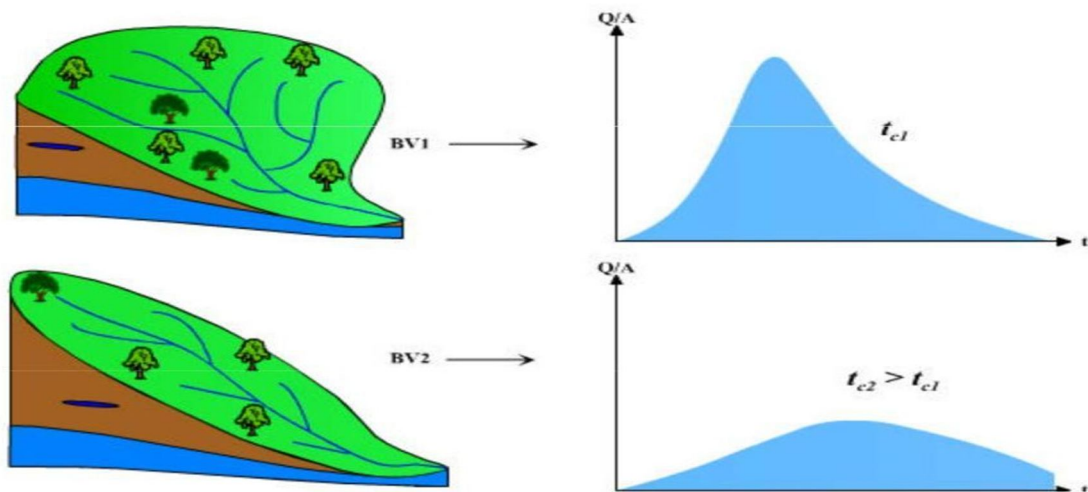


Figure III.3: Influence de la forme du bassin versant sur la réponse hydrologique.[07]

Le calcul du plus long chemin hydraulique a également été réalisé à l'aide de HEC-Géo HMS. L'exécution de cette manipulation a échoué et provoqué une erreur. Après diverses recherches dans des forums, et des échanges de mails avec les développeurs du logiciel, le problème a été résolu en effaçant toutes traces dans les dossiers temporaires. Le tracé du plus long chemin hydraulique par sous-bassin versant peut être amendé par l'utilisateur grâce à l'outil « Interactive Longest Flow Path ».

Les résultats sont présentés sur la figure 04 plus long chemin hydraulique par sous-bassin

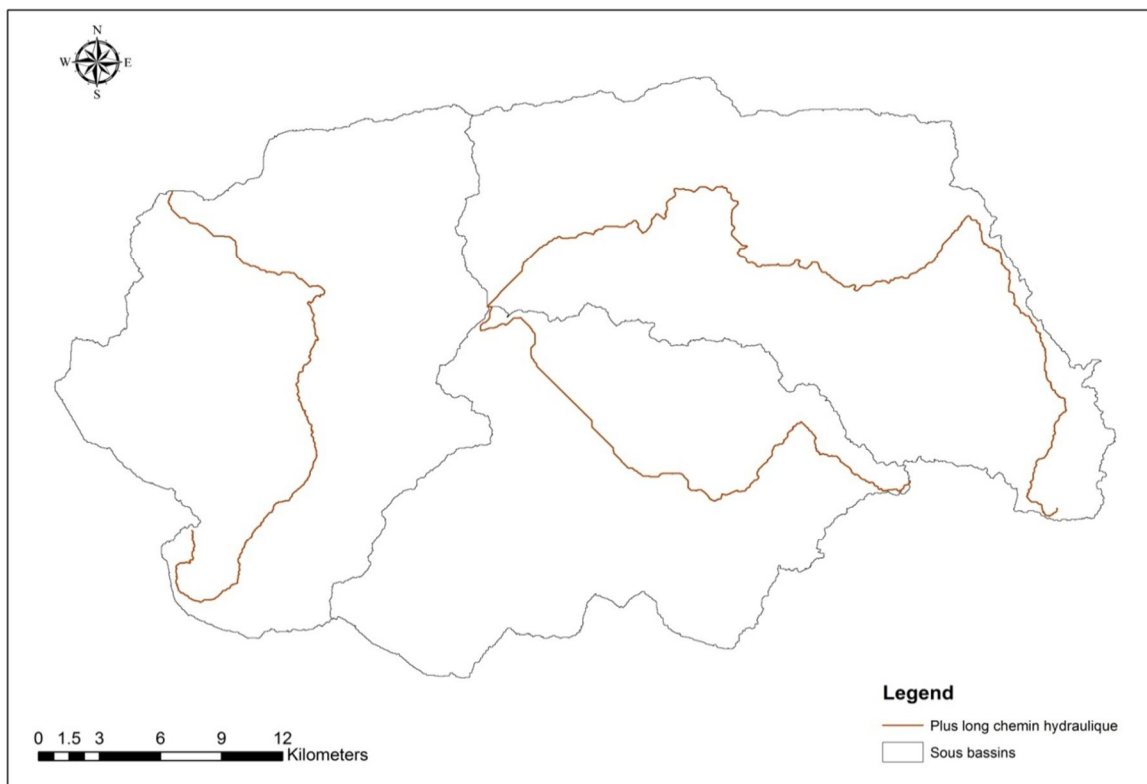


Figure III.4: Plus long chemin hydraulique par sous-bassin versant

Tableau III.2: Plus longs chemins hydrauliques

Name de sous bassin	Plus long chemin hydraulique (km)
W40	59.29
W50	38.77
W60	34.69

Le plus long chemin du bassin versant en entier est de 59.29kilomètres.

Les plus longs chemins hydrauliques interviennent dans le calcul du temps de concentration qui peut être calculé selon plusieurs manières :

$$\text{Formule de Kirpich : } t_c = 0.66 * L^{0.77} * L^{-0.385} \dots\dots\dots(\text{III.2})$$

$$\text{Formule de Passini : } t_c = 0.108 * (S * L)^{\frac{1}{3}} * I^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(\text{III.3})$$

$$\text{Formule de Ventura : } t_c = 0.127 * \left(\frac{S}{I}\right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(\text{III.4})$$

$$\text{Formule de Giandotti : } t_c = \frac{4 * S^{\frac{1}{2}} + 1.5 * L}{0.8} * (I * L * 1000)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

Avec:

t_c : Temps deconcentration(h)

L : plus long chemin hydraulique(Km)

I : pente (m/m)

S : Superficie du bassin versant(Km²)

Les résultats sont présentés les temps de concentration retenus sont les suivants :

Tableau III.3: Temps de concentration retenus

Name de sous bassin	t_c (kirpich)	t_c (Passini)	t_c (ventura)	t_c (Giandotti)	t_{cmoy}
W40	0.29	0.74	3.28	10.19	3.62
W50	0.19	0.66	3.12	8.09	3.02
W60	0.17	0.61	2.84	7.14	2.69

III.1.2 La description du modèle HEC-HMS :

Dans cette rubrique, l'accent sera mis sur le modèle HEC-HMS dont nous allons se servir pour la modélisation du oued Cheliff - Ghrib, de point de vue générale, en traitant des points tels que : sa création, son mode de fonctionnement, ses capacités, ses modules, ses formalismes.

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.

III.1.2.1 Les caractéristiques générales du modèle :

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie - débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse HEC (HEC-RAS, HEC-Géo RAS, HEC- Géo HMS...).[07]

Le HEC-HMS a été largement employé et validé dans plusieurs bassins versants à climats contrastés à travers le monde, il a été utilisé lors pour la prévention contre les dégâts des inondations dans les zones potentielles à cet aléa, ainsi que par les bureaux d'études, sur les bassins de moyenne et grande taille, pour leurs études hydrologiques de détermination des quantiles de débit.[07]

III.2 Modélisation pluies-débits par le modèle HEC-HMS

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-HMS.

En effet, afin de s'adapter aux différents contextes d'études, ce modèle opère selon le principe de tâches distinctes, c'est-à-dire qu'il simule le bassin à un système uniforme composé de plusieurs composantes assurant chacune de représenter un aspect particulier du processus pluie-débit et agissant successivement pour produire l'hydrogramme de l'écoulement. Pour y parvenir, chaque tâche est confiée à un formalisme d'un module choisi librement par l'utilisateur en fonction de ses besoins et ses données, ainsi, en mutant les formalismes d'un module, le HEC-HMS peut changer de type de modèle, par exemple passer d'un modèle événementiel à un modèle continu, de global au distribué, d'empirique au conceptuel et ainsi de suite. [08,09]

III.3 Le processus de fonctionnement :

Comme nous venons de le mentionner au chapitre précédent, le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit, et c'est la combinaison des résultats des modules les uns aux autres qui donne l'hydrogramme final.

