République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de l'**E**nseignement **S**upérieur et la **R**echerche **S**cientifique
Université des **S**ciences et de la **T**echnologies d'**O**ran
Mohamed BOUDIAF

FACULTE D'ARCHITECTURE ET DE GENIE CIVIL
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER

SPECIALITE : HYDRAULIQUE

OPTION : RESSOURCE EN EAU

PRESENTE PAR

Mr. MESSAK Abdelkader

SUJET DU MEMOIRE

MODELISATION PLUIE-DEBIT DES BASSINS VERSANTS DE L'OUED MINA : APPLICATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS

SOUTENU LE …….. DEVANT LE JURY COMPOSE DE

Nom et Prénoms	**Grade**	**Etablissement**	
Mr. HADJEL Mohammed	Professeur	USTO-MB	**Président**
Mr. ERRIH Mohamed	Maitre de conférences	USTO-MB	**Rapporteur**
Mr. CHERIF El-Amine	Maitre de conférences	USTO-MB	**Co-rapporteur**
Mr. BOUKERMA Baghdadi	Maitre de conférences	USTO-MB	**Examinateur**
Mr. BOUDJEMLINE Djamel	Maitre de conférences	USTO-MB	**Examinateur**

REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté que la conscience afin de rédiger ce modeste travail que je souhaite qu'il soit estimable et réussi.

Je remercie tout d'abord Monsieur ERRIH Mohamed. Il aura été mon encadreur, disponible et patient. Son aide et son soutien, même dans les conditions les plus difficiles, m'ont été très précieux. Ce travail n'aura pas abouti sans les conseils éclairés du M. CHERIF El-Amine mon Co-encadreur qui m'a accordé sa confiance en acceptant d'encadrer ce travail.

C'est ainsi que je remercie Mr HADJEL Mohammed, professeur de l'Université d'USTO, d'avoir accepté de présider le Jury. Mr. BOUKERMA Baghdadi, Maître de conférences, de l'Université d'USTO, et Mr. BOUDJEMLINE Djamel, Maître de conférences, de l'Université d'USTO.

Je ne saurais oublier mes enseignants de Département d'Hydraulique pour leurs aides, leurs informations et les encouragements qu'ils m'ont apportés pendant le déroulement de ce travail.

Je suis enfin reconnaissant envers tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu tout au long de ces études. Enfin j'adresse mes meilleurs et chaleureux remerciements à toutes personnes qui nous aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail, sans oublier bien sûr mes collègues de ma promotion de magister.

SOMMAIRE

Listes des tableaux
Liste des figures

Introduction générale…….. 1

PREMIER PARTIE
MODELISATION HYDROLOGIQUE PLUIE-DEBIT

CHAPITRE I
LES DIFFERENTS MODELES

I.1 Introduction…… 3
I.2 Cycle hydrologique…….. 3
I.3 Les modèles hydrologiques…….. 5
I.4 Les différentes approches de la modélisation…… 6
I.4.1 Modèles stochastiques…….. 6
I.4.2 Modèles déterministes…….. 6
I.4.3 Modèles à base physique…….. 7
I.4.4 Modèles paramétriques…….. 7
I.4.5 Modèles empiriques…… 7
I.4.6 Modèles analytiques…….. 7
I.4.7 Modèles conceptuels…….. 7
I.4.8 Modèles globaux…….. 8
I.4.9 Modèles Spatialisés…….. 8
I.5 La relation pluie-débit…….. 9
I.5.1 Définition d'un modèle…….. 10
I.5.2 Choix d'un modèle hydrologique…….. 10
I.5.2.1 Fonction de production…… 11
I.5.2.2 Fonction de transfert…… 11
I.6 Présentation de quelques modèles…….. 12
I.6.1 Critères de sélection…… 12
I.6.2 Modèle global (IHACRES)…… 12
I.6.3 Modèles semi-spécialisés (HEC, CEQUEAU & MIKE BASSIN)…… 13
I.6.3.1 Le Modèle HEC-HMS…….. 13
I.6.3.2 Le modèle CEQUEAU…… 14
I.6.3.3 Le modèle MIKE BASSIN…….. 16
I.6.4 Modèle physique spatialisé (MIKE SHE)…….. 17
I.6.5 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé (TOPMODEL)…… 19
I.7 Conclusion…….. 20

CHAPITRE II
THEORIE DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS

II.1 Introduction…….. 21
II.2 Modélisation des précipitations …….. 22
II.2.1 Méthodes basées sur les coefficients de pondération…….. 22
II.2.1.1 Précipitation moyenne…… 22
II.2.1.2 Répartition temporelle…… 23
II.2.2 Méthodes basées sur l'inverse du carré de la distance…….. 24
II.2.3 Méthodes basées sur les évènements pluvieux hypothétiques…….. 25
II.2.3.1 Pluie hypothétique basée sur la fréquence…….. 25
II.2.3.2 Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur…… 26
II.3 Modélisation de l'Evapotranspiration (ETP)…….. 27
II.4 Modélisation des pertes…….. 27
II.4.1 Concept de base…….. 27
II.4.2 Le modèle de pertes initiales et à taux constant…….. 27

II.4.3 Le modèle du Curve Number (CN)…… 29
II.4.4 La méthode CN en grille…… 30
II.4.5 Le modèle de Green & Ampt…… 30
II.4.6 Le modèle continue SMA (Sol-Moisture Accounting)…… 31
II.4.7 Limites d'application des modèles de ruissellement utilisés avec le HEC-HMS……. 33
II.5 Modélisation du ruissellement direct…… 35
II.5.1 Les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)…… 35
II.5.1.1 Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur…… 36
II.5.1.2 Hydrogramme unitaire paramétrique…… 36
II.5.2 Modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques…… 36
II.5.2.1 Le modèle de SNYDER…… 36
II.5.2.2 Le modèle du SCS (Soil Conservation Service)…… 37
II.5.2.3 Le modèle de CLARK (ModCLARK)…… 37
II.5.3 Modèle de l'onde cinématique…… 37
II.6 Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS…… 39
II.6.1 Modèle de Puls (modified puls)…… 40
II.6.2 Modèle de Muskingum…… 40
II.6.3 Le modèle du décalage (lag model)…… 41
II.6.4 Le modèle de l'onde cinématique…… 41
II.6.5 Le modèle Muskingum-Cunge…… 42

DEUXIEME PARTIE
PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MINA

CHAPITRE III
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BV

III.1 Introduction…… 44
III.2 Situation géographique…… 44
III.3 Situation socio-économique…… 44
III.4 Caractéristiques de formes…… 46
III.4.1 Superficie du bassin versant…… 46
III.4.2 Rectangle équivalent…… 46
III.5 Etude du relief…… 47
III.5.1 Courbe hypsométrique…… 47
III.5.2 Altitudes caractéristiques…… 48
III.5.3 Indices des pentes…… 48
III.5.4 La topographie…… 49
III.5.4.1 Profil en long des Oueds…… 50
III.6 Etude du réseau hydrographique…… 51
III.6.1 Densité de drainage…… 52
III.6.2 Rapport de confluence…… 52
III.6.3 Rapport des longueurs…… 52
III.6.4 coefficient de torrentialité…… 52
III.6.5 Temps de concentration…… 53
III.7 La végétation…… 54
III.8 Lithologie…… 56

CHAPITRE IV
HYDROCLIMATOLOGIE DU BASSIN VERSANT

IV.1 Introduction…… 58
IV.2 climatologie…… 58
IV.2.1 Température…… 59
IV.2.2 Humidité relative…… 59
IV.2.3 Evapotranspiration…… 60
IV.2 Aperçu sur le climat de l'Algérie…… 60

IV.3 Etude des précipitations…….. 61
IV.3.1 Homogénéisation des données pluviométriques…….. 61
IV.3.2 Les précipitations annuelles…… 62
IV.3.3 Précipitation moyenne du bassin versant……. 63
IV.3.4 Répartition saisonnière des précipitations……..…… 64
IV.3.5 Précipitations mensuelles……. 64
IV.3.6 Les précipitations maximales journalières…….. 65
IV.3.6.1 Données utilisées……..…... 65
IV.3.6.2 Analyse statistique des pluies max journalières……... 67
IV.4 Etude des crues……...…. 68
IV.4.1 Introduction…….. 68
IV.4.2 Présentation des stations hydrométriques…… 68
IV.4.3 Apports de Crue……... 71
IV.4.4 Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)……. 73
IV.4.5 Pluie de durée t_c…… 75
IV.4.6 Estimation des débits de crues…….……. 75
IV.4.6.1 Estimations des débits de pointe…… 75
IV.4.6.2 Calcul des hydrogrammes de crues……... 76
IV.5 Calcul des apports solides…… 78
IV.5.1 Introduction…….. 78
IV.5.2 Estimation du transport solide…….. 78
IV.5.2.1 Application des formules empiriques……... 79
IV.5.2.2 Application des données d'observation…… 79

TROISIEME PARTIE
APPLICATION DU MODELE HYDROLOGIQUE
HEC-HMS AU BASSIN VERSANT DE L'OUED MINA

CHAPITRE V
UTILISATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS

V.1 Introduction…….…… 82
V.2 Fonctionnalités……. 82
V.3 Préparation des entrées du modèle HEC-HMS…… 84
V.4 Modélisation du bassin versant…… 84
V.4.1 Les éditeurs d'éléments…….…… 86
V.4.1.1 L'éditeur de sous bassin……. 86
V.4.1.2 L'éditeur de tronçon……... 87
V.4.1.3 L'éditeur de réservoir……. 87
V.4.2 Les caractéristiques du modèle de bassin……. 88
V.5 Modèles météorologiques…… 88
V.5.1 Les modèles de précipitations……... 89
V.5.2 Les modèles d'évapotranspiration……. 89
V.6 Spécifications de Contrôle……... 89
V.6.1 Dates et Temps…….. 90
V.6.2 Les pas de temps……... 90
V.7 Réalisation de Simulations et Visualisation des Résultats……..……... 90
V.7.1 Créer et gérer une exécution…….. 90
V.7.2 Configuration et options de la simulation……. 90
V.7.3 Visualisation des résultats……. 91
V.8 Le calage du modèle……. 91
V.8.1 La barre de menu……... 92
V.8.2 Résultats des essais…….…... 92

CHAPITRE VI
APPLICATION DU MODELE HEC-HMS

VI.1 Introduction …… 93
VI.2 Etapes d'une simulation avec HEC-HMS…….. 93
VI.3 Modélisation du bassin versant……..…..... 94
VI.3.1 Infiltrations……... 95
VI.3.2 Ruissellement……... 96
VI.3.3 Ecoulement en rivière…….. 96
VI.3.4 Les données de bases d'entré……... 96
VI.4 Modélisation de la météorologie……. 98
VI.5 Les données de spécifications de contrôle…….. 99
VI.6 Calage du modèle…… 100
VI.7 Exploitation des résultats…… 101
VI.7.1 Calculs effectués…….. 101
VI.7.2 Débits et volumes obtenus……... 102
VI.8 conclusion et recommandations…….……. 105

Conclusion générale……..... 106
Références bibliographiques……... 107
Annexe I ……. 109
Annexe II …… 115
Annexe III …….. 121

LISTE DES TABLEAUS

Tableau I.1 : Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE
Tableau II.1 : Le taux de pertes constant pour les différents types du sol.
Tableau II.2 : Estimation des différentes classes de la texture du sol.
Tableau II.3 : Les avantages et les inconvénients des modèles de pertes incluent dans le modèle HEC-HMS
Tableau II.4 : Diverses informations à connaître pour chaque élément du bassin
Tableau II.5 : Valeurs minimales et maximales des différents modèles incluent dans le modèle HEC-HMS
Tableau III.1 : Répartition hypsométrique des bassins
Tableau III.2 : Classes de pentes dans le bassin versant de l'oued Mina
Tableau III.3 : Caractéristiques physiographiques des bassins versants de la Mina
Tableau III.4 : Les différentes espèces végétales dans le bassin versant de l'oued Mina
Tableau III.5 : Les différentes formations lithologiques du bassin versant de la Mina
Tableau IV.1 : Températures enregistrées à la station (°C)
Tableau IV.2 : Humidité relative enregistrée à la station de Tiaret
Tableau IV.3 : Stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina
Tableau IV.4 : pluviométrie moyenne et Surfaces d'influences des stations pluviométriques
Tableau IV.5 : Contrôle des échantillons $P_{j.max}$
Tableau IV.6 : Estimation des caractéristiques statistiques des pluies maximale journalières
Tableau IV.7 : Estimation des pluies maximale journalière de fréquence 1, 2, 5 et 10%
Tableau IV.8 : Surfaces et coordonnées Lambert des stations hydrométriques.
Tableau IV.9 : Débits de pinte et moyens annuels pour les différentes périodes de retour
Tableau IV.10 : Estimation des coefficients a et b
Tableau IV.11 : Estimation de l'averse de durée t_c.
Tableau IV.12 : Estimation du débit maximum instantané des crues de chaque fréquence
Tableau IV.13 : Estimations des taux d'abrasion (Tonnes/km²/an) :
Tableau IV.14 : Les relations obtenues à l'échelle journalière
Tableau IV.15 : Apport solide d'une crue de fréquence 1% et 10%.
Tableau VI.1 : Données de base des sous-bassins
Tableau VI.2 : Données de base des écoulements en rivière
Tableau VI.3 : Les données pluviométriques de chaque fréquence
Tableau VI.4: Les valeurs de tous les paramètres optimisés.
Tableau VI.5 : Résultats pour différents pas de temps
Tableau VI.6 : débits de pointes obtenues pour chaque fréquence
Tableau VI.7 : Comparaison des résultats obtenus de chaque site d'étude pour la fréquence de 1%, de la station d'Oued el Abtal

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Le cycle hydrologique
Figure I.2 : Les différentes approches de la modélisation
Figure I.3 : Décomposition d'un modèle pluie dédit
Figure I.4 : Structure du modèle IHACRES
Figure I.5 : La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU
Figure I.6 : La fonction de transfert du modèle CEQUEAU
Figure I.7 : Structure du modèle SHE
Figure I.8 : Structure du modèle TOPMODEL
Figure II.1 : Illustration de la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes
Figure II.2 : Illustration de la méthode de l'inverse du carré de la distance
Figure II.3 : Facteurs de réduction des hauteurs données par les courbes HDF
Figure II.4 : Exemple de la distribution de la Pluie basée sur la fréquence
Figure II.5 : Répartition de la précipitation au cours de l'évènement
Figure II.6 : Schéma conceptuel de l'algorithme du modèle SMA
Figure II.7 : Modélisation d'un modèle de bassin pour le modèle d'onde cinématique
Figure II.8 : Exemple de modèle Lag.
Figure III.1 : Situation du basin versant de l'Oued Mina
Figure III.2 : Courbes hypsométriques des Bassins versants de la Mina
Figure III.3 : Profil en long de L'Oued Mina et ces affluents
Figure III.4 : Le réseau hydrographique basin versant de l'Oued Mina
Figure IV.1 : Température max, min et moy dans le bassin de l'Oued Haddad
Figure IV.2 : Température moyenne et l'évapotranspiration potentielle dans le bassin
Figure IV.3 : Variation des précipitations annuelles dans le BV de la Mina
Figure IV.4 : Variation des précipitations annuelles dans le BV de la Mina
Figure IV.5 : Précipitations moyennes annuelles de chaque station pluviométrique
Figure IV.6 : Réparation saisonnière des précipitations sur le BV de la Mina
Figure IV.7 : Paramètres statistiques des précipitations mensuelles
Figure IV.8 : Les histogrammes de variation des pluies maximales journalières des deux stations, Oued el Abtal et Sidi Abdelkader Djilali
Figure IV.9 : L'histogramme de variation des pluies maximales journalières de l'ensemble des stations, Oued el Abtal + Sidi Abdelkader Djilali
Figure IV.10 : Les stations hydrométriques dans le bassin versant.
Figure IV.11 : variabilité temporelle des débits maxima annuels
Figure IV.12 : variabilité temporelle des débits moyens annuels
Figure IV.13 : variabilité temporelle des apports annuels
Figure IV.14: variabilité temporelle de la lame écoulée.
Figure IV.15 : Variation des débits annuels dans le BV
Figure IV.16 : Variation des débits annuels dans le BV
Figure IV.17 : Hydrogrammes observés au niveau des stations étudiées en 1990.
Figure IV.18 : Hydrogrammes observés au niveau des stations étudiées en 1997.
Figure IV.19 : Hydrogrammes observés au niveau des stations étudiées en 2005.
Figure IV.20 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence
Figure IV.21 : les hydrogrammes de fréquence 1%
Figure IV.22 : les hydrogrammes de fréquence 2%
Figure IV.23 : les hydrogrammes de fréquence 5%
Figure IV.24 : les hydrogrammes de fréquence 10%

Figure IV.25 : Relation débit solide débit liquide pour les deux stations de la Mina
Figure V.1 : vue de l'écran HEC HMS
Figure V.2 : fenêtre du bassin.
Figure V.3 : les différentes méthodes de production et de transfert
Figure V.4 : inclure les données dans les éditeurs des basins versants
Figure V.5 : les méthodes des écoulements fluviaux
Figure V.6 : les données de réservoir
Figure V.7 : Les modèles météorologiques (Précipitation et Evapotranspiration)
Figure V.8 : fenêtre de spécifications de contrôle
Figure V.9 : fenêtre d'exécution de simulation
Figure VI.1 : les bassins versants de la Mina
Figure VI.2 : Représentation du bassin versant de la Mina dans le modèle HEC-HMS.
Figure VI.3 : Fenêtre des données de l'élément (sous bassin)
Figure VI.4 : Fenêtre de saisie des données pour chaque bief
Figure VI.5 : Fenêtre des données météorologiques de fréquence de 1%
Figure VI.6 : Fenêtre de spécifications du contrôle
Figure VI.7 : Fenêtre des paramètres avant et après le calage
Figure VI.7 : Fenêtre de moteur de calcul
Figure VI.8 : Fenêtre de moteur de calcul
Figure VI.9 : Débits et volumes apportés par les sous bassins de fréquence 1%
Figure VI.10 : Fenêtre du tableau de résultats et de l'hydrogramme de crue (sous bassin)
Figure VI.11 : Hydrogrammes total obtenus au bge de SMBA.
Figure VI.12 : Débit observés et simulés à Oued el Abtal de chaque fréquence d'étude
Figure VI.13 : Débit observés et simulés à Sidi AEK Djilali de chaque fréquence d'étude

RESUME

Les bassins versants semi-arides Algériens ayant des pluies généralement irrégulières et par fois torrentiels, sont caractérisées par l'absence de réseaux de mesures hydrologiques et notamment hydrométriques. Par conséquent, plusieurs modèles transforment les pluies en débits ont été développés pour simuler les hydrogrammes de crues. Dans ce contexte cette études a été élaborée moyennent le modèle hydrologique HEC-HMS (Système de modélisation hydrologique) qui s'intéresse a la transformation pluies-débits dans les bassins versants ruraux et urbains, et ce moyennent plusieurs option de calcules de l'hydrogramme unitaire. Des modélisations du ruissèlement effectués sur la base des données pluviométriques correspondantes au bassin versant de la Mina, dont la superficie est de 6131km^2 ont été réalisées sous le modèle HEC-HMS et les comparées avec les hydrogrammes observées au niveau des stations hydrométriques d'Oued El Abtal et Sidi AEK Djilali et avec celles obtenues par les formules empiriques.

Mots clés : modélisation hydrologique, pluie-débit, bassin versant, Mina, débit de pointe, modèle HEC-HMS.

SUMMARY

The basins Algerian semi-arid slopes having generally irregular rains and by time torrential, are characterized by the absence of networks of hydrological and in particular hydrometric measurements. Consequently, several models transform the rains into flows were developed to simulate the hydrograms risings. In this context this studies was elaborate realize hydrological model HEC-HMS (hydrological System of modeling) which is interested has the transformation rain-flows in the basins slopes rural and urban, and this realize several option of calculate unit hydrogram. Modeling of flood carried out on the basis of the rainfall records corresponding to the catchment area of Mina, whose surface is of 6131km^2 were carried out under model HEC-HMS and compared with the hydrograms observed with the level of the hydrometric stations of Wadi El Abtal and Sidi AEK Djilali and with those obtained by the empirical formulas.

Key words: hydrological modeling, rain-flow, watershed, Mina, peak output, model HEC-HMS.

INTRODUCTION GENERALE

L'hydrologie peut être définie comme étant la science qui étudie le cycle de l'eau dans la nature ainsi que sont évolution à la surface de la terre et dans le sol. Elle est liée à des sciences telles que : l'hydraulique, la statistique mathématique, la mécanique de sols, la géographie physique, etc.… L'étude hydrologique est indispensable pour les projets d'irrigations, de distribution d'eau, de drainage et de protection contre les crues et autres, car elles offrent une évaluation des débits moyens et extrêmes (Crues et étiage) pour le dimensionnement, la sécurité et la bonne exploitation des ouvrages hydrauliques.

Les apports sont directement liés aux aléas climatiques et au régime hydrologique du bassin versant tandis que la demande est liée aux stratégies de planification et de gestion urbaine, agricole et industrielle.

Evaluer les ressources en eau superficielle d'un bassin versant, aussi bien dans son aspect quantitatif que qualitatif, exige qu'une certaine méthodologie soit appliquée. Cette méthodologie doit déterminer la disponibilité spatiale et temporelle de la ressource en eau, et tenir compte des caractéristiques aléatoires des paramètres hydrologiques. C'est ainsi, qu'en plus de la méthodologie classique de régionalisation, la modélisation hydrologique joue un rôle important dans l'évaluation des ressources en eau.

L'expression (modélisation hydrologique) désigne habituellement l'utilisation d'expressions mathématiques et logiques définissant les relations existantes entre les caractéristiques de l'écoulement (sorties) et ses facteurs endogènes et exogènes conditionnels (entrées).

La conception et le dimensionnement des ouvrages hydrauliques nécessitent l'acquisition en temps réel de l'information pluviométrique et limnimétrique permettant le suivi instantané de l'évolution de la crue et par voie de conséquence, l'estimation de diverses variables hydrologiques correspondantes (le niveau de la crue, le débit maximal, la forme et le volume de l'hydrogramme, …). La simulation des hydrogrammes de crue peut être effectuée moyennant la modélisation mathématique qui a vu son ampleur en temps qu'instrument de synthèse, de prévision et de design. De ce fait plusieurs modèles conceptuels transformant les pluies en débits ont été développés pour simuler le comportement du système (bassin versant) pour un signal particulier (averse).

Les réponses résultant de ces modèles (hydrogrammes de débits) reposent essentiellement sur les caractéristiques physiques du bassin versant et de type d'information disponibles. Dans ce cadre, le bute de cette étude est la modélisation quantitative de l'écoulement pour le bassin versant de l'Oued Mina de l'Ouest Algérien. Ceci est par l'application d'un modèle hydrologique de gestion des eaux pluviales intitulé HEC-HMS.

Le modèle "HEC-HMS" (Système de modélisation hydrologique), est un outil de simulation Pluie-Débit. Il a été développé par le Corps d'Ingénieurs de l'Armée américaine (USA). Ce programme est utilisé dans la formation des ingénieurs pour la détermination des caractéristiques de l'écoulement dans les bassins urbains et ruraux.

Notre travail est basée sur l'évaluation des débits des crues estimés par le modèle HEC-HMS et compare ses résultats avec les hydrogrammes observes au niveau des stations d'étude et avec les formules classiques utilisées en Algérie dans le but d'évaluer le modèle aux conditions algériennes et de contrôler la validité des formules empiriques largement utilisées. Cette étude d'application est réalisée pour plusieurs sous-bassins versant du bassin versant de l'Oued Mina dans la région de Nord Ouest de l'Algérie.

Cette étude est conçue en trois principales parties de la sorte :

- La première partie sera consacrée à l'étude de la modélisation hydrologique pluie-débit, elle s'intéressera à la présentation des différents modèles utilisés et la théorie du modèle hydrologique HEC-HMS.

- La deuxième partie comportera sur la présentation du bassin versant de l'oued Mina tel que les caractéristiques physiques et hydroclimatalogiques.

- La troisième et dernière partie sera donc réservée à l'application du modèle hydrologique HEC-HMS au bassin versant de l'oued Mina où on décrire l'utilisation du modèle ainsi que son application au bassin versant.

CHAPITRE I
LES DIFFERENTS MODELES

I.1 Introduction

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

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

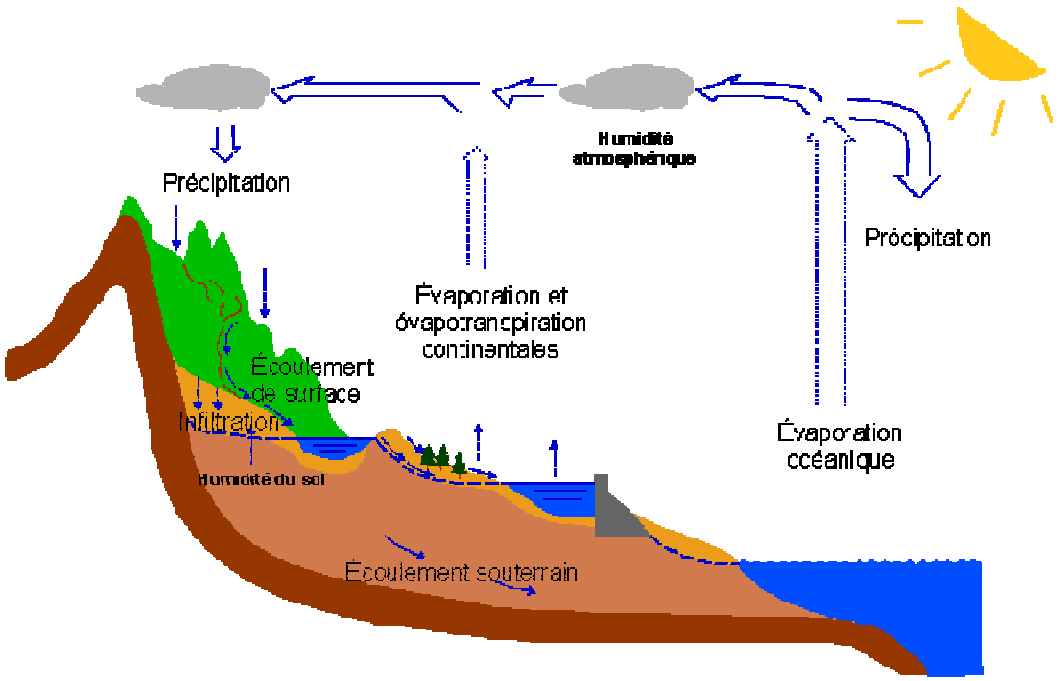
Dans ce chapitre nous présentons les modèles les plus utilisés dans le domaine de la modélisation hydrologique ainsi que les logiciels les plus utilisés dans le domaine public. Mais avant d'entamer cette revue, il est utile de donner un bref rappel sur le cycle hydrologique qui est la base de toute modélisation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

I.2 Cycle hydrologique

Les composantes de base du cycle hydrologique (figure I.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 [Henine05].

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 [Henine05] :

- 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.



Avec : ***P*** : Précipitation ; ***R*** : Ruissèlement de surface ; ***F*** : Infiltration ;
G : Ecoulement souterrain ; ***E*** : Evaporation ; ***T*** : Transpiration ;

Figure I.1 : *Le cycle hydrologique.*

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 [Henine05]. L'équation de continuité hydrologique pour n'importe quel système s'écrit sous la forme suivante :

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \tag{I-1}$$

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) :

$$P - R - G - E - T = \Delta S \tag{I-2}$$

Avec :

ΔS : Variation du stockage.

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

I.3 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 [Gaume00].

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, autre permettant d'établir un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques.

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle de l'eau dans les milieux naturels (bassins versants, rivières, nappes, etc.), associés aux développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie [Gaume00] :

- **La modélisation comme outil de recherche** : La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.

- **La modélisation comme outil de prévision** : elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

- **La modélisation comme outil d'extrapolation** : reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un Plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié. L'utilisation de longues séries de pluies - éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie - couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

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

I.4 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.

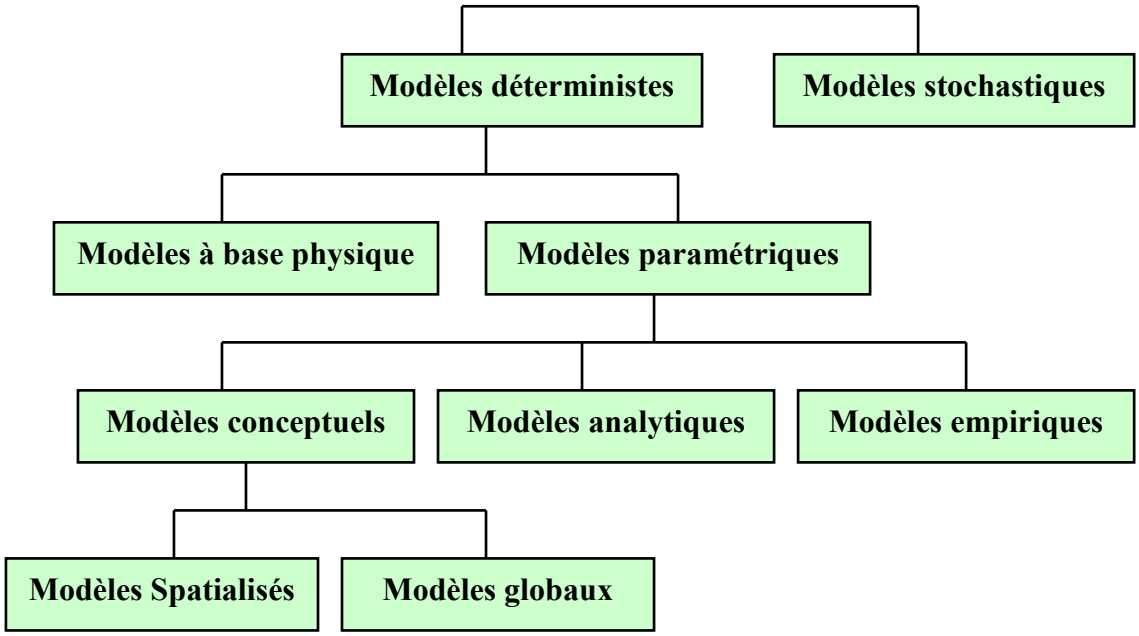


Figure I.2 : *Les différentes approches de la modélisation.*

I.4.1 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 [Vauclin91].

I.4.2 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) [Henine05].

I.4.3 Modèles à base physique

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. Certains modèles comme le SHE tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles. La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatives de sous parties du bassin versant doivent être évaluées par calage et deviennent, de fait, des paramètres et non des données [Henine05].

I.4.4 Modèles paramétriques

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par le calage. Cette notion est directement liée à la notion de modèles conceptuels. Il n'est souvent pas possible de représenter les processus physiques d'un modèle, on utilise alors des paramètres n'ayant plus de sens physique et ne pouvant être reliés à des variables mesurables.

I.4.5 Modèles empiriques

Le type de fonctions reliant les variables est fixé à priori (fonctions polynomiales, fonctions sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées [Gaume00].

I.4.6 Modèles analytiques

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établis par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables [Gaume00].

I.4.7 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 (débit, concentration,…) 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 [Morin] est un parfait exemple de modèle conceptuel que nous présenterons dans la section suivante.

I.4.8 Modèles globaux

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car ils présentent une structure très simplifiée, ils ne demandent 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 [Gaume00].

I.4.9 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.

i. 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.

ii. 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.

iii. Modèles semi-spatialisés

Il existe plusieurs modèles semi-distribués (ou semi-spatialisés), l'ensemble des modèles sélectionnés peut être utilisé avec succès dans le cadre du projet, l'avantage que présentent les modèles semi-distribués est qu'ils disposent d'une structure à base physique et ils demandent moins de données que les modèles distribués. Le modèle HEC-HMS est un exemple de ce type de modèles connu par ses performances de calcul et par la qualité de ses résultats ; il est disponible gratuitement dans le domaine public.

I.5 La relation pluie-débit

Aujourd'hui, la nécessité de quantifier les phénomènes de types extrêmes comme les crues exceptionnelles est un des domaines les plus connus du grand public, mais la connaissance des débits moins exceptionnels reste fondamentale dans le cadre de la gestion de la ressource en eau, en relation directe avec la demande en eau des populations.

Chaque point d'un cours d'eau permet de définir un bassin versant et les débits observés en ce point sont directement liés aux précipitations tombées sur ce bassin. A partir des observations faites en quantifiant la pluie tombée, on peut arriver à reproduire la réponse en débit du bassin. La simulation hydrologique du bassin versant, décrite comme la transformation de la pluie en débit passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique.

Le passage de la pluie au débit reste un problème complexe mais demande pour une utilisation simple un nombre de paramètres limité. La modélisation conceptuelle permet de limiter le nombre de paramètres entrant en jeu dans le modèle mais renonce à une connaissance minutieuse des différents phénomènes, l'objectif principal étant de reproduire au mieux le comportement global d'un bassin donné face à une série chronologique de données pluviométriques.

Les facteurs déterminants entrant dans les mécanismes hydrologiques présentent une variabilité tant d'un point de vue temporel que spatial extrêmement importante. Cela induit par conséquent une représentation mathématique de ces phénomènes extrêmement complexes.

La modélisation globale des processus avec des paramètres intégrant les hétérogénéités locales comme la donnée "sol" permet aujourd'hui de proposer des outils simples et opérationnels pour la prévision de la ressource en eau à l'échelle du bassin [Morin].

Cette démarche de recherche d'optimisation des outils de modélisation s'insère dans un cadre beaucoup plus général de l'hydrologie où l'objectif est de pouvoir obtenir des méthodes transposables d'un bassin versant à un autre. Pour cela, il semble nécessaire de relier les paramètres du modèle aux grandeurs caractéristiques du milieu physique.

