

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

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : **MEZATI Belkacem**
ARBANE Abir

Intitulé

Modélisation et simulation du fonctionnement
hydrologique avec logiciel HEC HMS dans le sous
bassin versant de Sidi Aich (Soummam)

Soutenu devant le jury composé de:

.....	Université de M'sila	Examineur
.....	Université de M'sila	Examineur
MOKHTARI El hadj	Université de M'sila	Encadreur
ABDELKEBIR Brahim	Université de Guelma	Co- Encadreur

Année universitaire : 2021 / 2022

Remerciement




A l'occasion de la rédaction de ce mémoire de fin d'étude nous tient particulièrement à remercier ALLAH de nous avoir accordé la foi, le courage, la volonté de continuer nos études, et d'effectuer ce modeste travail.

Nos plus vifs remerciements tout d'abord à notre promoteur Monsieur MOKHTARI EIHADJ, pour avoir accepté de nous encadrer en ce sujet. Ainsi pour leur orientation, leurs judicieux conseils et leur disponibilité durant toute la période de notre travail
A tous les enseignants de l'Hydraulique qui ont contribué à ma formation.

Aux membres de jury qui ont bien voulu examiner mon travail.

Sans oublier de remercier tous nos amis et nos collègues de promotion Hydraulique



ملخص:

في هذا العمل قمنا بتحديد الخصائص المورفولوجية و الهيدرولوجية و الجيولوجية لحوض التجميع سيدي عيش ثم قمنا بالتمنجة الهيدرولوجية لبيانات تساقط الأمطار اليومية لهذا الحوض 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 .

Résumé :

Notre travail consiste en premier lieu de définir les caractéristiques morpho métriques , hydro-climatologique et géologique des sous bassin du bassin versant de Sidi Aich ; 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 hydrogeological basins in the watershed of Sidi Aich ; secondly we go to the actual modeling HEC-HMS software. The latter among the hydrological modeling and are operating principle based on the introduction 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.

Introduction générale	01
Chapitre I : Recherche bibliographique sur les modèles hydrologiques	
Introduction	02
I.1 Cycle hydrologique	02
I.2 Les modèles hydrologiques	04
I.3 Les différentes approches de la modélisation	06
I.3.1 Modèles stochastiques	06
I.3.2 Modèles déterministes	07
I.3.3 Modèles à base physique	07
I.3.4 Modèles paramétriques	07
I.3.5 Modèles empiriques	07
I.3.6 Modèles analytiques	07
I.3.7 Modèles conceptuels	08
I.3.8 Modèles globaux	08
I.3.9 Modèles spatialisés	08
Conclusion	10
Chapitre II. Description de la région d'étude	
Introduction	11
II.1 Présentation de la zone d'étude	11
II.1.1 Situation géographique du bassin versant de la Soummam (Sidi Aich)	11
II.1.2 Les grands traits morphologiques	12
II.1.2.1 La chaîne du Djurdjura	12
II.1.2.2 Vallée de la Soummam	12
II.1.2.3 Chaîne des Bibans	12
II.1.2.4 Chaîne de la basse Kabylie	12
II.1.2.5 Chaîne du sud	12
II.1.3 Le couvert végétal	12
II.1.4 Types du sol	13
II.2. Caractéristiques géologiques	13
II.2.1 Contexte géodynamique	13
II.2.1.1 La limite de la plaque Afrique-Eurasie	13
II.2.1.2 La cinématique Afrique-Eurasie	15
II.2.2 Situation climatique du bassin versant de Soummam (Sidi Aich)	16
II.2.2.1 Climatologie	16
II.2.2.2 Température	16
II.2.2.3 Vent	17
II.2.2.4 L'humidité relative	17
II.2.2.5 Pluviométrie	18
II.2.3 Les caractéristiques de la disposition dans le plan	19
II.2.3.1 La surface	19
II.2.3.2 Le périmètre	19
II.2.3.3 La forme	19
II.2.3.4 Le rectangle équivalent	20
II.2.4 Caractéristiques Hypsométriques	20
II.2.4.1 Les altitudes maximale et minimale	20
II.2.4.2 La courbe hypsométrique	21
II.2.4.3 L'altitude moyenne	22
II.2.4.4 L'altitude médiane	22
II.2.4.5 La dénivelée simple	23
II.2.5 Les indices de pentes	23
II.2.5.1 La pente moyenne du bassin versant	23
II.2.5.2 L'indice de pente Roche	24
II.2.5.3 Indice de pente globale	24
II.2.5.4 Dénivelée spécifique	25
II.2.6 Caractéristiques du réseau hydrographique	25
II.2.6.1 Hiérarchisation du réseau (Ordre du bassin versant)	26
II.2.6.2 Rapport de confluence	27

II.7.3 Temps de concentration.....	27
Conclusion.....	29
Chapitre III. Modélisation pluies débits par l'application du model HEC-HMS	
Introduction	30
III.1 Découverte de HEC-HMS sous Arc Gis.....	30
III.1 La description du modèle Arc Gis.....	30
III.1.1 Présentation du logiciel Arc Gis.....	30
III.1.2 Qu'est ce qu'ArcGIS ?.....	31
III.1.1.3 Paramètres morphologiques du bassin versant	32
III.1.2 La description du modèle HEC-HMS	34
III.1.2 .1 Les caractéristiques générales du modèle	34
III.2 Modélisation pluies-débits par le modèle HEC-HMS.....	34
III.3 Le processus de fonctionnement	35
III.3.1 Fonctionnalités	35
III.3.2 Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS.....	36
III.4 Les données de bases d'entré	37
III.4.1 Le modèle numérique du terrain (MNT)	37
III.4.2 Occupation du sol	37
III.5 La calibration du modèle.....	43
III.5.1 Les résultats de calibration	43
III.6. La validation du modèle.....	45
III.7 Prédiction du comportement futur du SIDI AICH	46
III.7.1 Scénario 1.....	47
III.7.1.1 Les données d'entrée	47
III.7.2 Les résultats de la simulation.....	47
III.7.2 Scénario 2 : Changement dans l'occupation du sol dans un sens négatif	50
III.7.2.1 Les données d'entrée	50
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	52
Conclusion	53
Conclusion générale.....	54
Références bibliographiques.....	55

Liste des tableaux

Chapitre II :	
Tableau II.1 Moyennes mensuelles des températures (max 'M'et min 'm') dans la région de la basse vallée de la Soummam (période de 1970 - 2011) [17].....	11
Tableau II.2 Vitesse mensuelle moyenne du vent (1994-2003) [17].....	17
Tableau II.3 Humidités relatives mensuelles en % (1994-2004) [17].....	17
Tableau II.4 Valeurs des précipitations annuelles et mensuelles de 03 stations du bassin versant Sidi Aich [17].....	18
Tableau II.5 Répartition hypsométrique du bassin versant de Sidi Aich.....	21
Tableau II.6 L'indice global de pente.....	24
Tableau II.7 Deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M.....	25
Tableau II.8 Temps de concentration retenu.....	27
Tableau II.9 Caractéristiques physiographiques du bassin versant de Sidi Aich.....	28
Chapitre III :	
Tableau III.1Caractéristiques géométriques du bassin versant.....	32
Tableau III.2 Plus longs chemins hydrauliques.....	33
Tableau III.3 Temps de concentration retenus.....	33
Tableau III.4 Classification de groupe hydrologique des sols.....	38
Tableau III.5 Détermination de CN moyen pour le bassin versant.....	40
Tableau III.6 Données de base du-bassin versant.....	40
Tableau III.7 Résultats de simulation.....	42
Tableau III.8 Résultats de calibration.....	43
Tableau III.9 Paramètres de calage.....	44
Tableau III.10 Résultats de validation du modèle.....	45
Tableau III.11 Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du SIDI AICH pour différentes périodes de retour.....	47
Tableau III.12 Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 1.....	50
Tableau III.13 Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 2.....	51
Tableau III.14 La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2.....	51
Tableau III.15:Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station d'EL KHENEG pour le scénario 3.....	52
Tableau III.16 La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 3.....	53

Liste des figures

Chapitre I :	
Figure I.1 Le cycle hydrologique [1]	03
Figure I.2 Les différentes approches de modélisation [2].....	06
Chapitre II :	
Figure II.1 Situation du bassin versant de Sidi Aich.....	11
Figure II.2 Carte de répartition des associations forestières dans le bassin versant de la Soummam [11].....	13
Figure II.3 Carte des sols du bassin de la Soummam [12].....	14
Figure II.4 Carte topographique et bathymétrique de la plaque africaine (Nubie-Somalie), des plaques voisines et de leurs limites [13].....	14
Figure II.5 Tracé schématique de la limite de plaque entre l'Afrique (Nubie) et l'Eurasie, [14].....	15
Figure II.6 Mouvements relatifs de l'Afrique par rapport à l'Eurasie, sur une limite de plaque schématique entre le point triple des Açores et l'Italie [13].....	16
Figure II.7 Carte topographiques du BV de la Soummam	18
Figure II.8 Carte Hypsométrique BV de Sidi Aich.....	21
Figure II.9 Courbe hypsométrique du bassin versant de Sidi Aich.....	22
Figure II.10 Réseau hydrographique et ses ordres d'un BV.....	26
Figure II.11 Réseau hydrographique du bassin versant Sidi Aich.....	26
Chapitre III :	
Figure III.1 Influence de la forme du bassin versant sur la réponse hydrologique.	32
Figure III.2 Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant Sidi Aich.....	37
Figure III.3 Carte de groupe hydrologique des sols du bassin versant Sidi Aich.....	38
Figure III.4 Curve Number (CN) du bassin versant Sidi Aich.....	39
Figure III.5 Fenêtre de donnée de CurveNumber (CN) et Imperméabilité.....	41
Figure III.6 Fenêtre représente Lag time.....	41
Figure III.7 Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps	42
Figure III.8 Hydrogrammes des crues de l'évènement de 16 av.1992 au 26 av.1992.....	43
Figure III.9 Hydrogrammes des crues de l'évènement de 16 av.1992 au 26 av.1992 après calibration.....	44
Figure III.10 Hydrogrammes des crues de l'évènement de 05avr-15avr/1992 après validation du modèle.....	46
Figure III.11 Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 10 ans.....	48
Figure III.12 Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 20 ans.....	48
Figure III.13 Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 50 ans.....	49
Figure III.14 Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 100 ans.....	49

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource naturelle précieuse dont la bonne gestion s'inscrit dans la politique du développement durable tant au niveau d'un pays que d'une région pour ne pas dire mondial. Une bonne gestion de cette ressource est un défi permanent lié à l'évolution démographique, à l'urbanisation et au développement économique de la société tout en tenant compte des changements du climat mondial et la pollution. L'environnement de cette ressource est caractérisé par son cycle hydrologique, notamment les crues et les sécheresses. La maîtrise des crues constitue un centre d'intérêt vers lequel convergent plusieurs approches : prédiction, simulations stochastiques, et surtout, la modélisation mathématique et physique des phénomènes hydrauliques.

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 Sidi Aich.

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 est découpé en trois chapitres distincts :

Chapitre I : dans ce chapitre, on donne un aperçu bibliographique sur les différents types de modélisations hydrologiques faites sur des bassins versants, une analyse de classification.

Chapitre II : c'est une description de la région d'étude, il traite l'étude hydro-géomorphologique du bassin versant de Sidi Aich.

Chapitre III : une présentation du logiciel ARC-Gis, et Hec hms et l'application du model HEC-HMS au sous bassin versant Sidi Aich., ainsi que l'analyse des résultats et leurs comparaison avec les données mesurées.

Chapitre I. Recherche bibliographique sur les modèles hydrologiques

Chapitre I . Recherche bibliographique sur les modèles hydrologiques

Introduction

Très souvent, il y a insuffisance de données de débits alors que les données pluviométriques sont généralement abondantes. Il apparaît donc nécessaire, en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau par une connaissance plus précise des quantités d'eau disponible, de transformer les données pluviométriques en données hydrométriques. D'où l'intérêt de la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.

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, avant d'entamer les présentons des modèles les plus utilisés dans le domaine de la modélisation hydrologique ainsi que les logiciels les plus utilisés dans le domaine public, 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].

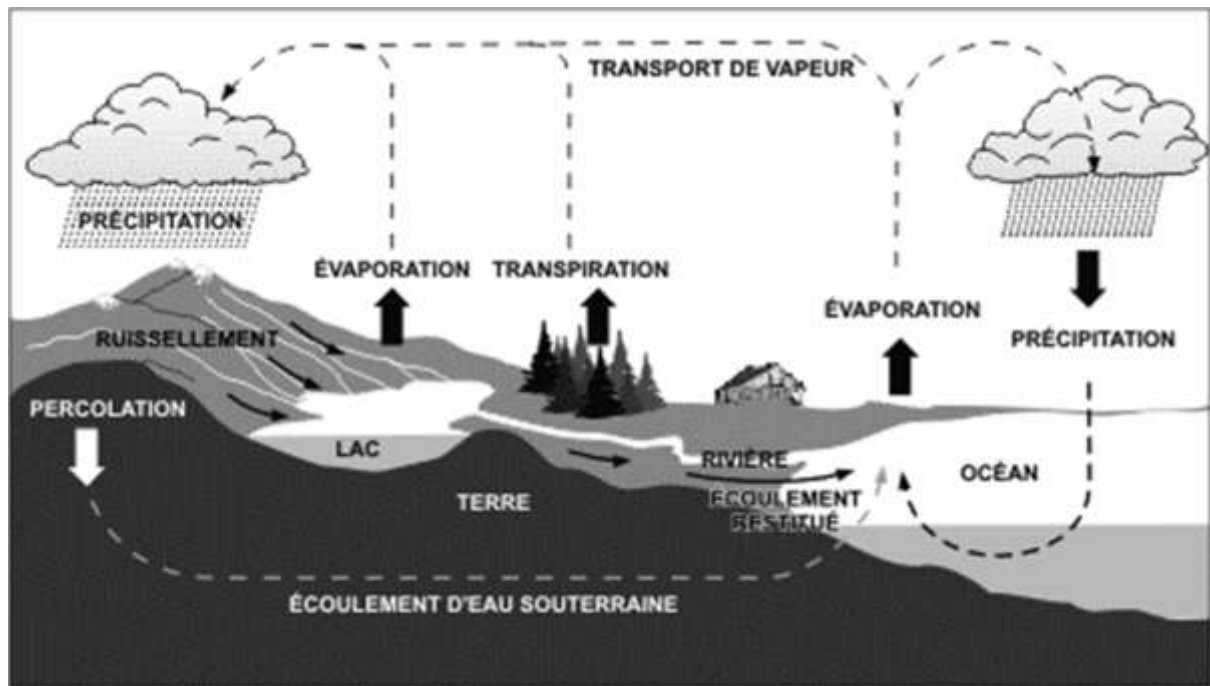


Figure I.1 : Le cycle hydrologique [1]

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:

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

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.[2]

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 [2]

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 [2]
- **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. [2].
- **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 [2].