III.3.1 Fonctionnalités :

Les données d'entrée peuvent être conçues pour les éléments du bassin versant comme les sous bassins et les tronçons de cours d'eau ou bien simultanément pour des groupes d'éléments analogues. Les tableaux et formulaires pour l'introduction de données nécessaires sont accessibles {partir d'un schéma visuel du bassin versant. Pour effectuer une première simulation, il est nécessaire de créer une base de données pour caractériser le bassin versant et déterminer les averses qui seront employées comme données d'entrée du modèle. Les principales étapes de la simulation sont :

- ✓ Démarrage d'un nouveau projet;
- ✓ Définition du modèle de bassin versant;
- ✓ Données de la ou des stations météorologiques;
- ✓ Définition du modèle de précipitation;
- ✓ Définition des paramètres de contrôle de la simulation;
- ✓ Création et exécution d'une simulation;
- ✓ Visualisation des résultats. [08,09]

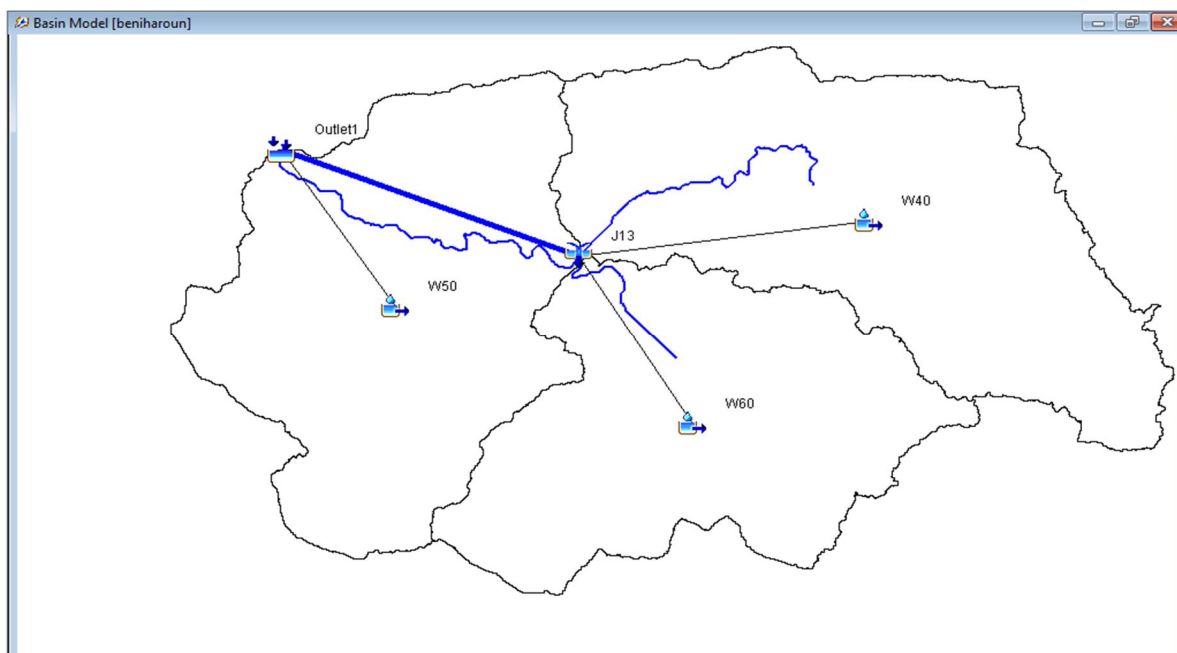


Figure III.5: Fenêtre bassin versant Beni Haroun et ses sous bassins.

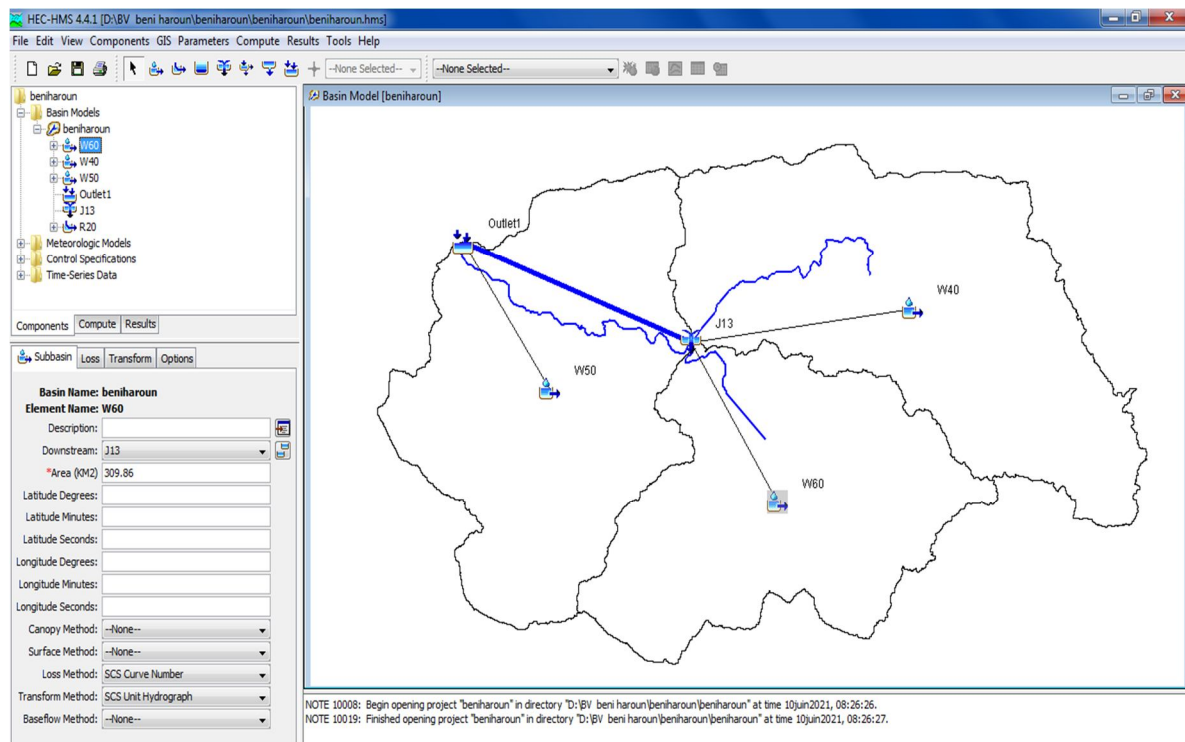


Figure III.6: Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente le bassin versant et leurs sous bassins.

La première étape consiste à schématiser le bassin versant étudié en éléments fondamentaux connectés entre eux sous forme d'un arbre ramifié. Le HEC-HMS offre l'opportunité de représenter toutes les entités naturelles ou artificielles installées dans un bassin et qui influencent le processus de transformation pluie-débit, allant depuis les sous bassins, les exutoires jusqu'aux canaux de rivières et les canaux de diversion d'eau, en passant par les réservoirs, les retenues de barrages,...etc. Les éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant sont les suivants:

- ✓ L'élément « Subbasin » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous-bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- ✓ L'élément « Reach » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- ✓ L'élément « Réservoir » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage,...etc. ses caractéristiques attribués permettent de définir les conditions stockage-déstockage.
- ✓ L'élément « Source » : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.
- ✓ L'élément « Jonction » : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments, comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.

- ✓ L'élément « Diversion » : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.
- ✓ L'élément « Sink » : simule l'exutoire des sous bassins versants. [08,09]

Dans notre cas, cette étape sera totalement et automatiquement réalisée par le logiciel WMS lors de la phase de caractérisation physique.

IV.3.2 Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS : [07]

L'application du modèle HEC-HMS nécessite une banque de données concernant le bassin ou les sites étudiés, afin qu'on puisse appliquer le modèle. Parmi les données indispensables on peut citer dans notre cas:

- ✚ Les caractéristiques morpho-métriques des bassins :
 - ✓ Les surfaces des sous bassins versants
 - ✓ Type de sol
 - ✓ Couvert végétal
- ✚ Les caractéristiques météorologiques :
 - ✓ Les précipitations
 - ✓ L'évapotranspiration
 - ✓ Les données de spécifications de contrôle
 - ✓ La date initiale
 - ✓ La date finale
 - ✓ L'intervalle de temps de calcul

III.4 Les données de bases d'entrée :

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

Tableau III.4: Données de base des sous-bassins versants.

N°	Sous bassin	Surface(km ²)	Pente(m/m)	Lag time (mn)	CN	Le pourcentage d'imperméable
1	Sous-BV W40	386.64	0.015864	130	65	44
2	Sous-BV W50	358.52	0.019979	108	64	44
3	Sous-BV W60	309.86	0.018353	97	73	44

CN: sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration. Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables NRCS (annexe 1) où on combine la nature de l'utilisation du sol, son traitement, les conditions hydrologiques avec le type de sol pour trouver la valeur de CN.

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 :

$$CN_{\text{composité}} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \dots\dots\dots(IV.1)$$

CN_{composité} : Le CN utilisé pour l'ensemble du bassin versant par la fonction de production ;

CN_i : Le CN d'un composé hydrologique du sol (classe d'occupation du sol + classe de sol) ;

A_i : Surface de drainage du composé hydrologique du sol.