Aussi, pour tenir compte de l'hétérogénéité d'un bassin, une démarche assez souvent suivie est la discrétisation du milieu étudié, grâce à un modèle distribué, avec une taille de maille telle que les paramètres physiques soient supposés homogènes. En outre, la variabilité entre les mailles doit reproduire une distribution observée ou présumée des grandeurs physiques et de leurs dépendances par rapport à des grandeurs macroscopiques établies sur quelques points de mesures.

La problématique est l'apport d'une modélisation spatialisée en mode semi-distribué par rapport à une simple modélisation globale en prenant mieux en compte la donnée "sol" dans les algorithmes de la relation pluie-débit, par une désagrégation de l'information à des échelles plus réduites.

I.5.1 Définition d'un modèle

Un modèle permet donc d'approcher de façon figurative des systèmes hydrologiques complexes. Le plus souvent basé sur la représentation mathématique ou physique des processus, il intègre les différentes phases du cycle de l'eau, en tentant de s'approcher au maximum de ce qui se passe dans la réalité. Le modèle hydrologique parfait, pouvant s'appliquer à toutes les échelles de temps et d'espace, n'existe pas, mais les efforts accomplis dans l'amélioration et le perfectionnement des outils de modélisation permettent aujourd'hui, de mieux cerner les différentes phases du cycle hydrologique et ainsi de mieux les modéliser.

I.5.2 Choix d'un modèle hydrologique

Depuis quelques années, différents chercheurs ont donc tenté d'adapter les modèles hydrologiques à la simulation du fonctionnement des bassins versants mixtes, c'est-à-dire comprenant des entités hydrologiques urbaine, rurale et éventuellement périurbaine car c'est une entité compliquée à modéliser. La possibilité de différencier le fonctionnement des entités hydrologiques ne signifie pas qu'il s'agit de modèles distribués en l'état mais les rend candidats à un usage de ce type. Cette analyse doit conduire au choix du modèle qui sera utilisé dans ce travail.

Le développement des études par bassins représentatifs correspondait souvent à des demandes de dimensionnement d'ouvrage. A partir d'observations obtenues sur des durées courtes, ce type d'étude nécessite une extrapolation pour prédéterminer une crue de projet. Dès les premières études vers 1950, les extrapolations ont été faites en employant la théorie de l'hydrogramme unitaire développée par Sherman (1932);

Nous pouvons présenter une hypothèse qui est à la base de toutes les applications de la modélisation hydrologique au Sahel, c'est la séparation des modèles pluie-débit en deux sous-modèles selon le schéma de la (figure I.3). Le premier sous-modèle, ou fonction de production, transforme les pluies brutes PB en pluies nettes PN après soustraction des pertes W. Ces pluies nettes PN engendrent les débits écoulés à l'exutoire au moyen de la fonction de transfert.

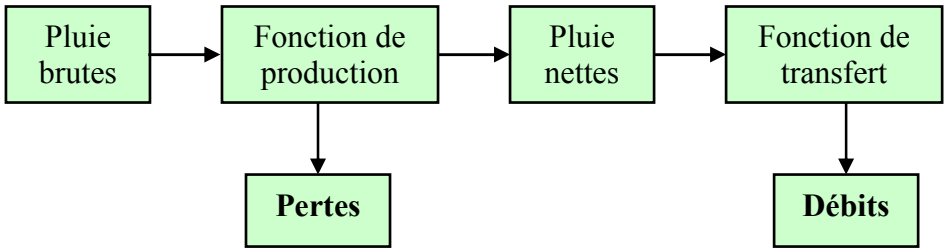


Figure I.3 : *Décomposition d'un modèle pluie dédit.*

I.5.2.1 Fonction de production

La fonction de production transforme la pluie brute observée ***PB*** en pluie nette ***PN***, en enlevant les pertes (voir figure I.3). La pluie nette est la partie de la pluie brute qui arrive par ruissellement de surface à l'exutoire. Par déduction, les pertes ***W*** correspondent à l'infiltration dans les couches superficielles du sol bien sûr mais aussi à l'interception par la végétation, au stockage dans les flaques, à la percolation vers les nappes profondes, â la reprise par évaporation . . .

On voit donc que le concept de fonction de production est une représentation très grossière de la réalité. Mais il s'agit d'une simplification qui permet de mieux appréhender les processus hydrologiques, et donc de mieux les modéliser. Sur une parcelle, toute l'eau qui s'infiltre est considérée comme perdue pour le ruissellement et toute l'eau qui ruisselle est supposée contribuer à la formation des crues [Morin].

Toujours sur une parcelle, il est possible de mesurer les différents termes qui composent les pertes **W**. Sur un bassin versant, il est possible de mesurer en différents points les termes du bilan hydrique, mais l'intégration dans l'espace de ces mesures et de leur variabilité s'avère très difficile car la plupart des phénomènes ne sont pas continus. De plus certains processus physiques apparaissent sur un bassin versant alors qu'ils n'existaient pas à l'échelle de la parcelle.

I.5.2.2 Fonction de transfert

Une fonction de production qui prend en compte toute la non-linéarité du processus pluie-débit et une fonction de transfert qui calcule les débits en considérant le système comme linéaire et invariant (figure I.3). Avec ces définitions, l'identification du modèle de transfert se réduit à la résolution de l'intégrale suivante :

$$Q(t) = \int_0^{\infty} h(r) PN(t-r)\, dr \qquad \text{(I-3)}$$

Cette intégrale est appelée intégrale de convolution ou interface du Duhamel, *h(r)* est la "réponse impulsionnelle" du système ou encore noyau de convolution. En hydrologie, *h(r)* est l'hydrogramme unitaire instantané ; si les débits *Q(t)* et les pluies nettes *PN(t)* sont exprimés dans la même unité, les ordonnées de ce hydrogramme unitaire ont pour dimension l'inverse d'un temps. Il s'agit d'une représentation "boite noire" du système, et la réponse impulsionnelle est la sortie de la boite noire lorsque l'entrée du système est une impulsion de Dirac (fonction d'intégrale unité se produisant sur un intervalle de temps très bref).

I.6 Présentation de quelques modèles

Dans cette section on présente une petite description des différents modèles disponibles dans le domaine public à analyser. L'objectif de cette analyse est de ressortir vers la fin avec un modèle hydrologique qui satisfait l'ensemble des critères de sélection défini par les partenaires du projet. L'ensemble des ses modèles ne satisfait pas tous les critères imposés, mais ils sont attractifs, car ils peuvent résoudre, même partiellement, les différentes tâches du projet.

I.6.1 Critères de sélection

Les critères de sélection d'un modèle hydrologique dépendent : Du type de l'approche qu'il utilise, de la qualité des résultats qu'il fournit, de son utilisation, comme par exemple les performances des interfaces graphiques utilisées (sa convivialité), de la portabilité du logiciel, la gestion et la structure des entrées/sorties, ainsi que de la facilité d'intégration et d'interconnexion avec d'autre outils de traitements et d'exploitation des résultats (pré et post-traitement).

Les principaux critères doivent répondre aux exigences suivantes

- Le type d'approche utilisée : Le modèle choisi doit tenir compte des conditions climatologiques et topographiques des bassins méditerranéens ;
- L'importance des sorties du modèle : Il doit prédire les variables requises par les modèles hydrodynamiques retenus dans le projet WADI (FESWMS et Saint-Venant 2.5D) tels que les hydrogrammes de crues de longues et de courtes durées au niveau du bassin versant ;
- Les différents processus hydrologiques modélisés doivent estimer adéquatement les différentes variables (est ce que le modèle est capable de modéliser les précipitations en fonction du temps, les précipitations accumulées, événements instantanés ou continus, … ?) ;
- Disponibilité des entrées du modèle (est ce que toutes les entrées requises par le modèle peuvent être fournies raisonnablement sans surcoût important en temps) ;
- La disponibilité du modèle dans le domaine public. Si non, on doit rajouter le critère du prix du modèle. Les prix des modèles hydrologiques varient très considérablement.

I.6.2 Modèle global (IHACRES)

Le modèle IHACRES (Identification of unit Hydrographs and Component flow from Rainfalls, Evaporation and streamflow data) est le résultat d'une collaboration entre le CEH (Centre for Ecology and Hydrology) du Royaume-Uni et l'Université Nationale de l'Australie (ANU). Ce logiciel peut être appliqué pour des investigations dans des petits bassins versants équipés pour des études spéciales ou pour des études régionales dans des grands bassins.

Le modèle IHACRES utilise la fonction de transfert à partir de trois modules de calcul, en séries, comme indiquer sur la figure II.3, il permet la simulation des écoulements continus ou instantanés pour n'importe quel bassin versant et n'importe quelle donnée temporelle supérieure ou égale à 1 min.

Des études publiées [Maftai02], [Henine05] ont démontré qu'on peut aller d'un intervalle de 6 min pour des bassins versants de 1 ha ($0.01km^2$) aux données mensuelles pour des bassins versants de 10 000 km^2.

Dans son mode de séparation des hydrogrammes, le logiciel IHACRES comporte trois modèles de stockages conceptuels : Le modèle non-linéaire qui détermine les précipitations effectives et deux modèles de stockage en parallèle (stockage de surface et souterrain) qui assure le transfert des précipitations effectives au cours d'eau (voir la figure ci-dessous).

Ce modèle demande peu de données : les précipitations, un hyétogramme (pour le calage), la température ou l'ETP, et les dimensions du bassin versant. En sortie du modèle on récupère : un hydrogramme de crue modélisé, l'humidité du bassin et les incertitudes indicatives associées aux paramètres d'hydrogramme unitaire.

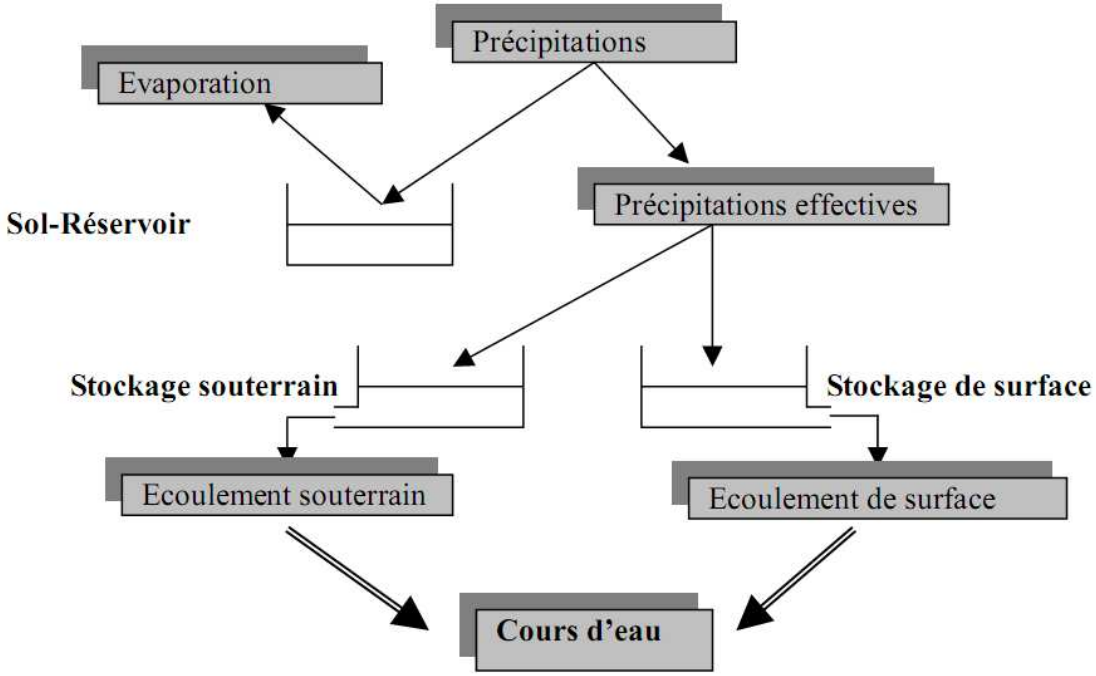


Figure I.4 : *Structure du modèle IHACRES.*

I.6.3 Modèles semi-spécialisés (HEC, CEQUEAU & MIKE BASSIN)

Il existe plusieurs modèles semi-distribués (ou semi-spatialisés), l'ensemble des modèles sélectionnés peut être utilisé avec succès dans le cadre du projet, l'avantage que présentent les modèles semi-distribués est qu'ils disposent d'une structure à base physique et ils demandent moins de données que les modèles distribués. Le modèle HEC-HMS est un exemple de ce type de modèles connu par ses performances de calcul et par la qualité de ses résultats ; il est disponible gratuitement dans le domaine public.

I.6.3.1 Le Modèle HEC-HMS

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

I.6.3.2 Le modèle CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU, développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau (INRS-Eau) depuis 1971, est un modèle déterministe distribué à bilan, qui prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant par le découpage de celui–ci en éléments de même dimension. Cette discrétisation spatiale du bassin versant permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes, de prévoir l'effet de toute modification physique du bassin versant et de prendre en compte des réservoirs réels ou fictifs.

Le découpage dans l'espace d'un bassin versant peut être très varié dans sa forme et sa densité. Pour le modèle CEQUEAU, le bassin versant est découpé en surfaces carrées de dimensions semblables appelées « carreaux entiers » c'est le premier découpage. Un deuxième est ensuite nécessaire pour reproduire le cheminement de l'eau entre les carreaux entiers et vers la rivière. Ceci ce fait en subdivisant chaque carreau entier en « carreaux partiels » à l'aide des lignes de partage des eaux [Henine05] :

- Le premier découpage délimite le bassin versant en surfaces élémentaires que nous appellerons "carreaux entiers". La dimension à donner aux "carreaux entiers" dépend principalement de la superficie du bassin versant étudié, des données météorologiques disponibles, de la topographie du terrain, etc. Les données physiographiques nécessaires pour chaque "carreau entier" sont l'altitude, les pourcentages de forêts, de lacs et de marais. Ces données sont déterminées à partir des cartes topographiques du bassin versant étudié ou à l'aide d'un système d'information géographique.

- Le deuxième découpage consiste à subdiviser les carreaux entiers en carreaux partiels. Ces éléments sont le résultat de la subdivision des "carreaux entiers" en fonction des lignes de partage des eaux. On compte jusqu'à quatre "carreaux partiels" par "carreau entier". Les données nécessaires pour ces éléments partiels sont : Le sens d'écoulement de l'eau et son pourcentage de superficie par rapport au "carreau entier" qu'il subdivise.

Le modèle compte deux parties principales visant à décrire le mieux possible l'écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant. La première partie concerne l'écoulement vertical de l'eau appelée fonction de production qui transforme les précipitations réelles en précipitations utiles sur chaque carreau entier et à chaque pas du temps.

La schématisation de ce processus est représentée par un ensemble de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle du pas de temps de la simulation, les différents transferts de masse. Et la deuxième partie concerne le transfert de l'écoulement dans le réseau de drainage appelé fonction de transfert qui assure le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels.

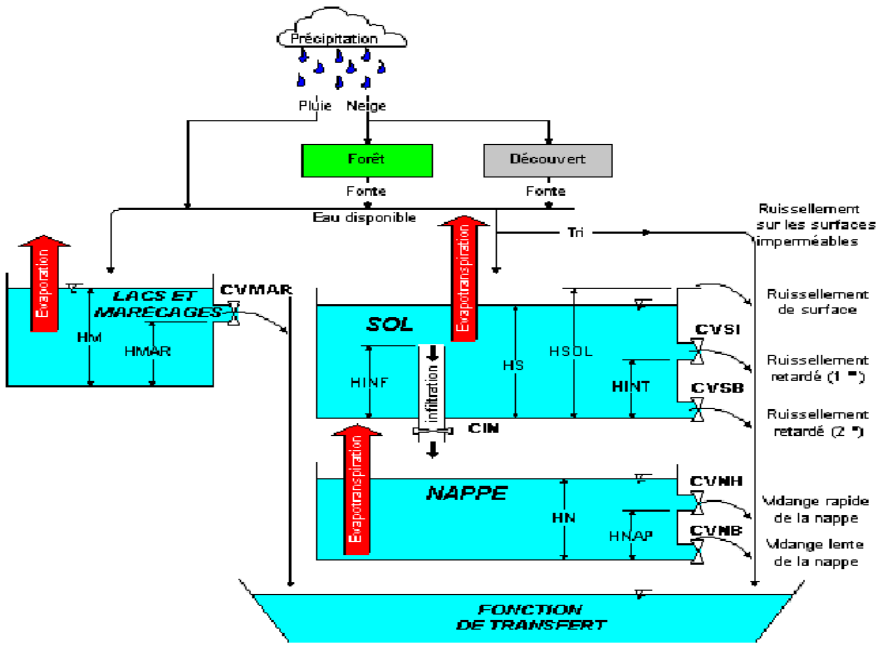


Figure I.5 : *La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU.*

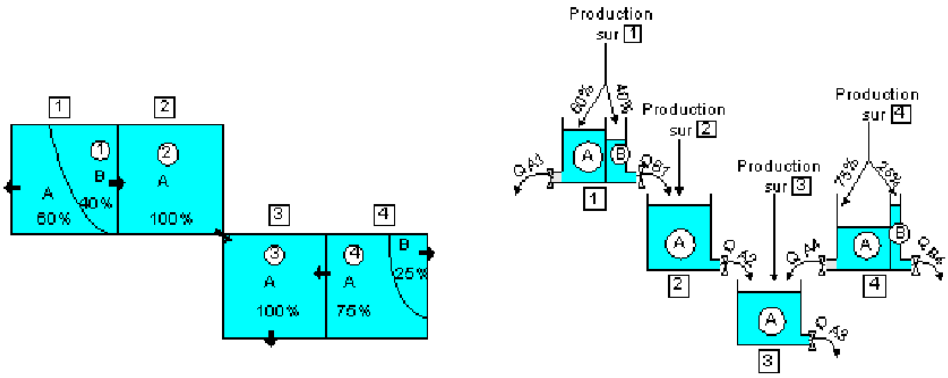


Figure I.6 : *La fonction de transfert du modèle CEQUEAU.*

Le modèle CEQUEAU dispose d'une interface graphique conviviale. Les informations nécessaires à la simulation (données physiographiques et hydrométéorologiques ainsi que tous les paramètres reliés à la simulation) y sont structurées sous la forme de projets pouvant être sauvegardés sur le disque. Chaque projet réfère à un ou plusieurs bassins versants et peu comprendre plusieurs essais de simulation. Ce concept permet une gestion aisée des données d'entrée du modèle ainsi que des résultats de simulation que l'usager désire conserver.
Les dernières modifications apportées pour la version 4.0 ont permis de faciliter et d'améliorer grandement l'utilisation de ce logiciel, cette version permet de :

- Choisir la langue d'affichage ;
- De simuler pour des pas du temps de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12 heures ou journaliers ;
- Prévoir des débits en temps réel avec mise à jours ;
- Traiter plusieurs bassins versants simultanément ;
- Offrir un nombre accru de types de graphiques permettant une analyse et une visualisation plus éclaircies des résultats et par conséquent une meilleure prise de décisions ;

- Introduire la variation spatiale des principaux paramètres de la fonction de production.

a- Les données météorologiques

En plus des données physiographiques des carreaux entiers, le modèle requiert sur chacun de ces carreaux, à chaque pas de temps, les données suivantes : les précipitations liquide et/ou solide ainsi que les températures maximales et minimales de l'air.

Ces données n'étant disponibles qu'à un nombre limité de stations, le modèle permet l'utilisation de différentes méthodes d'interpolation de données et combler ainsi les lacunes. Les méthodes d'interpolation utilisées avec le logiciel CEQUEAU sont : la régression, la pondération et la méthode des polygones de Thiessen.

En général, les données dont nous aurons besoin sont :

Pour la simulation :

- Les températures maximales et minimales de l'air ;
- Les précipitations liquides ou solides ;
- Débits observés pour les besoins de calibrage du modèle.

Pour la prévision à court terme :

- Les prévisions de la température de l'air aux stations météorologiques ou en des points de grille ou moyennes sur le bassin versant ;
- Les prévisions des précipitations aux stations météorologiques ou en des points de grille ou moyennes sur le bassin versant.

Pour la prévision à moyen terme :

- Données météorologiques (température de l'air et précipitation) historiques moyennes du bassin versant.

I.6.3.3 Le modèle MIKE BASSIN

Le modèle MIKE BASSIN a été élaboré au Danich Hydraulic Institute. C'est un instrument de gestion des ressources en eau fondé sur une forte représentation par bassin versant des points d'eau et des utilisateurs d'eau potentiels [Henine05].

Ce logiciel permet d'optimiser la gestion de l'utilisation des ressources en eau disponibles en relation avec les contraintes environnementales liées au sol, à la terre, à l'agriculture, à l'ingénierie et à la société. MIKE BASSIN permet d'effectuer une modélisation simple et intuitive des processus hydrologiques et hydrauliques à l'échelle du bassin versant. La modélisation hydrologique est basée sur une transformation pluie-débit. La modélisation hydraulique prend en compte le réseau fluvial (rivière, barrage, réservoirs) ainsi que la ressource souterraine (nappes). L'outil permet de décrire les demandes multisectorielles (domestique, industrielle, agriculture, production d'électricité, navigation, environnementale…) ainsi que les règles de priorité entre chacune de ces différentes utilisations.

a - L'interface sous Système d'Information Géographique

MIKE BASSIN fonctionne sur la base d'un réseau fluvial digitalisé généré directement sur l'écran dans le logiciel Arcview. Toutes les informations relatives à la configuration du réseau fluvial, des barrages, de la position des utilisateurs d'eau, des prises d'eau ainsi que les prises de retour sont également données à l'écran.

b - Les données de base

Les données de base du modèle consistent en des séries chronologiques du ruissellement en chaque branche (rivière) générée par le sous-bassin drainant. Les autres données relatives aux caractéristiques de barrage et aux règles de fonctionnement de chaque réservoir, aux séries chronologiques des données météorologiques et aux données pertinentes à chaque schéma d'approvisionnement en eau ou de périmètre d'irrigation telles que les exigences de dérivation et autres informations sur les débits de retour sont fournies par des fichiers complémentaires.

Sachant que le modèle MIKE BASIN est une extension de Arcview, les informations géographiques du bassin peuvent être inclues dans la simulation des ressources en eau, la structure du modèle du bassin est éditée par Arcview.

I.6.4 Modèle physique spatialisé (MIKE SHE)

Ce modèle d'inspiration mécaniste, a été élaboré au Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE SHE (Système Hydrologique Européen) a pour objectif la modélisation de la partie continentale du cycle de l'eau et peut être en théorie, appliqué à des surfaces allant de la parcelle à la totalité du bassin versant. Parmi les domaines d'application de MIKE SHE, nous retrouvons l'étude classique de la dynamique du bassin versant, ainsi que le suivi des impacts relatifs aux modifications du bassin (occupation des sols, aménagement, types des sols…), ou de scénarios climatiques (sécheresse, fortes pluies…).

Le caractère mécaniste de ce modèle provient de l'utilisation de différents modèles mathématiques pour décrire chacune des composantes du cycle hydrologique et du cycle des polluants [Henine05].

De ce fait, la discrétisation du bassin versant s'effectue classiquement par un découpage en strates horizontales et en colonnes homogènes tridimensionnelles. La structure de ce modèle est présentée sur la figure I.7.

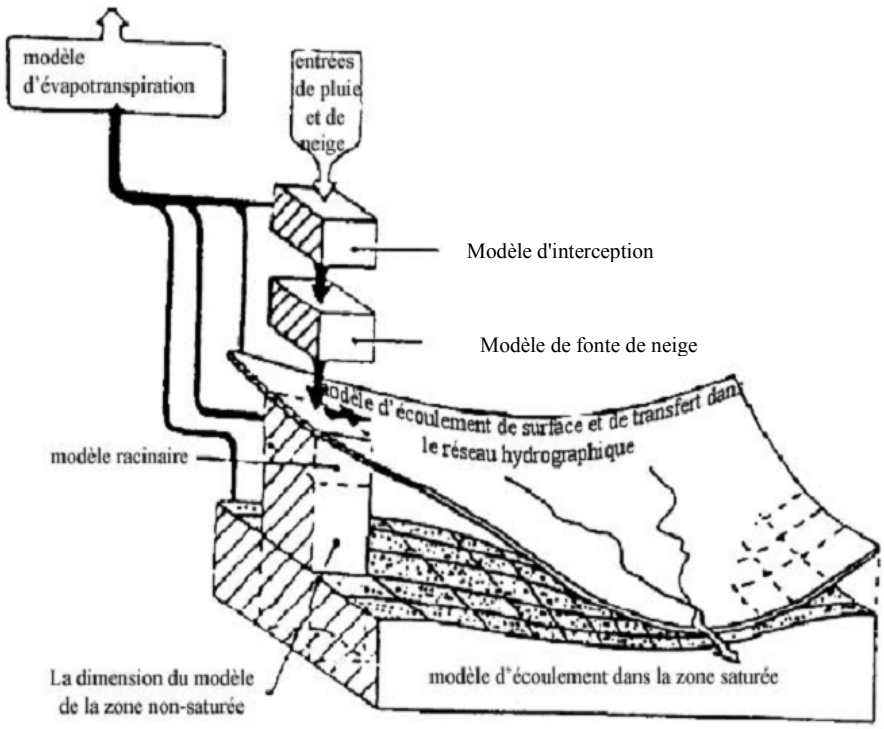


Figure I.7 : *Structure du modèle SHE.*

Le tableau I.1 ci-après montre globalement les modèles utilisés dans le cadre de l'hydrodynamique de MIKE SHE.

Tableau I.1 : *Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE.*

Interception et Evapotranspiration	Kriston et Jensen (1975)
Ecoulement en zone non saturée	Richart (1931)
Ecoulement en zone saturée	Boussineq (1904)
Ruissellement	Ondes diffusive
Ecoulement dans le réseau hydrographique	Saint Venant (1871)

Le transfert des polluants, les cinétiques, les processus d'adsorption/désorption ou encore les prélèvements racinaires sont modélisés de manière classique (cinétique du premier ordre, isotherme d'adsorption…).

Du fait du caractère fortement mathématique de ce modèle, la connaissance préalable de nombreuses données s'avère indispensable. Nous notons entre autre la pluviométrie, les températures, l'occupation des sols, le type de culture, la texture des sols, les usages des sols, la topographie. Toutefois, MIKE SHE dispose de nombreuses bases de données intégrées, ce qui lui confère un certain intérêt car la mise en place de campagne d'acquisition n'est pas indispensable que si l'utilisateur souhaite enrichir le plus possible la modélisation. Dans un premier temps, l'utilisation des banques de données peut se révéler suffisante.

I.6.5 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé (TOPMODEL)

TOPMODEL est un modèle semi-distribué destiné à reproduire le comportement hydromorphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore utilisé et amélioré car sa relative simplicité et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement. Ce modèle prédit, à chaque pas du temps, la distribution spatiale du contenu en eau au sein des différentes mailles du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant considéré. Il est basé sur les concepts originaux de déficit en eau du sol par rapport à la saturation et à l'index topographique. Cette idée provient du fait que, depuis quelques années, la participation des écoulements souterrains aux variations des débits des rivières, même en période de fortes précipitations ont été reconnue comme étant capitale [Henine05]. L'index topographique est utilisé pour déterminer, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau destinée au ruissellement et celle restant pour l'infiltration. La structure de ce modèle est illustrée sur la figure I.8.

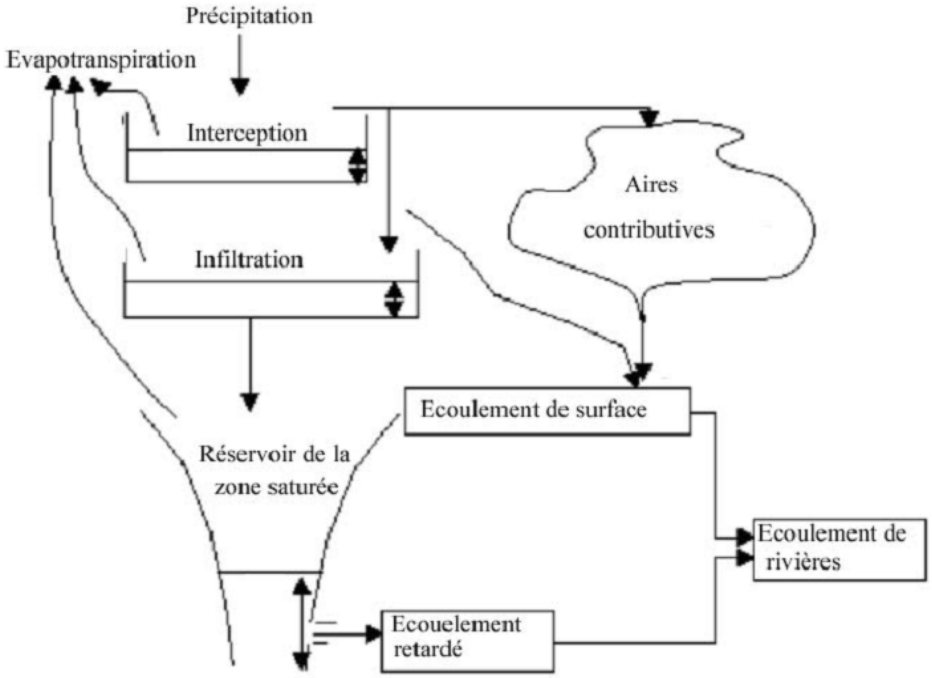


Figure I.8 : *Structure du modèle TOPMODEL.*

TOPMODEL repose sur un découpage du bassin versant en sous-bassins homogènes (mailles carrées). Le sol et le sous-sol sont représentés par des réservoirs successifs, d'où le caractère conceptuel de ce modèle. Ce modèle, relativement puissant nécessite toutefois, bien évidemment, un certain nombre de données pour fonctionner, parmi lesquelles, nous notons les pluies horaires, l'évapotranspiration potentielle une cartographie de la transmissivité T_0 et de la conductivité hydraulique verticale mesurée en surface, K_0. En effet, le modèle utilise une loi de décroissance de la conductivité avec la profondeur du type :

$$K_s(z) = K_0 e^{-fz} \qquad \text{(I-4)}$$

Où,

L'axe Z : est orienté positivement vers le bas ;

f : est un facteur de décroissance.

I.7 Conclusion

Compte tenu de cette étude des modèles analysés, notre choix s'est porté sur un modèle hydrologique qui traite la modélisation des écoulements dans les régions arides et semi-arides, avec un intérêt particulier sur la gestion et l'exploitation rationnelle des ressources en eau, il s'agit du modèle hydrologique HEC-HMS. En particulier, notre choix de simuler le comportement d'un bassin versant avec HEC-HMS, est justifié pour les raisons suivantes :

- Le modèle HEC-HMS est un modèle complet, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat et notamment à celui des zones arides ; en plus ce modèle a la capacité de simuler aussi bien les pertes, l'écoulement de surface, l'écoulement souterrain et l'écoulement fluvial ;
- La fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des bassins versants américains nous a encouragé à appliquer ce modèle à des bassins versants méditerranéens ;
- L'avantage de ce modèle est la prise en compte de la complexité géographique des bassins versants, et ce, par application de ce modèle dans un système intégré Télédétection-SIG-Modèle hydrologique.

CHAPITRE II
THEORIE DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS

II.1 Introduction

Un modèle hydrologique peut être défini comme une représentation théorique simplifiée d'une réalité physique. En hydrologie, la modélisation concerne généralement la relation pluie-débit, c'est à dire que les modèles utilisent la pluie comme variable d'entrée et calculent un hydrogramme en sortie du bassin. Ces modèles reposent en général sur deux fonctions distinctes :

- Une fonction de production qui sépare la pluie en une partie infiltrée et en une partie ruisselée.
- Une fonction de transfert qui achemine la pluie ruisselée à l'exutoire de l'unité hydrologique (le bassin versant)

Les Modèles développés sous le modèle hydrologique HEC-HMS se basent sur trois fonctions essentielles : Modèles pour calculer les précipitations, le volume de ruissellement, le ruissellement direct et les modèles de calcul des écoulements souterrains [HEC-HMS00] [HEC-HMS02].

Le HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un Bassin Versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs. Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, la réduction des effets des inondations. Le programme présente une interface graphique, des composantes hydrologiques intégrées, un système spécifique de stockage de données (DSS) et des outils de gestion, etc.

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

- **Les précipitations :** Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique ;

- **les pertes :** (par infiltration, retenue ou évapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant ;

- **Les ruissellements directs :** qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge ;

- **L'hydrologie fluviale :** concernée par l'écoulement de l'eau dans le lit de la rivière.

Ces différents paramètres seront ensuite modélisés mathématiquement par un ensemble de modèles intégrés dans HEC-HMS et qui permettront d'obtenir la réponse du système hydrologique global suite à un changement de conditions hydrométéorologiques.

II.2 Modélisation des précipitations

II.2.1 Méthodes basées sur les coefficients de pondération

II.2.1.1 Précipitation moyenne

A partir des relevés pluviométriques mesurés sur le bassin versant (ou à proximité), on calcule la moyenne surfacique des précipitations (P_{moy}). Elle est obtenue par la moyenne arithmétique après avoir affecté un coefficient de pondération pour chaque station pluviométrique :

$$P_{moy} = \frac{\sum_i \left(w_i \sum_T p_i(t) \right)}{\sum_i w_i} \qquad \text{(II-1)}$$

Où,

w_i : Coefficient de pondération affecté au pluviomètre i ;
$P_i(t)$: hauteur des précipitations mesurée au pluviomètre i au temps t.

Les coefficients de pondération peuvent être calculés par des considérations surfaciques où le poids affecté à un pluviomètre est d'autant plus grand qu'il est représentatif d'une grande surface. On peut choisir pour cela, soit la méthode des polygones de Thiessen, soit celle du tracé des isohyètes. A défaut, on pourra aussi affecter des coefficients égaux pour tous les pluviomètres. Les méthodes utilisées pour calculer le coefficient de pondération sont :

Moyenne arithmétique

Cette méthode permet de calculer un coefficient égal à l'inverse du nombre de stations. C'est le même coefficient qui sera appliqué à l'ensemble des stations de mesure se trouvant sur le bassin versant (ou à proximité).

$$w_i = \frac{1}{N} \qquad \text{(II -2)}$$

Avec,

N : Nombre de stations pluviométriques.