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). [2].

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.

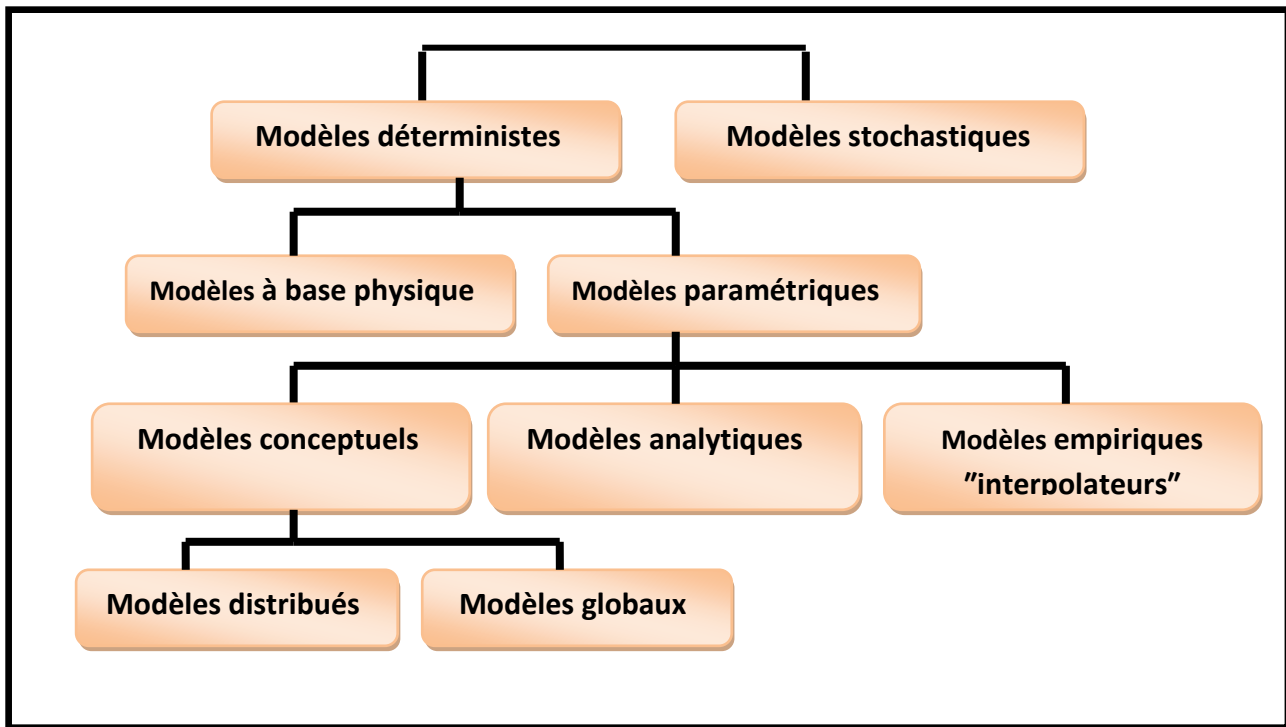


Figure I.2: Les différentes approches de modélisation [2].

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 davantage dans l'étude de détermination de ces données pour développer des modèles qui représentent le mieux la réponse hydrologique du bassin versant.

Chapitre II. Description de la région d'étude

Chapitre II. Description de la région d'étude

Introduction :

Ce chapitre est consacré à une description générale du bassin versant de la Soummam et en particulier le bassin versant de Sidi Aich ; afin de donner les indications géographiques, géomorphologiques, géologique et hydrogéologiques, bases indispensables à la compréhension future des mécanismes hydrologiques. En effet l'altitude, les cours d'eau et la forme d'un bassin versant reliées à la lithologie renseignent sur le type de réponse hydrologique du bassin. Aussi, l'ensemble des principales caractéristiques physiographiques qui jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau, a une forte influence sur la répartition spatio-temporelle des précipitations et des écoulements au sein du bassin étudié.

II.1 Présentation de la zone d'étude :

II.1.1 Situation géographique du bassin versant de la Soummam (Sidi Aich) :

Sidi Aich est un sous bassin de la Soummam, objet de la présente étude, il est situé dans la partie Nord-est de l'Algérie (figure II.1), entre les méridiens $3^{\circ} 36' 50''$ et $5^{\circ} 35' 56''$ et les parallèles de $35^{\circ} 44' 56''$ et $36^{\circ} 46' 30''$ et, du point de vue distance à environ 100 et 200 Km respectivement au Sud et à l'Est de la capitale Alger. Le bassin couvre une superficie de 1050,65 Km² de forme irrégulièrement étirée dans la direction Est-Ouest et accède à la Méditerranée par le golf de Béjaïa. Il est limité par les chaînes montagneuses de Djurdjura et ses contreforts qui s'étendent jusqu'à la mer au Nord, les contreforts du mont du Hodna au Sud, les chaînes des Babors et le plateau de Sétif à l'Est et le plateau de Bouira à l'Ouest.

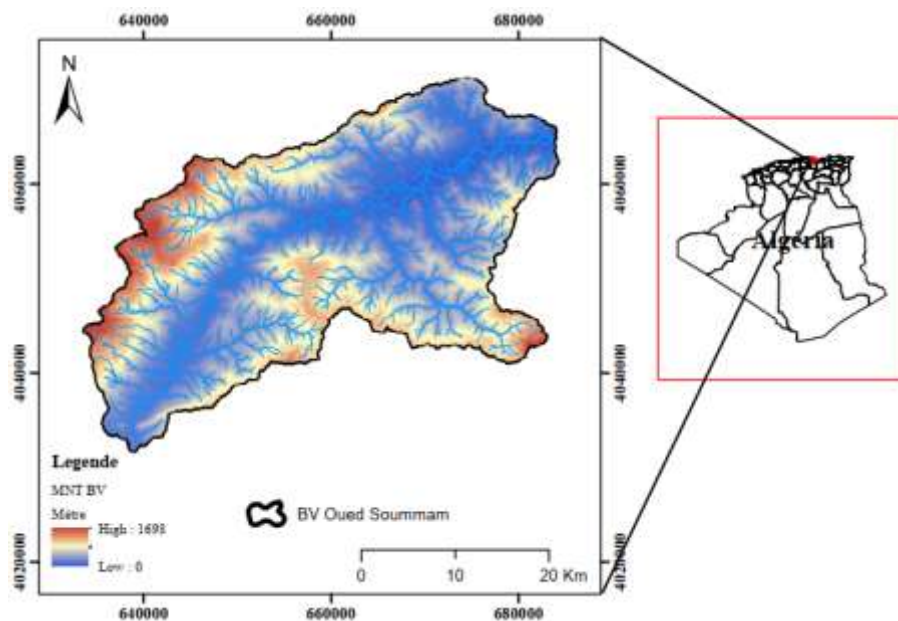


Figure II.1. Situation du bassin versant de Sidi Aich

II.1.2 Les grands traits morphologiques :

Le relief de la Soummam est très varié et les principales unités morphologiques du Nord au Sud sont :

II.1.2.1 La chaîne du Djurdjura :

C'est une chaîne marquante dans la structure de la haute Kabylie. Elle s'élève abruptement au Nord de Bouira à la hauteur de 2123m pour atteindre sa hauteur maximale près de M'Chedellah, (Lala Khadîdja 2308m). Elle se termine par la chaîne de Gouraya et son pittoresque Cap Carbon dans le golf de Béjaïa.

II.1.2.2 Vallée de la Soummam :

La vallée de la Soummam est un vaste couloir à fond plat situé entre le Djurdjura et les Bibans dans le cours supérieur, et entre la haute et la basse Kabylie dans le cours inférieur. Elle pénètre dans le bassin du côté Ouest sous le nom du plateau de Bouira, faisant suite à la plaine des Arib. Vers l'Est, la vallée rétrécit, tourne au Nord-Ouest et disparaît presque près de Sidi Aïch. De nouveau, elle s'élargit graduellement jusqu'au golf de Béjaïa.

II.1.2.3 Chaîne des Bibans :

D'orientation générale Est-Ouest, cette chaîne pénètre dans le bassin de la Soummam près de Sour El Ghoulane et s'étend vers Dj. Anechar (1415m) en passant par Azerou N'Said (1283m). Une ramification importante de la chaîne s'en sépare près de Guenzat en direction de Dj. Es-Sarsara, (1487m) pour atteindre Dj. Anini (1596m).

II.1.2.4 Chaîne de la basse Kabylie :

A l'Est du bassin, apparaît une chaîne de montagnes considérable ; c'est la chaîne de la basse Kabylie. Cette chaîne se situe au Nord-Est du cours aval du Boussellem et est constituée d'une série de crêtes différemment orientées. Sa hauteur moyenne varie entre 1200 et 2000m et atteint son maximum aux Babors (2004m).

II.1.2.5 Chaîne du sud :

Ce sont des crêtes de petites tailles qui séparent les terrains montagneux de l'Atlas tellien de la plaine du Hodna (Dj. Dira, Dj. Choukhot et Dj. Mansoura).

II.1.3 Le couvert végétal :

La végétation du bassin versant de la Soummam est de type méditerranéen et est très variée. Les régions alluvionnaires de la haute Soummam sont occupées par des chênaies.

La basse et moyenne Soummam sont occupées par des oliveraies et des vignobles. Dans la région de la moyenne Soummam, le couvert végétal est moins dense.



Figure II.2. Carte de répartition des associations forestières dans le bassin versant de la Soummam[11]

Dans la plaine, la végétation est dense mais essentiellement temporaire ; elle est formée par les grands et formidables champs de cultures maraîchère diverses.

Les forêts qui couvraient la région fournissaient le bois nécessaire à une industrie du bois florissante mais malheureusement ce capital tend à disparaître sous les feux qui ravagent chaque année des milliers d'hectares. A cela s'ajoute l'absence d'une politique claire de reboisement et de lutte contre les incendies (Fig. II.2).

II.1.4 Types du sol :

Dans le bassin versant de la Soummam on trouve des types de sols anciens de formation paléo marécageuse qui sont caractérisés par des formations bien accentués. La carte des sols du bassin de la Soummam a été extraite de la carte des sols de l'Algérie faite par J. Durand en 1954. La majorité des sols dans le bassin de la Soummam sont des sols calcaires (riches en calcaire). Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméables. Au nord du bassin, on rencontre des sols insaturés qui ne contiennent pas de calcaire dont l'argile peut être plus abondante en surface qu'en profondeur ; leurs roches mères sont généralement imperméables ou donnent des produits de décomposition imperméables. Le long des oueds, les sols existants sont des dépôts alluviaux appelés sols alluviaux. En outre on rencontre, en petites quantités des sols calciques et des sols en équilibre peu épais, plus ou moins riches en calcaire et très pauvres en sels solubles.[12]

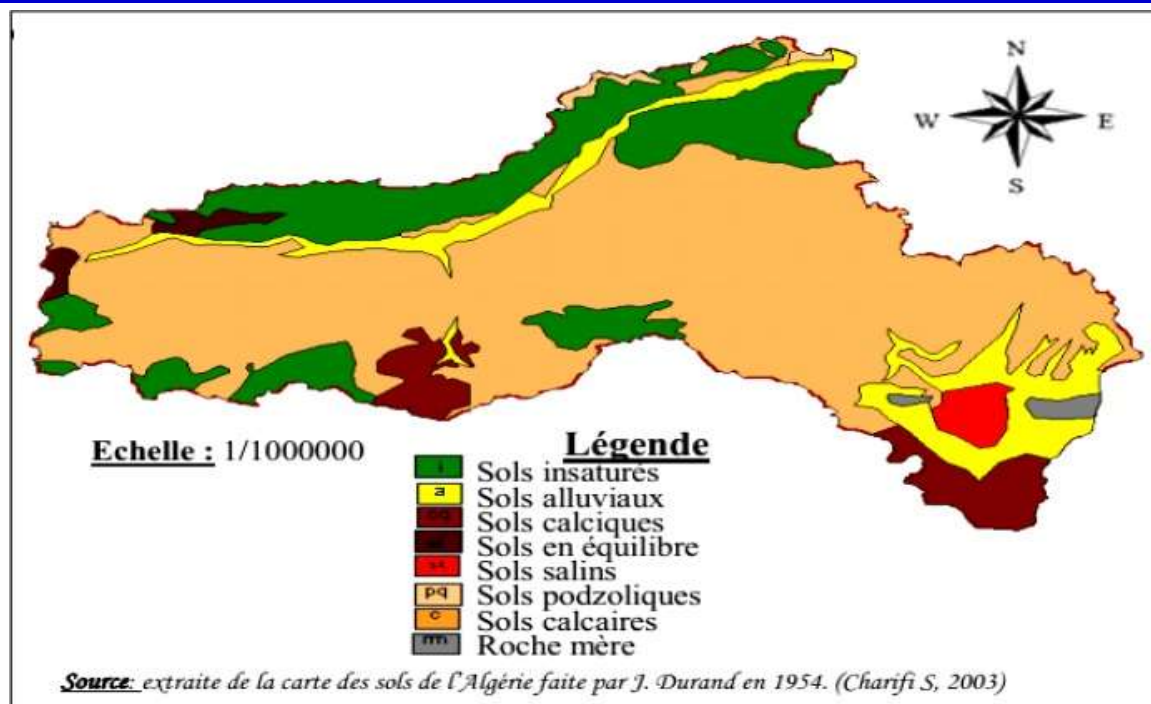


Figure II.3. Carte des sols du bassin de la Soummam [12]

II.2. Caractéristiques géologiques :

II.2.1 Contexte géodynamique

II.2.1.1 La limite de la plaque Afrique-Eurasie :

Le bassin versant du Soummam se trouve au nord de l'Algérie, sur la bordure nord de la plaque africaine, le long de sa zone de contact avec la plaque eurasiatique au nord (Figure II.2).