Tableau III.5: Détermination de CN moyen pour le bassin versant

CN _i	Surface S _i (km ²)	CN _i * S _i
65	386.64	25131.6
64	358.52	22945.28
73	309.86	22619.78
somme	1055.02	70696.66
CN_{composité}		67

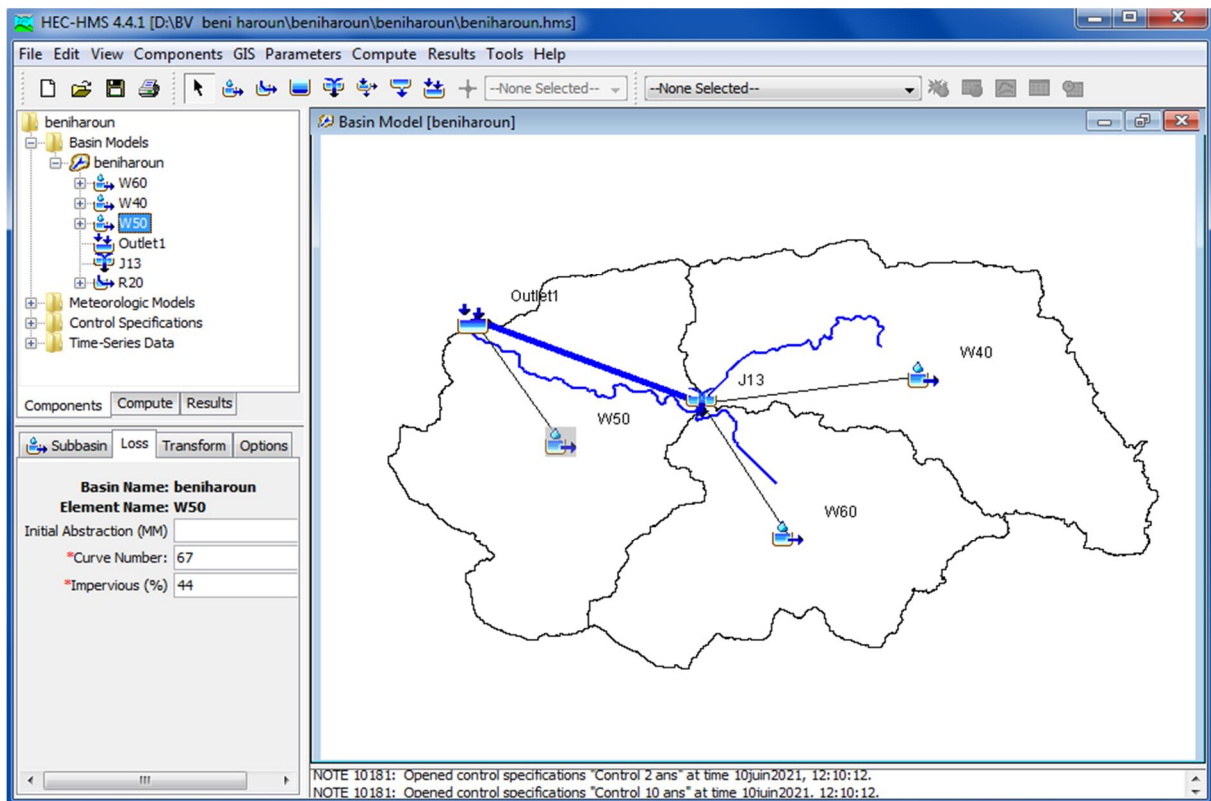


Figure III.7: Fenêtre de donnée de CurveNumber (CN) et Imperméabilité.

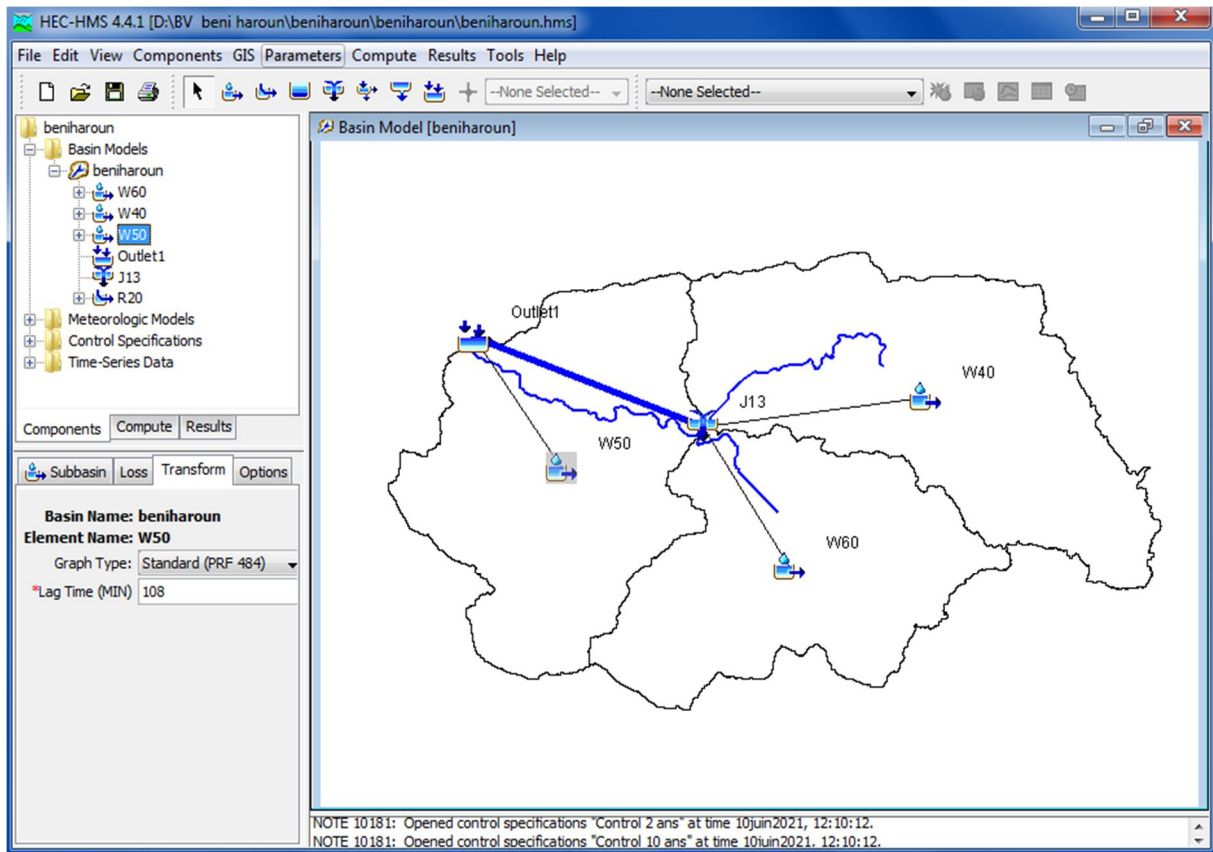


Figure III.8: Fenêtre représente Lag time.

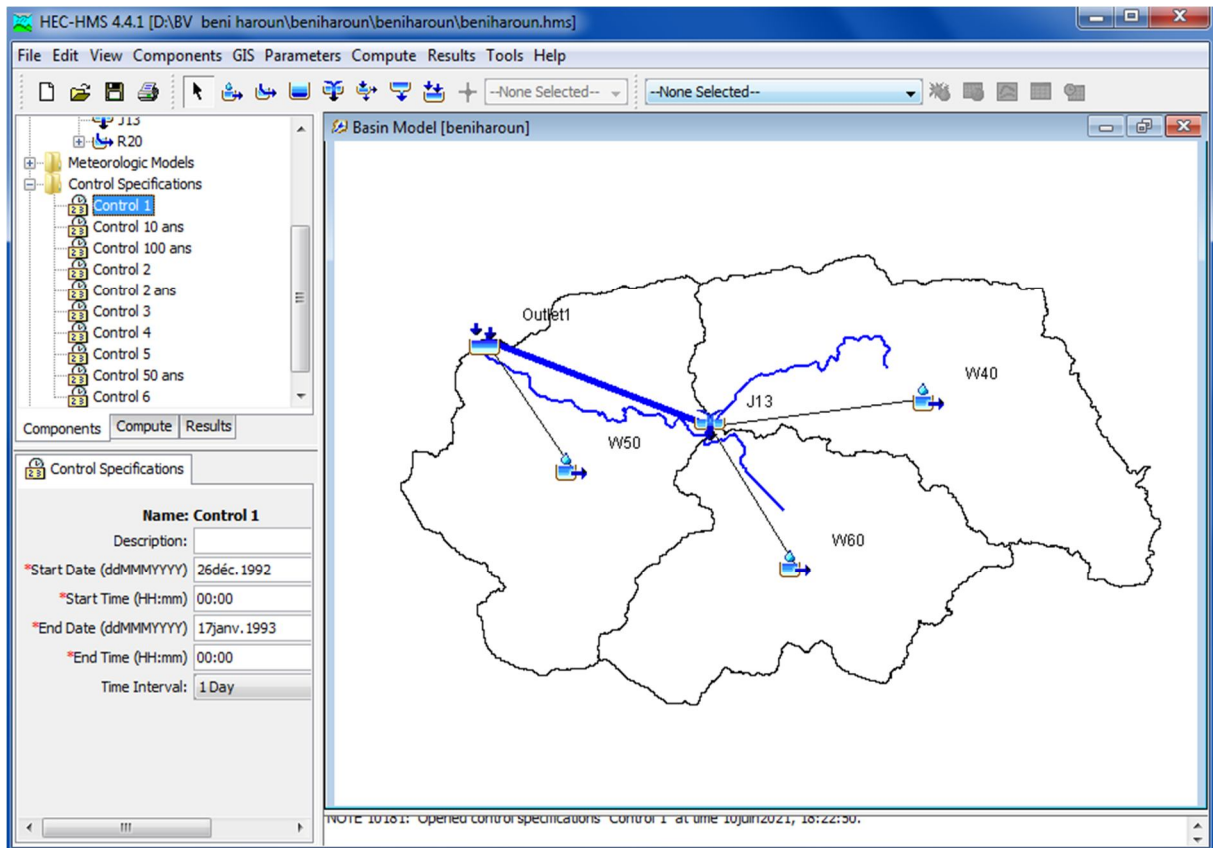


Figure III.9: Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps.