Polygones de Thiessen

Cette méthode permet de déterminer le coefficient de pondération en utilisant les polygones de Thiessen (figure II.1.a). Le coefficient de pondération est calculé par la formule ci-dessous :

$$w_j = \frac{a_{ij}}{A_i} \qquad \text{(II -3)}$$

Avec,

a_{ij} : Surface d'intersection du « polygone j » et le « sous bassin i » ;
A_i : Surface totale du sous bassin.

Les isohyètes

Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (isovaleurs de pluies annuelles, journalières, etc.) (Figure II.1.b). Les coefficients de pondération peuvent être calculés de la manière suivante :

$$w_j = \frac{b_{ij}}{A_i} \qquad \text{(II -4)}$$

Avec,

b_{ij} : Surface délimitée par le sous-bassin i et les deux isohyètes j et $j+1$;

A_i : Surface totale du sous-bassin i.

La pluie moyenne sur le sous-bassin i est calculée par la suite en utilisant la formule suivante :

$$P_{moy} = \sum_{j=1}^{K} w_j P_j \quad \text{avec,} \quad P_j = \frac{h_j + h_{j+1}}{2} \qquad \text{(II -5)}$$

Avec,

P_j : Précipitation moyenne entre deux isohyètes j et $j+1$;

K : nombre total d'isohyètes.

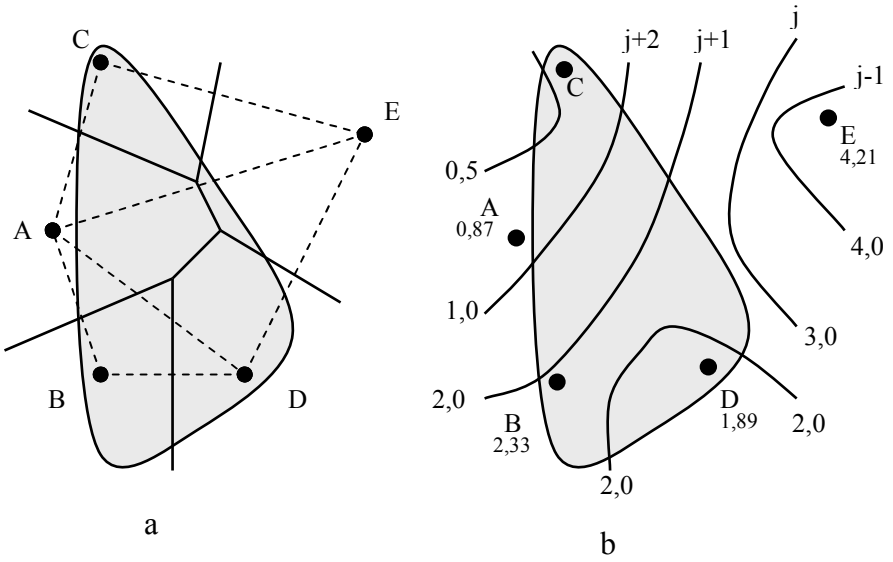


Figure II.1 : *Illustration de la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes.*

II.2.1.2 Répartition temporelle

Une fois la moyenne totale des précipitations est calculée, il faut ensuite donner la répartition temporelle des précipitations à partir de la répartition typique de l'évènement pluvieux $P_{typ}(t)$:

$$P_{moy}(t) = \left[\frac{P_{typ}(t)}{\sum_t P_{typ}(t)} \right] P_{moy} \qquad \text{Ou} \qquad P_{typ}(t) = \frac{\sum_j w_j P_j(t)}{\sum_j w_j} \qquad \text{(II -6)}$$

Avec,

w_j : coefficients de pondération affectés au pluviomètre j.

II.2.2 Méthodes basées sur l'inverse du carré de la distance

C'est une autre alternative à la méthode précédente qui comprend en fait deux étapes (calcul de P_{moy} puis la répartition temporelle). Cette méthode permet la réalisation directe de l'hyétographe en faisant intervenir la notion de nœuds entre pluviomètres. Les nœuds sont positionnés sur le bassin versant de sorte à avoir une répartition spatiale adéquate de la précipitation. Le HEC-HMS définit alors la répartition temporelle des pluies en un nœud par pondération des données pluviométriques donnée par la relation suivante :

$$P_{noeud}(t) = \sum_i w_i P_i(t) \qquad \text{(II -7)}$$

Où :

wi : est le coefficient de pondération affecté à la station i (*i*=1..nbr de stations).

Pour calculer les coefficients de pondération, le HEC-HMS construit un repère orthogonal basé sur un nœud (figure II.2), puis il détermine pour chaque quadrangle délimité par deux axes une station (la plus proche du nœud). Le facteur de pondération est calculé par la relation suivante :

$$w_j = \frac{l/d_j^2}{\sum l/d_j^2} \qquad \text{(II - 8)}$$

Où,

l/d_j^2 : Inverse du carré de la distance de la station *j* au « nœud *P* ».

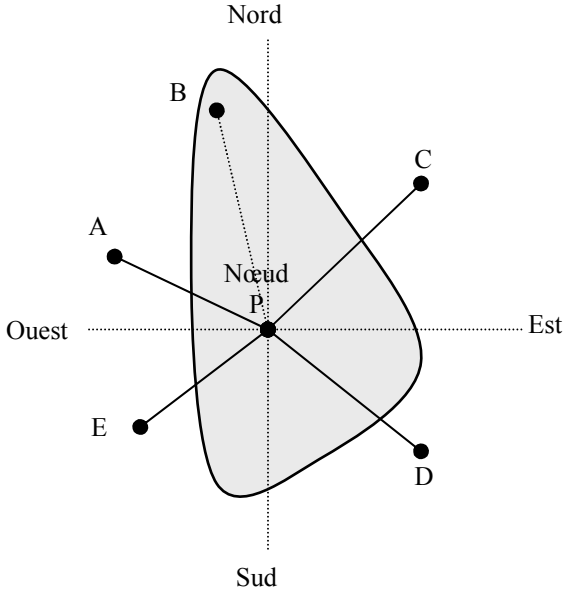


Figure II.2 : *Illustration de la méthode de l'inverse du carré de la distance.*

Une fois la série $P_{nœud}(t)$ est établie pour tous les nœuds, la moyenne temporelle des précipitations est calculée par la relation suivante :

$$P_{moy}(t) = \frac{\sum w_{noeud}(t) P_{noeud}(t)}{\sum w_{noeud}} \qquad \text{(II - 9)}$$

Où :

$w_{nœud}$: est le poids affecté pour chaque nœud.

Si un seul nœud est utilisé dans le bassin versant, $w_{nœud}$ sera égale à 1.00. Sinon, on détermine $w_{nœud}$ pour chaque nœud en utilisant les polygones de Thiessen ou un autre schéma.

II.2.3 Méthodes basées sur les évènements pluvieux hypothétiques

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

On peut créer trois types d'évènements pluvieux standards :

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

II.2.3.1 Pluie hypothétique basée sur la fréquence

L'objectif de cette méthode est de définir un événement pour lequel la hauteur et la durée des précipitations sont déterminées pour une probabilité de dépassement donnée. Pour définir cet évènement avec HEC-HMS l'utilisateur doit spécifier la hauteur de précipitation en chaque pas de temps pour une probabilité de dépassement choisi. Les hauteurs des précipitations peuvent être déduites à partir des courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence). HEC-HMS applique un coefficient de correction de surface aux hauteurs données par les courbes HDF.

Généralement, la distribution de l'intensité des précipitations est non uniforme sur le bassin versant, la hauteur moyenne sur la surface du bassin est inférieure à la hauteur donnée par les courbes HDF. Pour palier à ce problème, le U.S. Weather Bureau, a définit des facteurs qui permettent d'ajuster les hauteurs données par les courbes HDF à la hauteur moyenne. Ces facteurs, exprimés en pourcentage, sont fonction de la surface du bassin et de la durée de la pluie (figure II.3) [HEC-HMS00].

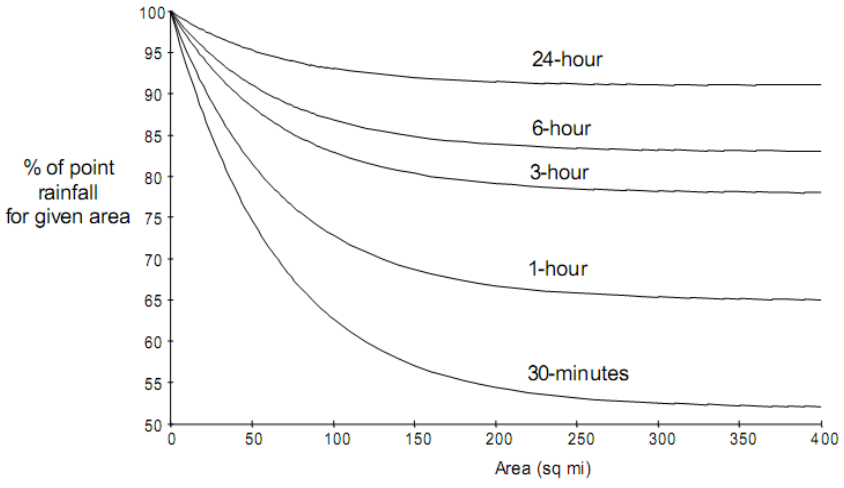


Figure II.3 *: Facteurs de réduction des hauteurs données par les courbes HDF.*

HEC-HMS fait une interpolation linéaire pour calculer les hauteurs d'eau en pas de temps régulier. Ensuite, il détermine un hyétogramme à partir des valeurs incrémentales des hauteurs de précipitations par la méthode dite en « Bloc ». Cette méthode positionne la hauteur maximale en milieu de l'hyétogramme. Les blocs restants sont arrangés alors dans l'ordre décroissant, alternativement avant et après le bloc central. Cette méthode est illustrée sur la figure II.4 [HEC-HMS00].

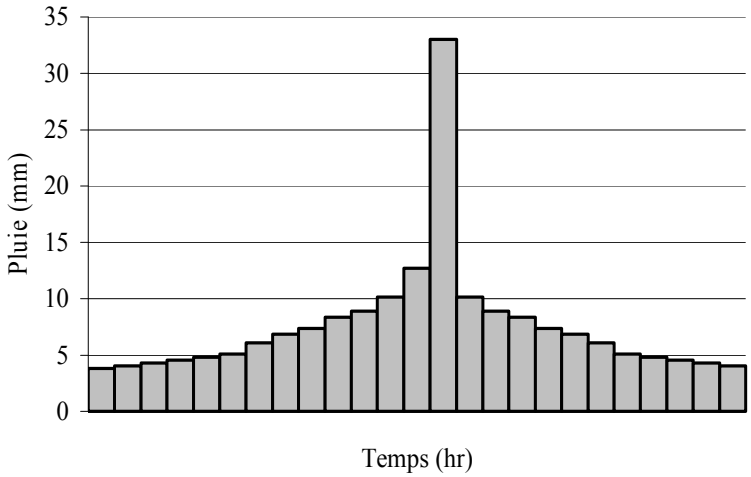


Figure II.4 *: Exemple de la distribution de la Pluie basée sur la fréquence.*

II.2.3.2 Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur

Cette méthode permet à l'utilisateur de définir la hauteur et la distribution de la pluie hypothétique. On peut aussi donner la quantité totale d'eau tombée sur le bassin versant et la fraction de cette quantité à chaque instant, avec une courbe du type (Figure II.5) [HEC-HMS00].

Il est important de définir un évènement pluvieux hypothétique d'une durée suffisamment longue pour que tout le bassin versant participe à l'écoulement. A titre indicatif un temps total égal à 3 fois le temps de concentration du bassin versant donne de bons résultats.

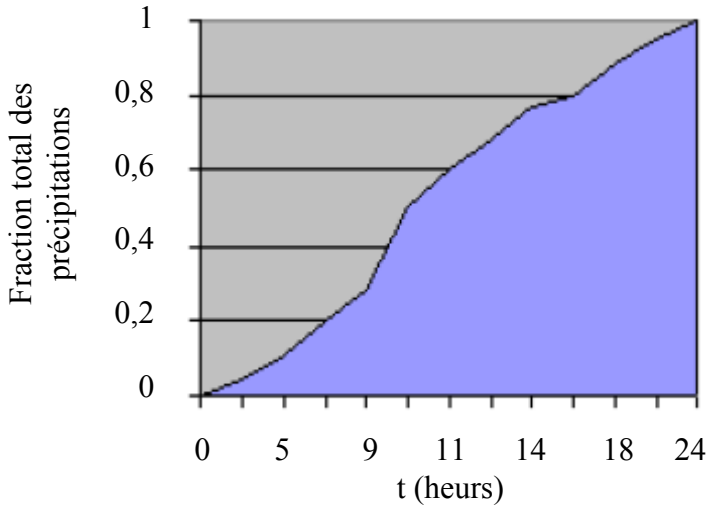


Figure II.5 *: Répartition de la précipitation au cours de l'évènement.*

II.3 Modélisation de l'Evapotranspiration (ETP)

Comme l'ETP reste insignifiante pendant l'inondation, le HEC-HMS ne tient pas compte de tous les détails concernant cette entité. Dans le cas des orages plus courts, telle que la pluie de projet standard, il est approprié d'omettre cette entité. Cependant, avec le modèle SMA, qui est décrit en détail dans la section Modélisation de pertes, il est possible d'analyser la réponse du bassin versant à des séries de précipitations de longue durée qui incluent les périodes de précipitation et les périodes sans précipitations. Pendant les périodes sans précipitations, l'état d'humidité du bassin versant continue à changer.

L'évapotranspiration est la composante critique de ce mouvement. L'évapotranspiration, comme modelée dans HEC-HMS, inclut la vaporisation de l'eau directement du sol et la transpiration des végétaux.

Dans HEC-HMS on représente l'Evapotranspiration par des valeurs et des coefficients de correction en pas de temps mensuel. Le taux d'évapotranspiration mensuel est calculé ensuite par le produit des valeurs de l'ETP par ces coefficients.

II.4 Modélisation des pertes

HEC-HMS calcule les volumes d'écoulements en soustrayant aux précipitations les quantités d'eau qui sont stockées, infiltrées ou évaporées sur le bassin versant. L'interception, l'infiltration, le stockage et l'évaporation sont représentés par le HEC comme étant des « pertes ».

II.4.1 Concept de base

Les surfaces d'un bassin versant sont classées en deux catégories :

1. Surfaces directement connectées et imperméables, où l'écoulement est direct et se fait sans pertes. Dans ce cas on utilise le modèle « sans pertes » ;

2. Surfaces perméables soumises à des pertes décrites par les différents modèles suivants :

    - Modèle de perte initiale et à taux constant ;
    - Modèle à déficit et à taux de perte constant ;
    - Modèle basé sur le Curve Number (CN) ;
    - Modèle de Green et Ampt.

Pour tous ces modèles, les pertes sont calculées pour chaque intervalle de temps et soustraites à la moyenne surfacique de précipitations de cet intervalle. La quantité d'eau restante désigne l'excès de précipitation. Cette quantité est considérée uniforme sur tout le bassin versant et représente le volume d'écoulement de surface.

II.4.2 Le modèle de pertes initiales et à taux constant

Ce modèle considère que le potentiel du taux de pertes maximum, noté *fc*, est constant, et inclut le taux de pertes initiales *Ia* qui représente l'interception et le stockage dans les dépressions de surfaces. L'interception est une conséquence de l'absorption de la pluie par

le couvert végétal et le stockage de surface est la conséquence de la topographie du bassin versant, l'eau stockée dans les dépressions de surface sera soit évaporée soit infiltrée. Tant que, *Ia* n'est pas atteint, il n'y a pas de ruissellement.

On peut résumer ce fonctionnement de la manière suivante :

$$\begin{aligned} &si \sum_i P_i \le I_a alors, P_{et} = 0 \\ &si \sum_i P_i \ge I_a et P_t \ge f_c alors, P_{et} = P_t - f_c \\ &si \sum_i P_i \ge I_a et P_t \le f_c alors, P_{et} = 0 \end{aligned} \qquad \text{(II -10)}$$

Où,

P_t : La moyenne surfacique des précipitations au temps t ;
P_{et} : le ruissellement au temps t.

La difficulté de cette méthode réside dans la détermination des pertes initiales et du taux de pertes constantes. La première dépend des conditions qui ont précédés l'évènement pluvieux à étudier (par exemple si le sol était déjà saturé en eau par des pluies précédentes, les pertes initiales seront quasiment nulles). Ces pertes dépendent aussi de l'aménagement et de la nature des sols. Le second dépend des propriétés physiques du sol du bassin et de la nature du sol.

Si le sol du bassin versant est saturé, *Ia* sera proche de zéro. Si le sol est drainé, alors *Ia* représentera la quantité d'eau qui tombe sur le bassin versant sans qu'il y ait de ruissellement ; cette quantité est fonction de la nature de terrain du bassin versant, occupation du sol, type et utilisation du sol. A titre indicatif, on estime que ces pertes sont égales à 10 ou 20% de la pluie totale pour une forêt, alors qu'en zone urbaine elles sont comprises entre 2 et 5 mm de hauteur d'eau.

Le taux de perte constant qui correspond au pouvoir d'absorption du sol est exprimé en mm/h. On peut toutefois se servir des valeurs données dans le tableau suivant [HEC-HMS00]:

Tableau II.1 *: Le taux de pertes constant pour les différents types du sol.*

Groupe	Type du sol	Ordre de grandeur du taux de pertes (mm/h)
A	Sable profond, lœss profond, limons agrégés.	7.5 à 11
B	Lœss peu profond, terre sableuse.	3.5 à 7.5
C	Terre argileuse, terre sableuse peu profonde, sols à faible teneur en matière organique, sols argileux	1.2 à 3.5
D	Sols gonflant fortement sous l'effet de l'eau, argiles plastiques lourdes, sols salins.	0 à 1.2

Une variante de ce modèle est le modèle quasi continu qui prend en compte des périodes sans pluie au cours de l'évènement et qui intègre donc une régénération (avec un taux à fixer) des pertes initiales. C'est le modèle "Déficitaire et à taux constant". Pour utiliser ce modèle avec le HEC-HMS on doit spécifier le taux de pertes initiales, le taux de pertes

constant et le taux de régénération. Ce dernier peut être estimé comme étant la somme du taux d'évaporation et du taux de percolation.

II.4.3 Le modèle du Curve Number (CN)

Ce modèle estime l'excès de précipitations comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation suivante :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \qquad \text{(II -11)}$$

Où,

P_e : L'excès de précipitation ;
P : est le total des précipitations accumulées au temps t ;
I_a : Les pertes initiales ;
S : est le potentiel maximum de rétention.

On a par ailleurs la relation empirique ci-dessous, qui a été développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins versants expérimentaux qui donne *Ia* en fonction de S:

$$I_a = 0.2S \qquad CN_{moy} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i} \qquad \text{(II -12)}$$

$$\text{On obtient donc : } P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \qquad \text{(II -13)}$$

Le potentiel de rétention maximum, S, et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du nombre de courbe CN (Curve Number) par :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \qquad \text{(II -14)}$$

CN peut être estimé comme une fonction du type du sol, d'occupation du sol et des conditions hydriques précédentes du bassin versant, ce nombre peut être estimé à partir des tables des données en annexe III du manuel de référence technique HEC-HMS, qui exprime CN en fonction du type de la couverture végétale.

Pour un bassin versant composé de différents types de sols ou de couvertures végétales, on peut établir un CN moyen par la relation suivante :

$$CN_{moy} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i} \qquad \text{(II -15)}$$

Où,

j : L'indice associé à la subdivision du bassin de type de sol uniforme ;
a_{ij} : l'aire de la subdivision j dans le sous-bassin i ;
A_i : l'aire du sous-bassin i.

II.4.4 La méthode CN en grille

Une autre alternative de la méthode de CN qui peut être utilisée par le HEC-HMS est celle de CN en grille, avec cette option, la subdivision de l'équation (II-11) sera des cellules d'une grille, dans la base de données, où chaque cellule doit inclure : sa localisation, sa distance de l'exutoire, ses dimensions et son CN (qui est donné en fonction du type de sol).

Ainsi, le HEC calcul l'excès des précipitations pour chaque cellule indépendamment en utilisant l'équation (II-11), ensuite, il calcule l'excès total au niveau de l'exutoire en utilisant la méthode de ModClark. Ce qui veut dire que la méthode de CN en grille n'est compatible qu'avec cette méthode de calcul.

II.4.5 Le modèle de Green & Ampt

Il est l'un des plus utilisé, c'est un modèle conceptuel d'infiltration et de précipitation. Sa fonction de production est basée sur la loi de Darcy généralisée aux milieux non saturés combinée avec le principe de conservation de la masse. Les pertes sur les zones perméables sont calculées par la formule suivante :

$$f_t = K\left[\frac{1+(\varphi-\theta_i)S_f}{F_t}\right] \qquad \text{(II -16)}$$

Où,

K : Conductivité hydraulique saturée ;
φ : la porosité ;
$(\varphi - \theta_i)$: le volume du déficit hydrique ;
S_f : un paramètre tabulé qui exprime l'aspiration avant mouillage ;
F_t : représente les pertes cumulées aux temps t.

L'excès des précipitations est calculé, ensuite, en soustrayant à la moyenne surfacique des précipitations (P_{moy}) pour le même intervalle de temps les pertes calculées par l'équation précédente.

Définition des différents paramètres utilisés

- **Les pertes initiales :** ce sont une fonction des conditions hydriques du bassin versant au début des précipitations, elles peuvent être estimées dans certains cas comme une abstraction initiale par certains modèles.

- **Conductivité hydraulique :** Le tableau II.2 nous donne la valeur de ce paramètre en fonction de la classe de la texture du sol.

- **Aspiration avant mouillage :** Celle ci peut être estimée en fonction de la dimension des pores et de leur distribution; elle peut être, en effet, corrélée avec la classe de la texture (tableau II.2).

- **Le volume du déficit hydrique $(\varphi-\theta_i)$:** Dans l'équation précédente, la porosité φ doit être supérieure à la quantité initiale d'eau contenue dans le sol θ_i. Pour les sols saturés, $\varphi=\theta_i$, et pour les sols complètement drainés $\theta_i=0$. La quantité d'eau initiale contenue dans le sol est fonction principalement des précipitations précédentes.

Tableau II.2 *: Estimation des différentes classes de la texture du sol.*

Texture	Porosité	Conductivité hydraulique	Aspersion avant mouillage
Sable	0.437	21.00	10.6
Sable glaiseux	0.437	6.11	14.2
Terre sableuse	0.453	2.59	22.2
Terre	0.463	1.32	31.5
Terre-Limons	0.501	0.68	40.4
Terre Argileuse sableuse	0.398	0.43	44.9
Terre argileuse	0.464	0.23	44.6
Terre-Argile-limons	0.471	0.15	58.1
Argile sableuse	0.430	0.12	63.6
Argile-limons	0.479	0.09	64.7
Limons	0.475	0.06	71.4

II.4.6 Le modèle continue SMA (Sol-Moisture Accounting)

Contrairement aux modèles précédents, SMA est un modèle qui permet d'étudier de longues périodes avec alternance de la pluie et du temps sec. Le modèle simule le mouvement de l'eau à travers les différents éléments d'un bassin versant. A partir des données de précipitations et d'évapotranspiration, le modèle calcule le ruissellement de surface, les infiltrations et les pertes dues à l'évapotranspiration et les percolations profondes.

Le modèle SMA représente le bassin versant avec une série de couches de stockage interconnectées entre elles. La figure II.6 représente la façon dont les couches de sont connectées. Chacune est représentée par le taux d'apport, de sortie et de sa capacité de stockage qui commande la quantité d'eau perdue ou supplémentaire [HEC-HMS00].

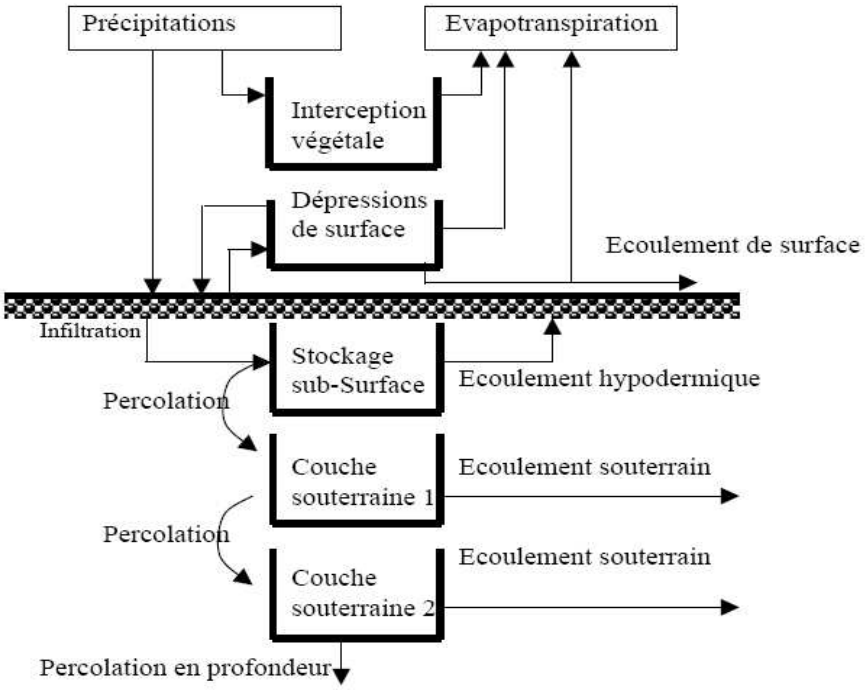


Figure II.6 *: Schéma conceptuel de l'algorithme du modèle SMA.*

Les différentes séries de couches de stockage

- Stockage par interception végétale : Cette couche représente l'eau retenue par la végétation (arbres, herbes...) et qui n'atteint donc pas le sol. Les précipitations représentent le seul apport de cette couche. L'évaporation est le principal moyen de la vider.

- Stockage par interception de surface (par les dépressions de surface) : Les apports de cette couche proviennent des eaux non capturées par la végétation. Cette couche se remplie quand l'infiltration maximale est atteinte. Lorsqu'elle est pleine, elle déborde pour créer le ruissellement de surface.

- Stockage de sub-surface : Il représente l'eau retenue dans le sol à faible profondeur et susceptible d'être soumise à l'évapotranspiration. Les apports sont les infiltrations et les sorties incluent les percolations et l'évapotranspiration. Cette couche est subdivisée en deux zones, la zone supérieure et la zone de tension. La première représente la zone où l'eau sera perdue par percolation et par évapotranspiration, la deuxième est représentée par la partie où l'eau n'est perdue que par évapotranspiration seulement.

- Stockage souterrain : Les couches souterraines représentent le processus des écoulements horizontaux. L'eau stockée dans ces couches est obtenue par percolation (dont le taux est à définir) et considérée comme perdue pour le système.

Le modèle SMA calcule l'écoulement à l'entrée et à la sortie de chaque couche de stockage. Cet écoulement peut être :

- **Précipitations** : Les précipitations représentent les données (ou les inputs) du modèle. Elles contribuent en premier lieu au volume de stockage par interception. Une fois que cette couche est saturée, l'excès sera disponible pour l'infiltration.

- **Infiltration** : Le volume d'infiltration pour chaque intervalle de temps est une fonction du volume disponible pour l'infiltration, l'état (fraction de la capacité) de la couche supérieure du sol et du taux d'infiltration maximum spécifié par l'utilisateur. Pour chaque pas de temps, le modèle détermine le potentiel du volume d'infiltration par la relation suivante :

$$PSolInf = MaxSolInf - \frac{CSolStoc}{MaxSolStoc} MaxSolInf \qquad \text{(II -17)}$$

Où,

PSolInf : Le potentiel du volume de stockage ;
MaxSolInf : Le taux d'infiltration maximum ;
CSolStoc : Le volume d'eau stocké précédemment ;
MaxSolStoc : La capacité maximum de stockage du sol.

Si le volume disponible pour l'infiltration dépasse le potentiel de stockage calculé, l'excès contribue ensuite au stockage de surface.

- **Percolation** : Le taux de percolation entre les couches de surfaces et les couches souterraines ou entre deux couches souterraines, dépend de l'eau contenue initialement dans la couche source et la couche de réception. Le taux sera important si la couche source est saturée et la couche de réception est presque drainée.

- **Ruissellement de surface et écoulement souterrain :** Le volume d'eau qui excède l'infiltration souterraine et le stockage de surface participe directement au ruissellement de surface ; l'hydrographe résultant de cette étape est calculé par l'un des modèles de ruissellement de surface (voire la section suivante). L'écoulement souterrain est la somme des volumes sortant de chaque couche souterraine en chaque pas de temps considéré.

- **Evapotranspiration** : L'ETP est la quantité d'eau perdue par évaporation directe de l'eau interceptée par les végétaux et l'eau stockée dans les dépressions de surface. Cette quantité est calculée généralement en pas de temps mensuels.

II.4.7 Limites d'application des modèles de ruissellement utilisés avec le HEC-HMS

Le choix du modèle et l'estimation des différents paramètres sont une étape critique dans le développement des données avec le logiciel HEC-HMS. On ne peut pas joindre n'importe quel modèle de pertes avec n'importe quel modèle de transfert. Par exemple, la méthode de pertes en grille n'est utilisée qu'avec le modèle de transfert de « ModClark » (méthode de Clark modifiée).

Le tableau II.3 liste les différents avantages et inconvénients de cette alternative. Cependant, ceux-ci sont seulement des directives et devraient être complétées par la connaissance et l'expérience de l'utilisateur.

Tableau II.3 *: Les avantages et les inconvénients des modèles de pertes incluent dans le modèle HEC-HMS.*

MODELE	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Modèle de pertes initiales et à taux constant et le modèle déficitaire à taux constant	• Ces modèles ont été utilisés avec succès dans plusieurs essais aux Etats Unis. • Faciles à installer et à utiliser. • Les modèles incluent seulement quelques paramètres nécessaires qui expliquent la variation du volume de l'écoulement. • Le modèle à déficit peut être utilisé pour des simulations à long terme.	• Difficile de l'appliquer pour un bassin non jaugé en raison du manque de rapport physique direct entre les paramètres et les propriétés du bassin. • Le modèle paraît très simplifié pour prévoir les pertes au cours de l'événement, même s'il prévoit bien les pertes totales
La méthode de Curve Number (CN)	• La méthode est simple, prévisible et stable. • Compte seulement sur un paramètre, qui change en fonction du type de sol, de l'occupation et l'utilisation de la terre, les conditions en surface, et l'état antécédent d'humidité. • Méthode bien établie, largement admise pour l'usage aux USA et à l'étranger.	• La méthode ne tient pas compte de la théorie des écoulements non saturés. • Le taux d'infiltration approchera zéro pour une précipitation à longue durée, plutôt que constante. • Ce modèle a été développé avec des données de petits bassins versants agricoles aux Etats Unis, donc son applicabilité ailleurs est incertaine. • L'abstraction initiale par défaut (0.2S) ne dépend pas des caractéristiques de la pluie, donc si elle est utilisée, elle sera la même pour des averses à des périodes de retour différentes. • La méthode ne tient pas compte de l'intensité des précipitations.
La méthode de Green & Ampt	• Les différents paramètres peuvent être estimés à partir des informations sur le sol, pour des bassins versants non jaugés.	• Ce modèle n'est pas trop utilisé par les professionnels. • Il est moins efficace que les modèles empiriques.

II.5 Modélisation du ruissellement direct

Dans cette partie, on présente les modèles qui simulent le processus du ruissellement direct des précipitations excédentaires sur un bassin versant. HEC-HMS se rapporte à ce processus comme transformation de l'excès de précipitation pour chacun des sous bassin en un écoulement à son exutoire. Avec le HEC-HMS il existe deux options pour calculer le volume de ruissellement :

- **Un modèle empirique :** Le but de ce type de modèle est d'établir un lien causal entre le ruissellement et l'excès de précipitation sans considérations détaillées des processus internes. Les équations et les paramètres du modèle ont une signification physique très limitée.

- **Un modèle conceptuel :** Le modèle conceptuel inclus dans HEC-HMS est le modèle de l'onde cinématique de l'écoulement de surface. Il représente, le mieux possible, les mécanismes physiques qui régissent le mouvement de l'excès de précipitation sur la surface et dans les petits canaux du bassin versant.

II.5.1 Les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)

Ces modèles donnent une relation empirique entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct. La méthode de l'hydrogramme unitaire vise à déterminer l'hydrogramme de ruissellement direct à l'exutoire d'un bassin versant à partir des hyétogrammes de l'averse correspondante reçue par ce même bassin [HEC-HMS00].

L'hydrogramme unitaire donne le débit de ruissellement par unité de hauteur d'eau tombée sur le bassin versant. Cette méthode repose donc principalement sur l'hypothèse de linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement.

On a donc l'équation de convolution suivante :

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \le m} P_m U_{n-m+1} \qquad \text{(II-18)}$$

Où,

Q_n : est le débit de ruissellement au temps $n\Delta t$,
P_m : est l'excès de précipitation entre $m\Delta t$ et $(m+1)\Delta$t (en hauteur d'eau),
U_{n-m+1} : est la valeur de l'hydrogramme unité au temps $(n-m+1)\Delta$t.

Cette méthode repose sur l'ensemble des hypothèses suivantes :

- La distribution spatiale de l'excès de précipitations doit être uniforme et son intensité reste constante durant l'intervalle de temps Δt ;
- La linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct ;
- L'hydrogramme unitaire résultant est indépendant des précipitations antécédentes ;
- L'excès de précipitation en un pas de temps donné est censé produire un hydrogramme, avec un temps équivalent, indépendamment de l'intensité des précipitations.