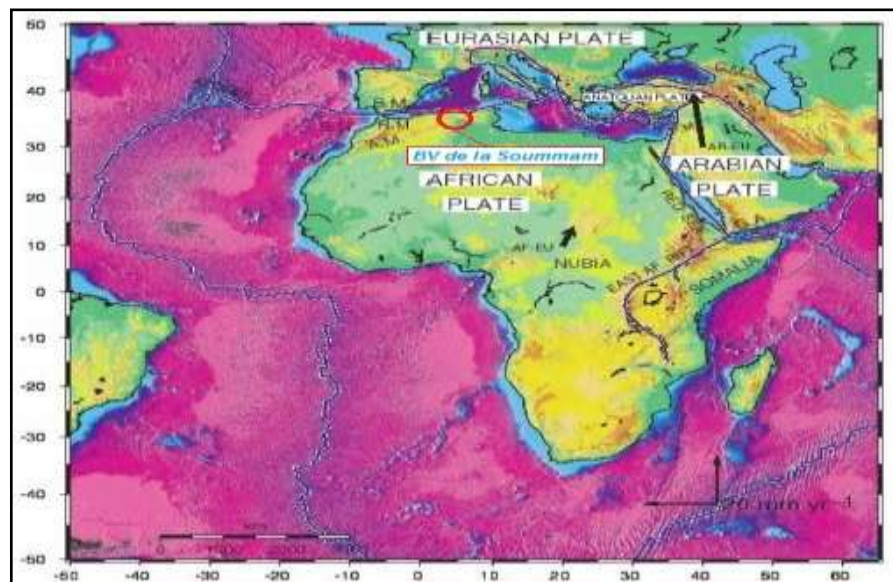


Figure II.4. Carte topographique et bathymétrique de la plaque africaine (Nubie-Somalie), des plaques voisines et de leurs limites [13]

La frontière de plaque Afrique-Eurasie est relativement complexe puisqu'elle est constituée de segments de géométrie, nature et cinématique variable (Figure II.2 et Figure II.3). De façon schématique, elle se résume à :

- Une limite océan-océan à l'ouest, entre le point triple des Açores et le détroit de Gibraltar (ride de Terceira et faille de Gloria) ;
- Une limite continent-continent dans sa partie centrale, dans la zone concernée par la présente étude, où la limite de plaque traverse les marges continentales de la péninsule ibérique et du Maghreb ;
- Une limite mal définie à l'est, dans la région adriatique, où limite et nature des plaques sont encore sujet à discussions (exemple : Kiratzi and Papazachos, 1995).

Dans sa partie centrale, où la limite Afrique-Eurasie sépare deux lithosphères continentales, le mouvement relatif des plaques n'est pas localisé sur un accident unique, mais distribué sur une ceinture large de déformation.

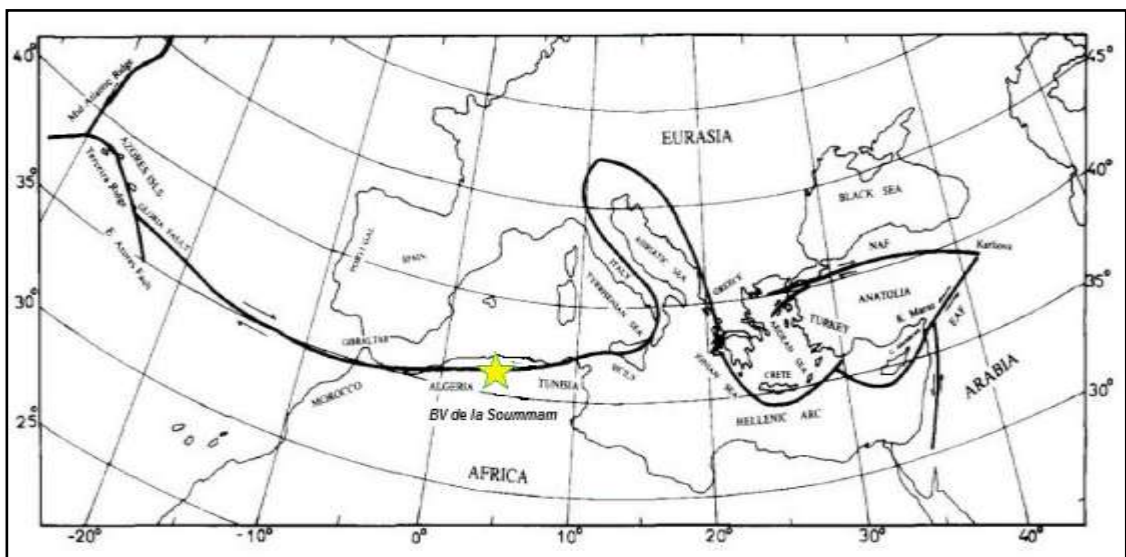


Figure II.5. Tracé schématique de la limite de plaque entre l'Afrique (Nubie) et l'Eurasie, [14]

II.2.1.2 La cinématique Afrique-Eurasie :

Le pôle eulérien de rotation Afrique-Eurasie, déduit des mesures par GPS du déplacement relatif des plaques, se trouve dans l'Atlantique sud. Il en résulte un mouvement relatif des deux plaques (Figure II.4) qui est :

- Divergent sur la ride des Açores ;
- Décrochant dextre sur la faille de Gloria ;
- Convergent dans la zone ibéro-maghrébine et plus à l'est.

La sismicité en Algérie est modérée et cantonnée à la partie nord du pays, soulignant la frontière diffuse entre les plaques Afrique et Eurasie. Bien que peu nombreux, dans la région du bassin versant de Soummam.

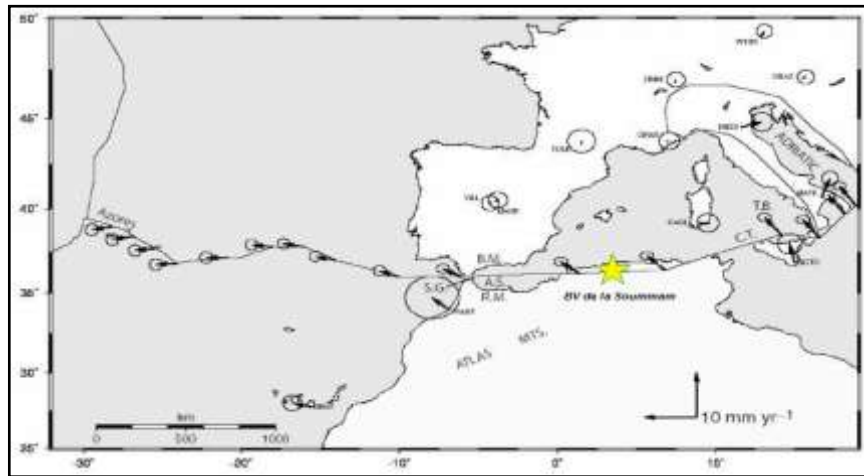


Figure II.6. Mouvements relatifs de l'Afrique par rapport à l'Eurasie, sur une limite de plaque schématisée entre le point triple des Açores et l'Italie [13]

II.3 Situation climatique du bassin versant de Soummam (Sidi Aich) :

II.3.1 Climatologie :

Dans chaque pays, chaque village, les caractéristiques moyennes des saisons déterminent le climat. On peut définir les climats à partir de deux phénomènes : la température et les précipitations, c'est à dire la pluie, la neige ou la grêle. Dans les grandes lignes, on décrit un type de climat, mais tant d'éléments le modifient.

Une région de montagne ne subira pas le même climat qu'une plaine. Une vallée située sur le versant d'une montagne n'a pas le même climat qu'une autre vallée sur le versant opposé, même si les deux sont à la même altitude.[15]

Le climat du bassin versant de la Soummam, montre une série de transition entre climat humide, dans les montagnes proches de la Méditerranée, et climat semi-aride des hautes-plaines (environ Sétif). Mais partout les averses sont fréquentes et règne aussi en été une sécheresse prolongée. Les argiles se dessèchent, se fendillent, ce qui favorisant certaines phénomènes (ruissellement, mouvement de masse et surtout nuit à la végétation). [16]

II.3.2 Température :

La température, seconde facture consécutive du climat, influe sur le développement de la végétation et le fonctionnement du système racinaire et elle affecte les relations physiologiques entre les organes souterrains et les organes aériens, d'après (GRECO, 1966).

Les températures moyennes mensuelles relevées sur 41 ans de 1970 à 2011 sont représentées par le tableau suivant :

Tableau II.1. Moyennes mensuelles des températures (max 'M' et min 'm') dans la région de la basse vallée de la Soummam (période de 1970 - 2011) [17]

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
M (C°)	16,47	17,07	18,61	20,26	22,86	26,37	29,47	30,16	28,14	25,28	20,85	17,57
m (C°)	7,50	7,67	9,04	10,83	13,96	17,57	20,37	21,18	19,04	15,73	11,71	8,70
Tmoy(C°)	11,99	12,37	13,82	15,54	18,41	21,97	24,92	25,67	23,59	20,50	16,28	13,13

M : Température moyenne maximale du mois,

m : Température moyenne minimale du mois,

Tmoy: Température moyenne mensuelle.

II.3.3 Vent

Dans la vallée de la Soummam, les vents dominants sont les vents du nord-ouest (vents marins qui s'engouffrent facilement dans la vallée de la Soummam). En hiver, ils apportent les nuages, la pluie. En été, ce sont les vents sud-est qui sont beaucoup moins importants et surtout le vent sud, le sirocco, vent sec d'intensité variable ayant une action funeste sur la végétation.

Les moyennes mensuelles des vitesses du vent moyen sur dix ans sont données par le Tableau suivant :

Tableau II.2. Vitesse mensuelle moyenne du vent (1994-2003) [17]

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
V(m/s)	4,7	4,28	3,92	3,52	3,58	3,47	3,63	3,38	3,54	4,13	4,4	4,91

La vitesse du vent la plus faible a été enregistrée le mois d'aout de l'ordre de 3,38 m/s contrairement à la période hivernale où les vents sont froids et violents surtout dans le mois de décembre et janvier dont la vitesse du vent varie entre 4,91 et 4,7 m/s.

II.3.4 L'humidité relative :

Le tableau suivant illustre les données relatives aux humidités moyennes mensuelles:

Tableau II.3. Humidités relatives mensuelles en % (1994-2004) [17]

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Humidité (%)	74,9	77,0	76,8	78,20	78,5	77,0	72,7	75,5	75,4	74,2	76,30	75,50

Les pourcentages d'humidité varient entre 72 et 78 % au cours de l'année, La moyenne minimale a été enregistrée le mois de juillet avec une valeur de 72,7% et la maximale au mois de Mai avec une valeur de 78,5 %.

II.3.5 Pluviométrie :

La pluviométrie du bassin versant de l'oued Soummam est bien déterminée grâce à l'existence d'environ 50 stations pluviométriques, soit à peu près une station pour 180 km². Le montant de la précipitation annuelle est caractérisé par grands écarts dans le bassin de la Soummam. La précipitation est au maximum sur les pentes des montagnes du Djurdjura et on l'estime à environ 1500 mm par an. La côte méditerranéenne, où la pluviosité annuelle atteint 1000 mm, est également une région de grande précipitation. La précipitation minimum, de 300 à 400 mm par an en moyenne, correspond à la partie sud-est du bassin sur le plateau qui s'étend de Sétif aux monts du Hodna.