La figure III.9 présente les procédures de saisie des données (temps de démarrage du crue, l'intervalle de temps et temps du fin du crue) sur le logiciel HEC HMS.

Résultats desimulation :

Les résultats de simulation pour les deux fonctions CNet pourcentage d'imperméable dans le tableauIII.6

Tableau III.6:Résultats de simulation

Evènement	Paramètres de modèle			Résultats de simulation					
	NRCS CN			Q _p (m ³ /s)			V (m ³)×10 ³		
	pourcentage d'imperméable	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Diff %	Obs.	Sim.	Diff %
26déc.1992/17janv.1993	44	67	108	148.50	215.80	31.19%	89408.00	86362.00	-3.53%
22nov-03déc/1998	44	67	108	74.60	288.00	74.10%	13062.00	58118.90	77.53%

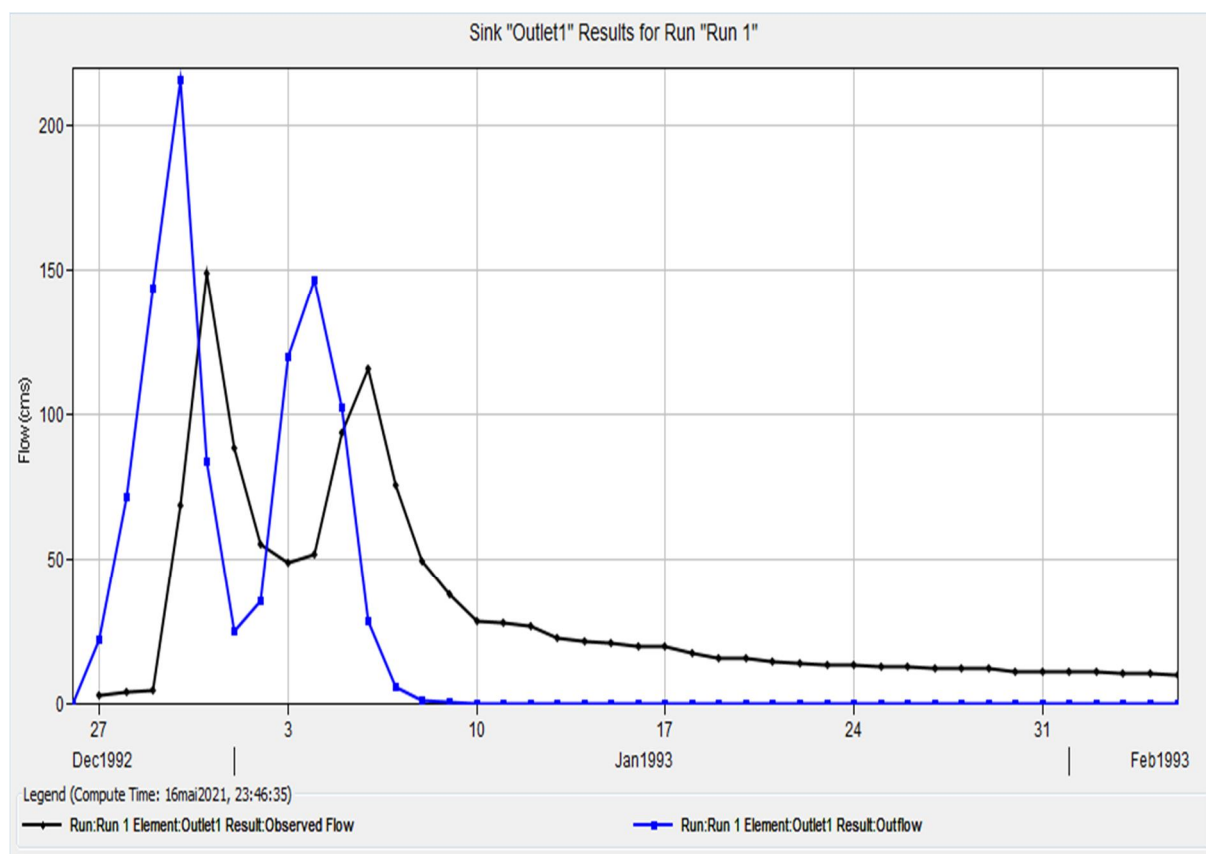


Figure III.10: Hydrogrammes des crues de l'évènement de 26déc.1992/17janv.1993

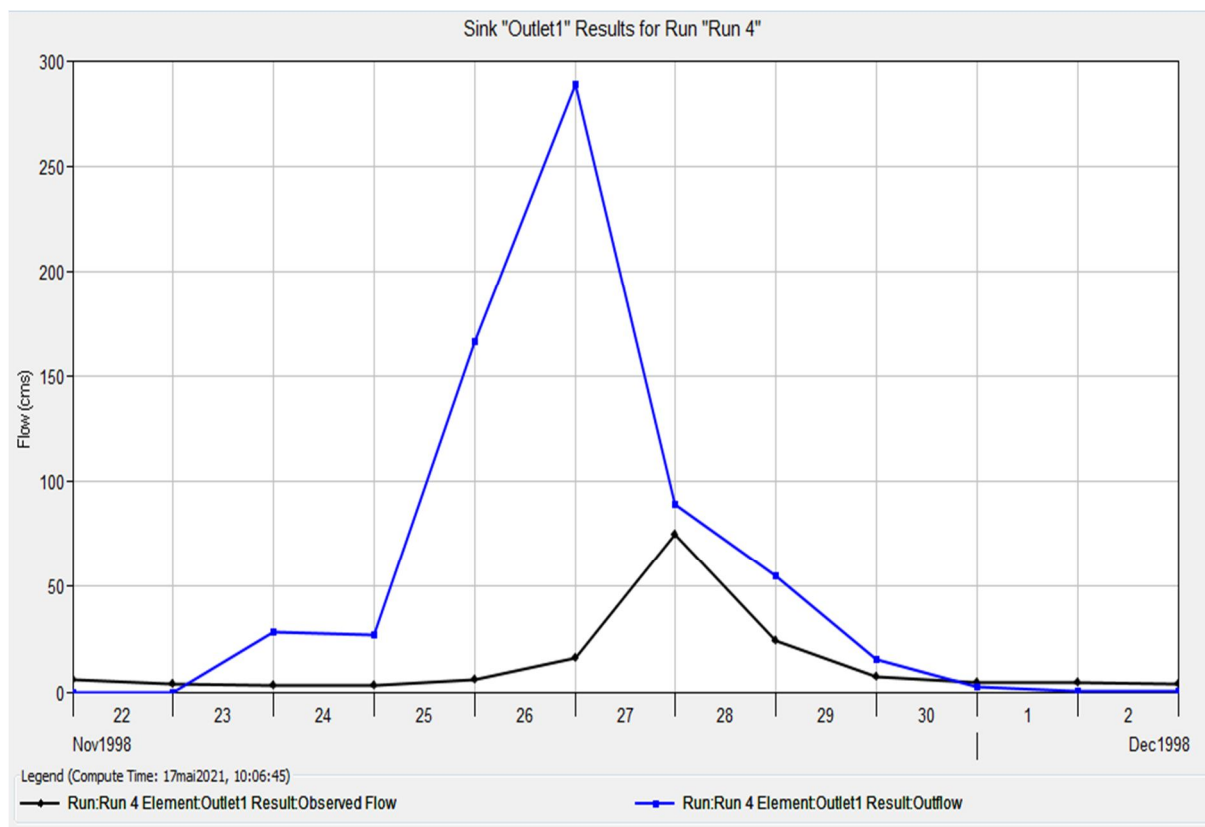


Figure III.11: Hydrogrammes des crues de l'évènement de 22nov-03déc/1998

III.5 La calibration du modèle :

Afin d'aboutir aux valeurs optimisées des paramètres du modèle, la calibration a été effectuée sur les deux évènements, en utilisant la fonction objective sur le débit de pointe.