II.5.1.1 Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur

Ce modèle consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de la formule II.15 et des données complètes d'un événement pluvieux. En pratique, cette méthode n'est que très peu utilisée car elle nécessite des données beaucoup trop complètes. De plus, l'hydrogramme obtenu ne pourra s'appliquer qu'à des événements pluvieux qui ont la même durée.

II.5.1.2 Hydrogramme unitaire paramétrique

Un hydrogramme unitaire paramétrique est obtenu par calcul à partir de plusieurs paramètres. Par exemple, l'amplitude et l'instant du pic suffisent à calculer entièrement un hydrogramme unitaire triangulaire. Un hydrogramme unitaire synthétique met en relation les paramètres d'un hydrogramme unitaire paramétrique et les caractéristiques du bassin versant. Cette méthode permet d'adapter l'hydrogramme unitaire obtenu dans certaines conditions pour un bassin versant à d'autres conditions et d'autres bassins versants. Par exemple, on peut relier l'amplitude du pic d'un hydrogramme unitaire triangulaire à l'aire drainée par le bassin [HEC-HMS00].

II.5.2 Modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques

II.5.2.1 Le modèle de SNYDER

Ce modèle permet d'estimer l'hydrogramme unitaire à partir des caractéristiques du bassin versant. Il est basé sur trois paramètres : l'amplitude du pic, la base du temps total et le décalage entre le maximum de l'hyétogramme de la pluie excédentaire et le pic de l'hydrogramme. Ce modèle est fondé par ailleurs sur un événement standard tel que le décalage temporel (T_p) qui est déterminé par la relation suivante :

$$T_p = 5.5T_c \qquad \text{(II-19)}$$

Où :

T_r : est la durée de l'évènement.

Si le décalage temporel est remarquablement différent du temps calculé par la relation précédente, on utilise la relation suivante :

$$t_{pR} = t_p - \frac{t_r - t_R}{4} \qquad \text{(II -20)}$$

Où,

t_R : Le décalage temporel de l'hydrographe désiré (défini par l'utilisateur) ;

t_{pR} : Le décalage temporel de l'hydrogramme unitaire (défini par l'utilisateur).

Pour ce type d'événement, Snyder a établi une relation entre le décalage temporel et le pic de l'hydrogramme unitaire.

$$\frac{U_p}{A_d} = C\frac{C_p}{t} \qquad \text{(II -21)}$$

Où,

U_p: Le pic de l'hydrogramme unitaire ;

A_d : La surface drainée ;

C_p : Coefficient du pic de l'hydrogramme unitaire ;

C : Constante de conversion, (C=2.08) pour le Système international d'unités (SI) ;

t : Le temps de décalage. Il est égal à t_p pour des événements standards et à t_{pR} pour d'autres durées.

II.5.2.2 Le modèle du SCS (Soil Conservation Service)

Ce modèle repose sur l'hydrogramme unitaire normalisé (qui est la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires calculés pour différents bassins versant). Cet hydrogramme normalisé représente le débit d'écoulement, U_t, comme une fraction du débit maximal, U_p, et, T_p , l'instant du pic. On a par ailleurs les relations empiriques suivantes :

$$U_p = 2.08\frac{A_d}{T_p} \quad \text{et} \quad T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6T_c \qquad \text{(II -22)}$$

Où,

Δt: La durée de l'excès de précipitation ;

T_c : le temps de concentration du bassin.

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

II.5.2.3 Le modèle de CLARK (ModCLARK)

Il s'agit d'un modèle quasi-conceptuel puisqu'il prend en compte les deux processus intervenant dans la transformation d'un excès de précipitation en ruissellement, à savoir le mouvement de l'eau de son origine jusqu'à l'exutoire du bassin versant et l'atténuation de cette quantité d'eau par stockage lors de son parcours. Le modèle de Clark modifié, fait intervenir un maillage du bassin versant qui permet de mieux modéliser les temps de parcours.

Une fois que l'excès de précipitation est déterminé pour chaque grille du maillage du bassin versant, le temps de transfert de l'excès de précipitation de la grille à l'exutoire est calculé par la relation suivante :

$$t_{cell} = t_c \frac{d_{cell}}{d_{\max}} \qquad \text{(II -23)}$$

Où,

t_{cell} : Temps de transfert de l'excès de précipitations de la grille ;

t_c : Temps de concentration du bassin versant ;

d_{cell} : Distance entre la grille et l'exutoire du bassin versant ;

$d_{\max}$: Le plus long parcours du bassin versant. Celltccellmax

II.5.3 Modèle de l'onde cinématique

Il s'agit d'un modèle conceptuel qui représente les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à l'excès de précipitations. Il résout donc les équations (de continuité et de quantité du mouvement) qui régissent les écoulements instationnaires en eau peu profonde pour tracer l'hydrogramme de ruissellement. Le bassin versant étant découpé en deux plans séparés par le cours d'eau dans lequel les écoulements se déversent (figure II.7). Le modèle de l'onde cinématique représente les écoulements de surface sur ces plans.

Sans rentrer dans la théorie complète, on retiendra que sous quelques hypothèses simplificatrices, l'équation de mouvement et celle de continuité donnent :

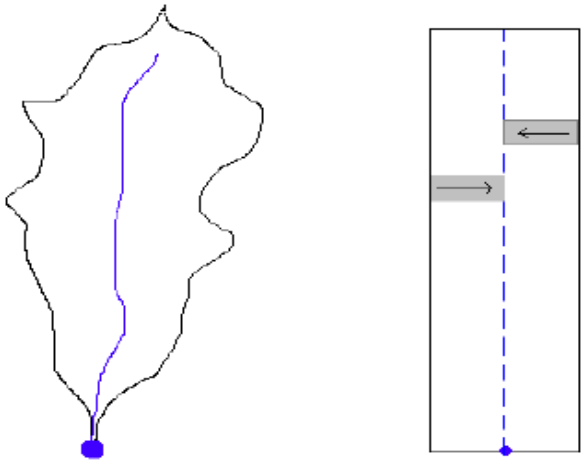


Figure II.7 : *Modélisation d'un modèle de bassin pour le modèle d'onde cinématique.*

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \alpha^{m-1}\frac{\partial A_T}{\partial x} = q \qquad \text{avec,} \qquad \alpha = 1.486\frac{S^{0.5}}{N} \qquad \text{et} \qquad m = \frac{5}{3}N \qquad \text{(II -24)}$$

Où,

A_T : La section transverse ;
S : est la pente ;
N : est un coefficient de rugosité tabulé ;
q : est le débit d'apport latéral par unité de longueur du canal [HEC-HMS00].

HEC-HMS représente les écoulements de surface sur un canal rectangulaire de largeur unité. Cette méthode est aussi utilisée pour les écoulements fluviaux. Dans les deux cas, la résolution des équations se fait par la méthode des différences finies pour assurer la précision et la stabilité. Pour utiliser la méthode de l'onde cinématique dans la modélisation du ruissellement, le bassin versant est décomposé en divers éléments :

- Les plans de ruissellement de surface ;
- Les canaux de collection ;
- Le cours d'eau principal.

Les informations nécessaires à connaître pour chacun de ces éléments sont représentées sur le tableau III.4 ci-dessous.

Tableau II.4 : *Diverses informations à connaître pour chaque élément du bassin.*

Plans de ruissellement de surface	Collecteurs	Cours d'eau principal
Longueur caractéristique, Pente représentative, Coefficient de rugosité, Aire représentée par le plan, Paramètres de pertes.	Aire drainée par le canal, Longueur caractéristique, Pente du canal, Forme de la section, Dimensions représentatives de la section, Coefficient de Manning.	Longueur du canal, Pente du canal, Forme de la section, Dimensions représentatives de la section, Coefficient de Manning.

Le choix du modèle de ruissellement direct dépend essentiellement de la disponibilité des données pour le calage ou pour l'estimation de certains paramètres, de la pertinence des hypothèses faites pour chaque modèle par rapport au cas étudié et de l'expérience que peut avoir l'utilisateur face aux divers modèles.

II.6 Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS

Les différents modèles d'écoulements fluviaux inclus dans le HEC-HMS permettent de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces modèles utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement [HEC-HMS00].

Equation de continuité

Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$A\frac{\partial V}{\partial x}+VB\frac{\partial y}{\partial x}+B\frac{\partial y}{\partial t}=q \qquad \text{(II -25)}$$

Où,

A : L'aire de la section du cours d'eau.
B : Largeur de la surface libre ;
q : Le débit unitaire, calculé par unité de longueur du canal ;

Equation de quantité de mouvement

L'équation du mouvement s'écrit comme suit :

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g}\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g}\frac{\partial V}{\partial t} \qquad \text{(II -26)}$$

Où,

S_f: est le gradient hydraulique **;**
S_0: est le gradient au fond du canal ;
V : vitesse d'écoulement ;
y : hauteur hydraulique ;
x : la longueur du chemin de l'écoulement ;
$\partial y/\partial x$: le gradient de pression ;
$V\partial V/g\partial x$: l'accélération convective et
$\partial V/g\partial t$: l'accélération locale.

Les principales hypothèses retenues lors de l'élaboration des ces équations sont :

- La vitesse est constante sur la surface et elle reste horizontale sur chaque section du cours d'eau ;
- La pression reste hydrostatique en chaque point du cours d'eau ;
- Aucune circulation latérale et secondaire ne se produit ;
- Le lit du canal est fixé ; l'érosion et le dépôt ne changent pas la forme de la section du canal ;
- La résistance à l'écoulement peut être décrite par des formules empiriques, telles que l'équation de Manning ou de Chézy.

II.6.1 Modèle de Puls (modified puls)

Ce modèle est basé sur une approximation en différences finies de l'équation de continuité, et sur une représentation empirique de l'équation de quantité de mouvement. On considère qu'il n'y a pas d'apports latéraux. L'équation de continuité devient alors :

$$\frac{\partial Q}{\partial X}+\frac{\partial A}{\partial t}=0 \qquad \text{(II -27)}$$

On utilise alors la méthode des différences finies en écrivant que :

$$I_t - O_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t} \qquad \text{(II -28)}$$

Où

I_t et O_t : sont les débits moyens respectivement amont et aval pendant une période Δt;
ΔS_t : étant la variation du stock d'eau durant le même pas de temps.

On obtient alors l'équation suivante :

$$\left(\frac{S_t}{\Delta t}+\frac{O_t}{2}\right)=\left(\frac{I_{t-1}+I_t}{2}\right)+\left(\frac{S_{t-1}}{\Delta t}-\frac{O_{t-1}}{2}\right) \qquad \text{(II -29)}$$

Ainsi, au temps t, on connaît les termes de droite, et l'on cherche à déterminer les termes de gauche. On a donc deux inconnues S_t et O_t, et l'on doit donc connaître une relation supplémentaire entre ces deux variables. Une fois cette relation déterminée, on résout le nouveau système d'équations par récurrence. En ce qui concerne la relation liant S_t à O_t, on peut la déterminer par des observations historiques des valeurs des débits et du volume d'eau stocké au cours du temps.

II.6.2 Modèle de Muskingum

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

$$\left(\frac{I_{t-1}+I_t}{2}\right)-\left(\frac{O_{t-1}+O_t}{2}\right)=\left(\frac{S_t-S_{t-1}}{\Delta t}\right) \qquad \text{(II -30)}$$

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

$$S_t = T_p O_t + T_p X\left(I_t - O_t\right) = T_p\left(XI_t + \left(1-X\right)O_t\right) \qquad \text{(II -31)}$$

Avec,

T_p : Temps de parcours ;
X : paramètre permettant une pondération (0<X<0.5).

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

Finalement, on obtient l'équation suivante :

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2T_p X}{2T_p(1-X)+\Delta t}\right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2T_p X}{2T_p(1-X)+\Delta t}\right) I_{t-1} + \left(\frac{2T_p(1-X)-\Delta t}{2T_p(1-X)+\Delta t}\right) O_{t-1} \qquad \text{(II -32)}$$

Connaissant les valeurs de T_p, X, Δt pour tous les instants t, et de la condition initiale (O_0). HEC-HMS calcule par récurrence l'hydrogramme amont.

Les paramètres T_p et X peuvent être évidemment estimés par une série d'essais successifs corrigés au fur et à mesure. T_p peut être aussi mesuré comme l'intervalle de temps entre deux points similaires appartenant respectivement aux hydrogrammes amont et aval.

II.6.3 Le modèle du décalage (lag model)

Ce modèle est le plus simple de tous et est extrêmement utilisé surtout pour modéliser le drainage urbain. On considère que l'hydrogramme aval est simplement l'hydrogramme amont décalé dans le temps d'une certaine durée (lag), La valeur de ce décalage peut être estimée comme la durée entre les deux pics des deux hydrographes (ou leurs centres de gravité respectifs).

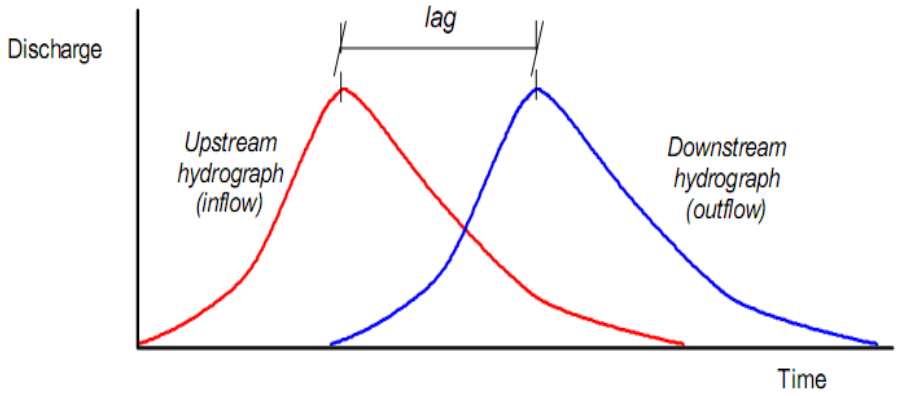


Figure II.8 : *Exemple de modèle Lag.*

II.6.4 Le modèle de l'onde cinématique

Ce modèle est basé sur une approche différences finies de l'équation de continuité et une approche simplifiée de l'équation du mouvement. Cette approche est décrite en détail dans la section précédente. Les informations nécessaires à ce modèle sont :

- Le type de la section du cours d'eau : trapézoïdale, rectangulaire ou circulaire ;
- Les dimensions principales : la base de la section du canal, le diamètre de la conduite ;
- Pente des berges ;
- La longueur du bief ;
- La pente de ligne d'énergie ;
- Coefficient de la rugosité de Manning (n).

II.6.5 Le modèle Muskingum-Cunge

Le modèle Muskingum est facile à utiliser mais emploie des paramètres qui n'ont pas de signification physique et qui sont donc difficiles à évaluer. De plus ce modèle est basé sur des approximations qui s'avèrent souvent fausses. Le modèle de Muskingum-Cunge évite ces erreurs. Il est basé sur l'équation de continuité incluant un débit latéral et sur la forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial X}=q \qquad S_f=S_0-\frac{\partial Y}{\partial X} \tag{II -33}$$

En combinant ces deux équations, on obtient alors l'équation de diffusion convection de Miller et Cunge, 1975.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+c\frac{\partial Q}{\partial X}=\mu\frac{\partial^2 Q}{\partial X^2}+cq_1 \tag{II -34}$$

Avec,

c : La célérité ;

μ : La diffusivité hydraulique définie par :

$$c=\frac{\partial Q}{\partial X} \qquad \mu=\frac{Q}{2BS_0} \tag{II -35}$$

L'approximation en différences finies des dérivées partielles permet d'obtenir l'équation suivante :

$$O_t=C_1I_{t-1}+C_2I_t+C_3O_{t-1}+C_4\left(q_1\Delta X\right) \tag{II -36}$$

Avec ;

$$C_1=\frac{\frac{\Delta t}{K}+2X}{\frac{\Delta t}{K}+2\left(1-X\right)} \tag{II -37}$$

$$C_2=\frac{\frac{\Delta t}{K}-2X}{\frac{\Delta t}{K}+2\left(1-X\right)} \tag{II -38}$$

$$C_3=\frac{-\frac{\Delta t}{K}+2\left(1-X\right)}{\frac{\Delta t}{K}+2\left(1-X\right)} \tag{II -39}$$

$$C_4=\frac{2\frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K}+2\left(1-X\right)} \tag{II -40}$$

$$X = 0.5\left(1 - \frac{Q}{BS_0C\Delta X}\right) \qquad K = \frac{\Delta X}{c} \qquad \text{(II -41)}$$

C, Q, B et les quatre paramètres C_i sont des variables. Ils sont recalculés à chaque pas de temps et d'espace par HEC-HMS.

En conclusion, pour les différents paramètres des modèles cités ci-avant, le tableau II.5 présente les valeurs minimales et maximales des différents modèles acceptées par le logiciel HEC-HMS.

Tableau II.5: *Valeurs minimales et maximales des différents modèles incluent dans le modèle HEC HMS.*

Modèle	Paramètres	Minimum	Maximum
Perte initiale et à taux constant	Perte initiale Taux de perte constant	0 mm 0mm/h	500mm 300mm/h
Modèle de perte SCS	Rétention initiale Curve Number (CN)	0 mm 1	500 mm 100
Modèle de perte de GREEN et AMPT	Déficit hydrique Conductivité hydraulique Wetting front suction	0 0 mm/h 0 mm	1 250mm/h 1000 mm
Hydrographe unitaire de CLARK	Temps de concentration Coefficient de stockage	h 0 h	500 h 150 h
Hydrographe unitaire de SNYDER	Décalage Cp	0.1 h 0.1	500 h 1.0
Hydrographe unitaire du SCS	Décalage	0.1 min	30 000min
Onde cinématique	Coefficient de Manning (n)	0	1
Ecoulement souterrain	Ecoulement souterrain initial Facteur de récession Rapport débit/pic max	0 m^3/s 0.000011 0	100 000m^3/s - 1
Modèle de Muskingum	K X	0.1 h 0	150h 0.5

CHAPITRE III
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BV

III.1 Introduction

Le bassin versant de l'oued Mina objet de cette étude, fait partie d'un ensemble plus vaste qui est le bassin de l'Oued Chellif. Il se trouve à environ quelque 300 km à l'Ouest d'Alger. Cette région est caractérisée par un climat de type méditerranéen avec des pluies plus au moins torrentielles, irrégulières, engendrant en des temps de concentrations courts des crues fortes, rapides et chargées dont les conséquences ont des répercussions directes à l'aval par le risque d'inondation de la ville de Relizane et des plaines et aussi par l'envasement du barrage de Sidi M'hamed BenAouda et en amont par des pertes de sols et des ravinements intenses.

III.2 Situation géographique

Le bassin versant de l'Oued Mina s'étend sur 6131 km^2 dans la partie occidentale de l'Atlas Tellien (figure III.1). II est situé entre 0°10' et l°10' de longitude Est, et entre 34°40' et 35°40' de latitude Nord. II s'allonge sur 90 km sur les monts de Frenda au Sud et ceux de la Mina au Nord et sur 50 km de l'Ouest à l'Est entre les monts des Beni-Chougrane et le massif de l'Ouarsenis.

L'Oued Mina prend sa source dans les monts de Frenda pour confluer avec l'Oued Chélif après un parcours de 135 km. Deux barrages ont été construits sur cet Oued; Bakhadda, mis en service en 1940 sur le cours supérieur qui draine un sous-bassin de 1275 km^2 et Es-Saada en amont de Sidi M'hamed BenAouda avec une capacité de 237 millions de mètres cubes. Ce dernier doit répondre à des besoins d'approvisionnement en eau potable de la ville de Relizane et à des besoins agricoles par le développement de l'irrigation sur un périmètre de 23 mille hectares situé dans la plaine de la Mina et du Bas Chélif.

Durant ce parcours, l'oued Mina reçoit quelques affluents : l'Oued Haddad, l'Oued El Abd, l'Oued Taht et l'Oued Medroussa (figure III.1).

III.3 Situation socio-économique

Dans une région où habite une population dont la forte majorité est occupée dans le secteur agricole (1993 : 66,4%), son importance peut déjà donner une première indication concernant les raisons de l'exploitation qui surcharge la capacité du sol [Achite, Meddi05].

Dans ce cas, c'est la variable socio-économique qu'il faut modifier dans un système écologique approprié pour maintenir l'équilibre entre le défrichement et la formation naturelle du sol.

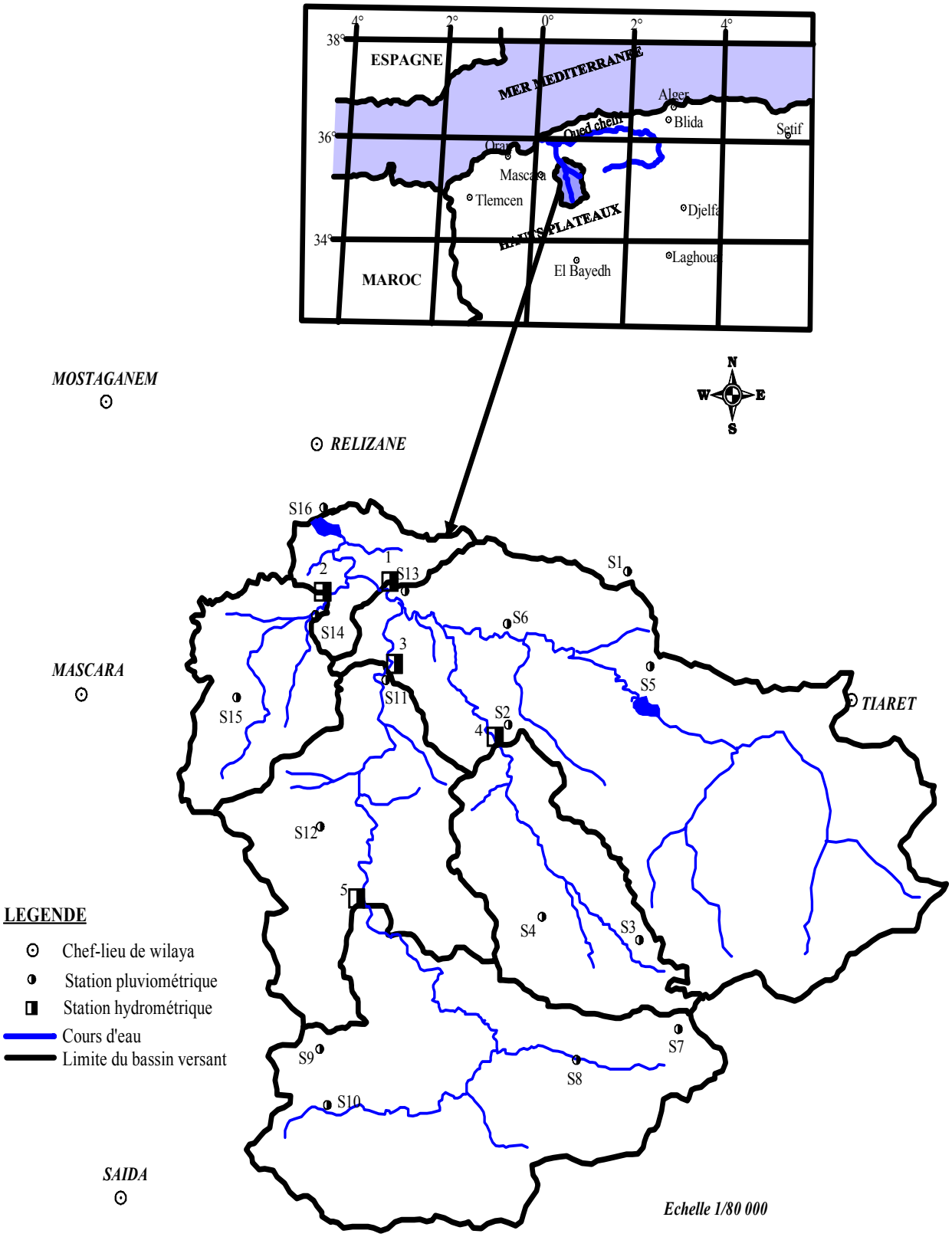


Figure III.1 : *Situation du basin versant de l'Oued Mina.*

III.4 Caractéristiques de forme

La forme d'un bassin versant est la configuration géométrique telle qu'elle est projetée sur un plan horizontal. Elle influence directement le temps de réponse du bassin, c'est-à-dire sur le temps de parcours des eaux à travers le réseau de drainage et par conséquent influe sur d'hydrogramme [Llamas93].

III.4.1 Superficie du bassin versant

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations, il est donc tout à fait logique que ce paramètre soit le premier à rechercher. Cette surface peut être déterminée par planimétrie sur des cartes d'échelle convenable.

III.4.2 Rectangle équivalent

Un autre paramètre permet de comparer les bassins versant entre eux, c'est le rectangle équivalent. C'est une transformation purement géométrique où la forme du bassin est rendue comme état celle d'un rectangle ayant même superficie que le bassin versant. La largeur et la longueur de ce rectangle sont déterminées en utilisant les relations suivantes, avec la condition de *Kc* supérieur à 1,12 :

$$l_R = \frac{K_C\sqrt{A}}{1.12}\left[1-\sqrt{1-\left(\frac{1.12}{K_C}\right)^2}\right] \quad \text{(III-1)}$$

$$L_R = \frac{K_C\sqrt{A}}{1.12}\left[1+\sqrt{1-\left(\frac{1.12}{K_C}\right)^2}\right] \quad \text{(III-2)}$$

Où :

L_R : La longueur du rectangle équivalent ;

l_R : La largeur du rectangle équivalent ;

A : La superficie du bassin versant ;

K_C : Le coefficient de compacité ou de Gravelius ; déterminé par l'équation suivante :

$$K_C = 0.28\frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{(III-3)}$$

Avec ;

P : représente le périmètre du bassin versant.

Nous, nous intéresserons dans cette partie particulièrement aux unités hydrologiques contrôlées par des stations de jaugeage. Les valeurs de l'indice de compacité montrent que les bassins versants des oueds ont des formes compactes (Kc < 1,3), Outre ces données extrêmes toutes les autres valeurs sont très rapprochées, les formes des bassins correspondants étant donc plus ou moins semblables.

Les sous bassins de la Mina présentent, dans l'ensemble une forme assez ramassée, favorisant à priori, le temps de concentration des eaux de ruissellement. Mais l'influence du relief est encore plus déterminante.

III.5 Etude du relief

III.5.1 Courbe hypsométrique

La plupart des phénomènes hydrologiques et climatologiques sont directement liés à l'altitude. La courbe hypsométrique est utilisée pour représenter la répartition des altitudes dans le bassin. La forme de cette courbe donne une certaine idée sur les pentes du bassin et leur variation en altitude, et permet d'apprécier le potentiel érosif du bassin versant.

Le réseau hydrographique désigne l'ensemble des canaux de drainage naturels, permanents ou temporaire, par lesquels s'écoulent les eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines. La répartition hypsométrique du bassin versant de la Mina est représentée dans le tableau III.1 et la figure III.2.

Tableau III.1 : *Répartition hypsométrique des bassins.*

Bassin versant	Altitudes(m)	Superficie Partielles		Superficie cumulée		Altitudes moyennes (m)
		(km^2)	(%)	(km^2)	(%)	
Oued Mina à Oued el Abtal	1339-l200	48,3	0,91	48,3	0,91	1269,5
	1200-1000	1369,7	25,71	1417,9	26,62	1100
	1000-800	1407,7	26,35	2825,7	52,97	900
	800-600	1472,2	27,15	4297,9	80,12	700
	600-400	780,9	14,66	5078,8	94,78	500
	400-205	278,2	5,22	5357,0	100	302,5
Superficie Total		**5357**				
Oued Haddad à Sidi AEK Djilali	1369,7	08	1,66	7,8	1,66	1080
	1407,7	71	15,17	79,1	16,83	800
	1472,2	138	29,4	217,3	46,23	700
	780,9	189	40,13	405,9	86,36	500
	278,2	64	13,64	470	100	312,5
Superficie Total		**470**				
Oued Mina au droit du barrage de SMBA	1339-1200	37,5	0,61	37,5	0,61	1269,5
	1200- 1000	1201,2	19,6	1238,7	20,21	1100
	1000-800	1649,1	26,9	2887,8	47,11	900
	800-600	1338,8	21,84	4226,6	68,95	700
	600-400	1353,8	22,08	5580,5	91,03	500
	400-200	506,7	8,26	6087,2	99,29	300
	200-145	43,8	0,71	6131,0	100	172,25
Superficie Total		**6131**				

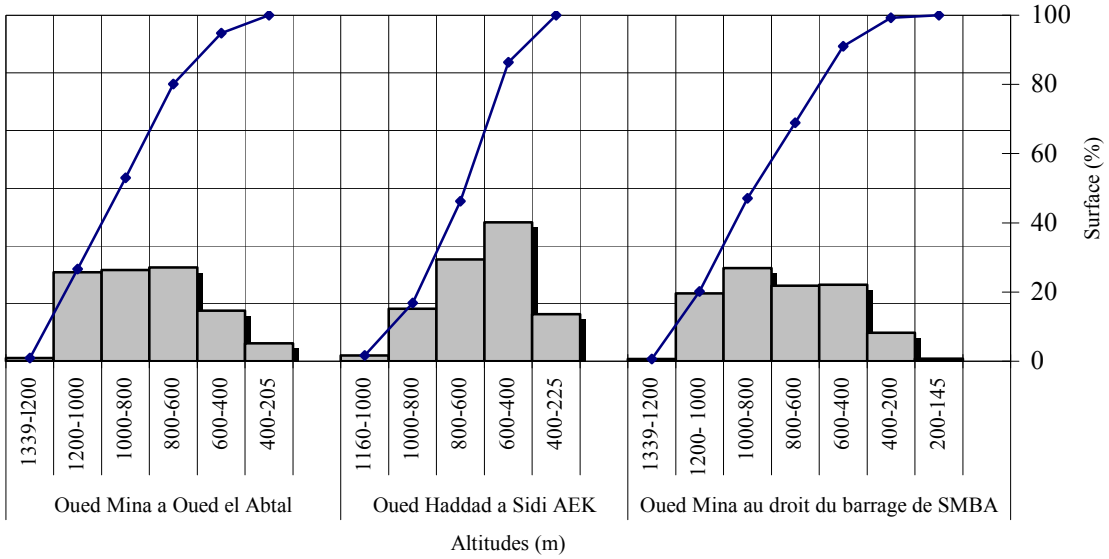


Figure III.2 : *Courbes hypsométriques des Bassins versants de la Mina.*

III.5.2 Altitudes caractéristiques

Certaines altitudes sont caractéristiques pour un bassin versant. Elles donnent des indications supplémentaires sur le potentiel érosif du bassin, et sont représentés par **:**

- L'altitude moyenne définie par l'altitude correspondant à la moyenne de la courbe hypsométrique.
- L'altitude la plus fréquente définie par le maximum de la courbe des fréquences altimétriques.
- L'altitude de fréquence ½ définie par l'altitude correspondante au point d'abscisse ½ de la courbe des fréquences altimétriques.

III.5.3 Indices des pentes

Le relief d'un bassin est caractérisé par des indices influençant le régime hydrologique, représenté par :

- L'indice de pente donné par :

$$I_P = \frac{1}{\sqrt{L_R}} \sum_{i=1}^{n} \sqrt{B_i \left(a - a_{i-1}\right)} \qquad \text{(III-4)}$$

Où :

L_R : représente la longueur du rectangle équivalent ;

B_i : La fraction en pourcent de la surface comprise entre les altitudes a_{i-1} et a_i

- L'indice de pente global I_g caractérisant la pente d'un bassin et déterminé à partir la relation suivante :

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_R} \qquad \text{(III-5)}$$

Où :

$H_{95\%}$ et $H_{5\%}$: représente l'altitude correspondant respectivement à 95% et 5% de la surface totale du bassin.

- L'indice de pente moyenne I_m utilisé dans les mêmes conditions que le précédent. Il est donné par :

$$I_m = \frac{D_{\max}}{L} \quad \text{(III-6)}$$

Où :

$D_{\max}$: représente la différence entre les altitudes extrêmes du bassin versant.

- Le dénivelé spécifique D_S servant à la classification des bassins en fonction de leurs reliefs. Cette dénivelée est donnée par :

$$D_S = I_g \sqrt{A} \quad \text{(III-7)}$$

Où :

A : est la surface du bassin versant

III.5.4 La topographie

Le bassin est situé entre le massif de l'Ouarsenis et les Beni-Chougrane, les monts de la Mina sont formés en grande partie de chaînons et de collines qui relèvent progressivement du nord-ouest au sud-est. Le relief est dans l'ensemble aéré et peu élevé.

La topographie est accidentée, les versants sont fortement entaillés par un réseau de ravins généralement dense et digité, aux parois raides. Les Monts de la Mina présentent des caractères ressemblant avec des régions voisines de l'Atlas tellien occidental [Achite, Meddi05].

En outre, l'inclinaison du relief est un facteur important en ce qui concerne son aptitude à l'érosion. Cependant, le degré d'inclinaison dépend de la roche en place, des sols, du ravinement, des pluies et de l'activité de l'homme [Achite, Meddi05].

Selon [Achite, Meddi05], quatre types de pentes composent le bassin versant de l'oued Mina. Cette classification montre la prépondérance des classes inférieures à 12,5%, soit 95% de la surface du bassin. Le tableau III.2 illustre les différentes classes de pentes du bassin versant de l'oued Mina.

Tableau III.2 : *Classes de pentes dans le bassin versant de l'oued Mina.*

Classes	Superficie (km^2)	%
P<3	3347,53	54,6
3<P< 12	2483,06	40,5
12< P< 25	288,16	4,7
P>25	6,13	0,1

Cependant, cette classification nous permet de distinguer :

- **Un relief relativement plat :** Cette partie se trouve surtout dans les vallées des oueds, dans la partie ouest de la zone des marnes. La plupart de ces terrains ont une pente inférieure à 3%, ce qui induit un faible danger d'érosion dans un système d'utilisation normale du sol.