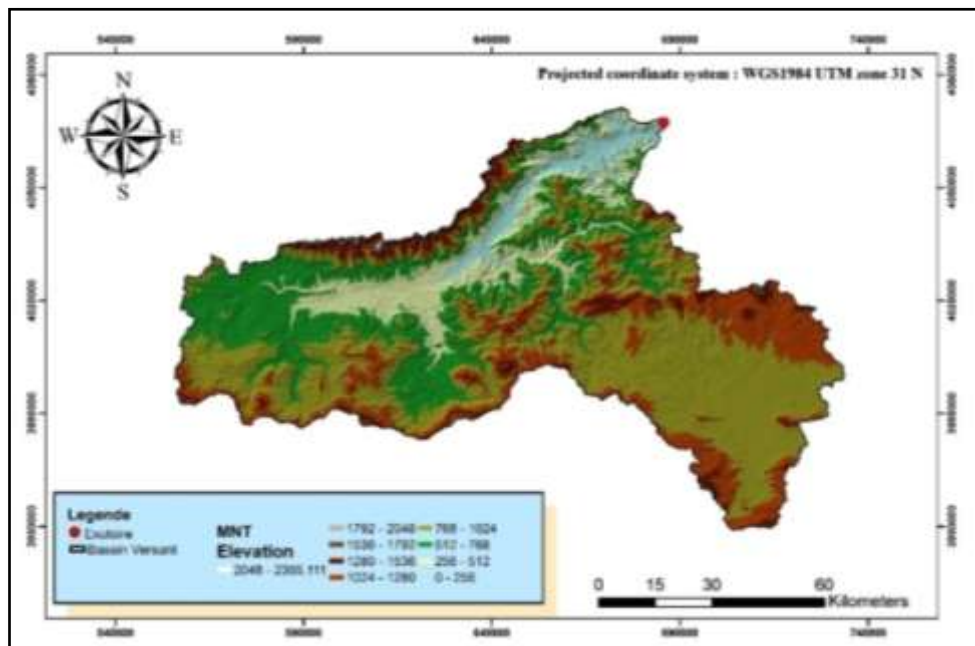


Figure II.7. Carte topographique du BV de la Soummam

Tableau II.4. Valeurs des précipitations annuelles et mensuelles de 03 stations du bassin versant Sidi Aich [17]

N°	Codes	P _{an}	P _{Sept}	P _{Oct}	P _{Nov}	P _{Dec}	P _{Jan}	P _{Fev}	P _{Mar}	P _{Avr}	P _{Mai}	P _{Jun}	P _{Jut}	P _{Aou}
1	151001	28,9	38,3	48,5	76,9	74,6	60,1	50,0	49,9	33,1	9,4	2,5	8,8	480,9
2	151004	26,0	42,2	47,3	70,0	62,3	52,5	50,9	40,3	28,5	7,0	7,4	4,3	438,9
3	151006	28,2	37,4	48,0	77,2	64,2	57,9	51,8	50,2	36,7	11,5	5,6	8,5	477,1
4	151007	33,2	69,2	82,8	155,3	123,8	104,5	101,5	73,1	41,9	14,5	2,8	7,8	802,8

II.4. Les caractéristiques de la disposition dans le plan :

II.4.1. La surface (A) :

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface. La surface du bassin versant peut être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre ou par des techniques de digitalisation (logiciel Arc Gis ...). Dans notre cas, la surface du bassin versant de Sidi Aich est égale à **1050,65 km²**.

II.4.2. Le périmètre (P) :

Une fois le bassin versant est délimité sur carte topographique, son périmètre peut être mesuré par un curvimètre ou par des techniques de digitalisation (logiciel Arc Gis ...). Le périmètre du bassin versant de la Soummam est égal à **193,03 km**.

II.4.3. La forme (KG) :

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydro-gramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration et de la vitesse de concentration à l'exutoire.

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

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Citons à titre d'exemple l'indice de compacité de Gravelius (1914) KG, défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle ayant la même surface du bassin **KG =1,67**(le bassin de Sidi Aich est de forme allongée).

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydro-gramme à l'exutoire du bassin versant.

- ✚ Lorsque KG = 1, Le BV est de forme circulaire.
- ✚ Lorsque KG = 1,12 : le BV est un carré.
- ✚ Lorsque KG se rapproche de 1 : le bassin est de forme compacte ou arrondi.
- ✚ Lorsque KG est supérieur à 1 : le bassin est de forme allongée.

II.4.4. Le rectangle équivalent :

C'est une notion qui a été introduite par Roche (en 1963) qui permet de comparer facilement des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement. On suppose que l'écoulement sur un bassin donné est approximativement le même, à conditions climatologiques égales, que sur un rectangle de même superficie, ayant même coefficient de Gravelius et même répartition hypsométrique, étant entendu que la distribution des sols et de la végétation et la densité de drainage sont respectées dans les différentes aires comprises entre les courbes de niveaux. Il s'agit donc d'une transformation purement géométrique dans laquelle le contour du bassin devient un rectangle de même périmètre, les courbes de niveaux des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire un des petits côtés du rectangle que nous avons appelé rectangle équivalent.

Soit l et L la largeur et la longueur du rectangle. P et A le périmètre et la surface du bassin versant. On a, d'après les définitions ci-dessus :

$P = 2 \cdot (L_{rec} + l_{rec})$, $A = L_{rec} \cdot l_{rec}$ et $K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$. En combinant ces relations, on obtient respectivement L_{rec} et l_{rec} la longueur et la largeur du rectangle équivalent.

$$L_{rec} = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (II.2)$$

$$l_{rec} = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (II.3)$$

II.5 Caractéristiques Hypsométriques (Altitudes) :

II.5.1 Les altitudes maximale et minimale (H_{max} et H_{min}) :

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

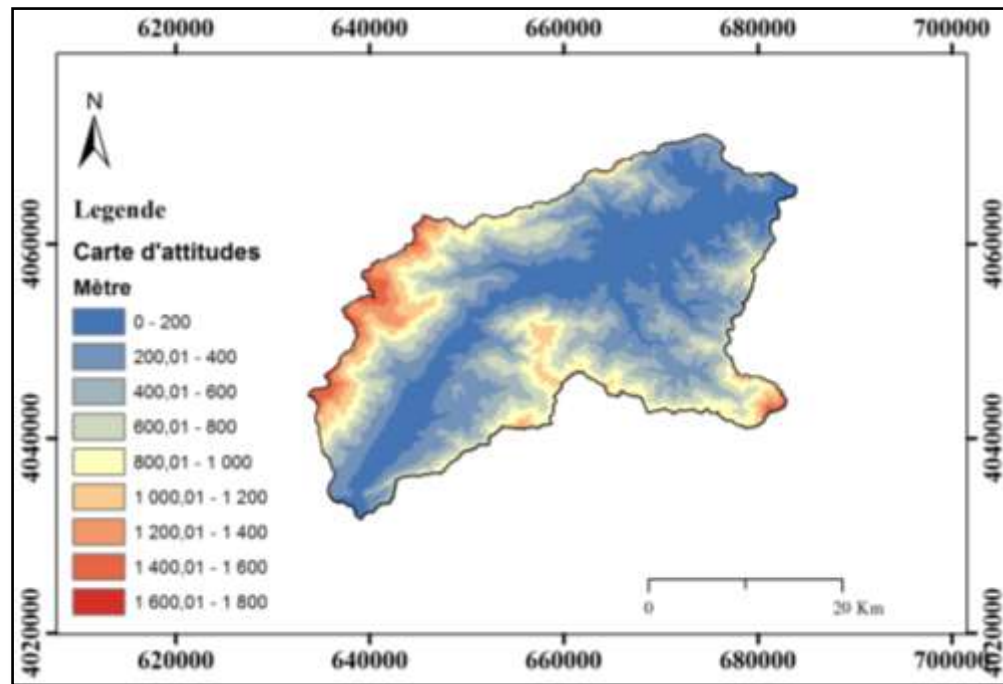


Figure II.8. Carte Hypsométrique BV de Sidi Aich

II.5.2 La courbe hypsométrique :

L'étude statistique permet de tracer la "courbe hypsométrique". Cette courbe donne la surface s (en km^2 ou en % de la surface totale) où les altitudes sont supérieures à une cote h donnée. Cette courbe est établie en planimètres pour différentes altitudes les surfaces situées au-dessus de la courbe de niveau correspondante. Cette méthode est précise mais fastidieuse. Une autre consiste à échantillonner les altitudes selon un maillage carré. On admet alors que l'altitude au centre d'une maille est égale à l'altitude moyenne de la maille.

Tableau II.5. Répartition hypsométrique du bassin versant de Sidi Aich

Bassin versant de Sidi Aich	Altitudes (m)	Superficies partielles		Superficies cumulées		Altitude moyenne (m)
		(Km^2)	(%)	(Km^2)	(%)	
	1698-1600	0,28	0,03	0,28	0,03	1649
1600-1400	15,3	1,46	15,58	1,48	1500	
1400-1200	30,13	2,87	45,71	4,35	1300	
1200-1000	53,42	5,08	99,13	9,44	1100	
1000-800	101,58	9,67	200,71	19,10	900	
800-600	135,01	12,85	335,72	31,95	700	
600-400	193,44	18,41	529,16	50,37	500	
400-200	267,18	25,43	796,34	75,79	300	
200-0	254,31	24,21	1050,65	100	100	
Total	1050,65	100				

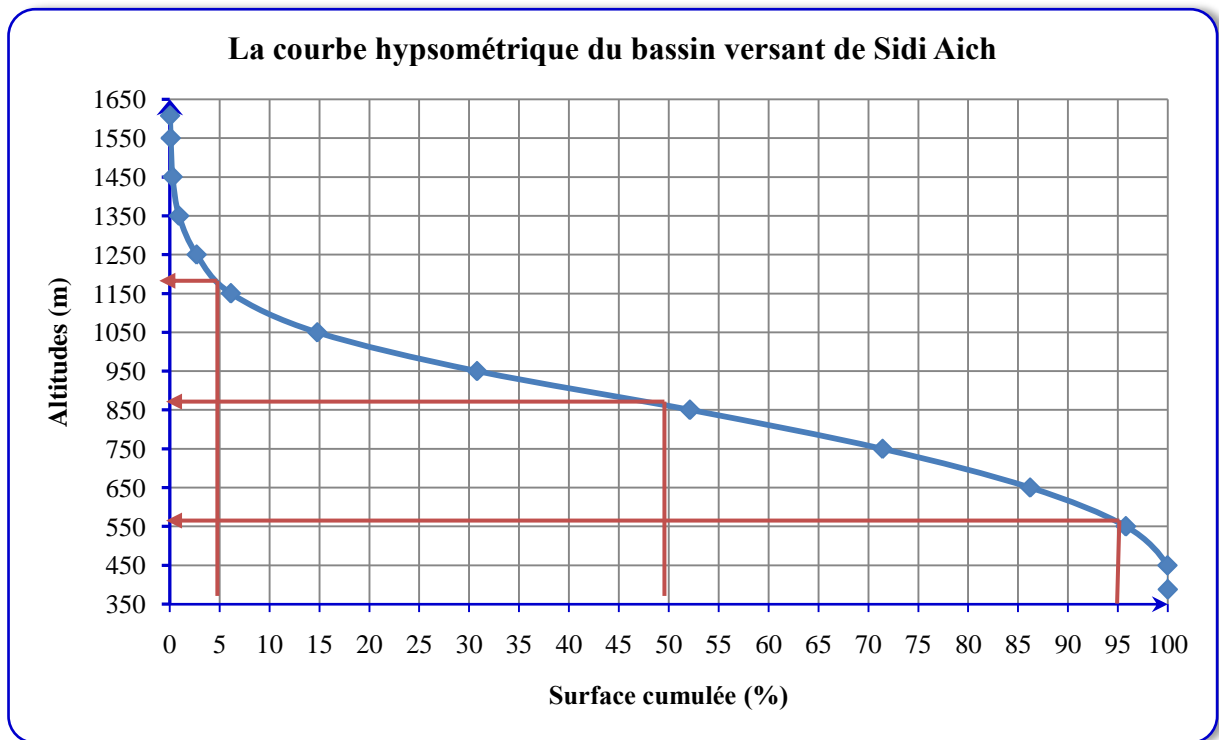


Figure II.9. Courbe hypsométrique du bassin versant de Sidi Aich

II.5.3 L'altitude moyenne (H_{moy}) :

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \sum_1^i \frac{A_i \cdot h_i}{A} \dots \dots \dots (II.4)$$

Avec :

- ✚ H_{moy} : Altitude moyenne du bassin [m] ;
- ✚ A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;
- ✚ h_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;
- ✚ A : Superficie totale du bassin versant [km²] ;
- ✚ H_{moy} du bassin versant de Sidi Aich égal à 535 m.

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toute fois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

II.5.4 L'altitude médiane ($H_{50\%}$) :

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. L'altitude médiane dans le bassin de Sidi Aich est égale à 860 m.

II.5.5 La dénivelée simple (D) :

On définit la "dénivelée D" comme étant la différence de côte entre $H_5\%$ et $H_{95\%}$:
Celles –ci sont lues sur la courbe hypsométrique.

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

$$D = 605 \text{ m}$$

II.6 Les indices de pentes :

L'objectif de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications.

II.6.1 La pente moyenne du bassin versant (I_m) :

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct - donc sur le temps de concentration t_c et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

Plusieurs méthodes ont été développées pour estimer la pente moyenne d'un bassin. Toutes se basent sur une lecture d'une carte topographique réelle ou approximative. La méthode proposée par Carlier et Leclerc (1964) consiste à calculer la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires comprises entre deux altitudes données. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$I_m = \frac{D.L}{A} \dots \dots \dots (II.6)$$

L : longueur totale de courbes de niveau [km],

D : équidistance entre deux courbes de niveau [m],

A : surface du bassin versant [km²].