III.5.1 Les résultats de calibration :

À partir des résultats de la calibration, nous pouvons constater d'une manière générale que la valeur de la fonction objective, les valeurs optimisées des paramètres, les débits de pointe et le volume simulés varient tous en fonction de l'évènement, pour les deux fonctions CN et pourcentage d'imperméable. Les résultats de calibration de modèle se trouvent dans les tableaux suivants :

Tableau III.7: Résultats de calibration

Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de calibration			
	NRCS CN			Qp (m3/s)		V (mm)×10 ³	
	Le pourcentage d'imperméable	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
26déc.1992/17janv.1993	10	48	108	148.50	66.70	89408.00	27749.10
22nov-03déc/1998	10	48	108	74.60	73.00	13062.00	14506.40

Les graphes de calibration:

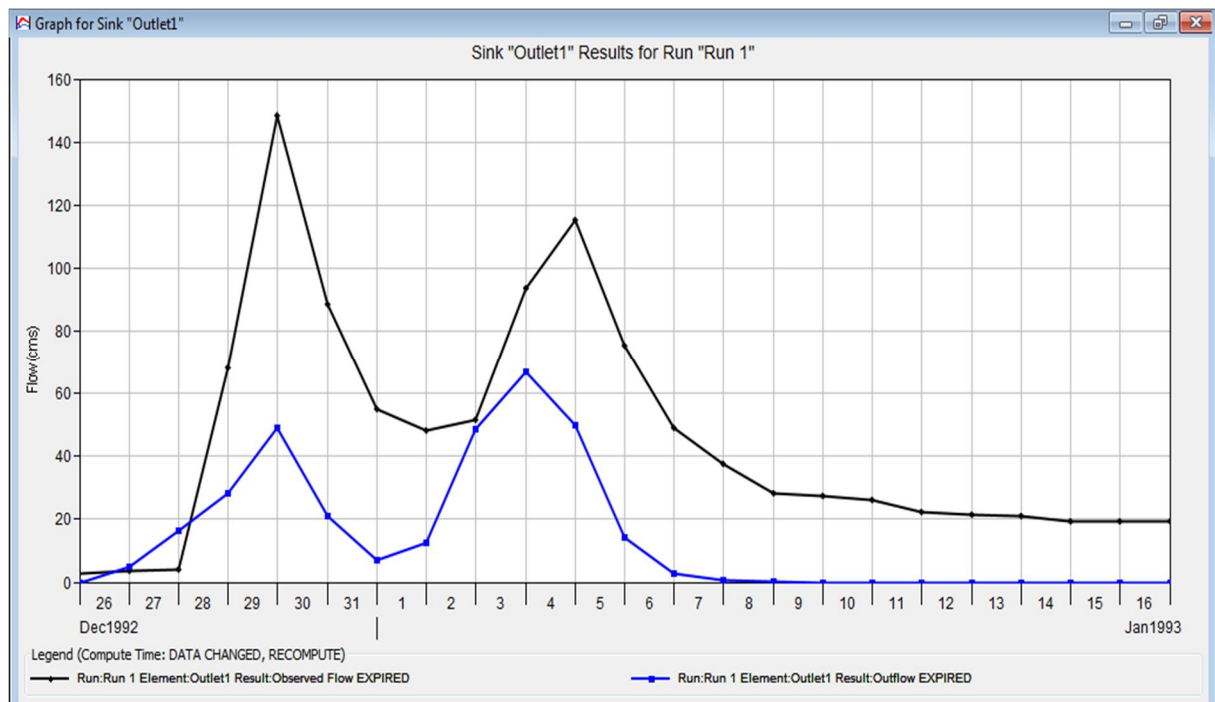


Figure III.12: Hydrogrammes des crues de l'évènement de 26déc.1992/17janv.1993 après calibration

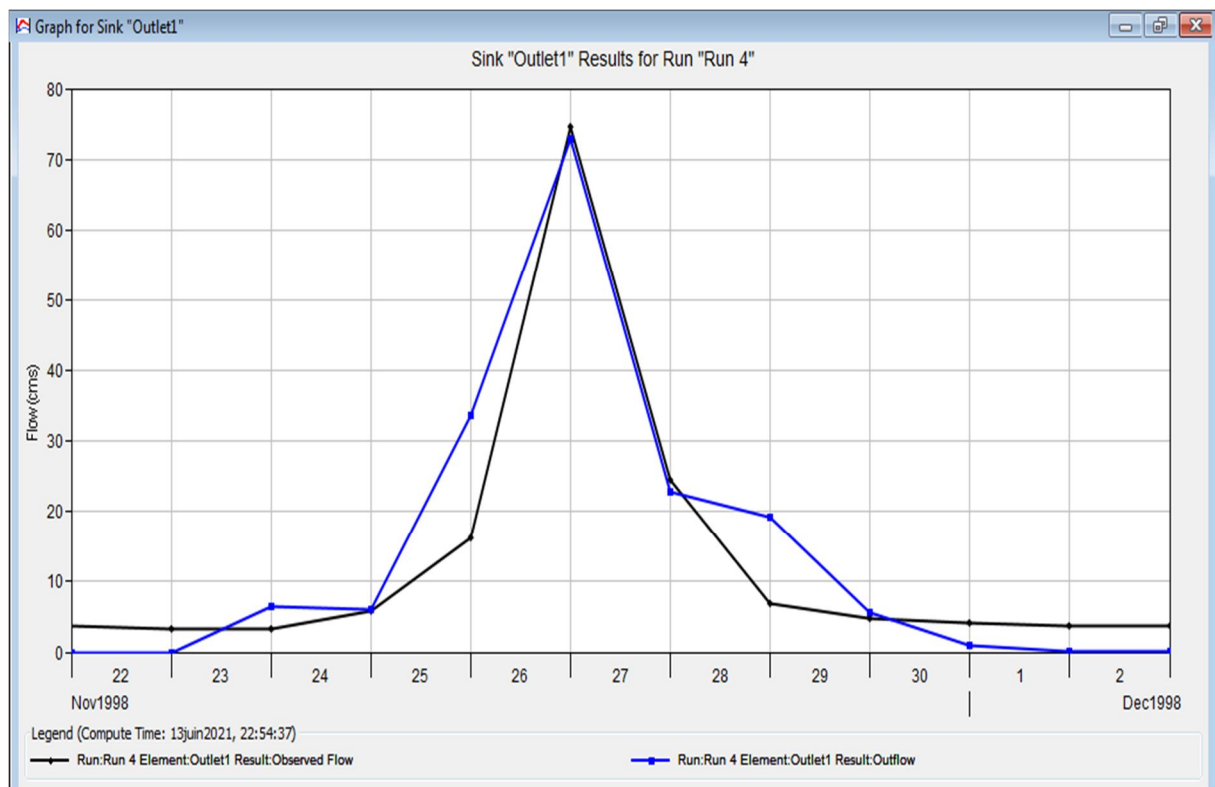


Figure III.13: Hydrogrammes des crues de l'évènement de 22nov-03déc/1998 après calibration

Le modèle est calé par l'évènement du 22/11/1998 à 03/12/1998. Le débit maximal instantané enregistré le 28 novembre 1998 est de 74.6 m³/s.

Les paramètres estimés auparavant sont à optimiser de manière à faire correspondre convenablement les hydrogrammes observés et simulés. « Le but du calage est de trouver le jeu de paramètres qui permet la reproduction la plus fidèle possible du fonctionnement du système étudié ». Les paramètres à caler sont les suivants :

Tableau III.8: Paramètres de calage

Paramètres	CN	T lag	imperméabilité%
Valeursoptimisés	48	108	10

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

Critère de performance :

Les objectifs principaux de la procédure de calage des modèles vont être de:

- Reconstituer 'correctement' la forme générale de l'hydrogramme observé;
- Arriver à un 'bon' accord entre les débits de pointe calculés et observés;
- Obtenir un bilan 'convenable' sur les volumes.

Afin de quantifier le degré d'accomplissement de ces différents objectifs, des critères de performance sont utilisés.

Pour le calage, le critère de performance retenu est le critère de NASH. Ce dernier donne une appréciation globale de la reconstitution de la crue.

La formulation du critère de Nash est la suivante :

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs})^2} = 0.885$$

Ce critère vaut 100% pour une reconstitution parfaite de la crue et s'annule pour le modèle dit à toute heure, le débit calculé est égal au débit moyen de la crue. Ainsi, il indique si la simulation issue du modèle est meilleure qu'une estimation qui donnerait le débit moyen sur toute la période de calage.

Comme il utilise les carrés d'écart, il est sensible à la reconstitution des forts débits. Nous considérons comme mauvais un Nash inférieur à 70%.

Donc le NASH = 88.50 % le modèle est calibré pour l'évènement 22/11/1998 à 03/12/1998.

III.6. La validation du modèle :

La validation des paramètres issus du calage sera effectuée à l'aide des pluies et débits observés en 05avr-15avr/1992. Le débit maximal instantané enregistré le 10 avril 1992 est de $52.06 \text{ m}^3 / \text{s}$. « La validation consiste à tester la performance du modèle en utilisant le jeu de paramètres obtenu par calage pour simuler un événement observé différent de ceux utilisés pour le calage ».

Le modèle est validé, si les paramètres obtenus par calage permettent de reproduire l'évènement de validation. Il peut alors être exploité pour simuler des événements variés.