- **Un relief relativement accidenté :** Une partie de ce relief se trouve dans la zone des marnes occupant une superficie de 19% pour des pentes variant entre 3% et 12%.

- **Un relief à pente moyenne :** à forte Répartition surtout sur les montagnes du jurassique. Ce relief recouvert de végétation résiste relativement bien à l'érosion dont les pentes sont comprises entre 12% et 25%.

- **Un relief accidenté:** Se trouvant surtout au milieu de la zone des marnes et représente 42% de la superficie de la zone pilote de Taassalet avec une pente supérieure à 25%.

III.5.4.1 Profil en long des Oueds

Le profil en long de l'Oued Mina est tracé à partir des cartes topographiques au 1/200000ème. Les courbes des profils longitudinaux de ses principaux affluents (Oued Mina, Oued Haddad, Oued Abd et Oued Taht) sont établies sur le même graphique (figure III.3).

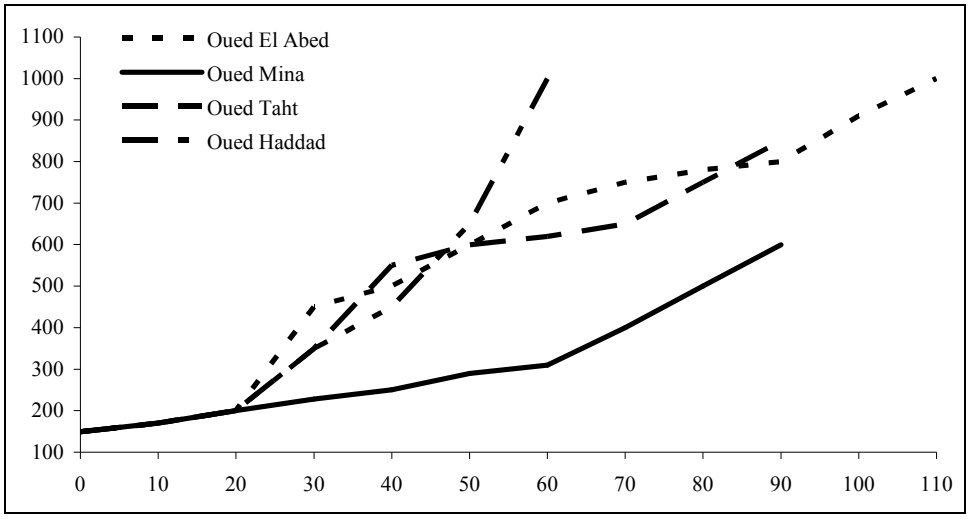


Figure III.3 : *Profil en long de L'Oued Mina et ces affluents.*

Nous notons les points suivants :

- L'Oued Mina est long de 135 Km, il a une concavité marquée. La pente, faible dans les tronçons inférieurs (0,27%) atteint 0,86% en amont de Djilali Ben Amar.

- L'Oued Haddad a une pente moyenne de 0,89% sur une longueur de 47 Km. le profil en long montre un changement de pente localisé approximativement à El-Hachem. A l'aval de cette localité, la pente est de 0,36%, et atteint 2,5% dans les tronçons à l'amont.

- Les Oueds Abd et Taht s'allongent respectivement sur 118 et 53 Km avec des pentes moyennes de 0,8% et 1,1%. Ces affluents ont une concavité peu marquée. Ils ont à l'amont de leurs confluences avec l'Oued Mina des formes convexes. Ce qui traduit une évolution moins avancée et une tendance au creusement de leurs lits

III.6 Etude du réseau hydrographique

Le bassin versant de l'oued Mina comprend six sous-bassins de taille variable, drainés par les oueds : Tabt, Medroussa, Haddad, Abd et l'oued Mina lui-même, comme le montre la figure III.4.

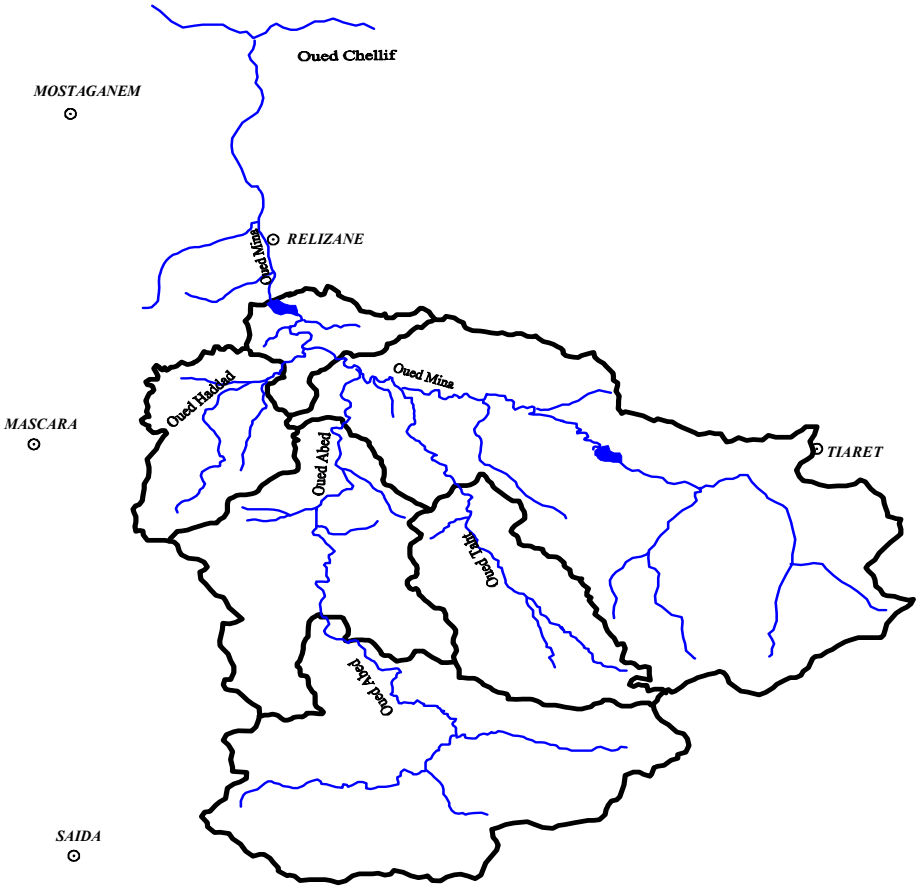


Figure III.4 : *Le réseau hydrographique basin versant de l'Oued Mina.*

Le cours d'eau supérieur de l'oued est limité par le barrage réservoir de Bakhada. De la à celui de Sidi M'hamed BenAouda, l'Oued ne draine directement que la partie Nord-Oriental du bassin versant. Le long de son parcours Sud-Est/Nord-Ouest, il reçoit les Oueds Medroussa, Taht, Abd, et Haddad qui drainent les secteurs Sud-Est, Sud et Nord-Ouest du bassin versant. Cependant, l'oued Medroussa draine la partie orientale du bassin versant, se jetant dans le cours supérieur de l'Oued Mina. C'est une zone restreinte, mais pluvieuse, atteignant plus de 1000m d'altitude. En outre, l'oued Taht draine le Sud-Est du bassin versant. Il prend sa source dans les montagnes de Frenda qui dépassent aussi les 1000m d'altitude, cependant, il est jaugé à la station de Kef-Mahboula [Achite, Meddi05].

L'Oued Abd, l'affluent principal, résulte de la confluence des Oueds Chiba et Dez. La longueur totale de son cours est d'environ 118 km. L'Oued Haddad roule les eaux des cours d'eaux Baloul, Rekada et Medjaref. Il a sa source dans le Djebel Bazita à environ 1000m d'altitude. Il draine de sa part le Nord-Ouest du bassin; on le jauge à la station de Sidi Abdelkader Djilali.

III.6.1 Densité de drainage

La densité de drainage (D_d), exprimée en km/km^2, est définie pour un bassin donné par la relation suivante :

$$D_d = \frac{\sum_1^n L_x}{A} \qquad \text{(III-8)}$$

Avec :

L_x : représente la longueur de la rivière d'ordre x (km) ;

$\sum_1^n L_x$: Longueur totale du réseau hydrographique ;

A : représente la superficie du bassin versant.

III.6.2 Rapport de confluence

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

$$R_c = \frac{N_X}{N_{X+1}} \qquad \text{(III-9)}$$

III.6.3 Rapport des longueurs

C'est le rapport entre la longueur moyenne des talwegs d'ordre ($x+1$) par celle des talwegs d'ordre immédiatement inférieur (x). Ce rapport est donné par la relation suivante :

$$R_L = \frac{L_{X+1}}{L_X} \qquad \text{(III-10)}$$

III.6.4 coefficient de torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois du nombre de talwegs élémentaires d'ordre 1 et la densité de drainage. Il est donné par :

$$C_r = D_d F_1 \qquad \text{(III-11)}$$

Où :

D_d : est la densité de drainage (km/km^2) ;

F_1 : est la densité des talwegs élémentaires déterminée par :

$$F_1 = \frac{N_1}{A} \qquad \text{(III-12)}$$

Où :

N_1 : est le nombre de cours d'eau d'ordre 1 ;

A : est la superficie du bassin versant (km^2).

III.6.5 Temps de concentration

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

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\left(H_{moy} - H_{min}\right)^{0.5}} \quad \text{(III-13)}$$

Où,

T_c : temps de concentration (heures) ;
A : superficie du bassin (km2) ;
L : longueur du thalweg principal (km) ;
H_{moy} : altitude moyenne (m) ;
H_{min} : altitude minimale (m).

Tableau III.3 : *Caractéristiques physiographiques des bassins versants de la Mina.*

Paramètres			Oued Mina à Oued El-Abtal	Oued Haddad à Sidi AEK Djilali	Bassin au droit du barrage de SMBA
Caractéristiques de forme	A	Km^2	5373	470	6131
	P	Km	335	100	352
	K_c	-	1,28	1,29	1,26
	R_f	-	0,51	0,48	1,91
	K_f	-	0,77	0,59	0,69
	R_e	-	0,81	0,76	1,5
	R_c	-	0,59	0,71	0,62
	L	Km	124,14	37,36	128,44
	l	Km	43,15	12,58	47,73
Caractéristiques topographique	H_{max}	m	1339	1160	1339
	H_{min}	m	205	225	145
	H_{moy}	m	810	588	755
	$H_{5\%}$	m	1243	1018	1232
	$H_{95\%}$	m	492	381	404
	$H_{50\%}$	m	923	681	874
	D	m	1134	935	1194
	D_s	m	688	542	728
	I_g	%	25,59	46,05	24,63
	I_p	%	1,08	2,5	1,04
	I_m	%	50,1	46	56,6
Caractéristiques hydrographique	$\sum_{i=1}^{N} L_i$	Km	23250	1150	28448
	D_d	Km/km^2	4,34	2,44	4,84
	C_t	-	15,01	5,4	18,3
	L_{cp}	Km	90	47	135
	T_c *(Giandotti)*	Heures	21,97	10, 18	25,36

III.7 La végétation

C'est un facteur important et conditionnel du phénomène de l'érosion. Son influence est marquée surtout à travers le degré de couverture du sol. L'analyse de la répartition géographique des formations végétales, leurs diversités et leur répartition sur le bassin versant de l'Oued Mina montrant deux parties nettement distinctes [Achite, Meddi05], à savoir :

- La zone du Nord purement marneuse fortement érodée et dépourvue de végétation dans la plupart des terres; à l'exception de quelques îlots de reboisement de Tassaalat et des plantations d'arbres fruitières dans la vallée. Les sols de cette partie du bassin versant sont généralement nus, surtout sur les terrains rocheux. Les cultures annuelles intensives et les champs résiduels se retrouvent sur les collines et les zones rocheuses l'érosion hydrique se trouve son champ de développement, car la discontinuité du l'absence totale de la végétation n'a aucune efficacité vis-à-vis l'ampleur morphodynamique due à la faible

- La zone jurassique du sud est moins érodée et près de 50% de sa surface est recouverte par une végétation de densité variable. Les formations végétales existantes sur cette zone sont :

    - Les forêts, représentant 4,91%, sont dominées par une grande partie de jeunes plantations de pin d'Alep.

    - Les maquis représentent environ 30,56 % de l'ensemble du bassin versant. Il existe sous deux formes : maquis avec Pistacia et maquis avec Tetraclinis.

    - La végétation herbacée En plus de la végétation naturelle, les céréales sont les principales cultures annuelles appliquées.

Cependant, la pression de l'homme, le surpâturage et les conditions climatiques défavorables de la dernière décennie est les causes principales d'une dégradation accélérée de la végétation et de l'intensification de l'érosion Le tableau III.4 montre la répartition des différentes espèces végétales dans le bassin versant de la Mina.

Tableau III.4 : *Les différentes espèces végétales dans le bassin versant de l'oued Mina.*

Désignation	A (Km2)	%
Zones irriguées plantation d'arbres fruitiers et cultures maraîchères.	344,6	5,62
Cultures annuelles rotation de cultures céréalières et de légumineux.	407,7	6,65
cultures annuelles et cultures permanentes mosaïque de cultures annuelles, arbres fruitiers et viticultures.	67,4	1,10
Cultures de céréales Cultures de céréales seulement.	251,4	4,10
Agricultures et économie pastorale mosaïque de cultures annuelles, d'arbres fruitiers et de pâturage.	117,7	1,92
Cultures annuelles et pâturage en zone rocheuse Mosaïque de cultures sur les sols plus profonds et surpâturage de steppe d'artimisia sur roches et éboulis.	595,9	9,72
Cultures de céréales et pâturages d'Artemisia rocheux mosaïque de cultures sur les sols plus profonds et surpâturage de steppe d'artimisia sur roches et éboulis	226,2	3,69
Cultures annuelles et maquis dégradé maquis surpaturé, arbustes isolés entre les champs	76,0	1,24
Champs résiduels sur les collines Champs avec des cultures annuelles sur les sommets et les pentes moins de 10%, pentes raides avec des indices de surpâturages, couverture végétale sporadique.	239,1	3,90
Champs résiduels sur les ravines Cultures annuelles sur les petits fonds plats entre les ravines. Pentes surpâturage et avec des indices de surpâturage.	265,5	4,33
Zones ravinées Pentes instables et surpaturées, sols nus.	201,7	3,29
Pâturage rocheux Fort surpâturage sur les roches, les éboulis et les croûtes calcaires. Couverture végétale discontinue	772,5	12,60
Formations de dunes Végétation initiale des dunes tertiaires réactivées	17,8	0,29
Maquis avec pistacia et Olea Haut de 3 à 5 m maquis, dance avec une grande diversité	200,5	3,27
Maquis avec Tetraclinis Formation arbustive discontinue, indices de surpâturage dans la formation herbeuse	461,7	7,53
Maquis avec Quercus et Pisticia Maquis avec des indices de dégradation	525,4	8,57
Maquis avec juniperus et artimisia Formation d'arbustes discontinue de juniperus, arbustes sporadiques de quercus, artimisia	374,0	6,13
Maquis avec tetraclinis stipia Formation dégradée, formation discontinue	310,2	5,06
Formation des roches et des éboulis Buissons isolent surpatures, ne dépassant pas 20cm, formation herbeuse discontinue	236,7	3,86
Steppe d'artimisia et de stipia Couverture végétales discontinue	126,3	2,06
Foret de Pinus Forêt dense de pinus avec formation arbustive de Quercus	81,5	1,33
Reboisement récent, couverture végétale discontinue	219,5	3,58
Eau libre	11,6	0,19
TOTAL	6131	**100%**

III.8 Lithologie

Le bassin versant de l'oued Mina est caractérisé du point de vue géologique par :

- la prépondérance du jurassique au Nord et â l'Ouest.

- les restes d'un paysage crétacé avec des roches calcaires et grès calcaires. Les couches inférieures du jurassique supérieur constitué les marnes et l'occasion de gisement alternant avec des bancs de roches carboniques. A laquelle se joignent les marnes tertiaires au Nord qui contiennent localement des bancs de calcaire et de grès-calcaire.

Par contre, au centre et à l'ouest de la partie septentrionale, aucune couche protectrice ne s'oppose au processus de l'érosion. L'absence de ces facteurs géologiques capables d'envoyer l'érosion faite que la partie méridionale située à peu près au sud du 35°20' de lattitude est soumise à une érosion moins forte.

Le long de cette lattitude, il y a un soulèvement de terrain qui marque le début de la formation jurassique sujette à l'érosion, mais là un niveau stable d'érosion a été atteint. Cette érosion s'intensifie quand se combine un relief accidenté et la présence de marnes dans lesquelles il y a des intercalations de quelques bancs de carbonate [Achite, Meddi05].

I1 ressort du tableau III.5, que la majorité des sols du bassin sont constitués de marnes et d'argiles imperméables.

Tableau III.5 : *Les différentes formations lithologiques du bassin versant de la Mina.*

DESIGNATION	PERIODE	ERE	A (Km^2)	%
Sables fins rouges et jaune clair, dunes	Pliocène	TERTIAIRE	65,6	1,07
Grés sableux avec en partie un peu de cimentation carbonatée, calcaires sableux et croûtes pouvant atteindre 1 m d'épaisseur.	Pliocène		384,4	6,27
Grés bruns à grains fins d'origine marine avec cimentation carbonatée -alternant avec des couches de grés marins et des calcaires, en partie conglomérat.	Miocène Sup.		225,0	3,67
Marnes sableux alternant en partie avec des bans de grés peu importants.	Miocène Sup.		90,7	1,48
Dépôts de carbonates et de grés en partie sous forme de conglomérats et de brèches et par endroits de minces plaques de grés et de marnes.	Miocène inf.		282,0	4,60
marnes avec des intercalations de minces plaques de grés et de bancs de limon.	Miocène inf		211,5	3,45
Bancs de grés et de carbonate important, avec de rares intercalations de couches de marnes.	Oligocène		87,1	1,42
marnes verts clair avec sporadiquement de faibles bancs de grés et de limon en partie de marnes sableuses foncées.	Oligocène		291,2	4,75
Calcaires fossilisés surtout d'origine marine et calcaires à nummulites, en partie conglomérat bien ronds, grés mal assortis avec cimentation carbonatée	Eocène Moy.		22,7	0,37
calcaires à foraminifères, grés marins en alternance avec des marnes colorées.	Eocène Inf.		84,0	1,37
Marnes avec intercalations de bancs peu importants de carbonates et de grés.	Crétacé Sup.	CRETACE	12,3	0,20
Bonne couche de grés à grains fins jaune rougeâtre.	Crétacé Sup.		64,4	1,05
Importante quantité de calcaires gris et dolomies.	Crétacé Sup.		61,3	1,00
Marnes claires à verdâtres, pierres limoneux.	Crétacé lnf.		119,6	1,95
Calcaires en partie sableux et par endroits stromatolithe.	Crétacé lnf.		86,4	1,41
Calcaires et dolomies par endroits bien déposées avec des intercalations de marnes en partie de conglomérat et de calcaires sableux.	Jurassique Sup.	JURASSIQUE	946,0	15,43
Calcaires et dolomies alternant en général avec des marnes claires et par endroits calcaires sableux et des marnes.	Jurassique Sup.		507,0	8,27
Dominances des marnes calcaires, grises et vertes alternant avec de faibles bancs de calcaires et de dolomies.	Jurassique Sup.		1348,8	22,0
Importante quantité de calcaires gris en partie et dolomies à gros grains, surfaces karstiques.	Jurassique Moy.		920,9	15,02
Importante quantité de calcaires gris et dolomies, surfaces karstiques avec éboulis.	Jurassique Moy		284,5	4,64
Alternance de grés quartziques, dolomies, roches limoneux et marnes.	Jurassique Tuf		12,9	0,21
Grés durs et dolomies.	Trias	TRIAS	9,8	0,16
Eau libre.			11,6	0,19
TOTAL.			**6131**	**100**

CHAPITRE IV
HYDROCLIMATOLOGIE
DU BASSIN VERSANT

IV.1 Introduction

Plus encore que les facteurs morphologiques, lithologiques, …, les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau [Achite, Meddi05]. Ce sont les précipitations, surtout liquides, qui constituent le facteur essentiel intervenant par :

- leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale,
- leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques,
- leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices des crues.

Ces différents aspects des précipitations sont plus ou moins modifiés selon l'effet combiné des autres paramètres physiques et climatiques (températures et évapotranspiration). Mais, contrairement aux paramètres proprement physiques permettent une interprétation seulement qualitative du comportement hydrologique des bassins, les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large.

L'équipement climatologique du bassin est cependant loin d'être satisfaisant. Le manque de documentation est flagrant, les longues séries d'observation sont rares. Toutefois, nous allons tenter de faire ressortir les caractères généraux du climat méditerranéen du bassin, ses nuances spatiales et ses irrégularités temporelles à partir de la documentation disponible. Les séries pluviométriques qui présentaient des lacunes ont été largement homogénéisées avant leur utilisation; cela est essentiel pour arriver à une série longue et continue. Il reste qu'en dépit de données limitées, il est possible de saisir l'importance et la variabilité des précipitations sur l'alimentation de l'oued.

Le climat est la moyenne, sur un certain nombre d'années, des variations quotidiennes de la température, des précipitations, des vents et d'autres conditions atmosphériques qui caractérisent un point quelconque de la surface de la terre. Il englobe aussi la variabilité de chacun de ses éléments, comme la température et les précipitations, ainsi que la fréquence des divers phénomènes météorologiques. Mais le climat étant un phénomène plus ou moins périodique, il est indispensable de définir la durée durant laquelle on étudie les éléments atmosphériques.

IV.2 Climatologie

Le climat du la région, se caractérise par des étés chauds et secs peu orageux et des hivers doux et humides et peut être appelé méditerranéen semi-aride [Achite, Meddi05]. Du point de vue climatique, la partie septentrionale de la région d'étude peut être rangée dans les régions méditerranéennes, à part quelques situations spécifiques comme les hauts plateaux méridionaux montrent un caractère aride.

IV.2.1 Température

Le bassin versant de l'oued Mina est caractérisé par une température sèche et chaude de mai â septembre et par une température relativement humide d'octobre à avril figure IV.5. A titre d'exemple le tableau IV.6 illustre les valeurs de températures enregistrées à la station de Matmeur qui s'éloignent à quelques dizaines de km du bassin. Pour la période (1970/71 - 1999/00), la température moyenne annuelle est de 18,37 °C.

Tableau IV.1 : *Températures enregistrées à la station (°C).*

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Min	17,72	13,92	9,34	6,20	5,22	6,41	7,52	9,74	13,24	17,45	20,46	20,91
Max	31.11	25,50	20,16	16,16	15,32	17,08	19,21	21,44	25,55	30,71	35,04	35.37
Moy	24,1J	19,61	14,75	11,18	10,29	11,74	13,37	15,59	19,50	24,08	27,75	28,14

Min : température minimale moyenne;
Max : température maximale moyenne;
Moy : température moyenne = (*M*+*m*)/2;
A : amplitude (*M*-*m*).

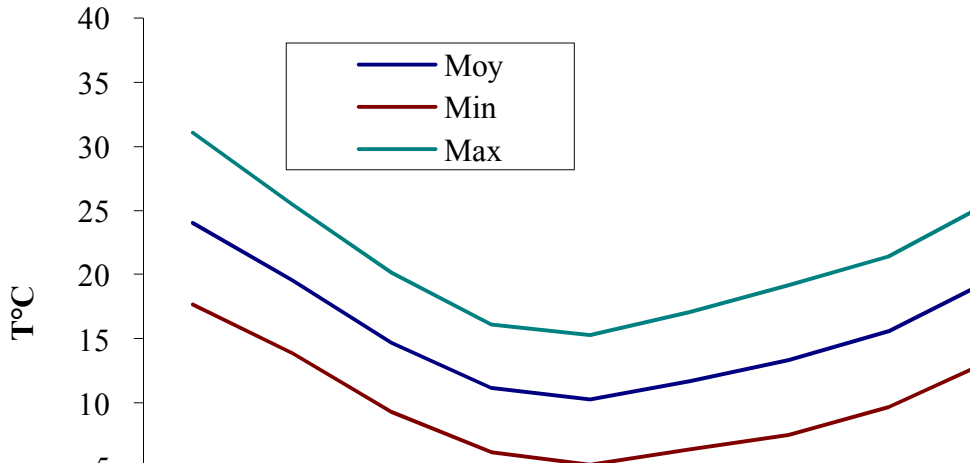


Figure IV.1 : *Température maximale, minimale et moyenne dans le bassin versant*

IV.2.2 Humidité relative

C'est la quantité de vapeur d'eau contenue dans certain volume d'air. Elle est représentée par l'humidité relative considérée comme l'un des éléments essentiels du cycle hydrologique. Les données d'humidité relatives de la station de Tiaret qui s'éloignent quelques vingtaines de Km du site du bassin sont mentionnées dans le tableau IV.7. L'humidité en hiver varie de 69 à 78% et en été 38 à 48%.

Tableau IV.2 : *Humidité relative (%) enregistrée à la station de Tiaret.*

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	O	An
Hr (%)	55	64	73	78	76	69	66	56	54	48	38	45	60,17

IV.2.3 Evapotranspiration

La combinaison des précipitations et des températures place l'ensemble du Tell occidental dans le domaine méditerranéen semi-aride. Le bilan hydrique annuel des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (FTP) est généralement négatif, ce qui limite les possibilités de boisement ainsi que les rendements céréaliers hors irrigation. La méthode de Thornthwaite d'évaluation de l'évapotranspiration potentielle est une méthode empirique qui a été établie par ajustement statistique en 1951.

Il est souvent aisé de calculer L'ETP par cette formule car elle nécessite des données climatiques relativement simples à acquérir. La formule de Thornthwaite est la suivante :

$$ETP(mm) = 16\left(10(T/I)^{a} F(\lambda)\right) \qquad \text{(IV-14)}$$

Avec :

T: Température moyenne de la période considérée en °C ;

I : Indice thermique annuel qui est la somme des 12 indices thermiques mensuels i,

Avec : $$i = (T/5)^{1.514} \qquad \text{(IV -15)}$$

a : est une fonction complexe

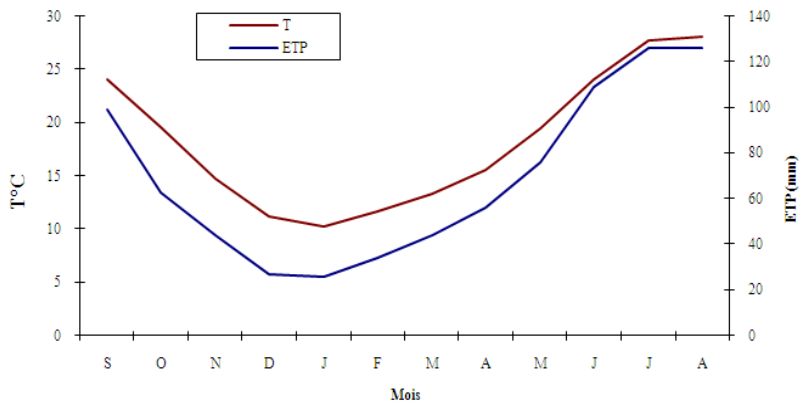


Figure IV.2 : *Température moyenne et l'évapotranspiration potentielle dans le BV.*

IV.3 Aperçu sur le climat de l'Algérie

Selon [Achite, Meddi05], le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé. L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles. Le climat de l'Atlas tellien présentera donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagne pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques.

IV.4 Etude des précipitations

Les données d'observation utilisées sont celles enregistrées au niveau de plusieurs stations climatiques présentées au tableau (IV-1). Certaines mesures s'étendent de (1970/1971 - 1999 /2000). Les périodes d'observations pour les stations pluviométriques utilisées, proches des sites étudiés, sont données au tableau (IV-1). Les stations couvrent presque tout le secteur d'étude, permettant ainsi l'estimation en tout point des valeurs des pluies de différentes fréquences de retour et des débits des ruissellements correspondants à l'exutoire des bassins versants considérés.

Tableau IV.3 : *Stations pluviométriques du bassin versant de l'Oued Mina*

N°	Station	Code	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
1	Rahouia	012702	347,85	249,15	650
2	Kef-Mehboula	013001	331,60	224,25	475
3	Frenda	013002	348,60	197,00	990
4	Ain El Haddid	013004	334,50	197,00	829
5	Mechra safa	013101	351,00	233,20	655
6	Djilali Benamar	013102	232,50	239,90	300
7	Ain Kêrmes	013201	354,55	179,85	1162
8	Rosfa	013202	330,60	179,50	960
9	Tiricine	013203	303,90	180,50	1070
10	Sidi Youcef	013204	305,60	169,10	1100
11	Ain Hamara	013302	316,45	233,12	288
12	Takhmaret	013304	316,40	203,10	655
13	Oued El Abtal	013306	318,05	261,70	354
14	Sidi AEK Djilali	013401	309,00	244,50	225
15	El Hachem	013407	299,50	233,10	417
16	Sidi M'Hamed Ben Aouda	013410	308,85	255,18	145

IV.4.1 Homogénéisation des données pluviométriques

Afin d'obtenir des séries pluviométriques homogènes [Achite, Meddi05], un comblement de lacunes s'est avéré nécessaire Le comblement des lacunes annuelles, entre stations, a été fait en utilisant la régression linéaire. Par la suite et afin de combler les séries à l'échelle mensuelle, la méthode des rapports [Achite, Meddi05] a été utilisée. Cette dernière se base sur le rapport entre les mois et les années de la station de base et celle à combler.

$$P_{mij2} = P_{mij1} * \left(P_{ani2} / P_{ani1} \right) \qquad \text{(IV-1)}$$

Avec :

P_{mij2} : pluie du mois j de l'année ide la station à combler;
P_{mij1} : pluie du mois j de l'année j de la station de base;
P_{ani2} : pluie de l'année i de la station à combler;
P_{ani1} : pluie de l'année i de la station de base.

IV.4.2 Les précipitations annuelles

On remarque des figures (IV.1) et (IV.2) la similarité (variabilité et tendance) de la pluviométrie annuelle dans les limites de la zone étudiée. Ceci nous permet de dire que la formation des pluies dans le secteur est liée à un même courant de dépressions importantes, les dépressions du courant dérivé du front. Ces perturbations atmosphériques locales sont à l'origine des précipitations observées dans les zones Sud du secteur d'étude. Ces dépressions apparaissent toutes les fois qu'une dépression appartenant au courant polaire descend du Nord de l'anticyclone des Açores sur le centre de la Péninsule Ibérique pour remonter brusquement vers l'Europe centrale. Par contre les pluies arrosant les zones Sud du secteur d'étude et dépendant des dépressions soudano-sahariennes ont une fréquence comparable sur toute l'étendue de la région et leur importance est fonction de l'altitude.

On voit que le secteur d'étude enregistre une tendance à la diminution des précipitations annuelles mais à des intensités différentes, une augmentation moindre suivant la direction Nord et plus conséquente suivant la direction Sud. Ces décroissements de la pluviométrie annuelle sont donnés ci-dessous pour les deux stations retenues :

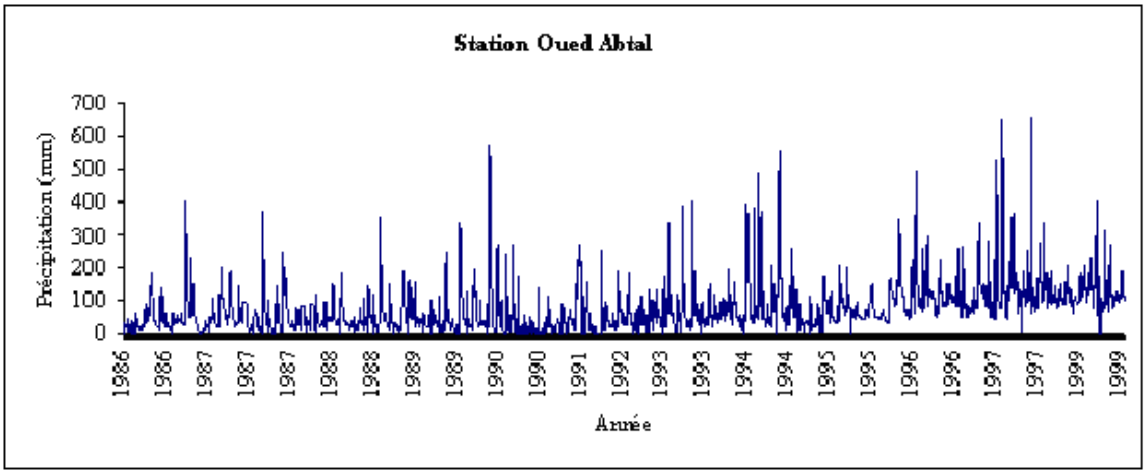


Figure IV.3 : *Variation des précipitations annuelles dans le BV de la Mina*

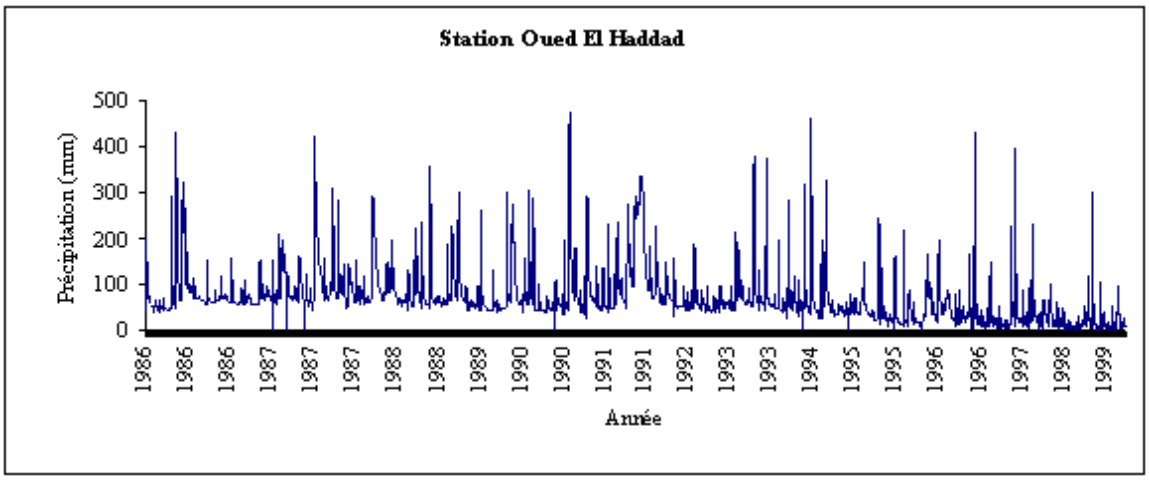


Figure IV.4 : *Variation des précipitations annuelles dans le BV de la Mina*

IV.4.3 Précipitation moyenne du bassin versant

La méthode de polygone de Theissen a permis de déterminer la précipitation moyenne sur l'ensemble du bassin versant de L'Oued Mina. Cette méthode consiste à diviser la surface du bassin en polygones, dans laquelle nous attribuons à chaque station une surface d'influence. La lame d'eau moyenne sur l'ensemble du bassin versant peut être calculée par l'expression suivante :

$$P_{moy} = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{n} S_i P_i \qquad \text{(IV-2)}$$

Avec:

P_{moy} : lame d'eau moyenne sur le bassin versant (mm) ;
P_i : lame d'eau enregistrée a la station i (mm) ;
S_i : surface d'influence de la station i (Km) ;
S : surface totale du bassin versant (Km^2).