II.6.2 L'indice de pente Roche (I_p) :

Cet indice se calcule à partir du rectangle équivalent. Il est égal à la somme des racines carrées des pentes moyennes de chacun des éléments pondérés par la surface intéressée, soit :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L_{rec}}} \sum_{i=1}^n \left(X_i \sqrt{\frac{d}{x_i}} \right) \dots\dots\dots (II.7)$$

Où :

I_p : Indice de pente [%],

L_{rec} : Longueur du rectangle [m],

x_i : Distance qui sépare deux courbes sur le rectangle [m] (la largeur du rectangle étant constante, cette distance est égale au facteur de pondération),

d : Distance entre 2 courbes de niveau successives (peut être variable) [m],

d/x_i : Pente moyenne d'un élément [%].

II.6.3 Indice de pente globale (I_g) :

L'indice de Roche étant cependant trop long à évaluer pour des études rapides, il a été proposé, par Laborde, un indice encore plus simple : la pente globale

$$I_g = \frac{D}{L_{rec}} \dots\dots\dots (II.8)$$

$$I_g = 10,36m/m$$

Où :

D étant la dénivelée H5% - H95%, définie sur la courbe hypsométrique ou même directement à l'œil sur la carte topographique ;

L : Longueur du rectangle équivalent.

Cet indice, très facile à calculer, est des plus utilisés. Il sert de base à une des classifications (O.R.S.T.O.M. actuellement IRD) pour des bassins versants dont la surface est dès l'ordre de 25 km² :

Tableau II.6. L'indice global de pente.

R1	Relief très faible	$I_g < 0,002$
R2	Relief faible	$0,002 < I_g < 0,005$
R3	Relief assez faible	$0,005 < I_g < 0,01$
R4	Relief modéré	$0,01 < I_g < 0,02$
R5	Relief assez fort	$0,02 < I_g < 0,05$
R6	Relief fort	$0,05 < I_g < 0,1$
R7	Relief très fort	$0,1 < I_g$

II.6.4 Dénivelée spécifique (Ds) :

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 ne présente pas cet inconvénient : elle dérive de la pente globale I_g en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à A :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} = \frac{D}{L} \sqrt{L \cdot l} = D \sqrt{\frac{l}{L}} \dots \dots \dots (II.9)$$

$$D_s = 335,76m$$

La dénivelée spécifique ne dépend donc que de l'hypsométrie ($D = H5\% - H95\%$) et de la forme du bassin (l/L). Elle donne lieu à une deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M., indépendante des surfaces des bassins.

Tableau II.7.Deuxième classification de l'O.R.S.T.O.M

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

II.7 Caractéristiques du réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est constitué de l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant. La définition d'un cours d'eau est difficile à donner avec précision, en particulier pour les cours d'eau temporaires. Selon le support cartographique utilisé, on étudiera le réseau avec plus ou moins de détails : en photographie aérienne, on pourra déceler des thalwegs de très faibles extensions, tandis qu'on ne verra que les cours d'eau pérennes et importants sur une carte au 1/100 000ème.

L'étude du chevelu hydrographique servant surtout à comparer des bassins entre eux, il suffit, dans la plupart des cas, de se fixer une définition du thalweg élémentaire et de l'appliquer pour l'étude de tous les bassins (par exemple : thalwegs = traits bleus temporaires ou pérennes sur carte I.G.N. au 1/50 000ème).

Le réseau hydrographique peut se caractériser par trois éléments : sa hiérarchisation, son développement (nombres et longueurs des cours d'eau) et son profil en long.

II.7.1 Hiérarchisation du réseau (Ordre du bassin versant) :

Pour chiffrer la ramification du réseau, chaque cours d'eau reçoit un numéro fonction de son importance. Cette numérotation, appelée ordre du cours d'eau, diffère selon les auteurs. Parmi toutes ces classifications, nous adopterons celle de Strehler :

- Tout cours d'eau n'ayant pas d'affluent est dit d'ordre 1,
- Au confluent de deux cours d'eau de même ordre n , le cours d'eau résultant est d'ordre $n+1$,
- Un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre, ce qui se résume par : $n + n = n + 1$ et $n + m = \max(n,m)$.

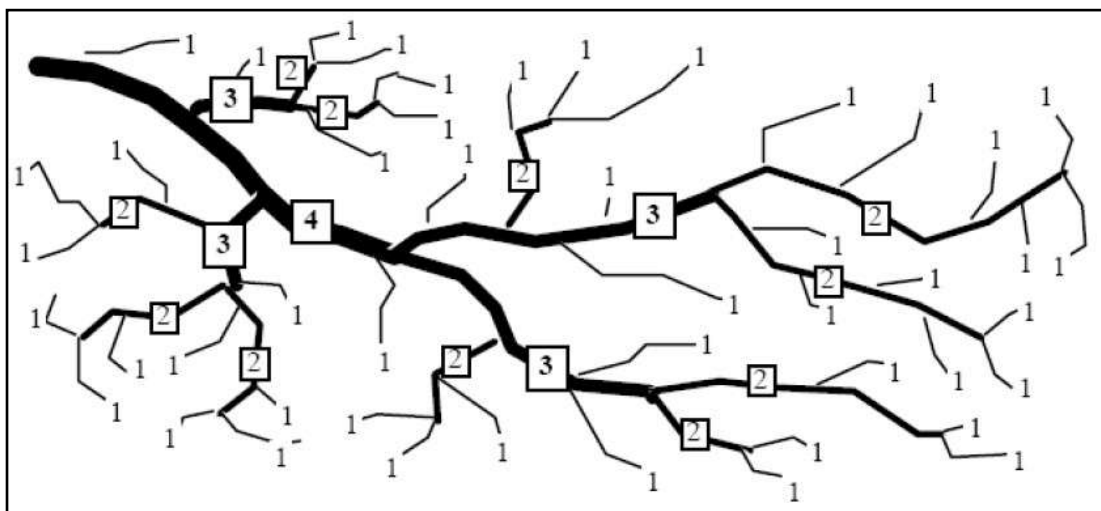


Figure II.10. Réseau hydrographique et ses ordres d'un BV

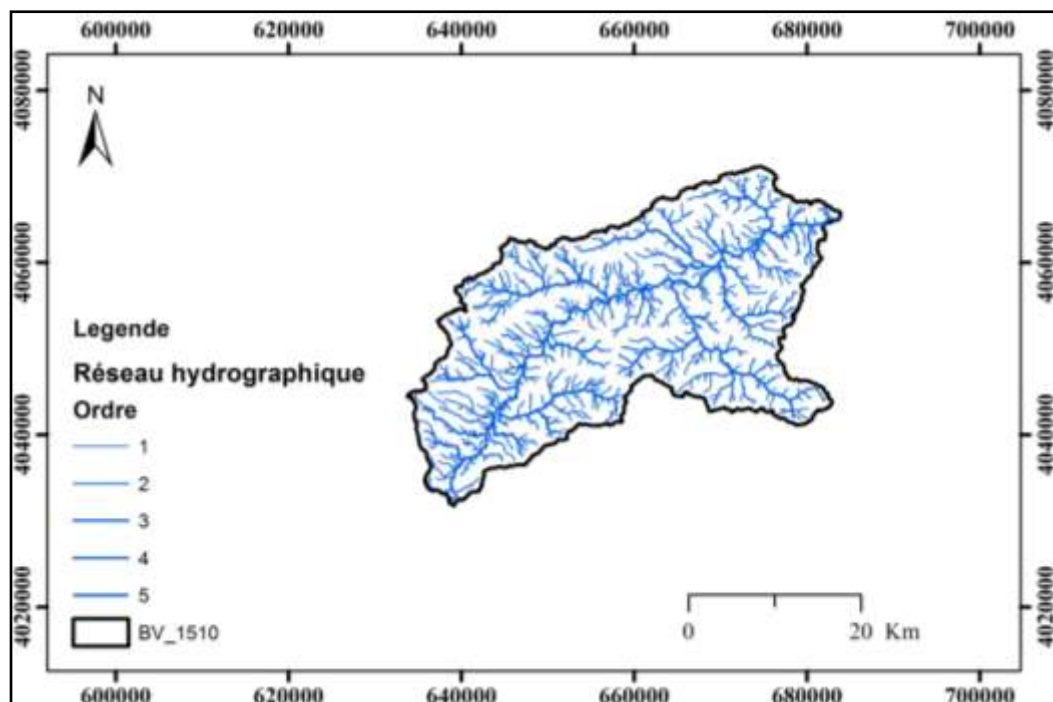


Figure II.11. Réseau hydrographique du bassin versant Sidi Aich

II.7.2 Rapport de confluence :

C'est le rapport du nombre de thalwegs d'ordre x et de celui des thalwegs d'ordre immédiatement supérieur (x_{+1}). Il est donné par la relation suivante :

$$R_c = \frac{N_x}{N_{x+1}} \dots\dots\dots(II.10)$$

Tous les paramètres hydro-morpho-métriques des sous bassins cités ci-dessus sont résumés dans le tableau suivant :

II.7.3 Temps de concentration :

An cas des bassins versant non jaugés, le temps de concentration représente la durée que met une goutte d'eau de ruissellement du point le plus élevé au point représentant l'exutoire du bassin versant.

Le temps de concentration est déterminé par La formule suivante :

$$\text{Formule de GIANDOTTI : } t_c = \frac{4\sqrt{A}+1.5L_{cp}}{0.8\sqrt{H_{moy}-H_{min}}} \dots\dots\dots(II.11)$$

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

$$\text{Formule de Ventura : } t_c = 0.127 * \left(\frac{S}{I}\right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(III.3)$$

Avec :

t_c : Temps de concentration(h)

L : Plus long chemin hydraulique(Km)

I : Pente (m/m)

S : Superficie du bassin versant(Km²)

Les résultats du temps de concentration retenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau II.8: Temps de concentration retenu

Bassin versant	t_c (Giandotti)	t_c (Passini)	t_c (ventura)	t_c moy
Sidi Aich	12,42	18,81	18	16,41

- Le temps de concentration du bassin de Sidi Aich quand doit utilisé dans notre étude est de 16,41h

Tableau II.9. Caractéristiques physiographiques du bassin versant de Sidi Aich

	Paramètres	Symboles	Unités	Résultats
Caractéristiques morpho-métriques	La Surface	A	(Km ²)	1050,65
	Le Périmètre	P	(Km)	193,03
	L'indice de compacité de Gravelius	KG	(-)	1,67
	La longueur du rectangle équivalent	Lrec	(Km)	58,42
	La largeur du rectangle équivalent	lrec	(Km)	17,98
	Le rapport de confluence	RC	(-)	-
Caractéristiques du relief	L'altitude maximale	Hmax	(m)	1698
	L'altitude minimale	Hmin	(m)	0
	L'altitude moyenne	Hmoy	(m)	535
	L'altitude à 5%	H5%	(m)	1160
	L'altitude à 95%	H95%	(m)	555
	L'altitude à 50%	H50%	(m)	860
	La dénivelée simple	D	(m)	605
	La dénivelée spécifique	Ds	(m)	335,76
	L'indice de pente globale	Ig	(%)	10,61
	L'indice de pente roche	Ip	(%)	7,83
	Pente moyenne Brute du cours d'eau principale	Pmoy	(%)	52,39
Caractéristiques hydrographiques	Longueurs du cours d'eau	ΣLi	(Km)	1232,54
	La densité de drainage	Dd	Km/Km ²	1,17
	Densité Hydro-graphique	F	(Km ²)	2,49
	Coefficient de Torrentialité	Ct	(KmM/Km ⁴)	2,92
	Longueur du cours d'eau principale	Lcp	(Km)	66,74
	Temps de concentration	Tc	(h)	16,41
	Vitesse d'écoulement de l'eau	Ve	(Km/h)	4,07

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons été amenés à extraire le bassin versant en question, et à déduire sa caractéristique géomorphologique et hydrométrique, à partir d'un modèle numérique de terrain. L'évaluation de ces paramètres qui intervenant dans le comportement hydrologiques du bassin versant de Sidi Aich nous permis d'obtenir les résultats suivants :

La surface de Sidi Aich est égale à **1050,65 Km²** et un périmètre de **193,03 Km**.

Sa forme allongé avec un relief assez fort, pour une altitude moyenne de **535m**, le réseau hydrographique du bassin est caractérisé par un cours d'eau principale long de **66,74 Km** correspondant à un ordre **5**, un temps de concentration égale à **16,41 h** et une vitesse de ruissellement de **4,07Km /h**.

Chapitre III. Modélisation pluies débits par l'application du modèle HEC-HMS

Chapitre III : Modélisation pluies débits par l'application du modèle 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 coté 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 constitué d'une interface ArcMap et d'une interface ArcCatalog (accessoirement d'une interface ArcToolBox séparée pour les versions antérieurs 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]

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.1.1.3 Paramètres morphologiques du bassin versant :

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 :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots(III.1)$$

P : Périmètre du bassin (km)

S : Surface du bassin (km²)

- Le coefficient de Gravelius calculés est supérieur à 1, donc le bassin est 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 du bassin versant

Name de SBV	Périmètre (km)	Surface (km ²)	coefficient de Gravelius
BV Sidi Aich	193,2	1050,65	1,67

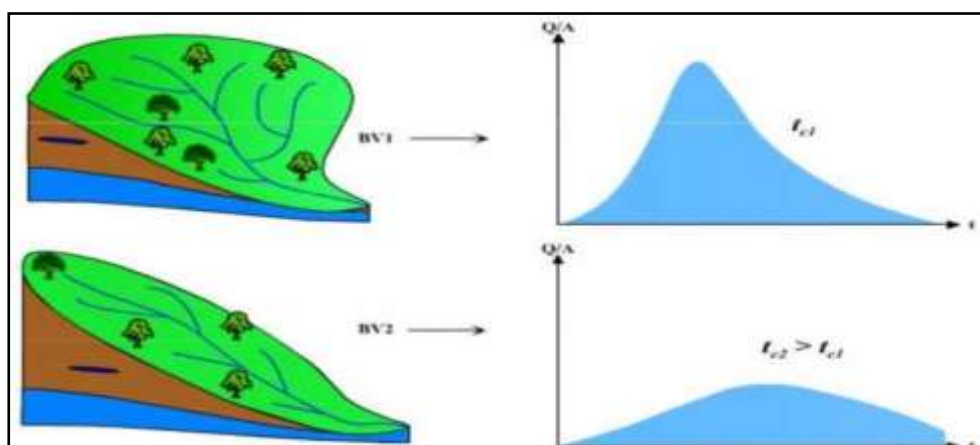


Figure III.1: Influence de la forme du bassin versant sur la réponse hydrologique. [07]

Le calcul du plus long chemin hydraulique a également été réalisé à l'aide de Arc Gis. L'exécution de cette manipulation a échoué et provoquée 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.