En appliquant le jeu de paramètre défini dans le tableau III.8aux événements nous arrivons aux résultats suivants:

Tableau III.9:Résultats de validation du modèle

Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de calibration			
	NRCS CN			Qp (m3/s)		V (mm)×10 ³	
	Le pourcentage d'imperméable	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
05avr-15avr/1992	10	48	108	52.10	63.10	13660.70	13300.20

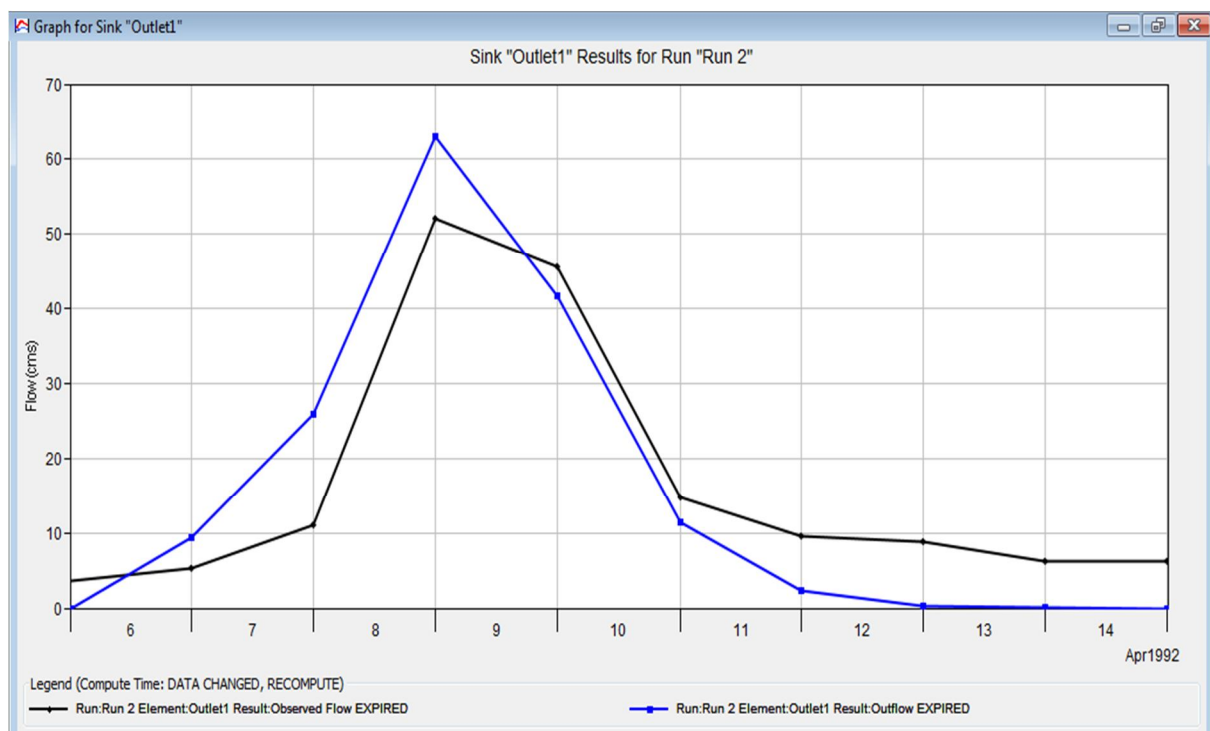


Figure III.14: Hydrogrammes des crues de l'évènement de 05avr-15avr/1992 après validation du modèle

La formulation du critère de Nash est la suivante :

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs})^2} = 0.782$$

Le critère de validation de modèle NASH=78.20% Statistiquement, le critère de Nash montre que le modèle est validé.

I.7.1 Prédiction du comportement futur du BENI HAROUN :

Nul ne peut nier l'effet des changements climatiques et d'occupation du sol sur les processus hydrologiques et la perturbation de l'équilibre naturel des écoulements. Par conséquent, les planificateurs et les décideurs sont censés connaître quelles seront les répercussions en aval de leurs actions anthropiques entreprises en amont du bassin versant, telle que le développement urbain, la déforestation, les reboisements,...

À la lumière de ceci, la présente partie essaie de réutiliser le modèle HEC-HMS ajusté au bassin versant du beniharounpour prédire sa réponse à des scénarios positifs et négatifs prenant en considération des modifications au niveau climatique par l'exploitation des averses quantiles prédéterminées, et d'autres touchant l'occupation du sol.

Tous ces scénarios vont être exécutés sur l'événement de 22nov-03déc/1998 auquel le modèle a pu restituer le débit de pointe.

Pour le volume de crue, il sera comparé à celui simulé par le modèle et ensuite à celui réellement observé à la station de l'exutoire.

III.7.1 Scénario 1 :

À partir de ces modifications, nous avons utilisé le CN composite du bassin qui est égal à 48. Le pourcentage d'imperméable est égal à 10 %.

III.7.1.1 Les données d'entrée :

Le tableau suivant résume les valeurs estimées de la pluie pour des périodes de retour qui seront utilisées dans les simulations.

Tableau III.10: Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du beniharounpour différentes périodes de retour

Période de retour T(ans)	Pjmax (mm)
2	44.63
10	78.93
50	111.29
100	125.64

Chaque hauteur de pluie sera additionnée au jeu de paramètres optimisés définis dans le tableau III.9 pour configurer un fichier de simulation distinct. Par conséquent, nous aurons à comparer quater fichiers de simulation, en plus des résultats simulés et observés pour l'événement de 22nov-03déc/1998.

III.7.1.2 Les résultats de la simulation :

Les résultats résumés dans le tableau III.11 et les graphes portés sur les figures III.15 ;III.16 ;III.17 etIII.18présentent les hydrogrammes des crues pour différentes périodes de retour.

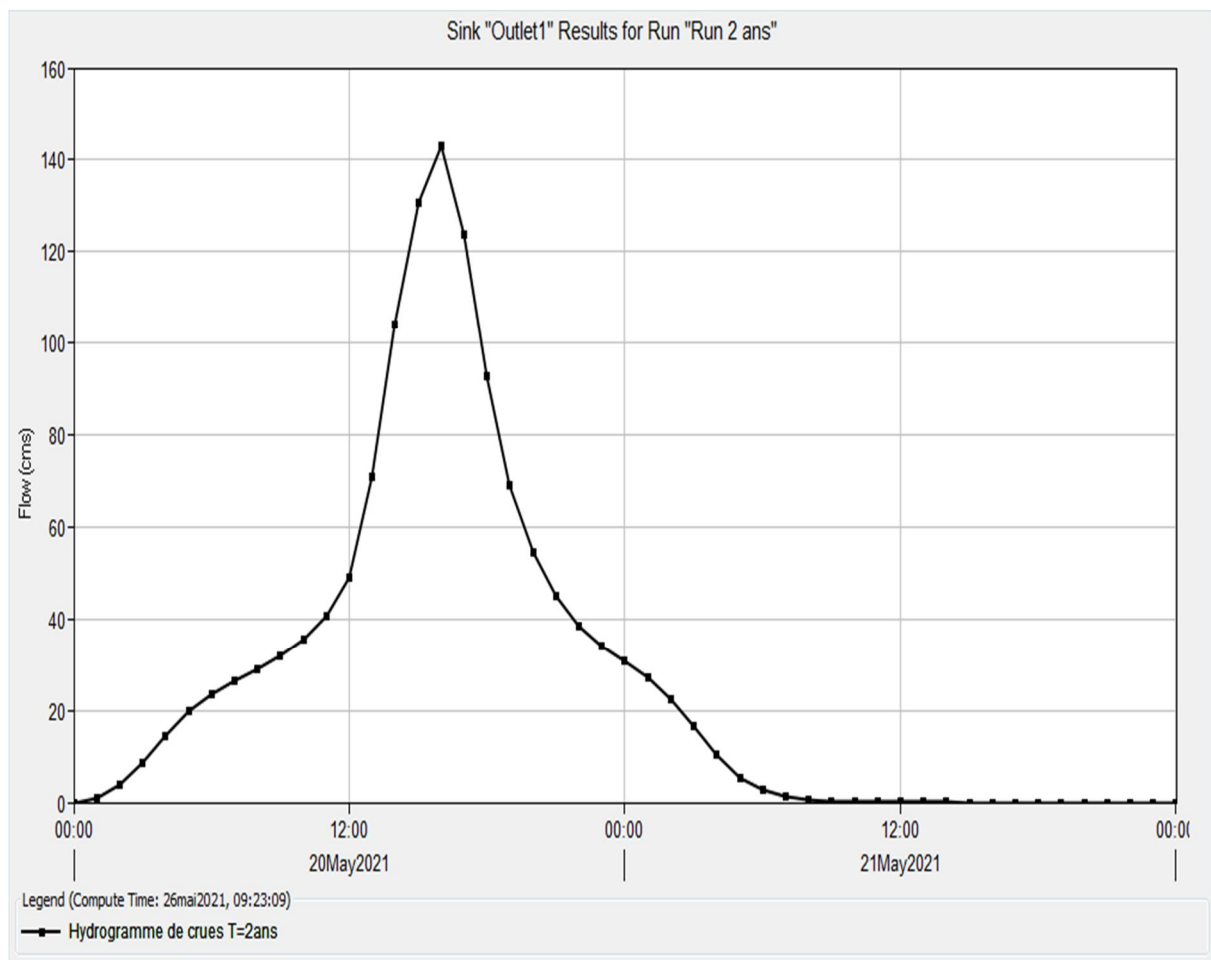


Figure III.15: Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 2 ans.