Le tableau (IV.2) montre les surfaces d'influences et la pluviométrie moyenne annuelle de chaque station pluviométrique et la moyenne de l'ensemble de bassin versant.

Tableau IV.4 : *pluviométrie moyenne et Surfaces d'influences des stations pluviométriques*

Station	Pluies (mm)	Surface d'inf (Km^2)	Station	Pluies (mm)	Surface d'inf (Km^2)	Station	Pluies (mm)	Surface d'inf (Km^2)
1	352	68	7	305	290	13	273	135
2	332	510	8	174	560	14	245	153
3	365	240	9	278	280	15	245	460
4	287	487	10	275	330	16	228	38
5	342	210	11	251	301	**Moy**	**294**	**6131**
6	306	298	12	237	540			

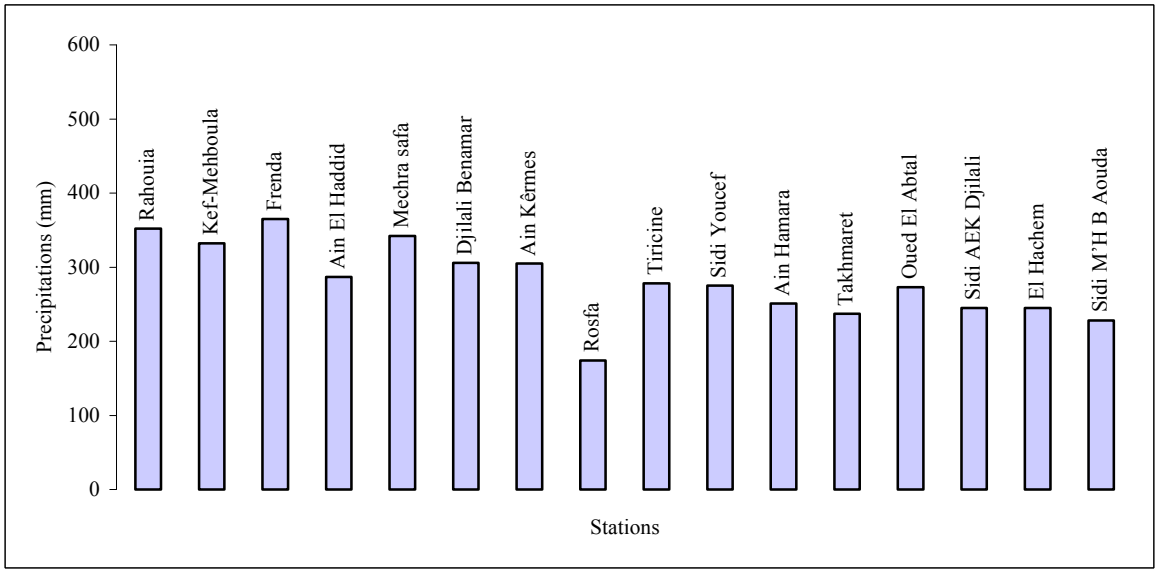


Figure IV.5 : *Précipitations moyennes annuelles de chaque station pluviométrique*

IV.4.4 Répartition saisonnière des précipitations

Pour la caractérisation du régime saisonnier, nous procédons à grouper les données des précipitations saison par saison. Ensuite nous allons faire un arrangement des ces quatre saisons par ordre décroissant de pluviosité, les quatre saisons ainsi classées forment ce qu'on appelle « indicatif saisonnier».

Selon ces indicatifs, nous remarquons que l'hiver est la saison la plus pluvieuse pour les deux stations, avec 105 mm à la station d'Oued Abtal et 92 mm à la station de Sidi AEK Djilali (figure III.5).

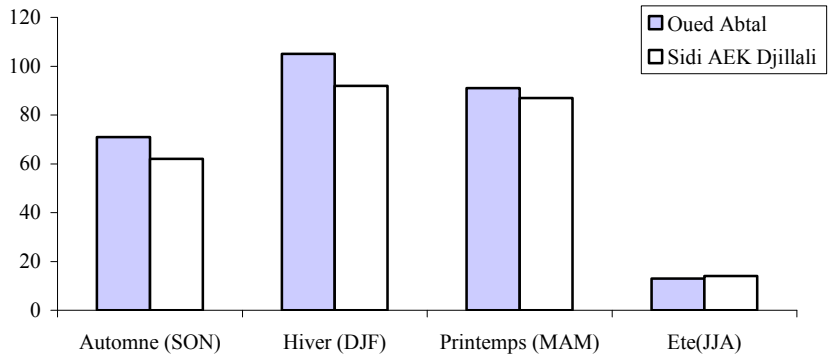
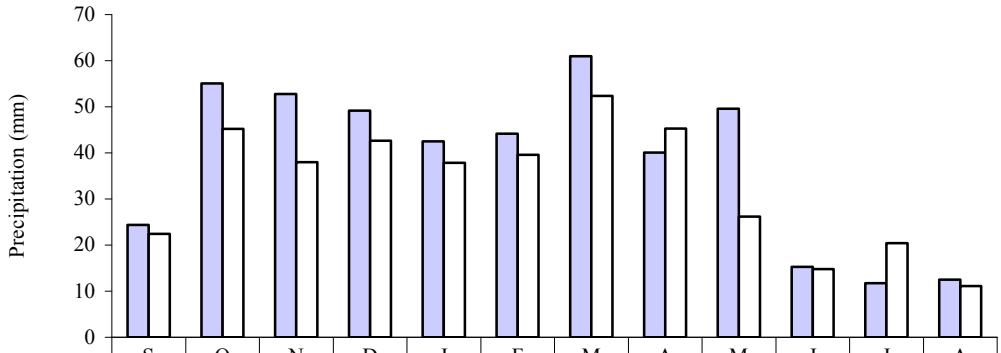


Figure IV.6 : *Réparation saisonnière des précipitations sur le BV de la Mina*

IV.4.5 Précipitations mensuelles

Quant à la variation intra-annuelle des précipitations est très forte pour des valeurs de coefficients de variations qui varient de 0,67 à 2,32 à la station d'Oued Abtal et de 0,70 à 2,33 à la station de Sidi AEK Djilali. La variabilité du climat constitue un des facteurs déterminants dans la variabilité des apports superficiels des oueds.

On peut exprimer la variation de la pluviosité par le coefficient de variation (Cv). La variabilité de la pluviosité, exprimée le plus souvent par le coefficient de variation, est inversement proportionnelle à l'aridité. Cette variabilité connaît des différences en relation avec les types de climat et les situations géographiques. La figure (IV.6) montre la distribution des précipitations mensuelles sur les 30 d'années d'observation de la station d'oued Abtal et Sidi AEK Djilali.



	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Oued Abtal	24,35	55,1	52,75	49,15	42,5	44,15	61	40,1	49,55	15,25	11,75	12,5
Sidi AEK Djillali	22,4	45,2	38	42,65	37,85	39,6	52,35	45,25	26,2	14,8	20,4	11,1

Figure IV.7 : *Paramètres statistiques des précipitations mensuelles*

Les régimes pluviométriques mensuels se distinguent par deux maximas pluviométriques, le premier en mars, provoqué par le passage de dépressions des fronts polaires. Le second intervient au début de l'hiver en décembre; ce phénomène est provoqué par le passage du front des alizés et les pluies orageuses du front qui tombent sur les reliefs. Les pluies sont localisées et souvent violentes, et la majeure partie de la pluie tombe sous forme d'averse.

IV.4.6 Les précipitations maximales journalières

IV.4.6.1 Données utilisées

On a utilisé les données des deux stations, station d'Oued el Abtal et station de sidi Abdelkader Djilali. Les années correspondant aux lacunes d'observation n'ont pas été prises en considération, compte tenu de l'absence de mesure pour certains mois de l'année.

Ces valeurs de pluies maximales journalières annuelles ont été contrôlées du point de vue indépendance par le test de stationnarité de Kendall.

On note une indépendance des observations (corrélation interne nulle) à un seuil de signifiance de 5%, voir tableau IV.3.

Tableau IV.5 : *Contrôle des échantillons* $P_{j.max}$

Test de stationnarité (Kendall)
Hypothèses : H_0 : Il n'y a aucune tendance dans les observations H_1 : Il y a une tendance dans les observations
Résultats : Valeur de la statistique : |K| = 0.0714; p-value : p = 0.943. Conclusion : Nous pouvons accepter H_0 au niveau de signification de 5 %

Les histogrammes de la figure IV.7 illustrent la variation des pluies maximales journalières (maximum de l'année). On voit que les intensités moyennes des pluies les plus fréquentes génératrices de crues à fréquences correspondantes, sont situées dans l'intervalle de 0,76 à 4,61mm/h à la station d'Oued El Abtal et de 0,74 à 7,08mm/h à la station de Sidi Abdelkader Djilali.

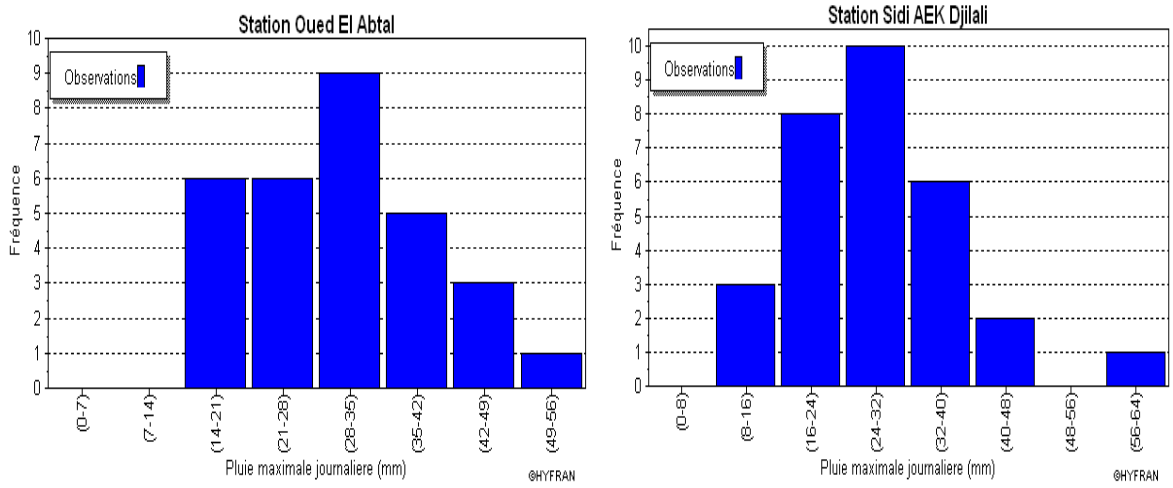


Figure IV.8 : *Les histogrammes de variation des pluies maximales journalières des deux stations, Oued el Abtal et Sidi Abdelkader Djilali*

L'histogramme de la figure IV.8, représente l'ensemble des données d'observations des pluies maximales journalières enregistrées au niveau des deux stations considérées (soit 60 valeurs).

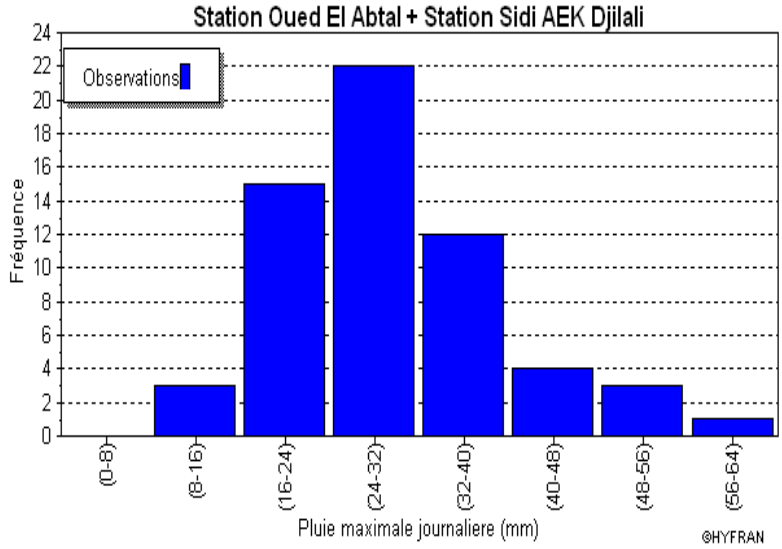


Figure IV.9 : *L'histogramme de variation des pluies maximales journalières de l'ensemble des stations, Oued el Abtal + Sidi Abdelkader Djilali*

IV.4.6.2 Analyse statistique des pluies max journalières

L'ajustement aux cinq lois ou modèles statistiques les plus utilisés montre une adéquation plus nette avec le modèle de Gumbel pour les stations considérées (Station Oued El Abtal et Station Sidi Abdelkader Djilali). Les résultats de l'analyse statistique sont donnés en Annexe I. Cette adéquation est justifiée par application de test KHI-2.

Le tableau IV.4 donne les différentes caractéristiques statistiques de l'échantillon et de la population (loi) pour les différentes stations considérées et pour l'ensemble des stations représentant le secteur d'étude.

Tableau IV.6 : *Estimation des caractéristiques statistiques des pluies maximale journalières*

Statistiques de base	Oued El Abtal		Sidi AEK Djilali		Ens. Des stations	
	Ech	Loi	Ech	Loi	Ech	Loi
Maximum	52.0	-	62.0	-	62.0	-
Minimum	17.0	-	14.0	-	14.0	-
Moyenne	30.1	30.1	27.3	27.2	28.7	28.6
Ecart-type	9.62	10.0	10.3	9.72	9.97	9.93
Médiane	28.5	28.5	26.0	25.6	27.0	27.0
Coefficient de variation (Cv)	0.319	0.333	0.376	0.358	0.347	0.347
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.626	1.14	1.41	1.14	0.972	1.14
Coefficient d'aplatiss (Ck)	2.41	2.40	5.12	2.40	3.79	2.40
Nombre d'observations	30	-	30	-	60	-

Le tableau IV.5 donne les différents quantiles des pluies max journalières ($P_{j.max,\ p\%}$) aux différentes fréquences de retour; valeurs utilisées dans l'estimation des débits de pointe des crues de même fréquence de retour pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Tableau IV.7 : *Estimation des pluies maximale journalière de fréquence 1, 2, 5 et 10%*

STATION	FREQUENCE %, (années)							
	1% (100)		2% (50)		5% (20)		10% (10)	
	P_{jmax} (mm)	E-T	P_{jmax} (mm)	E-T	P_{jmax} (mm)	E-T	P_{jmax} (mm)	E-T
Oued El Abtal	61.6	5.89	56.2	5.12	48.9	4.11	43.2	3.34
Sidi AEK Djilali	57.7	5.70	52.4	4.96	45.3	3.97	39.8	3.24
Ens. des stations	**59.8**	4.08	**54.4**	3.55	**47.2**	2.85	**41.6**	2.32

La variabilité du climat constitue un des facteurs déterminants dans la variabilité des apports superficiels des oueds. On peut exprimer la variation de la pluviosité par le coefficient de variation (Cv). Ce dernier est en moyenne de l'ordre de 0.35.

La variabilité de la pluviosité, exprimée le plus souvent par le coefficient de variation, est inversement proportionnelle à l'aridité. Cette variabilité connaît des différences en relation avec les types de climat et les situations géographiques.

IV.5 Etude des crues

IV.5.1 Introduction

Les paramètres hydrologiques devant être mis en évidence dans cette étude concernent les eaux superficielles. Ces paramètres hydrologiques sont étudiés par l'intermédiaire de l'estimation des apports moyens et de crues et de l'analyse des éléments du bilan hydrique de la région en tenant compte des bassins versants hydrologiques considérés dans cette étude. Les paramètres hydrologiques constituant l'équation du bilan hydrique sont :

- Les précipitations (P en mm).
- L'évapotranspiration réelle et l'évaporation potentielle (ETR et ETP en mm).
- L'écoulement superficiel (LE en mm).
- La variation de la réserve d'eau dans le sol (ΔW en mm).

IV.5.2 Présentation des stations hydrométriques

L'observation hydrométrique (hydrologique) de la région d'étude est couverte par cinq (05) stations hydrométriques, réparties entre des différents sites comme le montre le tableau IV.6, et la figure IV.9.

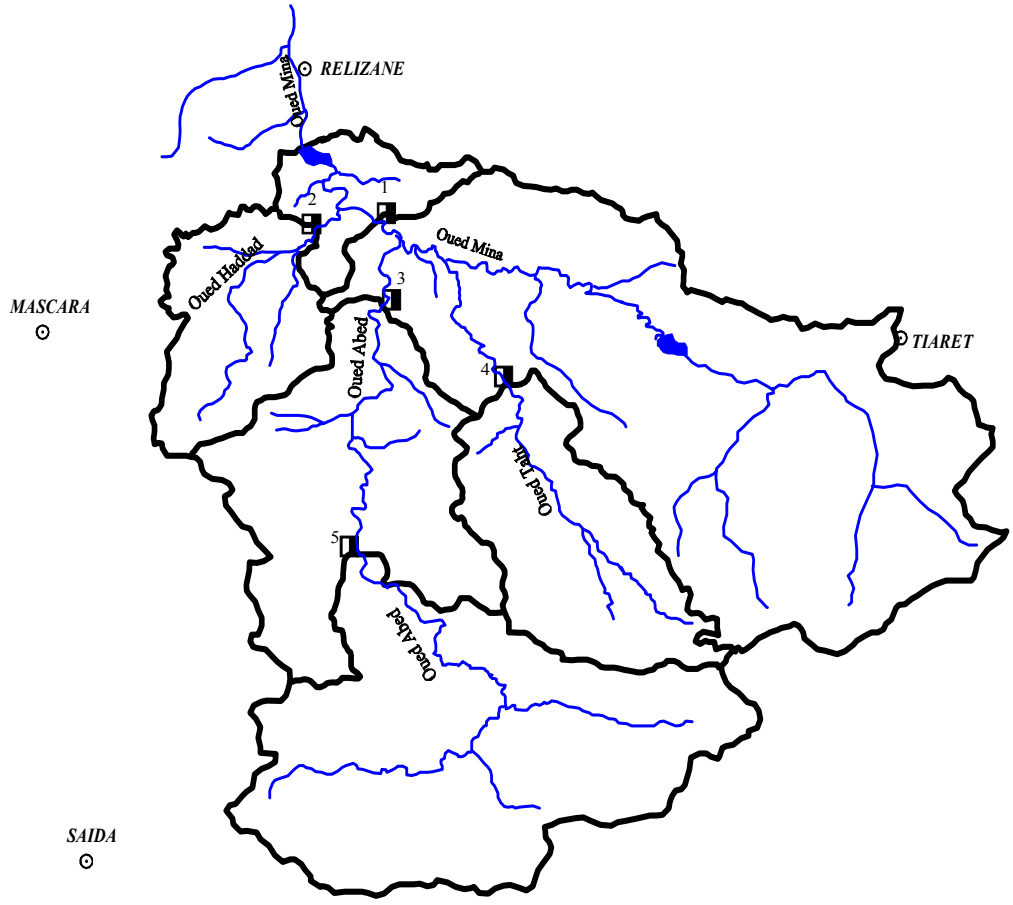


Figure IV.10 : *Les stations hydrométriques dans le bassin versant.*

Tableau IV.8 : *Surfaces et coordonnées Lambert des stations hydrométriques.*

N°	Station	S (km)	X (km)	Y (km)	Z (km)
1	Oued El Abtal	5373	316,80	245,65	205,00
2	Sidi AEK Djilali	470	309,00	244,50	225,00
3	Ain Hamra	2480	316,45	235,12	300,00
4	Kef Mehboula	680	331,60	224,25	475,00
5	Takhmaret	1553	316,40	203,10	600,00

Nous nous intéressons dans cette étude qu'à la station d'Oued Abtal et à la station de Sidi AEK Djilali qui drainent toutes les deux, plus de 95% de la surface du bassin. Les figures suivantes représentent les caractéristiques de l'écoulement de stations prés en compte.

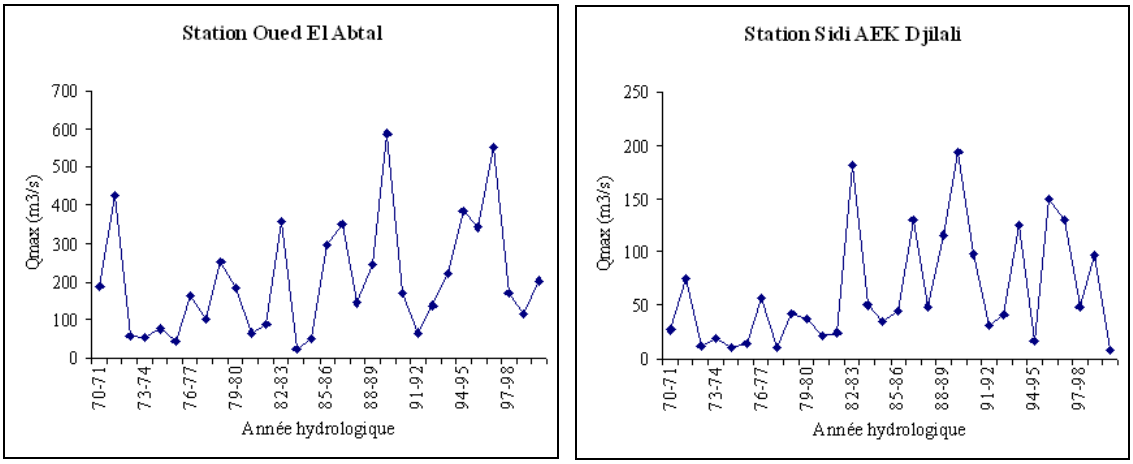


Figure IV.11 : *variabilité temporelle des débits maxima annuels*

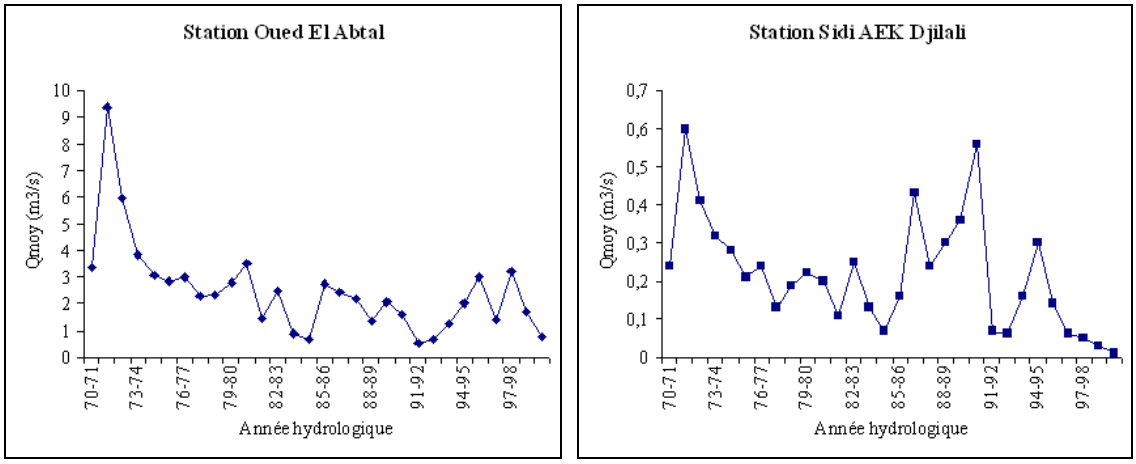


Figure IV.12 : *variabilité temporelle des débits moyens annuels*

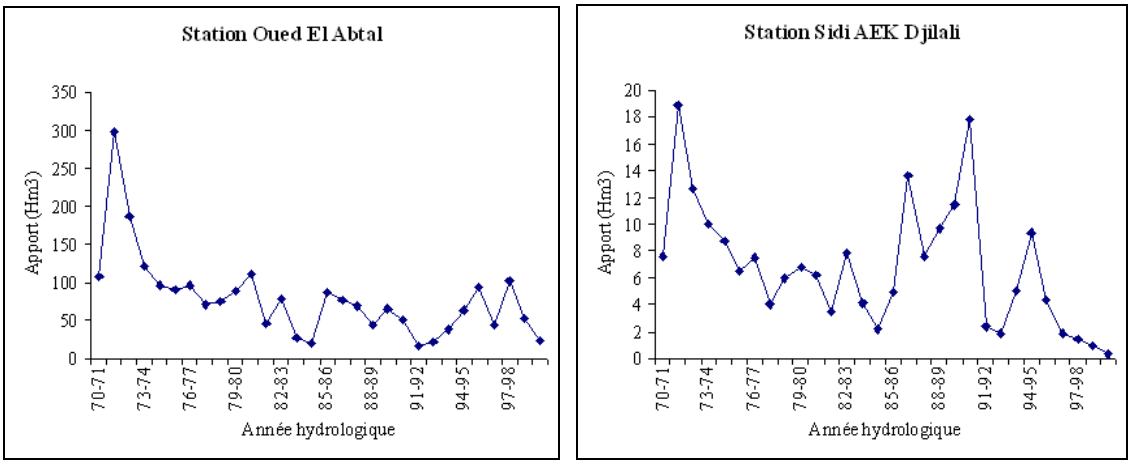


Figure IV.13 : *variabilité temporelle des apports annuels*

Le graphe de la figure (IV -10) montre la similitude dans la variabilité temporelle du débit moyen annuel au niveau des stations hydrométriques des oueds dans le bassin versant de la Mina. C'est la différence dans la pluviométrie qui conditionne, en relation avec les autres paramètres physiques du milieu.

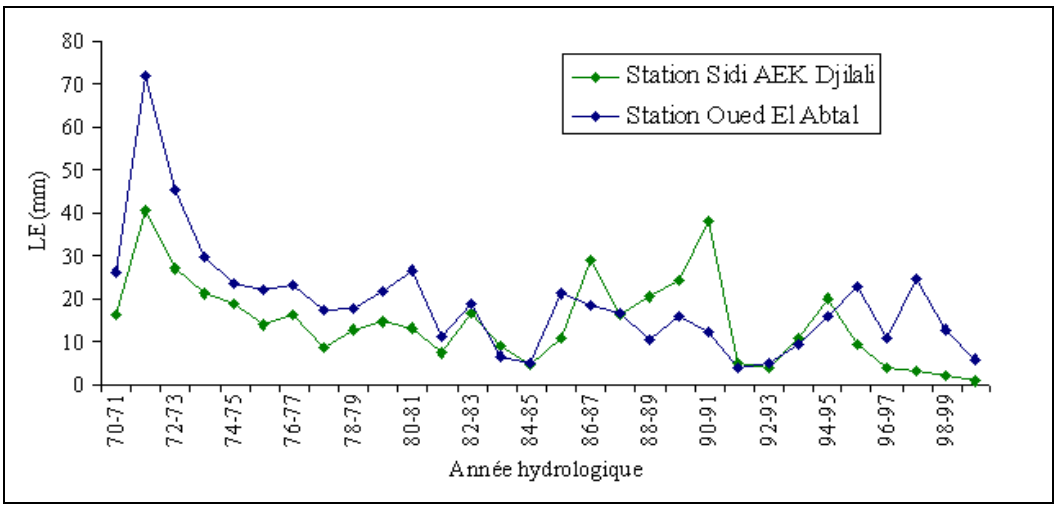


Figure IV.14 : *variabilité temporelle de la lame écoulée.*

Les différences entre les volumes des apports, plus petits dans la haute Mékerra (276 mm/an, en moyenne de pluie) et plus grands dans la Mina (294 mm/an en moyenne de pluie) et plus grands dans la haute Tafna (478 mm/an en moyenne de pluie). Ainsi les apports liquides dans les limites du secteur d'étude doivent suivre la même allure de variation dans le temps.

L'estimation des apports liquides dans les limites du secteur d'étude se base sur les données physico-géographiques et climatiques, ainsi que sur les données d'observations hydrologiques (hydrométriques) relatives aux stations du bassin versant de la Mina. L'analyse statistique des données d'observations à la station d'Oued El Abtal et station de

Sidi AEK Djilali montre un bon ajustement à la loi Lognormale, (Annexe II), les valeurs des débits maximum et moyenne sont présente dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV.9 : *Débits de pointe et moyens annuels pour les différentes périodes de retour*

Période de retour (an)		10	20	50	100
Débit de pointe Q_{max} (m^3/s)	Oued El Abtal	437,85	590,73	827,45	1035,8
	Sidi AEK Djilali	156,05	219,4	321,9	415,61
Débit moyen Q_{moy} (m^3/s)	Oued El Abtal	4,74	6,01	7,87	9,4
	Sidi AEK Djilali	0,52	0,73	1,06	1,37
Volume (Hm^3)	Oued El Abtal	149	189	248	296
	Sidi AEK Djilali	16,4	23,0	33,5	43,1

IV.5.3 Apports de Crue

Les crues dans les régions montagneuses sont rapides se caractérisant par une montée rapide des eaux en phase de crue et une descente plus lente, plus régularisée, en phase de décrue. Ceci est justifié par les données des observations hydrométriques (jaugeages) au niveau de la station d'Oued El Abtal à régime hydrologique assez identique à celui des oueds du secteur d'étude.

On voit la différence entre les deux périodes de la crue : une phase de montée plus rapide et une phase de descente plus longue. La contribution de l'écoulement de l'inféroflux n'est pas négligeable. Ainsi la crue contribue assez nettement à la réalimentation des eaux souterraines et surtout à celle de l'inféroflux caractéristique aux zones de montagnes.

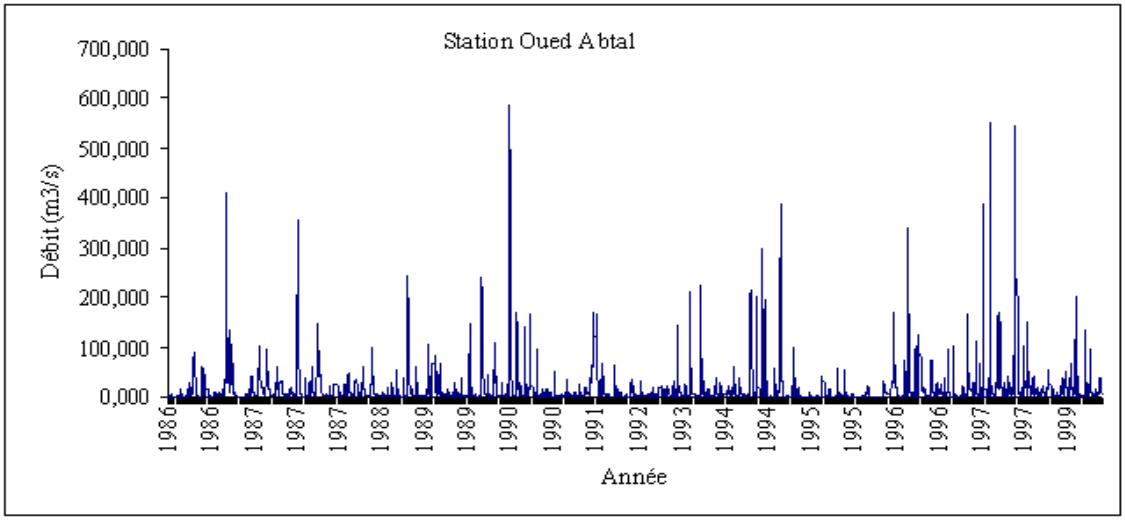


Figure IV.15 : *Variation des débits annuels dans le BV*

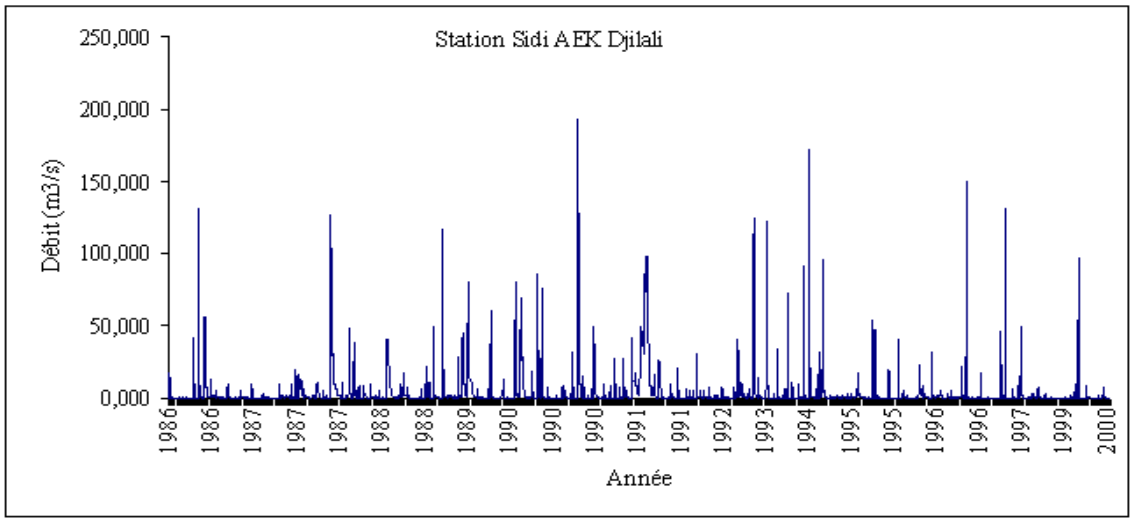


Figure IV.16 : *Variation des débits annuels dans le BV*

Dans les figures ci-après on présente quelque hydrogrammes observes au niveau des stations étudies pour des années les plus humides pour la période de retour de 1%.