Les résultats de plus long chemin hydraulique sont présentés dans le tableau sous-dessus :

Tableau III.2: Plus longs chemins hydrauliques

Name de sous bassin	Plus long chemin hydraulique (km)
BV Sidia Aich	66,74

Le plus long chemin du bassin versant en entier est de 66,74 kilomètres.

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

Formule de GIANDOTTI : $t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L_{cp}}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$ (III.2)

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

Formule de VENTURA : $t_c = 0.127 * (\frac{S}{I})^{\frac{1}{2}}$ (III.4)

Avec :

t_c : Temps de concentration(h)

L : Plus long chemin hydraulique(Km)

I : Pente (m/m)

S : Superficie du bassin versant(Km²)

Les résultats du temps de concentration retenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.3: Temps de concentration retenus

Bassin versant	t_c (Giandotti)	t_c (Passini)	t_c (ventura)	t_c moy
Sidi Aich	12,42	18,81	18	16,41

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 de bassin SIDI AICH , 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].

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 « Subbassin » : 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.

III.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'entré :

III.4.1 Le modèle numérique du terrain (MNT) :

Avant de procéder à n'importe quelle opération de préparation d'un fichier de simulation HMS, il est primordial d'avoir à sa possession le MNT de la zone d'étude, dont le rôle est fondamental dans la caractérisation physique du bassin et le calcul des paramètres.

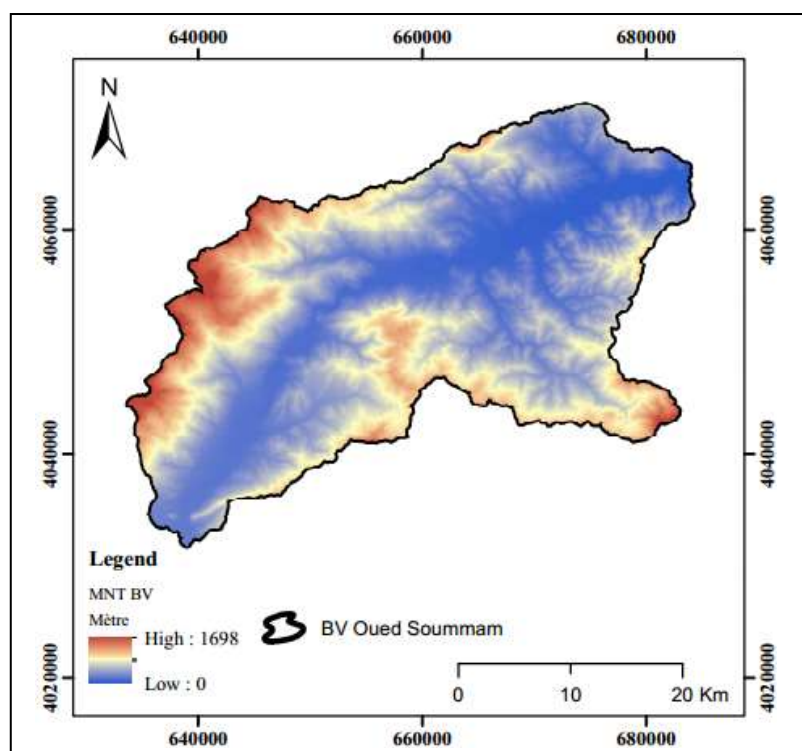


Figure III.2. Modèle numérique du terrain (MNT) du bassin versant Sidi Aich

III.4.2 Occupation du sol :

Vu les exigences particulières de la combinaison modulaire choisie, plus précisément la méthode de service de conservation de nature (NRCS CN) comme fonction de production, l'établissement d'une carte d'occupation du sol sur l'ensemble de la zone d'étude était une voie incontournable. Toutefois, l'information supposée contenue dans cette carte devrait être authentique à la classification reconnue par le NRCS, par conséquent nous étions mené à faire des correspondances entre les classes de la NRCS et les informations recueillies de toutes les données bibliographiques répertoriées qui traitent ce volet.

Afin d'estimer la valeur du CN, il faut donc d'abord établir une classification hydrologique des sols, ainsi qu'une classification de l'occupation du sol.

Selon la méthode du CN, on distingue quatre groupes de sols (Hydrologic Soil Group) nommés de A à D.

Le Service de Conservation des Sols (SCS) des Etats-Unis a établi, à partir de certaines classes de l'USGS, les "Curve Numbers"(CN) qui sont des coefficients de ruissellement en fonction du type de sol, de son utilisation, des conditions d'humidité antérieures et de leurs variations dans le temps. Ils représentent la corrélation entre des groupes de sols hydrologiques (A à D) et des classes d'utilisation du sol. Ils ont servi à calculer un index de ruissellement (*Taillon, 1991*).

Tableau III.4 Classification de groupe hydrologique des sols (*Bastian, 2011*).

Groupe hydrologique des sols	Caractéristiques des sols	Précisions
<i>A</i>	Capacité d'infiltration élevée Conductivité hydraulique élevée	Sols développés dans les sables, les lœss profonds et les limons agrégés
<i>B</i>	Capacité d'infiltration modérée Conductivité hydraulique modérée	Sols dérivés de lœss et développés dans les limons sableux peu profonds
<i>C</i>	Capacité d'infiltration faible Conductivité hydraulique faible	Sols développés dans les limons argileux, les limons sableux, les sols à faibles teneurs en matière organique et les sols à haute teneur en argile
<i>D</i>	Capacité d'infiltration très faible Conductivité hydraulique très faible	Sols à forte teneur en argiles gonflantes, aux sols riches en argile lourde et à certains sols salins.

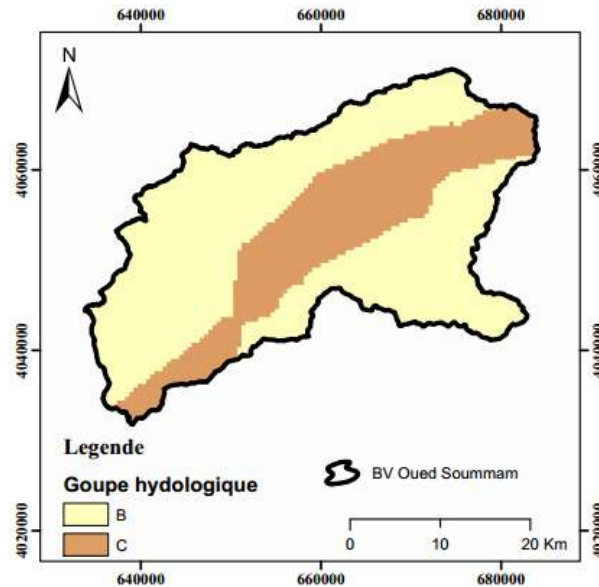


Figure III.3. Carte de groupe hydrologique des sols du bassin versant Sidi Aich

Il existe de nombreuses tables qui permettent d'estimer les CN associés aux catégories d'occupation du sol et aux groupes hydrologiques de sol. Elles ont été établies sur base de nombreuses mesures de pluies et débits réalisées dans des bassins versants agricoles aux États-Unis .

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 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.

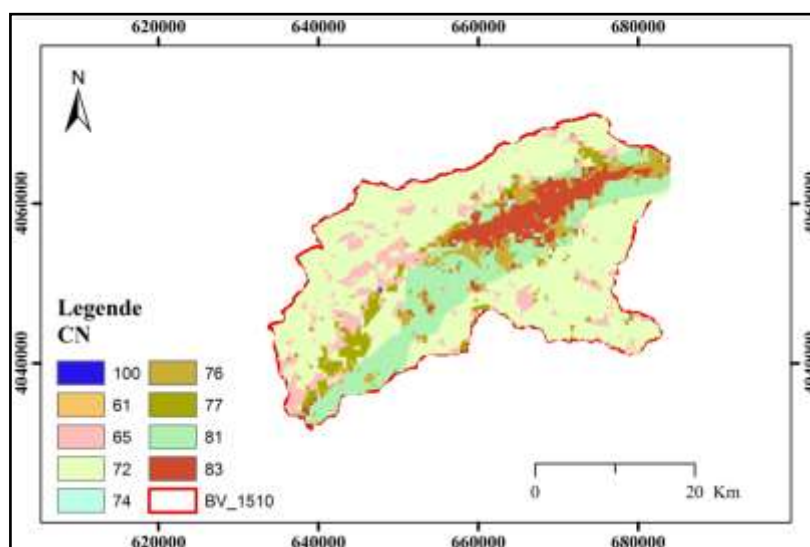


Figure III.4: Curve Number (CN) du bassin versant Sidi Aich

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 :

$$\text{CN composite} = \frac{\sum A_i \text{CN}_i}{\sum A_i} \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

Le CN composite : 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 (km ²)	CN _i * A _i
72	549,05	39531,55
65	118,62	7710,42
77	54,02	4159,18
81	174,76	14155,18
76	66,72	5071,08
83	85,58	7102,90
74	1,06	78,38
61	0,64	38,76
100	0,21	21,18
Somme	1050,65	77868,63
CN composite		74

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

Tableau III.6: Données de base du-bassin versant.

Bassin versant	Surface (km ²)	Lag time (mn)	CN	Le pourcentage d'imperméable
Sidi Aich	1050,65	984	74,11	10

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

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.

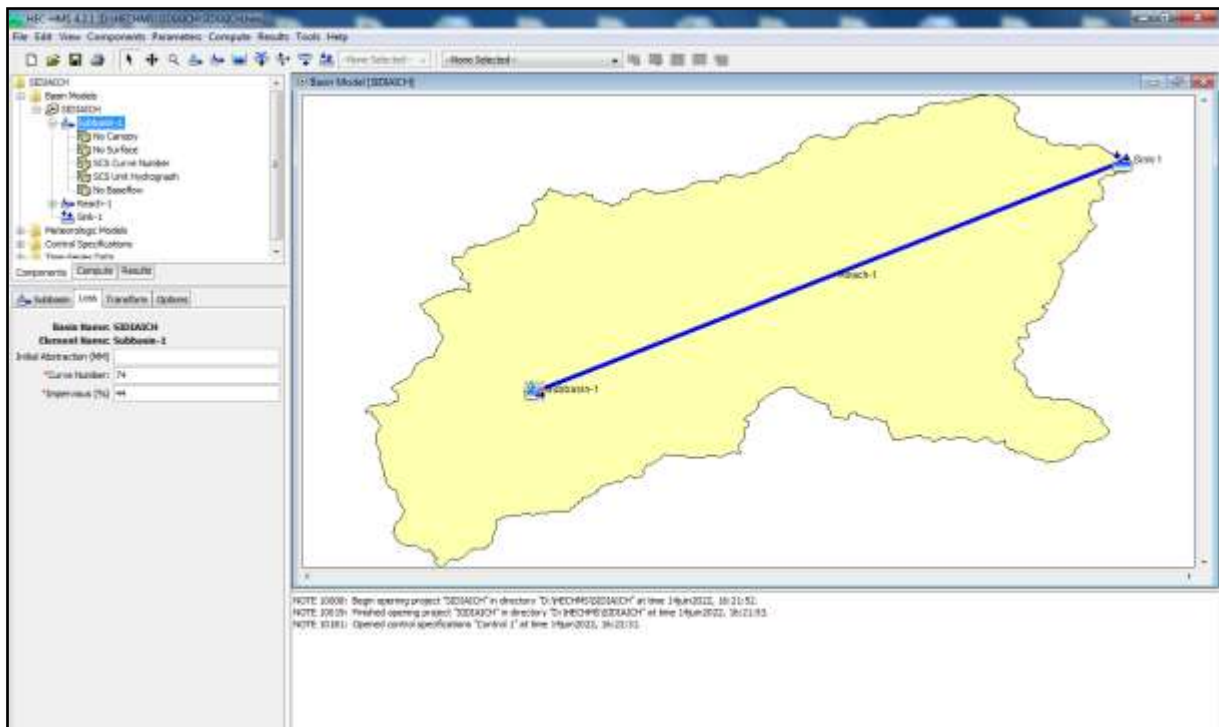


Figure III.5: Fenêtre de donnée de CurveNumber (CN) et Imperméabilité.