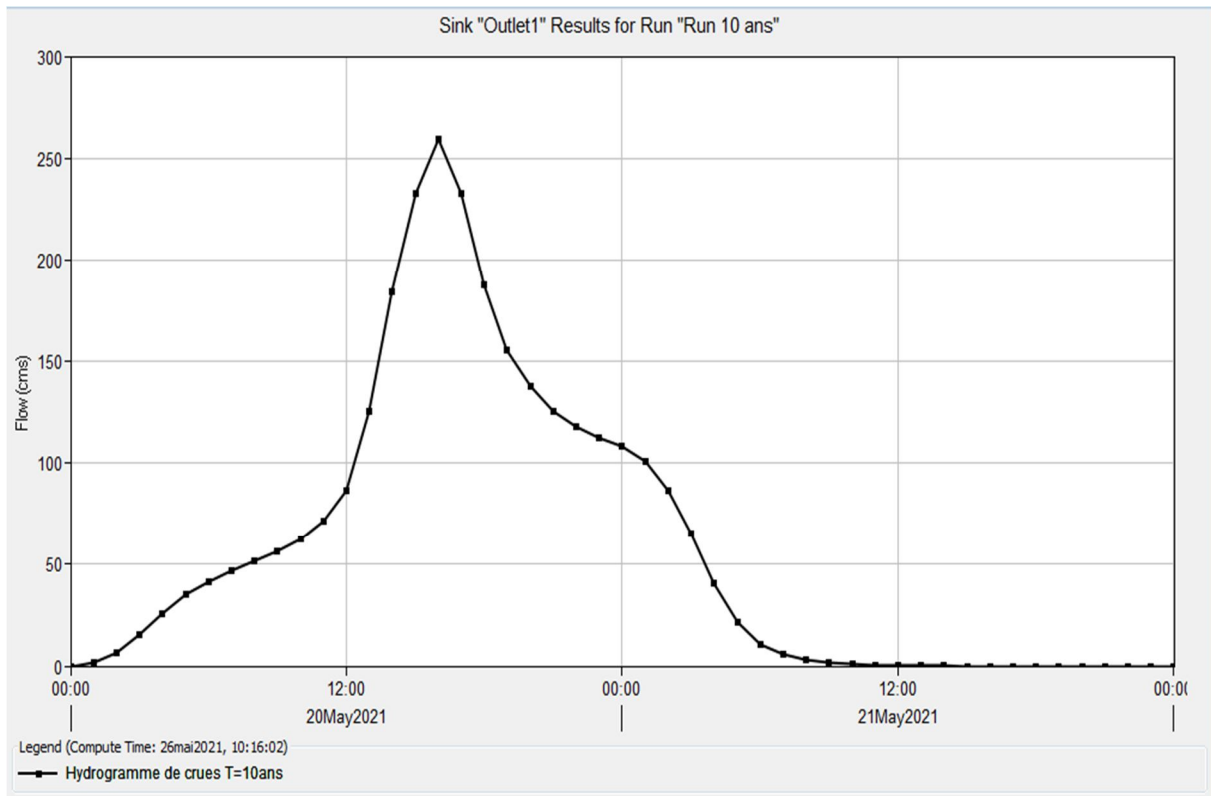


Figure III.16: Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 10 ans.

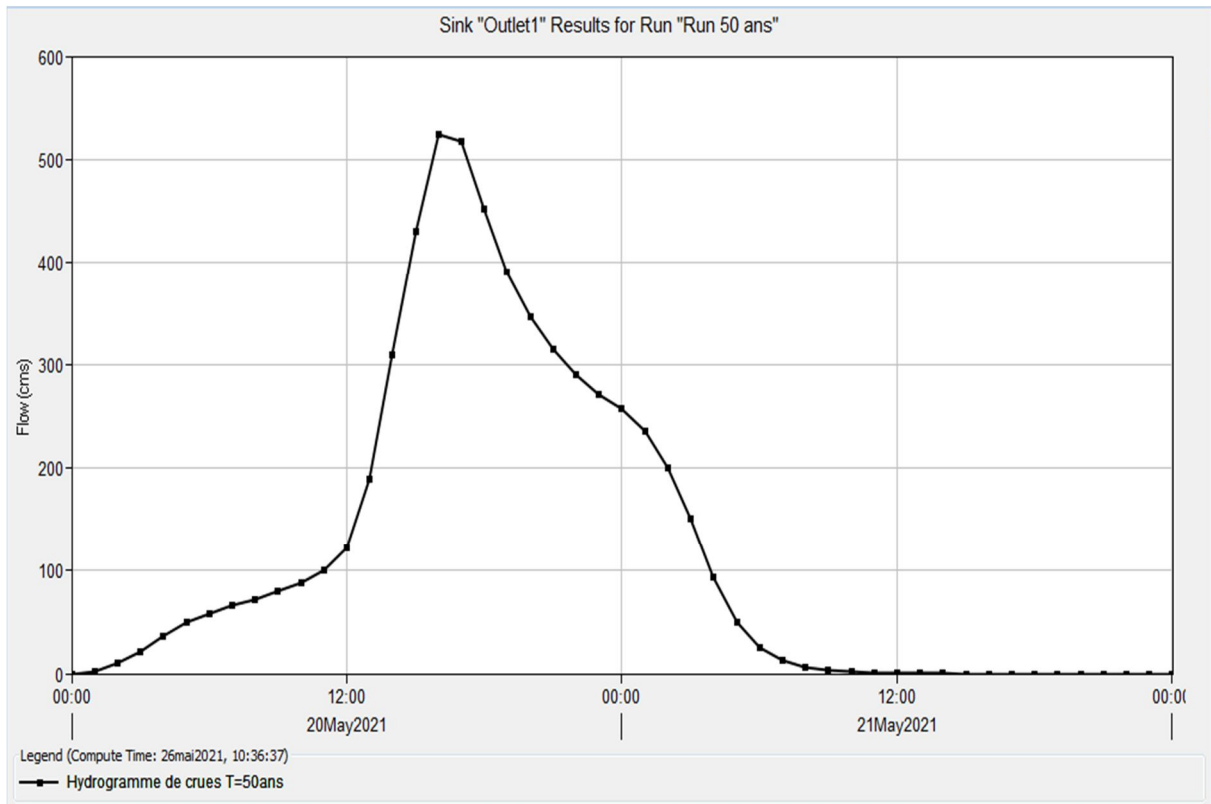


Figure III.17: Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 50 ans.

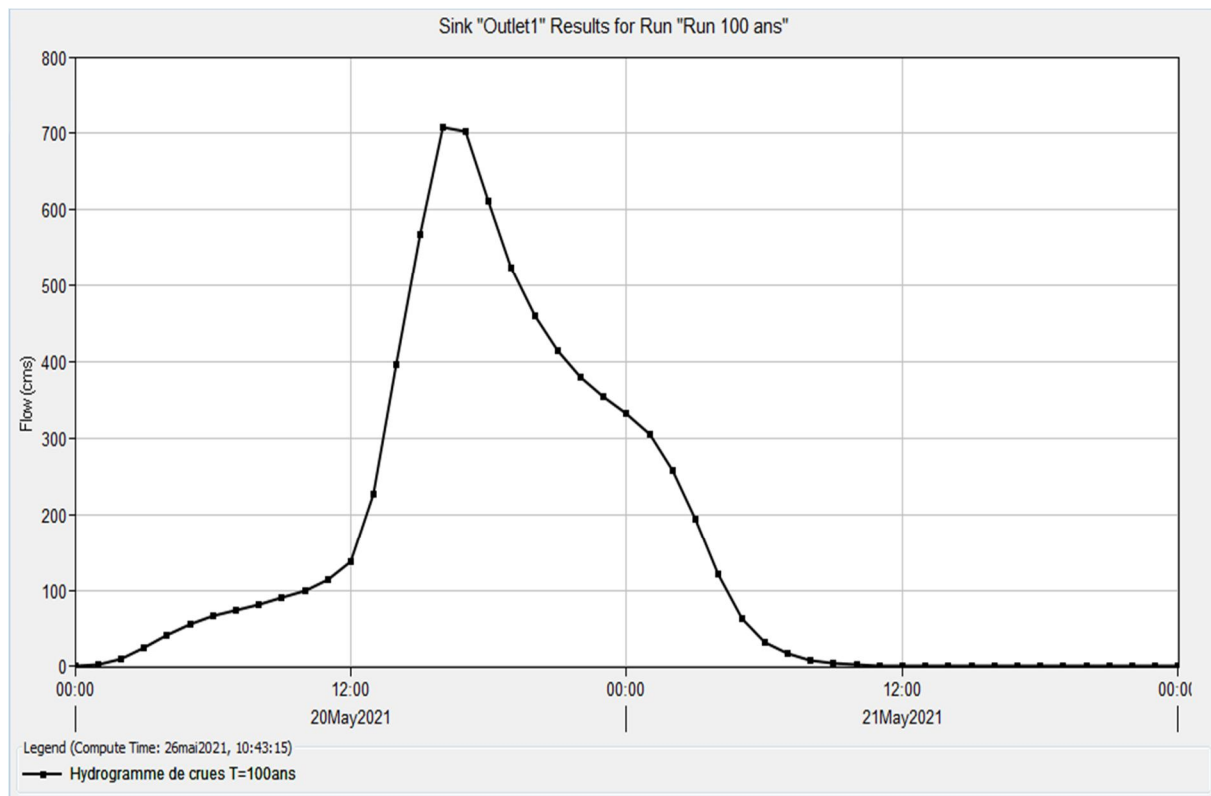


Figure III.18: Hydrogrammes des crues pour différents événements et des périodes de retour de 100 ans.

Tableau III.11: Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 1

	T=2	T=10	T=50	T=100
Qp (m3/s)	143.00	259.30	524.10	708.60
V (103m3)	4708.60	10140.30	20808.40	26945.30

Ces résultats imposent aux responsables de renforcer la protection de l'équipement de mesure du débit à l'exutoire pour qu'il ne soit pas entraîné par les crues prévues, et de mettre en œuvre des mesures structurelles qui peuvent encaisser les énormes volumes simulés.

III.7.2 Scénario 2 : Changement dans l'occupation du sol dans un sens négatif :

III.7.2.1 Les données d'entrée :

Dans ce scénario, nous essayons de simuler l'effet de la déforestation et de l'urbanisation sur les débits et les volumes de crue à la station d'EL KHENEG. Mais pour des raisons liées essentiellement à l'absence d'informations et au caractère global du modèle, nous avons opté pour des modifications d'ordre général sur l'occupation du sol et le type de

sol. Ces changements apportés à la carte touchent essentiellement :

- L'augmentation de la surface de la zone urbanisée ;
- La disparition de la couverture forestière dont la densité est faible (genévrier clair, chêne clair et forêt claire).
- La croissance de pourcentage des terrains dénudés en faveur des terrains déboisés ;
- L'augmentation du pourcentage d'imperméable suite à l'urbanisation.