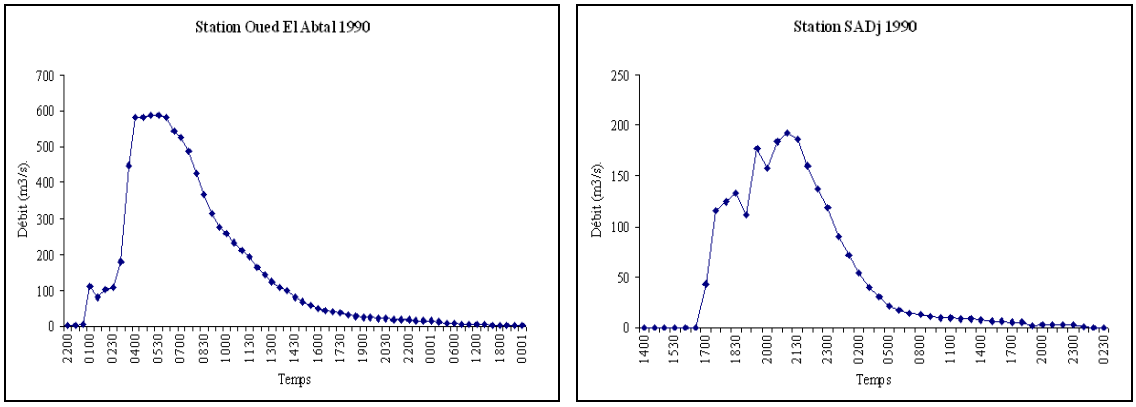


Figure IV.17 : *Hydrogrammes observés au niveau des stations étudiées en 1990*

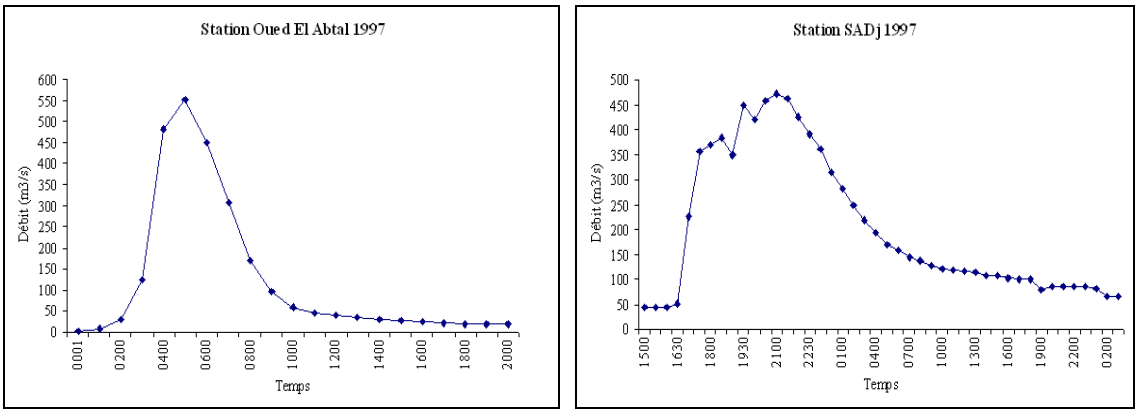


Figure IV.18 : *Hydrogrammes observés au niveau des stations étudiées en 1997*

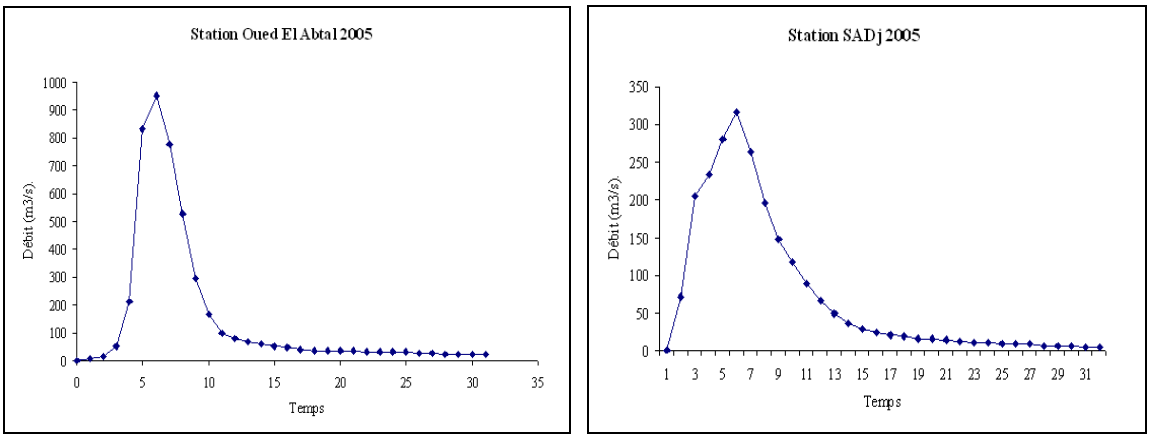


Figure IV.19 : *Hydrogrammes observés au niveau des stations étudiées en 2005*

IV.5.4 Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)

La particularité du climat Algérien pose avec acuité le problème de la maitrise et de la gestion rigoureuse des ressources hydriques. En hydrologie, une grande importance est accordé à la connaissance des fortes averses et des débits optimum, servant à dimensionner certains ouvrages hydrauliques (système de drainage urbain et agricole, évacuateur des crus de barrage, …).

On ne dispose pas de données de dépouillement en différents pas de temps des averses observées au niveau des stations climatiques de la région d'étude, pour procéder à leur traitement statistique afin d'obtenir les courbes IDF correspondantes. On a donc utilisé les données de traitement des averses observées au niveau de station de Ain Hammara (code ANRH : 013302, coordonnées Lambert : (X=316.45, Y=233.12). les courbes IDF de la station sont présentées dans la figure suivante :

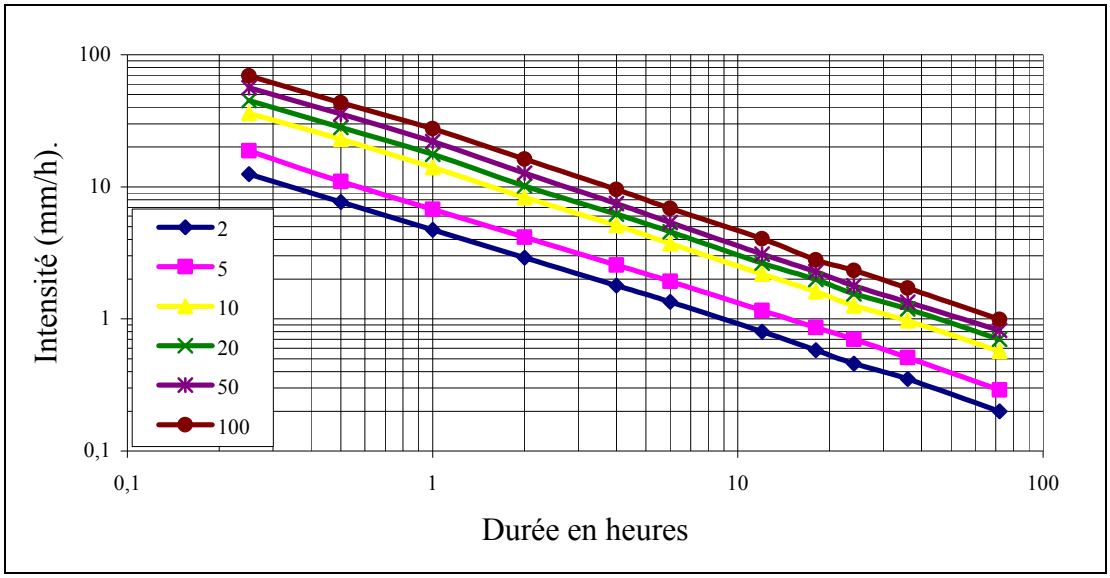


Figure IV.20 : *Courbes Intensité-Durée-Fréquence*

Les données d'observations sur les averses ont fait l'objet d'une analyse statistique à partir des résultats de dépouillement de plusieurs enregistrements d'averses. La recherche de la loi IDF s'effectue sur la base des enregistrements pluviographiques qui sont dépouillés par un lecteur de courbes. La digitalisation se fait par la méthode de dépouillement à intensités constantes. A partir des dépouillements à intensités constantes nous avons calculé les quantités de pluies correspondantes à différents pas de temps (15mn, 30mn, 1h, 2h, 3h, 6h…).

Pour chaque pas de temps nous avons sélectionné une valeur maximale par averse. Nous avons obtenu donc une série de données pour chaque pas de temps sur toute la période dépouillée. La relation Intensité - Durée - Fréquence recherchée est de la forme :

$$\frac{P_t}{P_{jmax}} = at^b \qquad \text{(IV -3)}$$

Où :

P_t : pluie correspondante à un pas de temps t ;
P_{jmax} : pluie journalière maximale ;
a, b : paramètres climatiques.

Les séries de données de chaque pas de temps ainsi que les pluies journalières maximales ont été ajustées aux différentes lois y compris la loi de Gumbel communément utilisée en Algérie. Pour des fréquences choisies on détermine, à partir des ajustements, les valeurs de pluie P_t pour chaque pas de temps.

Sur un graphique, on représente la relation $P_t/P_{jmax} = f(t)$ après avoir linéarisé par anamorphose la relation en introduisant le changement de variable suivant :

$$LN\left(\frac{P_t}{P_{jmax}}\right) = LN(a) + b * LN(t) \qquad \text{(IV -4)}$$

En utilisant la méthode des moindres carrés, on calcule les paramètres a et b.

Tableau IV.10 : *Estimation des coefficients a et b*

Période (ans)	**Fréquence (%)**	***P(t) = a t^b***	
		a	**b**
100	1	0,406	0,52
50	2	0,406	0,42
20	5	0,406	0,34
10	10	0,406	0,27
Moyenne		**0,406**	**0,388**

Donc la relation devient comme suit :

$$P_t = P_{jmax}\left(0.406t^{0,388}\right) \qquad \text{(IV -5)}$$

IV.5.5 Pluie de durée t_c

Le tableau (IV.9) suivant donne les estimations des précipitations $P_{max,tc,p}$ en mm (où : t_c est le temps de concentration en heures et p la probabilité en %).

Tableau IV.11 : *Estimation de l'averse de durée t_c.*

BASSIN VERSANT	T_c (h)	Fréquence de retour (années et %)			
		100	50	20	10
		1	2	5	10
SB 01	06,29	49,55	45,08	39,11	34,47
SB 02	13,14	65,95	59,99	52,05	45,88
SB 03	10,18	59,73	54,34	47,14	41,55
SB 04	11,99	63,65	57,90	50,2	44,27
SB 05	15,79	70,82	64,43	55,90	49,27
SB 06	11,46	62,54	56,89	49,36	43,50
Oued El Abed	19,76	77,26	70,28	60,98	53,75
Oued El Abtal	21,19	79,39	76,30	62,66	55,22
Bge SMBA	24,61	84,13	76,53	66,40	58,52

IV.5.6 Estimation des débits de crues

IV.5.6.1 Estimations des débits de pointe

Le débit maximum instantané Q_{max} a été estimé pour les crues de fréquence de retour 1%, 2%, 5% et 10% à partir des formules empiriques de Turraza et Giandotti :

1. Formule de TURRAZA :

$$Q_{max,p\%} = \frac{C_e P_{max,t_c,p\%} S}{3.6 t_c} \qquad \text{(IV -6)}$$

2. Formule de GIANDOTTI :

$$Q_{max,p\%} = \frac{0.28 P_{max,t_c,p\%} \alpha f S}{k t_c} \qquad \text{(IV -7)}$$

Avec :

$Q_{max,p\%}$: Débit maximum a une probabilité *p%*.
S : Surface du bassin versant en (km^2).
t_c : Temps de concentration en (h).
$P_{max,tc,p\%}$: Pluie du durée t_c.
C_e : Coefficient d'écoulement.
α, f, k : Paramètres pour S<300 km^2 ($\alpha = 0.5, f = 10, k = 4$).

Le tableau (IV.12) suivant donne les différents débits de pointe Q_{max} de chaque frequence, pour les différents sous bassins étudiés.

Tableau IV.12 : *Estimation du débit maximum instantané des crues de chaque fréquence*

SOUS BASSIN	Surface (km^2)	1%		2%		5%		10%	
		Tur	Gia	Tur	Gia	Tur	Gia	Tur	Gia
SB 01	304	299,39	838,29	272,35	762,59	236,3	661,66	208,2	583,1
SB 02	2197	848,13	1697,0	771,54	1543,8	669,4	1339,4	590,0	1180,5
SB 03	470	375,39	965,28	341,49	878,11	296,2	761,89	261,1	671,5
SB 04	927	410,10	1722,4	373,07	1566,8	323,69	1359,5	285,29	1198,2
SB 05	1553	483,76	2438,1	440,07	2217,9	381,83	1729,4	336,53	1696,0
SB 06	680	257,72	1298,9	234,45	1181,6	203,42	1025,2	179,29	903,60
OA Clc	5357	1090,6	6870,8	1048,8	6607,9	860,73	5422,5	758,73	764,80
OA Obs	5357	1035,8	1035,8	827,45	827,45	590,73	590,73	437,85	437,85
Er. (%)	-	5,3	563,3	26,8	698,6	45,7	817,9	73,3	74,7

On voit d'après les résultats des estimations du débit de pointe des crues de chaque fréquence et données au tableau (IV.12), que la formule de Giandotti surestime les résultats de crues, mais le cas de la formule de Turrazza donne une surestimation de l'ordre de 10% sur les valeurs d'observation (au niveau de la station d'Oued el Abtal, prise comme référence). Les résultats obtenus par la formule de Turrazza sont retenus pour le secteur d'étude de toutes les fréquences.

IV.5.6.2 Calcul des hydrogrammes de crues

Les hydrogrammes de crues ont été calculés en utilisant le modèle de l'hydrogramme type, le modèle de ce hydrogramme adimensionnel est décrit par l'équation mathématique suivante :

$$y = 10^{-a\frac{(1-x)^2}{x}} \qquad \text{(IV -8)}$$

Où :

a : est un paramètre dépendant de la forme de l'hydrogramme type, égal à 0.5.

$x = t/t_m$; y = Q_t/Q_{max}.

Ce modèle représente assez bien l'hydrogramme type. On prend comme temps de montée le temps de concentration ($t_m = t_c$), et comme temps de décrue $t_d = \gamma t_m$, avec γ=4.

On obtient les ordonnées des hydrogrammes de crue de chaque fréquence présentées aux figures suivantes.

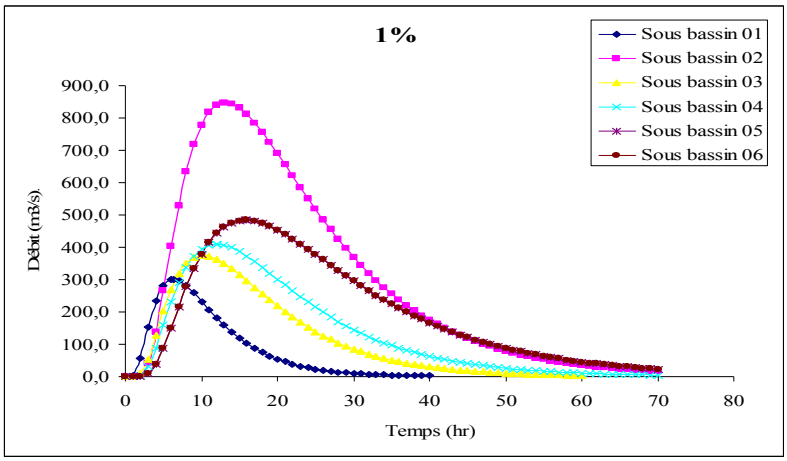


Figure IV.21 : *Les hydrogrammes de fréquence 1%*

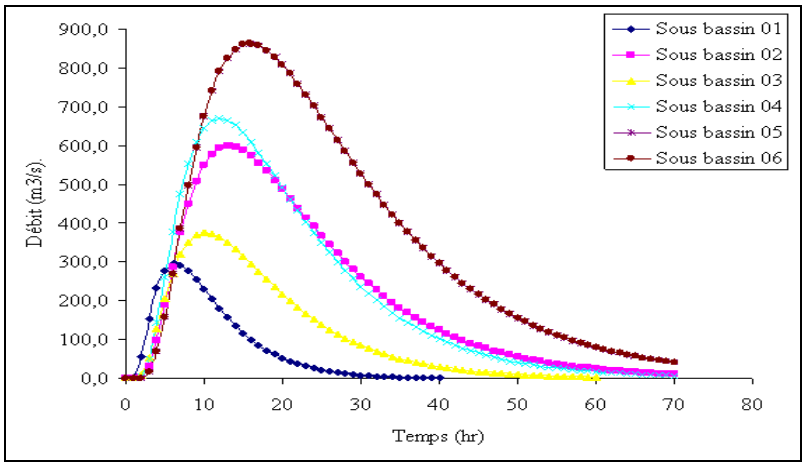


Figure IV.22 : *Les hydrogrammes de fréquence 2%*

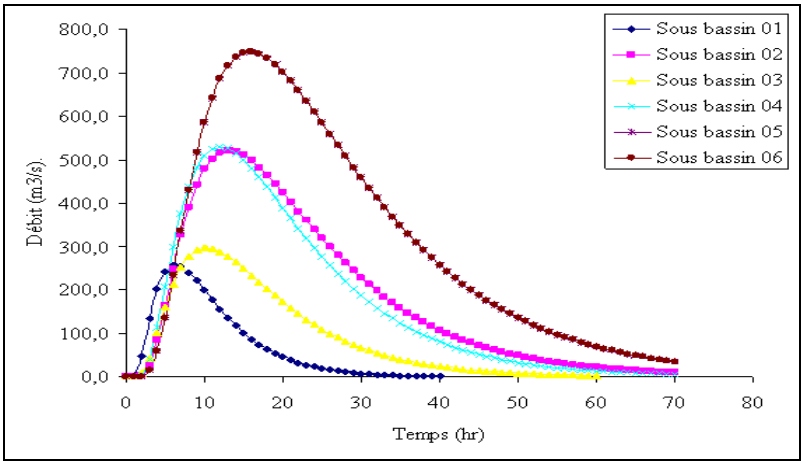


Figure IV.23 : *Les hydrogrammes de fréquence 5%*

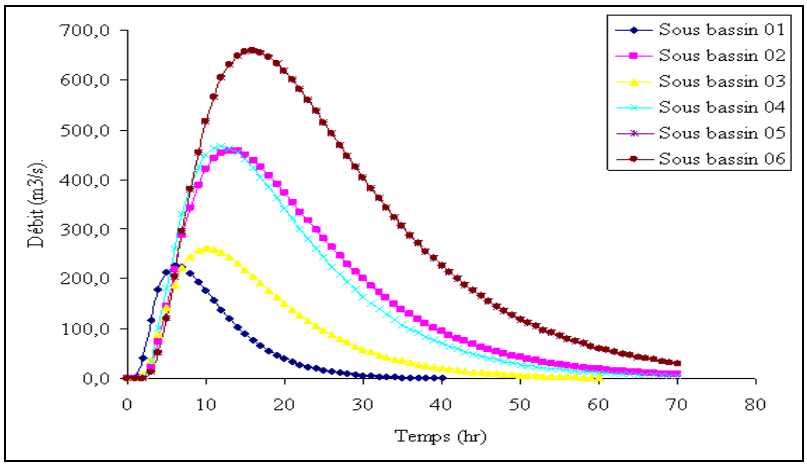


Figure IV.24 : *Les hydrogrammes de fréquence 10%*

On voit que les apports solides des crues estimes par les données d'observation sont inférieurs à l'estimation moyenne annuelle obtenue par les formules expérimentales de Fournier et Tixéront, qui surestiment donc le taux d'abrasion. Nous retiendrons donc les estimations obtenueys d'après les données d'observations des stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Mina.

IV.6 Calcul des apports solides

IV.6.1 Introduction

Les crues des oueds de la région se caractérisent, compte tenu de leurs volumes d'apports et des grandes vitesses d'écoulement (vitesse moyenne en crue dépassant les 1,5 m/s, surtout en montagne, par leur extrême violence et leur force de charriage de matériaux solides). Aussi tout aménagement quel qu'il soit doit avant tout prendre en considération le travail de l'érosion et de l'alluvionnement dû aux crues et la prise en considération de l'envasement de la retenue.

IV.6.2 Estimation du transport solide

L'estimation du transport solide des oueds du secteur d'étude a été réalisée selon deux approches : la première basée sur les formules empiriques les plus utilisées en Algérie, notamment les formules de Tixéront et de Fournier.

1. Formule de FOURNIER

$$A = \frac{1}{36}\left(\frac{Pm^2}{Pa}\right)^{2.65}\left(\frac{H^2}{S}\right)^{0.46} \qquad \text{(IV -9)}$$

2. Formule de TIXERONT

$$A = 200LE^{0.15} \qquad \text{(IV -10)}$$

Avec :

A : Apport solide spécifique en (Tonne/km^2/an).
P_m : Pluie moyenne des mois les plus humides en (mm).
P_a : Pluie annuelle en (mm).
H : Dénivelée (m) : H=0,45 (H_{max} - H_{min}).
S : Surface du bassin versant en (km^2).
LE : Lame d'eau précipitée en (mm).

IV.6.2.1 Application des formules empiriques

Les sols du secteur d'étude sont des sols fragiles à couverture végétale assez faible. Cet état de fait est accentué par la dégradation des sols suite aux labours des terres situées dans ou prés des berges des lits d'oueds accentuant ainsi le processus d'érosion des ces sols.

Afin de pouvoir estimer le taux d'abrasion ou dégradation spécifique des bassins des oueds de la région, on a utilisé les formules expérimentales appliquées aux conditions algériennes. La formule de Tixéront se base sur les corrélations établies à partir des mesures effectuées dans les oueds importants en Algérie. La formule de Fournier estime la dégradation du bassin à partir de la pluviométrie et la morphométrie.

Le tableau (IV.9) suivant donne les estimations du transport solide d'après le calcul du taux d'abrasion des bassins versants étudiés.

Tableau IV.13 : *Estimations des taux d'abrasion (Tonnes/km²/an) :*

BASSIN VERSANT	**Oued El Abtal**	**Sidi AEK Djilali**
S (km^2)	5373	470
LE (mm)	273	245
Pa (mm)	294	294
Pm (mm)	61	52,35
Ct	15,01	5,4
45% (H_{max}-H_{min}) (m)	510,3	420,75
Fournier T/km^2/an	223	860
Tixéront T/km^2/an	463,9	456,5
Moyenne T/km^2/an	343,49	658,25

IV.6.2.2 Application des données d'observation

L'approche méthodologique adoptée consiste à développer un modèle de régression qui permet d'évaluer les valeurs journalières du débit solide à partir des valeurs du débit liquide observés. Les transports en suspension de l'oued Mina et de ces affluents présentent des variations spatio-temporelles considérables. Elles sont dues essentiellement au régime pluviométrique, au couvert végétal et à la lithologie. En général, les variations saisonnières des apports solides suivent celles des apports liquides. Les valeurs maximales

des apports solides, pour l'ensemble des sous basins s'observent au début d'automne et la fin de printemps [Meddi, 1992 et Achite, 1999].

Le modèle puissance $Q_S = a\,Q_L^b$ offre le meilleur ajustement, le modèle retenu a permis de calculer les apports solides et l'érosion spécifique journalière pour les cinq stations hydrométriques (tableau IV.10).

Tableau IV.14 : *Les relations obtenues à l'échelle journalière*

BASSIN VERSANT	R^2	MODELE
Oued Abtal	0,76	$Q_S = 3,1197 Q_L^{1,331}$
Sidi AEK Djilali	0,78	$Q_S = 9,7338 Q_L^{1,7141}$
Ain Hamamra	0,81	$Q_S = 1,7411 Q_L^{1,7141}$
Kef Mahboula	0,82	$Q_S = 6,531 Q_L^{1;4632}$
Takhmaret	0,73	$Q_S = 4,325 Q_L^{1,4112}$

L'application de ces relations pour les bassins versants du secteur d'étude donne pour les crues de différentes fréquences de retour, mais on utilisé uniquement le modèle du basin versant d'Oued el Abtal, les estimations données au tableau (IV.11) du transport solide par suspension.

Tableau IV.15 : *Apport solide d'une crue de chaque fréquence*

BASSIN		Oued El Abtal	Sidi AEK Djilali
Surface (Km^2)		5373	470
Débit solide de pointe Q_{Smax} (Kg/s)	1%	32170,38	9540,78
	2%	23857,62	6790,31
	5%	15234,62	4076,61
	10%	10226,26	2590,28
Apport solide total (Mille tonne)	1%	202,99	60,20
	2%	64,52	42,84
	5%	96,13	25,72
	10%	64,52	16,34
Taux d'abrasion (T/km^2)	1%	49,20	128,09
	2%	15,64	91,16
	5%	23,30	54,73
	10%	15,64	34,78

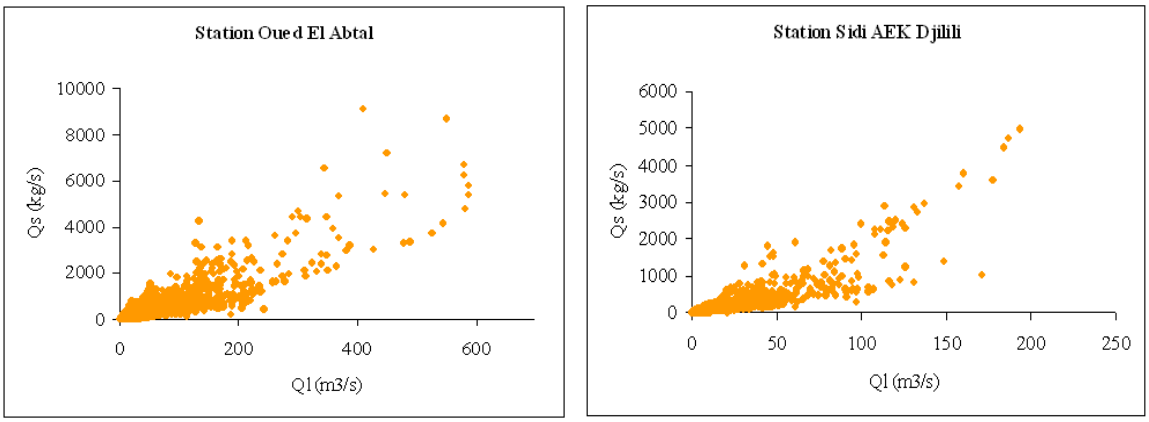


Figure IV.25 : *Relation débit solide débit liquide pour les deux stations de la Mina*

On voit que les apports solides des crues estimes par les données d'observation sont inférieurs à l'estimation moyenne annuelle obtenue par les formules expérimentales de Fournier et Tixéront, qui surestiment donc le taux d'abrasion. Nous retiendrons donc les estimations obtenues d'après les données d'observations des stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Mina.

CHAPITRE V
UTILISATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS

V.1 Introduction

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS est un logiciel très flexible employé pour modeler le processus pluie-débit dans un bassin versant ou une région [HEC-HMS06]. Il est conçu pour être utilisé pour de grandes surfaces géographiques afin de résoudre si possible un plus grand nombre de problèmes. Ce logiciel offre une grande liberté dans la modélisation des bassins versants grâce aussi bien aux nombreux éléments proposés pour le bassin versant qu'à la variété des théories proposées pour modéliser le ruissellement, les infiltrations, l'écoulement en rivière ou encore la répartition des pluies.

Les hydrographes produits par le programme sont utilisés directement ou conjointement avec d'autres logiciel pour l'étude de la disponibilité des ressources en eau, de l'assainissement urbain, de la prévision des crues, de la réduction des dégâts causés par les inondations, de la régulation des zones inondables et des systèmes d'opération.

A l'aide de son interface fonctionnant sous l'environnement Windows le modèle HEC HMS est d'usage très souple. Les informations nécessaires pour les simulations sont groupées sous forme de projet qui peut être sauvé sur disque. Néanmoins, ce logiciel nécessite une étape de préparation des données, qui consiste en une schématisation du bassin versant en dehors de ce logiciel, ce schéma s'appelle modèle du bassin.

La préparation des données (modèle du bassin, données météorologiques et paramètres de contrôle) est une partie incontournable pour toute modélisation hydrologique avec HEC-HMS ; elle nécessite l'utilisation de plusieurs outils et logiciels à savoir : le SIG Arcview, Mapinfo, Arcinfo, etc.

V.2 Fonctionnalités

Les fonctionnalités du programme sont complètement intégrées dans l'environnement de travail comprenant une base de données, des utilitaires d'introduction de données, ont moteur de calcul et des utilitaires de rédaction des résultats. Une interface graphique permet à l'utilisateur de se déplacer d'une interface du programme à une autre. Les fonctionnalités du programme et son ergonomie sont identiques pour les mêmes plates formes existantes [HEC-HMS06].

Les séries chronologiques ainsi que les autres données (coordonnées, maillages) sont emmagasinées dans le système de stockage de données de HEC-HMS (HEC, 1994). Les opérations de stockage et de restauration des données sont prises en charge par le programme et sont généralement faciles pour l'utilisateur. Les informations sur les précipitations et les stations de jaugeage de débits peuvent être introduites manuellement dans le programme ou bien chargées à partir de fichiers DSS préalablement crées. Les résultats stockés par le programme dans la base de données sont accessibles aux autres programmes HEC.

Les données d'entrée peuvent être conçues pour les éléments de bassins versants 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 à partir d'un schéma visuel du bassin versant.

Pour effectuer une première simulation, il est nécessaire de créer une base de données pour caractériser le bassin versant et déterminer les 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.

Le démarrage d'une session HEC-HMS se fait en double cliquant sur l'icône HEC-HMS. L'interface et les composantes principales du logiciel HEC-HMS sont schématisées sur la figure suivante :

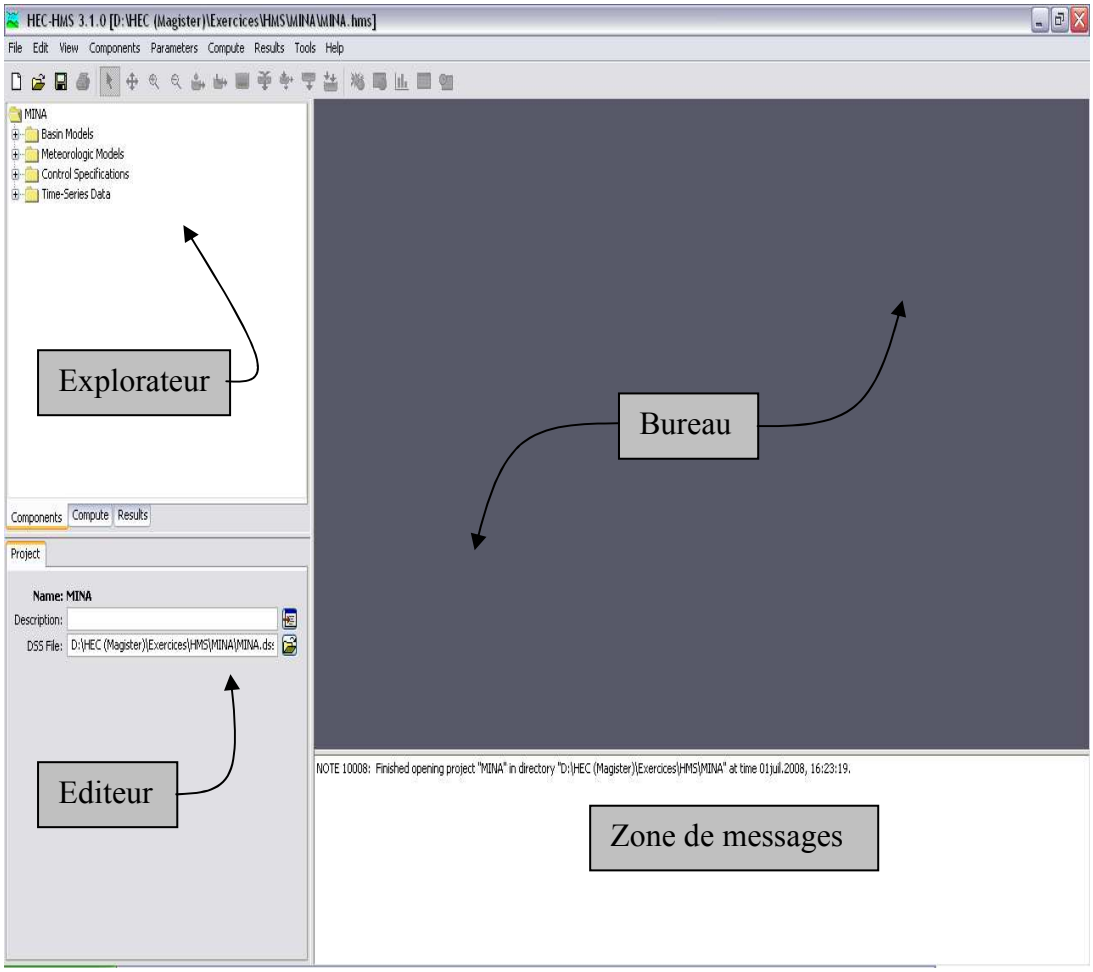


Figure V.1 : *Vue de l'écran HEC HMS.*

V.3 Préparation des entrées du modèle HEC-HMS

La modélisation de la réponse d'un bassin versant soumis à un phénomène pluvieux sous le logiciel HEC-HMS [HEC-HMS06] est découpée en trois parties :

- la modélisation du bassin versant ;
- la modélisation de la météorologie ;
- les spécifications particulières.