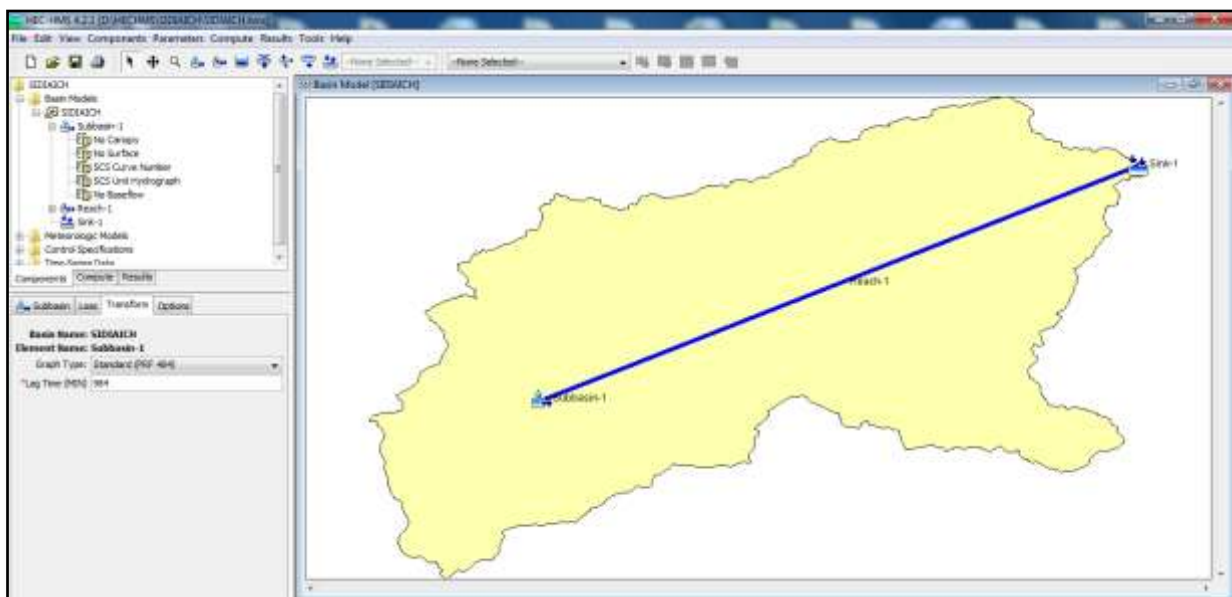


Figure III.6: Fenêtre représente Lag time

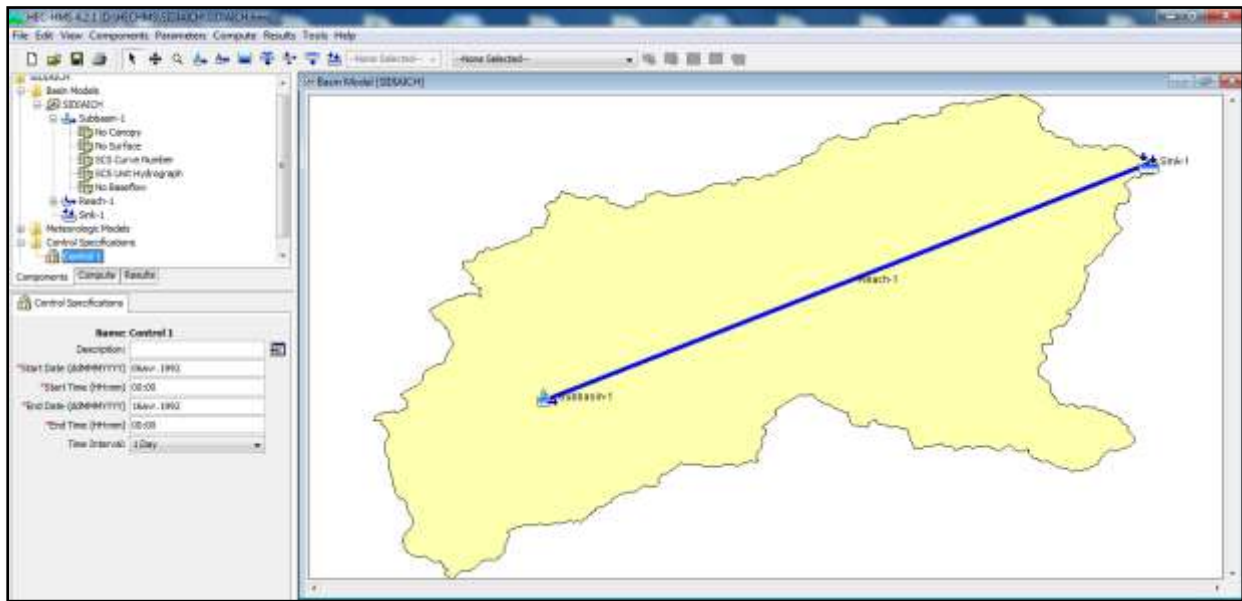


Figure III.7: Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps

La figure III.7 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 de simulation :

Les résultats de simulation pour les deux fonctions CN et pourcentage d'imperméable dans le tableau suivant :

Tableau III.7:Résultats de simulation

Evènement	Paramètres de modèle			Résultats de simulation					
	NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (m ³) x10 ³		
	Pourcentage d'imperméable	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Diff %	Obs	Sim.	Diff %
06 au 14 sept 1986	10	74	984	32,2	11,1	190,09	4448,7	1576	-182,28

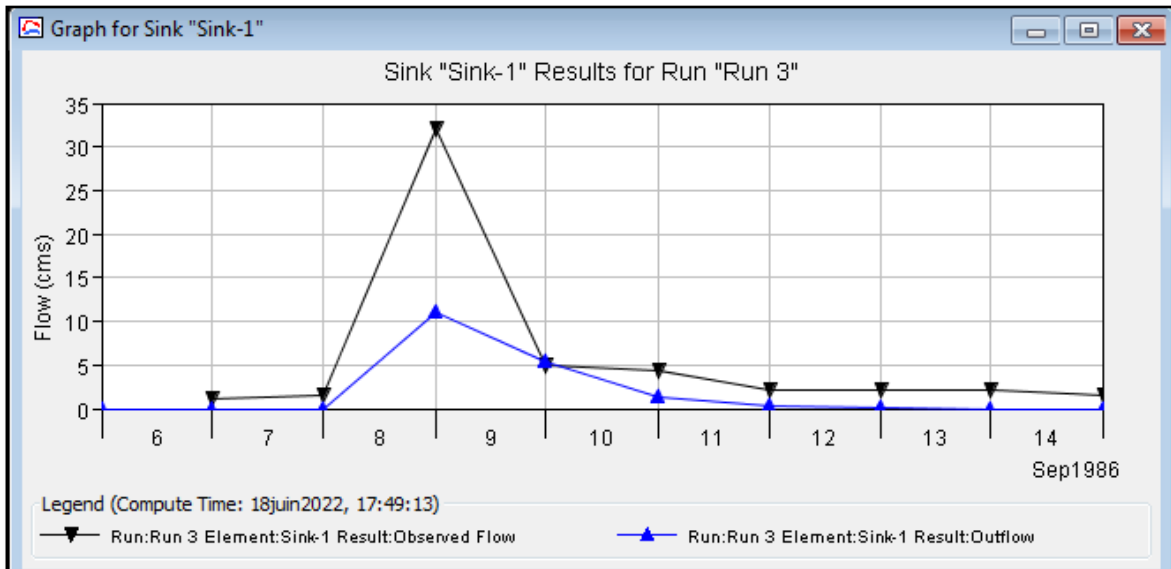


Figure III.8 : Hydrogrammes des crues de l'évènement de 06 sept.1986 au 14 sept.191986

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.8:Résultats de calibration

Evènement	Paramètres de modèle			Résultats de simulation					
	NRCS CN			Qp (m ³ /s)			V (m ³) x10 ³		
	Pourcentage d'imperméable	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Diff %	Obs	Sim.	Diff %
06 au 14 sept 1986	79	29	984	32,2	32,3	30,96	4448,7	4594,5	3,17

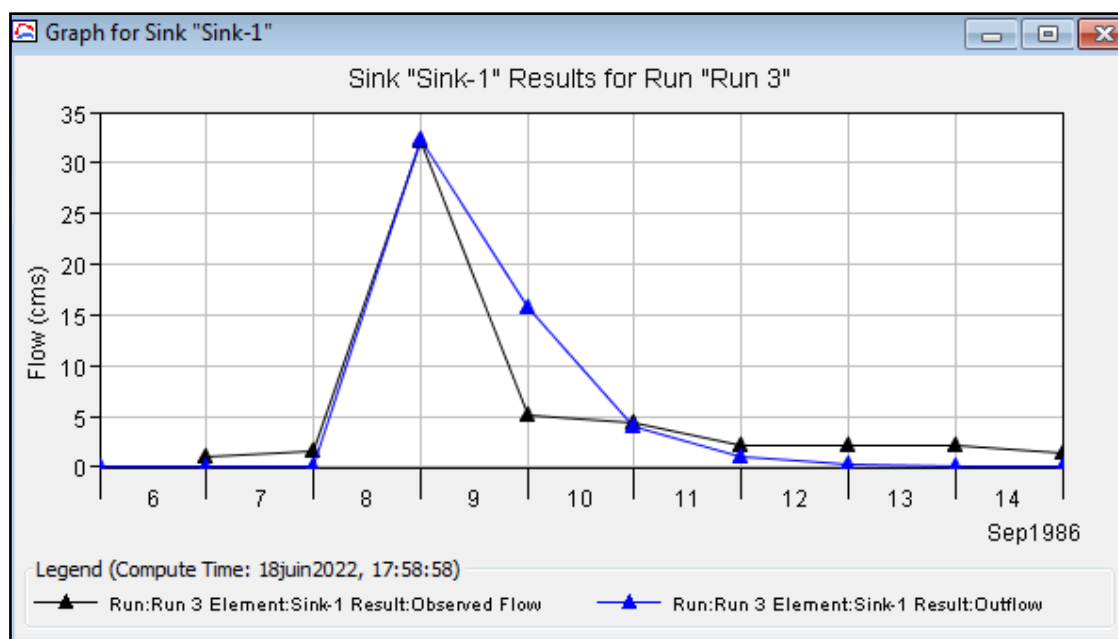


Figure III.9: Hydrogrammes des crues de l'évènement de 06 sept.1986 au 14 sept.1986 après calibration

Le modèle est calé par l'évènement du 06/09/1986 à 14/09/1986. Le débit maximal instantané enregistré le 19 septembre 1986 est de $32.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

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.9: Paramètres de calage

Paramètres	CN	T lag	imperméabilité%
Valeurs optimisés	79	984	29

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 :

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs})^2} = 0.839$$

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 = 83.90 % le modèle est calibré pour l'évènement 06/09/1986 à 14/09/1986.

III.6. La validation du modèle :

La validation des paramètres issus du calage sera effectuée à l'aide des pluies et débits observés en 07 déc-13 déc1986. Le débit maximal instantané enregistré le 11 décembre 1986 est de 111 m³ /s. « La validation consiste à tester la performance du modèle en utilisant le jeu de paramètres obtenu par calage pour simuler un événement observé différent de ceux utilisés pour le calage ».

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

En appliquant le jeu de paramètre défini dans le tableau III.9 aux événements nous arrivons aux résultats suivants:

Tableau III.10: Résultats de validation du modèle

Evènement	Paramètres calibrés			Résultats de calibration			
	NRCS CN			Qp (m3/s)		V (mm)x10 ³	
	Le pourcentage d'imperméable	CN	Tlag	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
07 déc-13 déc1986	29	79	984	108,9	111	17360,4	15570,9

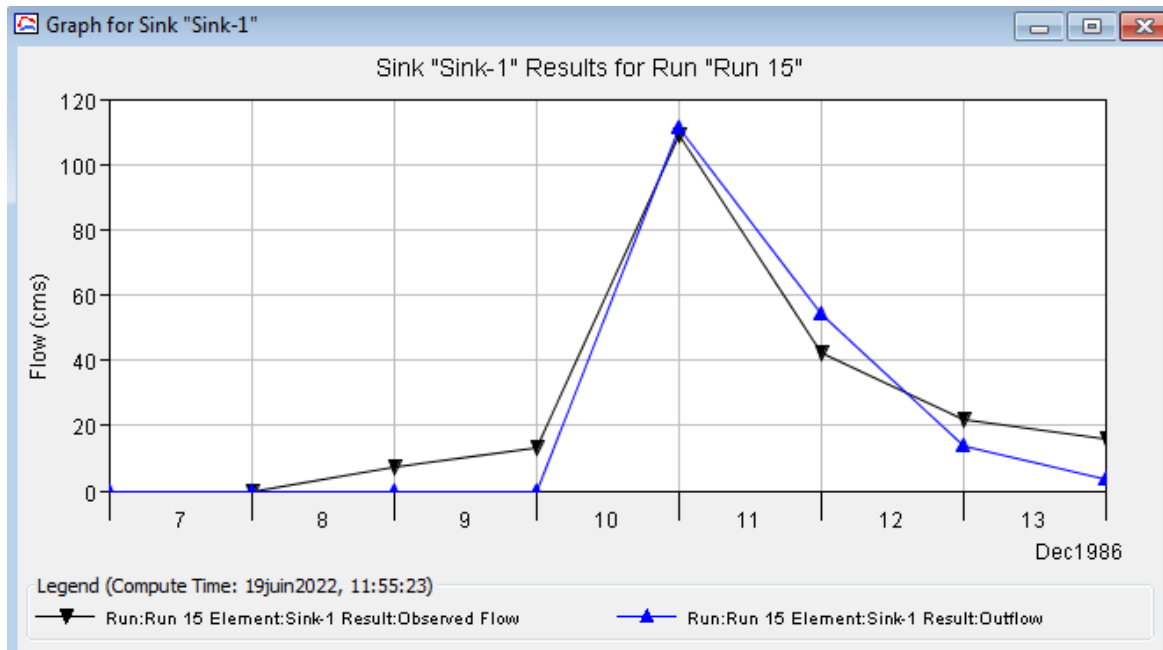


Figure III.10: Hydrogrammes des crues de l'évènement de 07déc-13déc/1986 après validation du modèle

La formulation du critère de Nash est la suivante :

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs})^2} = 0.930$$

Le critère de validation de modèle NASH=93% Statistiquement, le critère de Nash montre que le modèle est validé.