À partir de ces modifications, nous avons recalculé le nouveau CN composite du bassin qui passe de 48 à 60. Le pourcentage d'imperméable est évalué à 20 %.

Ces valeurs de CN et du pourcentage d'imperméable remplaceront les anciennes dans le jeu de paramètres optimisés, puis on lance la simulation.

III.7.2.2 Les résultats de la simulation :

Le tableau ci-joint montre les valeurs du débit de pointe et du volume obtenues pour le scénario étudié, puis les résultats en lui associant les averses quantiles.

Tableau III.12: Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 2

	T=2	T=10	T=50	T=100
Qp (m³/s)	286.40	689.30	1330.00	1666.70
V(10³m³)	9960.00	24648.80	43986.00	53735.40

Tableau III.13:La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2

Période de retour (ans)	T=2	T=10	T=50	T=100
Qp scénario 1 (m ³ /s)	143.00	259.30	524.10	708.60
Qp scénario 2 (m ³ /s)	286.40	689.30	1330.00	1666.70
Différence (%)	50.07	62.38	60.59	57.48
V scénario 1 (10 ³ m ³)	4708.60	10140.30	20808.40	26945.30
V scénario 2 (10 ³ m ³)	9960.00	24648.80	43986.00	53735.40
Différence (%)	52.72	58.86	52.69	49.86

III.7.3 Scénario 3 : changement dans l'occupation du sol dans un sens positif :

III.7.3.1 Les données d'entrée :

Pour ce troisième scénario, l'action est mise sur l'évaluation de l'impact d'une urbanisation du bassin de même envergure que celle du scénario 2, mais en parallèle on entreprend des actions de reboisements des sols nus et de renforcement de la couverture forestière à densité faible, ainsi :

- Les sols nus deviendront une forêt claire ;
- La densité claire deviendra moyenne;
- La zone urbanisée est identique à celle du scénario 2 ;

À partir de ces modifications, nous avons recalculé le nouveau CN composite du bassin qui est égal à 45. Le pourcentage d'imperméable est évalué à 20 %.

Cette valeur va remplacer celle du jeu de paramètres optimisés, ensuite on lance les simulations.

III.7.3.2 Les résultats de la simulation :

Dans ce qui suit sont représentés les résultats obtenus pour ce scénario, à savoir le débit de pointe et le volume issus de la simulation du scénario et ceux résultant en substituant la pluie de l'événement de 22nov-03déc/1998 par des pluies à périodes de retour distinctes.

Tableau III.14: Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 3

	T=2	T=10	T=50	T=100
Qp (m ³ /s)	286.10	506.10	791.50	974.00
V(10 ³ m ³)	94177.10	17386.00	29163.6	35625.00

Nous pouvons donc comprendre l'effet négatif de l'imperméabilisation des surfaces des bassins versants, par le biais de l'urbanisation par exemple, sur son régime hydrologique. En outre, nous remarquons que les deux variables débit et volume montrent des valeurs moins fortes que dans le cas du scénario 2, ceci prouve que les reboisements bien que modestes amortissent les effets de l'urbanisation prévue.

Enfin, la diminution de l'influence de l'occupation du sol sur les débits et les volumes pour les averses extrêmes est aussi valide pour ce scénario.

D'après ce qui précède, nous arrivons à reconnaître l'effet positif et négatif de quelques situations susceptibles de se manifester sur le terrain dans les prochaines décennies, et que les responsables sont censés à prendre en considération dans leur plan d'aménagement du sousbassin du beniharoun. En outre, nous avons pu reconfirmer que la relation cause à effet entre le changement de l'occupation du sol d'une part et les débits et les volumes d'autres parts, est de moins en moins étroite que les averses sont extrêmes.

Conclusion :

La mise en service de la modélisation comme outil pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, et d'aide à la décision est l'une des meilleures méthodes reconnues à la fois simple et fructueuse.

Dans cette optique, la présente étude s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison modulaire appropriée du modèle HEC-HMS à l'un des sous bassins de beniharoun. Ensuite, après avoir été validé sur au moins l'un des événements présélectionnés, l'étude se penchait sur l'utilisation de ce modèle pour prédire le comportement hydrologique futur du bassin vis-à-vis des scénarios de changement climatique et de modification d'occupation du sol.

Après avoir validé complètement le modèle HEC-HMS sur le sous bassin versant du beniharoun, on peut l'utiliser pour la protection contre les inondations, en utilisant ce qu'on appelle la modélisation à temps réel qui repose sur le principe de reconstitution du débit à l'exutoire pour chaque pas de temps pour lequel la donnée pluie est mesurée, par conséquent on peut reconstituer l'hydrogramme d'une crue au fur et à mesure de l'enregistrement de la hauteur de pluie. Ce système d'alarme s'avère plus efficace que celui qui se base sur la mesure de la hauteur d'eau dans la rivière en amont du bassin versant.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La mise en service de la modélisation comme outil pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, et d'aide à la décision est l'une des meilleures méthodes reconnues à la fois simple et fructueuse.

Dans cette optique, la présente étude s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison modulaire appropriée du modèle HEC-HMS au sous bassin versant de Beni Haroun. Ensuite, après la calibration du modèle, il doit être validé sur au moins l'un des événements présélectionnés.

L'objectif de cette étude était de développer une méthode afin de simuler des débits de pointe et des lames d'eau provenant d'évènements pluviaux pour dans le bassin versant à l'amont du barrage de Beni Haroun. La méthode présentée dans cette étude a permis d'atteindre cet objectif pour des évènements de précipitation journalière. Il a aussi été possible de simuler des scénarios de précipitations futures afin de déterminer des débits de pointe et des lames d'eau générés dans un contexte de changement climatique. Afin de poursuivre cette analyse, d'autres évènements pluie-débit devraient être testés pour cette région afin de rendre le modèle plus polyvalent.

La méthode pourrait être transposée sur une base temporelle horaire, mais aussi sur une base continue, c'est-à-dire simuler l'évolution des débits sur plusieurs années en utilisant un pas de temps horaire. Bien évidemment, d'autres bassins versants de la région pourraient bénéficier de cette méthode afin de générer des hydrogrammes de crue.

Le modèle peut aussi être utilisé afin d'intégrer des scénarios de gestion des ressources hydriques par exemple la modification de l'utilisation du sol actuel, afin de produire les débits de pointe et les lames d'eau associés. Ces informations deviennent pertinentes lors de la prise de décision concernant la planification future de l'aménagement du territoire, comme le développement de nouveaux quartiers ou d'une nouvelle route.

Les résultats obtenus avec cette étude permettent donc de combler un manque d'information concernant les processus hydrologiques et les variabilités climatiques (précipitations et débits de pointe) dans le bassin versant du barrage de Beni Haroun. Ces informations serviront de données d'entrée au modèle hydraulique afin de simuler la variation de la hauteur d'eau dans une rivière lors d'un évènement pluvial. La génération de ces hauteurs d'eau peut par la suite être transposée en zones inondables à l'aide d'un système d'information géographique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] P. B. Bedient and W. C. Huber, Hydrology and flood plain analysis. Library of Congress Cataloging in Publication Data. 1988.
- [2] E. GAUME, Hydrologie : Cycle de l'eau et modélisation pluie-débit, ENPC - CERREVE, Novembre 2000.
- [3] M. VAUCLIN et G. VACHAUD, Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu naturel : approche déterministe ou stochastique ? Institut de mécanique de Grenoble, 1991
- [4] C.P. MAFTEI, Etudes concernant les écoulements superficiels modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti-Roumanie, Mai 2002
- [5] (AZZEDINE MEBARKI, CHAOUKI BENABBAS, FLORINA GRECU) Article, Le Système « Beni-Haroun » (Oued Kebir-Rhumel, Algérie) : Aménagements Hydrauliques Et Contraintes Morpho-Géologiques,
- [6] DRISSE, H. E. (2020). Evaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'utilisation de SIG et le modèle EPM Cas du bassin versant du barrage de Beni Haroun (Doctoral dissertation, Univ M'sila). (université M'sila)
- [7] Mémoire, modélisation pluie-débit par le logiciel hec-hms cas de bv oued Boussellam 2015/2016 (université M'sila)
- [8] Mokhtari, E. H., Remini, B., & Hamoudi, S. A. (2016). Modelling of the rain-flow by hydrological modelling software system HEC-HMS-watershed's case of wadi Cheliff-Ghrib, Algeria. Journal of Water and Land Development, 30(1), 87-100.
- [9] Mokhtari, E. 2017. Contribution à l'étude du transport solide en suspension Bassin de l'Oued Cheliff-Ghrib. Thèse de doctorat en sciences, université Hassiba ben Bouali Chlef.
- [10] Meftah A., (2014). Modélisation pluie-débit par le logiciel hec-hms cas de bv oued cheliff-ghrib (Mémoire de Master, université de m'sila faculte de technologie).
- [11] Benyettou E., (2016). modélisation pluie-débit par le logiciel hec-hms cas de bv oued Boussellam. Mémoire de Master, Faculté de technologie université de M'sila.