III.7 Prédiction du comportement futur du SIDI AICH :

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 répercutions 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 SIDI AICH pour 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 07/12/1986 à 13/12/1986 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 79. Le pourcentage d'imperméable est égal à 29 %.

II.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.11: Les hauteurs de précipitations estimées au bassin du Sidi Aich pour différentes périodes de retour

Période de retour T(ans)	Pjmax (mm)
10	67.3
20	77.0
50	89.6
100	131.6

Chaque hauteur de pluie sera additionnée au jeu de paramètres optimisés définis dans le tableau III.10 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 07/12/1986 à 13/12/1986

III.7.2 Les résultats de la simulation :

Les résultats résumés dans le tableau III.12 et les graphes portés sur les figures III.11 ; III.12 ; III.13 et III.14 présentent les hydrogrammes des crues pour différentes périodes de retour.

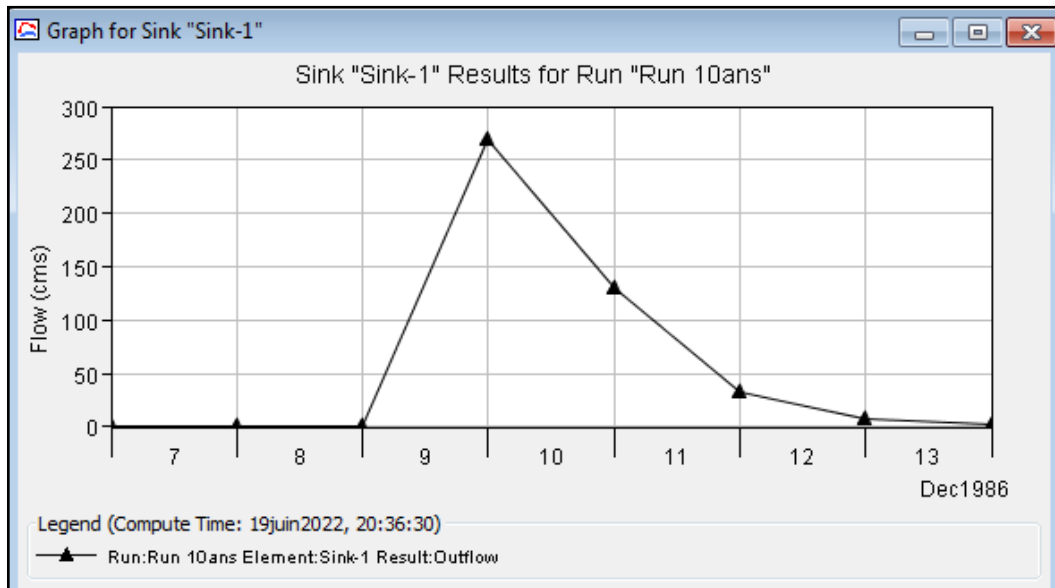


Figure III.11: Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 10 ans.

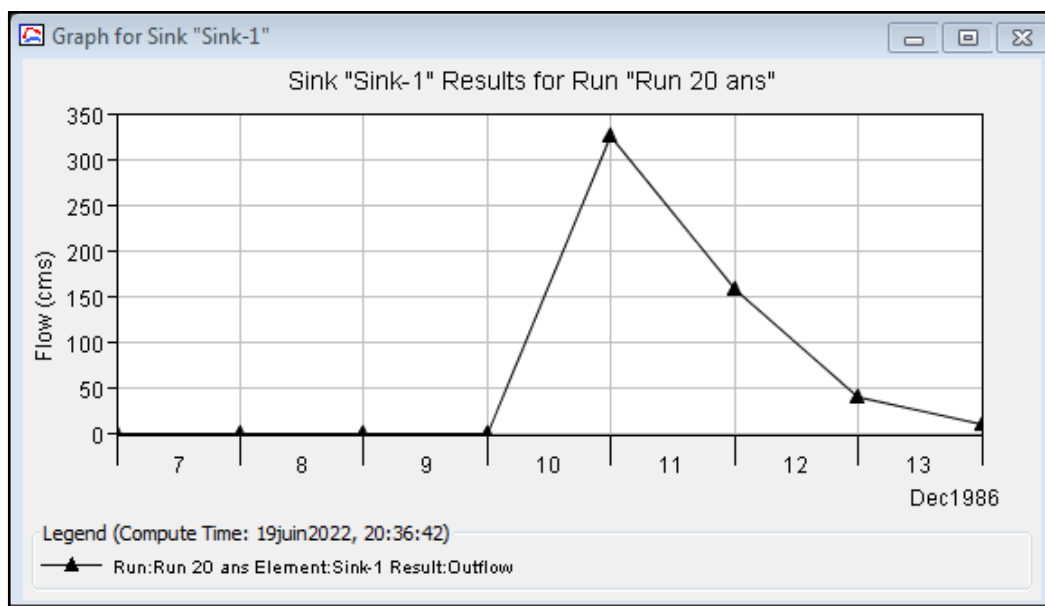


Figure III.12: Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 20 ans.

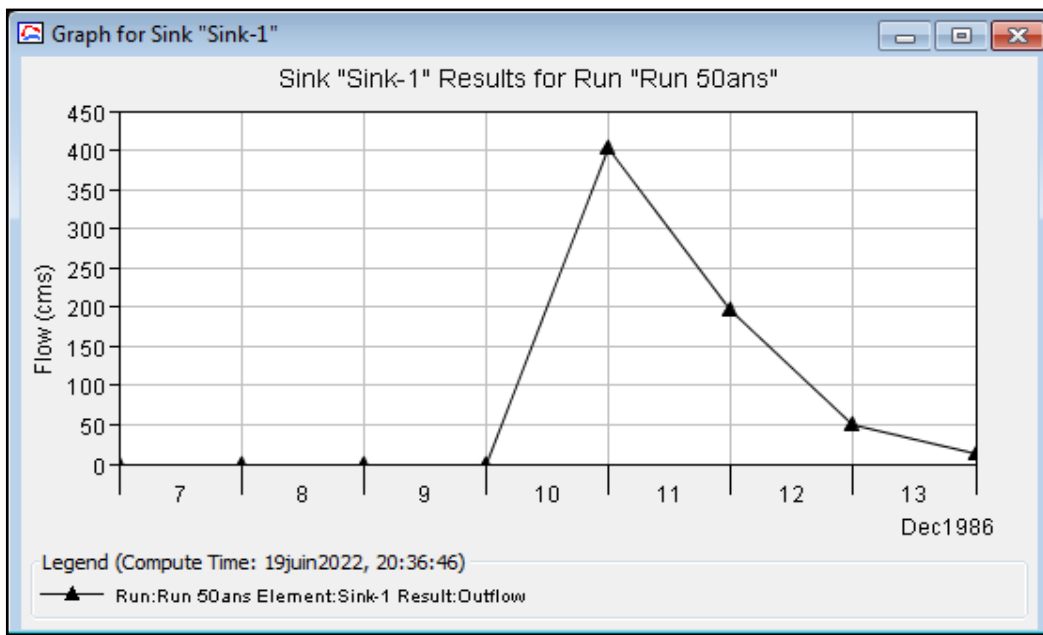


Figure III.13: Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 50 ans.

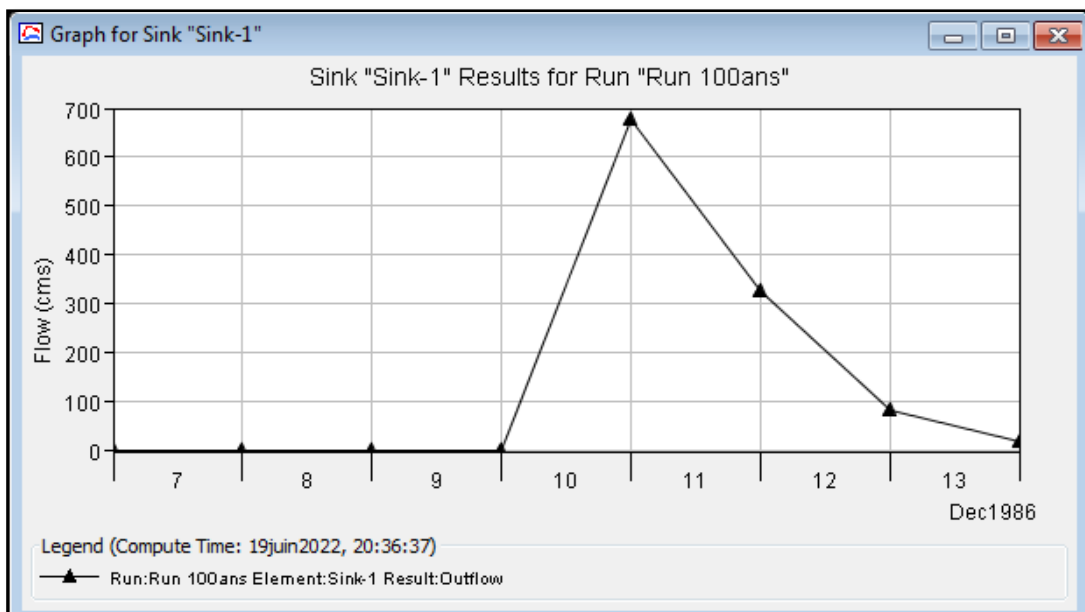


Figure III.14: Hydrogrammes des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 100 ans.

Tableau III.12: Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station Sidi Aich pour le scénario 1

	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp (m3/s)	269	326	403.5	675.3
V (103m3)	38205.7	45748.7	56551.9	94763.3

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 Sidi Aich . 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 79 à 90. Le pourcentage d'imperméable est évalué à 40 %.

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.13: Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station Sidi Aich pour le scénario 2

	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp (m ³ /s)	269	453,7	542,7	844,1
V(10 ³ m ³)	38205,7	63663,6	76153,1	118443,6

Tableau III.14:La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 2

Période de retour (ans)	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp scénario 1 (m ³ /s)	269	326	403.5	675.3
Qp scénario 2 (m ³ /s)	269	453.7	542.7	844.1
Différence (%)	0	28.15	25.65	20
V scénario 1 (10 ³ m ³)	38205.7	45748.7	56551.9	94763.3
V scénario 2 (10 ³ m ³)	38205.7	63663.6	76153.1	118443,6
Différence (%)	0	28.14	25.74	19.99

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 70. 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 06/09/1986 à 14/09/1986 par des pluies à périodes de retour distinctes.

Tableau III.15: Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume à la station Sidi Aich pour le scénario 3

	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp (m ³ /s)	269	223.4	286	519.9
V(10 ³ m ³)	38205.7	31346.8	40128	72949.6

Tableau III.16: La comparaison entre les résultats des scénarios 1 et 3

Période de retour (ans)	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp scénario 1 (m ³ /s)	269	326	403.5	675.3
Qp scénario 3 (m ³ /s)	269	223.4	286	519.9
Différence (%)	0	-45,93	-41,08	-29,89
V scénario 1 (10 ³ m ³)	38205.7	45748.7	56551.9	94763.3
V scénario 3 (10 ³ m ³)	38205.7	31346.8	40128	72949.6
Différence (%)	0	-45,94	-40,93	-29,90

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 sous

bassin du Sidi Aich. 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 SIDI AICH. 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 Sidi Aich, 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 générale

La révision des méthodes d'estimation des débits de projet utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques s'est imposée face aux dégâts causés par les événements extrêmes récents. Une réadaptation de ces méthodes au contexte et aux données hydrologiques récentes s'est avérée nécessaire. Ceci définit l'objectif de mémoire de Master. Le travail mené est présenté pour le sous bassin de Sidi Aich .

De plus, les données pluviométriques et hydrométriques sont en permanente transformation, dans le temps, due à l'activité humaine, au changement climatique ou à l'évolution naturelle de la végétation, de la pédologie ou du réseau hydrographique du site. Néanmoins cela n'empêche l'établissement d'une étude hydrologique sur le site en se focalisant sur quelques paramètres selon l'objectif attendu.

La modélisation est une méthode qui nous permet à 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 Sidi Aich. Ensuite, après la calibration du modèle, il doit être validé sur au moins l'un des événements présélectionnés.

Une fois le modèle calé et validé, il pourra servir à simuler les crues de projet à partir des pluies de projet synthétiques de période de retour 10, 20, 50 et 100 ans. A long terme, on envisage pour les études postérieures de soulever des défis beaucoup plus enthousiastes comme par exemple :

Après avoir validé complètement le modèle HEC-HMS sur le bassin versant du Sidi Aich, 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

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] Salhi, A. (2021). Modélisation Pluie-Débit par l'application du modèle hydrologique HEC HMS dans le bassin versant du barrage de Beni Haroun (Doctoral dissertation, univ msila).
- [7]) Choayb, M. (2016). MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE LOGICIEL" HEC-HMS" DE SOUS-BASSIN VERSANT L'OUED SAHEL (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- [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] Abderrahmen, M. E. F. T. A. H. (2014). MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE LOGICIEL HEC-HMS CAS DE BV OUED CHELIFF-GHRIB (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
- [11] Elhassen, B. E. N. Y. E. T. T. O. U. (2016). MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE LOGICIEL HEC-HMS CAS DE BV OUED BOUSSELLAM.