Ce logiciel autorise ainsi d'utiliser différents types de méthodes pour la modélisation du bassin versant et de la pluviométrie. La composante spécification permet de spécifier chaque cas par la date de début et de fin de la simulation et le pas de temps de la simulation.

V.4 Modélisation du bassin versant

La modélisation d'un bassin versant consiste, en premier lieu, en un découpage de celui-ci en plusieurs sous-bassins versants élémentaires [HEC-HMS06], ensuite, spécifier les méthodes utilisées pour le calcul des infiltrations, de ruissellement et des écoulements souterrains. La représentation physique des cours d'eau ou des bassins et d'oueds est configurée dans le modèle du bassin versant figure (V-1). Les éléments hydrologiques sont connectés pour former en un réseau afin de simuler les processus d'écoulement, et le calcul commence à partir des éléments amont suivant une direction aval.

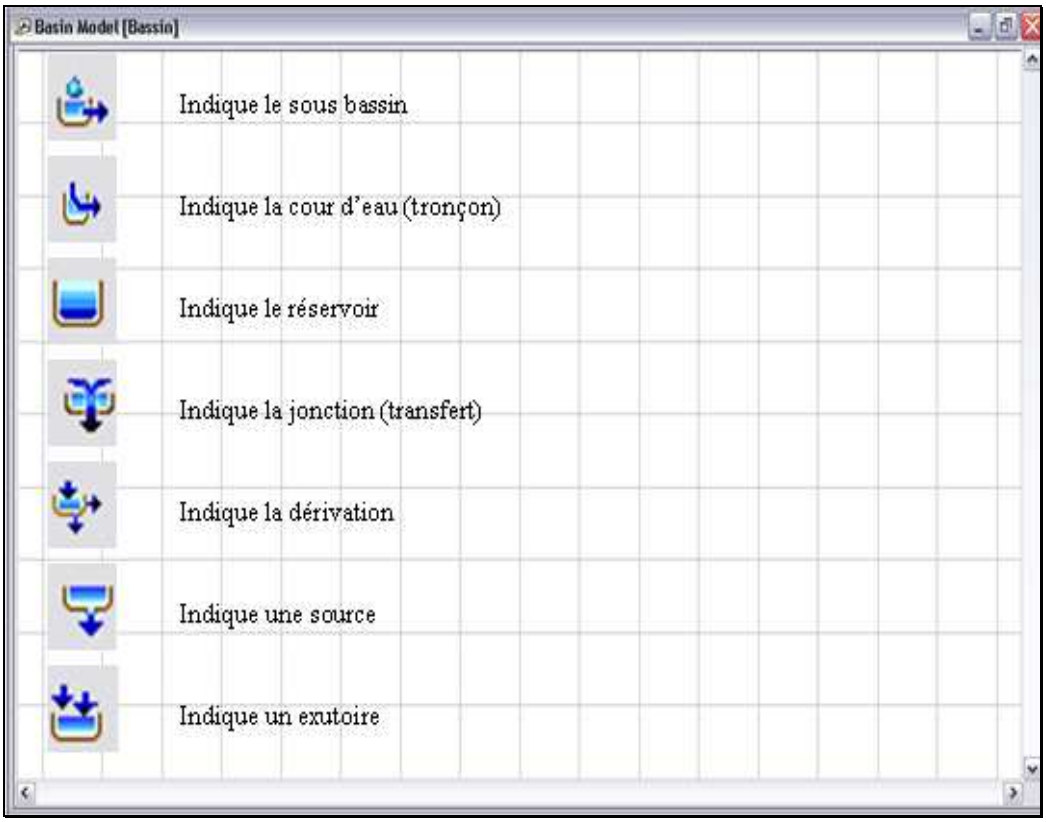


Figure V.2 : *Fenêtre du bassin.*

Après avoir créé un modèle de bassin (*EDIT-Basin Model-New*), l'utilisateur doit rentrer les différents éléments hydrologiques caractéristiques participant au ruissellement sur le bassin versant. On peut inclure sept types d'éléments différents :

- **Sous bassin (*Subbasin*) :** Un sous bassin est un élément hydrologique générant un écoulement à partir des pluies. L'écoulement est calculé à partir des données climatiques en considérant les pertes par rétention et infiltration et la transformation du ruissellement en écoulement concentré dans le réseau hydrographique

- **Tronçon (*Reach*) :** Un Tronçon est un élément du réseau hydrographique avec un ou plusieurs affluents (entrées) mais un seul exutoire (sortie). l'affluent résulte d'autres éléments du système (tronçon, réservoir …). L'écoulement est calculé en utilisant une des méthodes disponibles pour simuler la transformation de l'écoulement dans le cours d'eau (Muskingum, Muskingum,Cunge, Onde cinétique etc…).

- **Réservoir (*Reservoir*) :** Un réservoir est un élément du système avec un affluent (entrée) ou plus (toutes les entrées sont additionnées pour obtenir une seule entrée dans le réservoir) et une seule sortie.

- **Jonction (*Junction*) :** Une jonction est un élément du système avec une ou plusieurs entrées et une seule sortie. Toutes les entrées additionnées pour obtenir une seule entrée.

- **Transfert (*Diversion*) :** Le transfert est un élément du système permettant le transfert de l'écoulement ; s'il y a lieu plusieurs entrées sont additionnées pour obtenir une seule entrée.

- **Source (*Source*) :** Une source est un élément du système sans entrée. La source peut être utilisée pour représenter des conditions aux limites du bassin versant simulé.

- **Exutoire (*Sink*) :** Un exutoire est un élément du système avec une ou plusieurs entrées mais aucune sortie. S'il y a lieu plusieurs entrées sont additionnées pour obtenir une seule entrée. L'exutoire peut être utilisé pour représenter le point le plus bas d'une région où l'écoulement y débouche (cuvette, dépression, exutoire, mer, …)

Les éléments hydrologiques définis précédemment doivent être reliés pour créer un réseau. Cette création s'effectue en deux étapes :

- créer les éléments et les placer sur le schéma (faire glisser les icones grâce au bouton gauche de la souris) ;
- les connecter en cliquant sur l'élément amont avec le bouton droit et sélectionner la commande *Connect Downstream*. Une croix apparaît avec laquelle on pointe sur l'élément aval (bouton gauche).

En cas d'erreur, l'option *Delete Element* permet de détruire un élément.

V.4.1 Les éditeurs d'éléments

Chacun des éléments précités possède un éditeur qui permet de sélectionner les méthodes de calcul permettant de les modéliser, mais aussi d'entrer les données caractéristiques. Pour accéder à un éditeur d'élément, il suffit de double-cliquer avec le bouton gauche de la souris sur l'élément en question.

V.4.1.1 L'éditeur de sous bassin

Le fonctionnement hydrologique d'un sous bassin est caractérisé par seulement trois processus : les pertes (*Loss Method*), les ruissellements (*Transform*), les écoulements souterrains (*Baseflow Method*). L'utilisateur doit sélectionner un modèle pour chacun de ces processus grâce aux trois onglets de l'écran d'éditeur de sous bassin. Les différentes modélisations sont présentées dans les figures suivantes :

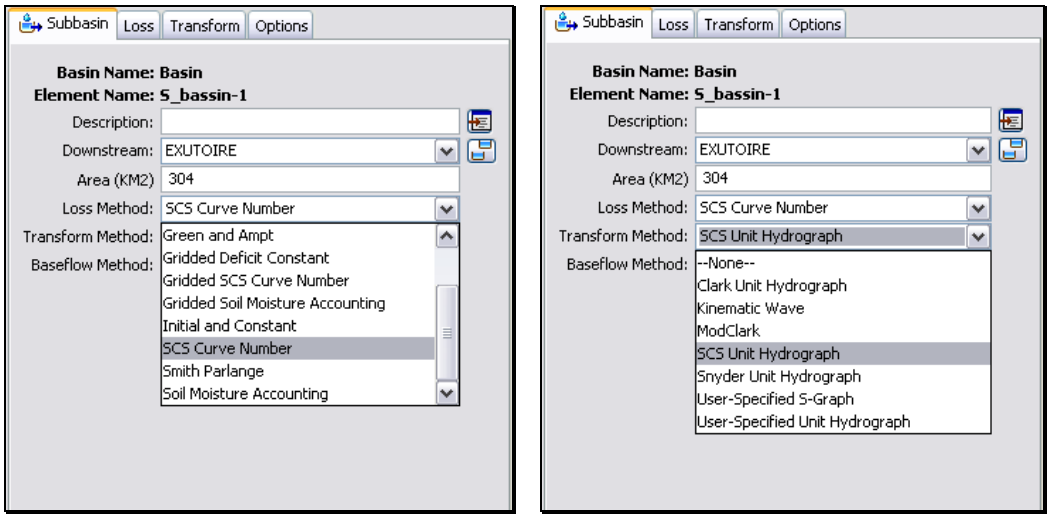


Figure V.3 : *Les différentes méthodes de production et de transfert.*

Apres avoir choisi les deux méthodes de production et de transfert voici les fenêtres ou on introduire les données.

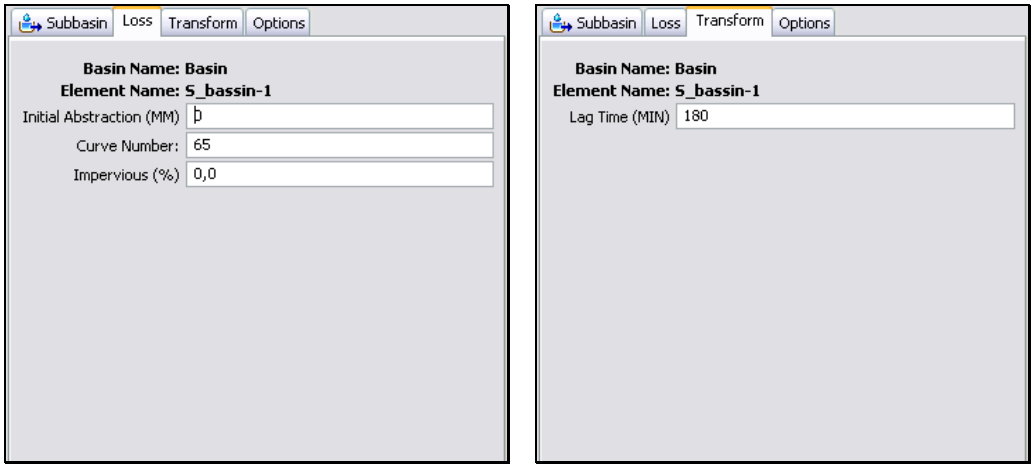


Figure V.4 : *Inclure les données dans les éditeurs des basins versants.*

V.4.1.2 L'éditeur de tronçon

Cet éditeur permet de choisir entre les différents modèles d'écoulements fluviaux (*Routing methods*) comme le montre la figure suivante :

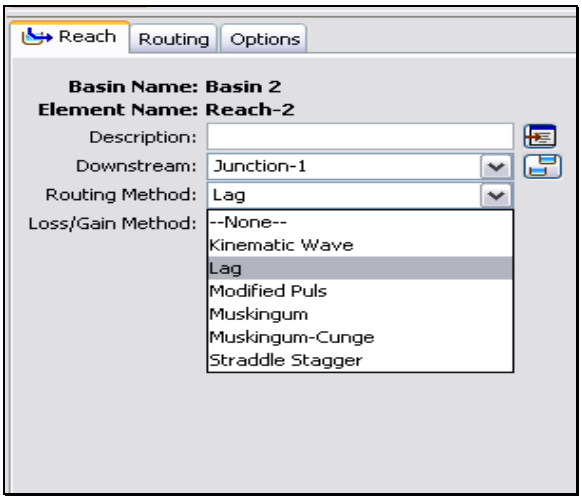


Figure V.5 : *Les méthodes des écoulements fluviaux.*

V.4.1.3 L'éditeur de réservoir

Il faut ici que l'utilisateur fournisse la relation stockage/débit du réservoir. Trois différentes relations sont disponibles :

- Stockage/débit
- Hauteur d'eau/Stockage/débit
- Hauteur d'eau/Surface/débit

Pour chacun de ces modèles, un tableau permet de donner des valeurs de calage pour les différents paramètres (par ex., les débits observés en fonction du volume d'eau dans le réservoir pour le premier modèle).

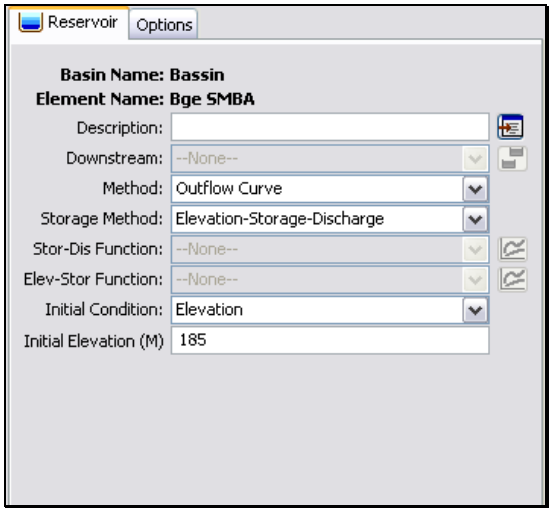


Figure V.6 : *Les données de réservoir.*

V.4.2 Les caractéristiques du modèle de bassin

On peut définir dans le menu *File-Basin Model Attributes* des caractéristiques par défaut du modèle de bassin :

- modélisation des pertes, ruissellements, écoulements souterrains et fluviaux dans l'onglet *Defaults* ;
- les fichiers de maillage et les cartes dans l'onglet *Files* ;
- le système d'unité (choisir métrique) dans l'onglet *Units* ;
- ne rien toucher dans l'onglet *Options*.

Une carte du basin versant peut être entrée sous forme de fichier de coordonnées, mais servira uniquement de support visuel et n'entre en aucun cas dans les calculs.

V.5 Modèles météorologiques

Les modèles météorologiques sont au même titre que le modèle de bassin indispensable à la simulation hydrologique. Ils regroupent les données des précipitations et d'évapotranspiration nécessaires au calcul de la réponse hydrologique du bassin versant à une pluie donnée [HEC-HMS06].

Diverses méthodes sont proposées pour modéliser un événement pluvieux, connu ou non. Les données météorologiques sont données par les services de la météorologie dans des fichiers à format libre ou dans des tableaux. Le HEC-HMS saisit toutes ces données à partir d'un fichier d'extension « *.DSS* » (*Data Storage System*). Ce fichier est écrit en binaire sous un format bien spécifique. Pour introduire les données de précipitation dans HEC-HMS, on peut procéder de deux manières : manuellement en saisissant les données à partir du HEC-HMS ou moyennant le programme DSSUTL, qui nous permettra de transférer automatiquement les données dans ce fichier.

Après avoir créé un nouveau modèle météorologique (*Edit-Météorologic Model-New*), l'écran modèle météorologique apparaît avec deux onglets (Précipitation, Evapotranspiration).

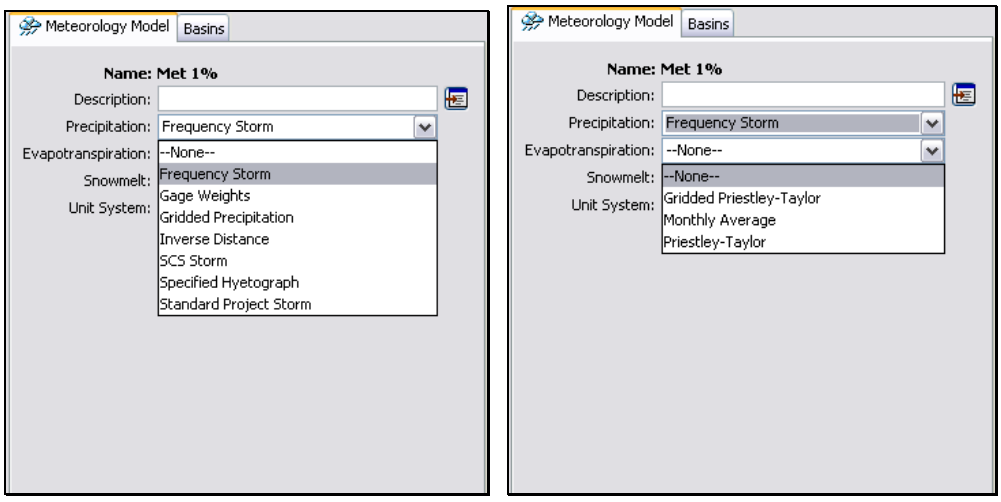


Figure V.7 : *Les modèles météorologiques (Précipitation et Evapotranspiration).*

Le bouton *Subbasin list* en haut à droite de la fenêtre permet d'afficher la liste des sous bassins auxquels va être appliqué le modèle météorologique. On peut alors ajouter ou supprimer des sous bassins grâce aux fonctions *Add* et *Delete*.

Dans l'onglet Evapotranspiration, on peut définir des zones d'évapotranspiration homogène en utilisant le bouton *ET Zone List*.

V.5.1 Les modèles de précipitations

Il existe plusieurs modèles de précipitations disponibles dans HEC-HMS. L'utilisateur doit choisir un modèle dans la case *Method* de l'onglet *Precipitation* puis sélectionner avec le bouton *Subbasin* List, les sous bassins auxquels il s'applique.

Pour les méthodes de pondération des données pluviométriques (*User Gage Weigthing*), l'utilisateur peut utiliser des données enregistrées lors de la définition du projet en pressant le bouton *Recording* ou définir une pluie non mesurée grâce au bouton Total Storm, il faudra alors donner impérativement la hauteur totale de pluie.

V.5.2 Les modèles d'évapotranspiration

Dans l'onglet Evapotranspiration, il faut sélectionner dans le champ *Method*, No Evapotranspiration dans la majorité des cas. Le seul cas où l'on sélectionne *Monthly Average* est le cas où l'on a choisi le modèle de perte SMA. Dans ce dernier cas il faudra sélectionner "*allow evapotranspiration method in model*" dans les attributs du modèle météorologique (*File/ Met Model Atttribute*) pour obtenir le tableau d'évapotranspiration.

V.6 Spécifications de Contrôle

Les spécifications de contrôle sont la dernière composante indispensable pour effectuer une simulation. C'est à cette étape que l'on définit les instants de départ et de fin de la simulation ainsi que le pas de temps de calcul.

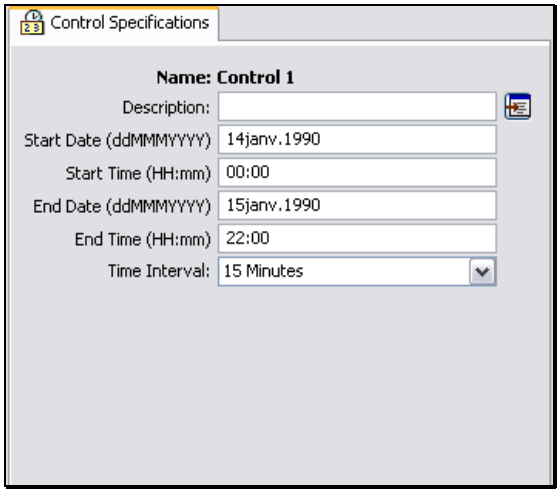


Figure V.8 : *Fenêtre de spécifications de contrôle.*

V.6.1 Dates et Temps

Le logiciel est assez flexible quant à la manière de rentrer les dates. Nous conseillons toutefois de les rentrer de la façon suivante :

Le mois est donc indiqué par ses 3 premières lettres en Anglais, Les heures sont entrées de la manière suivante: 08:15 (pour 8 heures 15 du matin).

V.6.2 Les pas de temps

Les pas de temps peuvent varier entre 1 minute et 24 heures. HEC-HMS réalise une interpolation linéaire pour obtenir les valeurs correspondant à un multiple entier du pas de temps dans les données hydro-météorologiques.

IV.7 Réalisation de Simulations et Visualisation des Résultats

IV.7.1 Créer et gérer une exécution

L'outil principal est le gestionnaire d'exécution que l'on obtient à partir de l'écran Basin Model, *Simulate/Run Manager*. L'exécution est lancée après avoir sélectionné un "*Run*" dans la colonne *Run ID*, puis en appuyant sur *Compute*.

Figure V.9 : *Fenêtre d'exécution de simulation.*

Si aucune simulation (*Run*) n'est disponible dans le gestionnaire il faut la créer à partir de l'écran *Run Manager* : *File / New Run*. On accède alors à une fenêtre de configuration où l'on choisit un élément de chaque type (modèle de bassin : *Basin ID*, modèle météorologique : *Met Model ID* et spécification de contrôle : *Control ID*).

V.7.2 Configuration et options de la simulation

Il est nécessaire de définir les composantes et certaines options de la simulation dans la fenêtre prévue à cet effet, accessible à partir du gestionnaire (*Run Manager*) en faisant : *Edit / Run Options*.

- L'option Ratio : Cette option peut être utilisée pour entrer un ratio de précipitation ou de débit. En effet on peut ajuster un hyetographe avant de lancer le calcul des pertes fluviales en le multipliant par un ratio des précipitations. De même on peut ajuster, à l'aide d'un ratio de débit, un hydrographe avant de lancer une simulation de ruissellement.
- Les options relatives à l'état initial du bassin versant (*start states*) : Chaque modèle de bassin contient des conditions initiales qui décrivent l'état initial de chaque élément composant le bassin avant le calcul de ruissellement. Cette option permet de rentrer un état initial au lieu de conditions initiales. On peut ainsi prendre comme état initial

l'état du bassin à un temps de calcul particulier calculé lors d'une simulation précédente. Cette option permet aussi de découper de longues simulations en de petites parties pour une exploitation des résultats plus aisée.

- L'option Sauvegarde d'état (*Save State*) : Cette option permet de sauvegarder toutes les valeurs des variables définissant le bassin à un instant donné de la simulation afin d'éventuellement réutiliser cet état ultérieurement. Il suffit simplement de rentrer la date et l'heure à laquelle la sauvegarde doit être réalisée.

IV.7.3 Visualisation des résultats

Les résultats peuvent être visualisés sous forme de tableau ou de graphes à partir de l'écran des modèles de bassin.

- Le tableau global : Ce tableau contient les informations relatives au débit de pointe d'une simulation (valeur, volume écoulé, temps auquel il se produit)
- Les résultats de la simulation : Ils peuvent être visualisés sous trois formes différentes à partir du menu *View Results* :

    - un graphe (*graph*) : disponible pour chaque élément constituant le bassin versant;
    - un tableau récapitulatif des résultats (*Summary table*) : permet d'obtenir des informations relatives aux pics d'intensité et aux volumes écoulés pour chaque élément du bassin versant;
    - un tableau relatif aux résultats calculés à chaque pas de temps (*Time Series Table*).

V.8 Le calage du modèle

Nous allons expliquer ici comment caler les modèles hydrologiques utilisés lors de l'exécution du logiciel HEC-HMS.

On se sert pour cela d'un hydrographe observé et le logiciel HEC-HMS compare cet hydrographe à celui qu'il a calculé.

Ce calage du modèle s'effectue à partir de l'écran du gestionnaire de l'optimisation (*Optimization Manager*) et s'effectue en trois étapes:

- créer une simulation d'optimisation en choisissant un modèle de bassin, un modèle météorologique et des spécifications de contrôle.
- créer et configurer le premier essai de calage en choisissant l'endroit ou va se faire l'optimisation, la fonction mathématique qui va calculer l'écart entre les hydrographes observés et calculés, ...
- caler le modèle.

V.8.1 La barre de menu

Elle se compose des fonctions suivantes :

- *Edit* : permet de gérer les paramètres relatifs à l'exécution du calage;
- *Options* : permet de choisir les fonctions qui vont être utilisées pour évaluer l'écart entre les deux hydrogrammes;
- *Simulate* : permet de lancer l'exécution d'un calage. Chaque tentative est lancée en cliquant sur *Optimization Run* Configuration puis sur *Optimize*.
- *View* : permet d'accéder aux résultats du calage.

Les icones affichées sur l'écran ne sont que des raccourcis des fonctions présentées dans le menu *View*. Comme on l'a vu, on crée un calcul d'optimisation en cliquant sur *Simulate-Optimization Run* Configuration et en choisissant les différents modèles utilisés. Puis on lance les essais de calage en sélectionnant le bouton *New Trial.*

V.8.2 Résultats des essais

Afin de visualiser les résultats concernant les différentes tentatives d'optimisation plusieurs alternatives sont disponibles :

- Résultats de chaque essai (*Trial Results*) : permet de visualiser les paramètres symbolisant les écarts entre les hydrographes observés et calculés (Volume écoulé, pic d'intensité, ...)
- Graphe de comparaison (*Flow Comparison Graph*) : permet de comparer les deux hydrographes visuellement;
- Graphique de dispersion (*Scatter Graph*) : permet de visualiser le rapport hydrographe observé/hydrographe calculé par rapport à une droite d'angle 45°.
- graphique des résidus (*Residual Graph*) : permet de visualiser le débit résiduel pour chaque pas de temps;
- Objective (*Function Graph)* : montre la valeur de la fonction servant à l'approximation de l'écart hydrographe observé-calculé à chaque pas de temps;
- Schéma d'optimisation (*Optimization Schematic*) : permet de visualiser des résultats pour n'importe quel élément placé en amont du point où l'on procède au calage.

CHAPITRE VI
APPLICATION DU MODELE HEC-HMS

VI.1 Introduction

Avant de présenter l'analyse des crues ainsi que les événements pluies-débits, on insistera une fois encore sur le fait que le rôle de l'ingénieur est d'identifier les facteurs dominant du comportement hydrologique d'un bassin versant ainsi que de quantifier leur importance. Dans cet esprit, notre travail s'intéresse à la modélisation hydrologique des bassins versants de l'Oued Mina.

Le modèle utilisé offre une grande liberté dans la modélisation du bassin versant grâce aux nombreux éléments composant le bassin versant qu'à la variété des théories proposées pour modéliser le ruissellement, les infiltrations, l'écoulement en rivière, ou encore la répartition des pluies. Après une période de familiarisation, il a été donc nécessaire d'obtenir les données correspondantes aux modèles choisis : l'ensemble, données et modèles, constitue la modélisation de l'événement en première partie.

VI.2 Etapes d'une simulation avec HEC-HMS

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 bases de données nécessaires concernant le bassin versant étudié pour l'application du modèle HEC-HMS sont :

- Les caractéristiques morphométriques des bassins :
  - Les surfaces des sous bassins.
  - Type de sol.
  - Couverture végétale.

- Les caractéristiques météorologiques :
  - Les précipitations.
  - L'évapotranspiration.

- Les données de spécifications du contrôle :
  - La date initiale.
  - La date finale.
  - L'intervalle de temps de calcul.

La modélisation de la réponse d'un bassin versant soumis à un phénomène pluvieux sous le modèle HEC-HMS est découpée en trois parties :

- la modélisation du bassin versant
- la modélisation de la météorologie
- les spécifications de contrôle

Ces trois composantes permettent donc d'utiliser différents types de méthodes pour la modélisation du bassin versant, différentes pluviométries pour la météorologie et la composante spécification de contrôle permet de spécifier chaque cas par la date du début et la date de la fin de la simulation ainsi que le pas de temps choisi pour la modélisation.

VI.3 Modélisation du bassin versant

La modélisation proposée a pour objectif d'estimer le débit maximal probable des bassins versants de l'Oued Mina ainsi que le volume a son exutoire. Ce bassin versant a une superficie d'environ 6131 km^2 et découpé en (06) six sous-bassins de la sorte :

Figure VI.1 : *Les bassins versants de la Mina*

Pour modéliser ce bassin nous considèrerons donc les six (06) sous-bassins qui le constituent, ainsi que cinq (05) biefs qui transitent le volume d'eau de chacun de ces sous-bassins vers l'exutoire du bassin au site du (Barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda). La représentation des sous bassins est schématisée sous le logiciel HEC-HMS par la figure suivante :

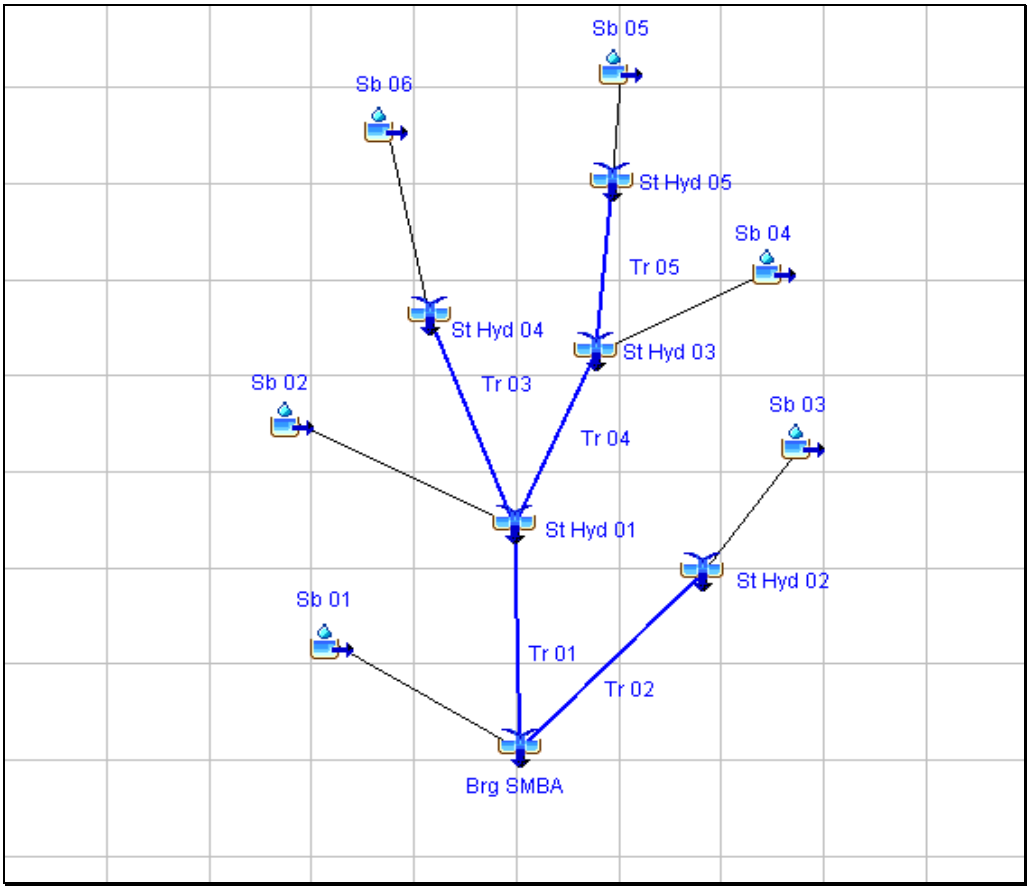


Figure VI.2 : *Représentation du bassin versant de la Mina dans le modèle HEC-HMS.*

VI.3.1 Infiltrations

Un assortiment de méthodes diversifiées est disponible pour simuler les pertes par infiltration. Des options pour une modélisation éventuelle comprennent des infiltrations initiales et constantes, le nombre de la courbe SCS, le nombre de la courbe SCS par maillage, et la méthode de Green et Ampt. Le déficit pour une couche superficielle du sol et le modèle de perte constante.

Toutes ces méthodes peuvent être utilisées pour une modélisation simple et continue de l'infiltration et de l'évapotranspiration. Dans notre étude on prend la méthode de SCS (CN), puis qu'elle est simple et facile à appliquer.

La méthode de "Curve Number" (CN) du service de conservation de l'USDA (SCS, USDA), connue également sous le nom de la méthode de couverture hydrologique des sols, est un procédé simple largement utilisé pour l'évaluation de l'écoulement superficiel. Dans cette méthode, l'écoulement superficiel est exprimé par une valeur numérique variant entre 0 ÷ 100. Durant ces trente (30) dernières années, la méthode de SCS a été utilisée par de nombreux chercheurs et a donné des résultats satisfaisants dans l'évaluation de l'écoulement superficiel.

VI.3.2 Ruissellement

La modélisation du ruissellement sous le logiciel HEC-HMS se fait par l'intermédiaire de la méthode des hydrogrammes unitaires. Le modèle retenu est celui de l'hydrogramme unitaire de SCS (*SCS unit hydrograph*).
Ce modèle donne une relation empirique entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct. La méthode de l'hydrogramme unitaire vise à déterminer l'hydrogramme de ruissellement direct à l'exutoire d'un bassin versant à partir des hyétogrammes de l'averse correspondante reçue par ce même bassin.

L'hydrogramme unitaire par la méthode (SCS) est basé sur la transformation des pluies en débit avec l'utilisation du temps de réponse (ou retard) (T_{lag}), qui est le décalage de temps entre le centre de la masse pluviale et le sommet de l'hydrogramme unitaire des crues. On considère d'après les données expérimentales nombreuses que : $T_{lag} = 0.6\ T_c$, avec ; T_c : est le temps de concentration.

VI.3.3 Ecoulement en rivière

Les hydrogrammes de chacun de ces sous bassins étant simulés il reste maintenant à faire transiter ces débits dans les biefs jusqu'à l'exutoire. A chaque jonction le logiciel additionne les débits entrant pour donner un débit sortant, il n'y a pas de stockage au niveau des jonctions.

Une variété de méthodes de calcul hydraulique des cours d'eau est incluse pour la simulation de l'écoulement dans les canaux ouverts. La propagation sans atténuation (sans laminage) peut être simulée. La méthode traditionnelle de Muskingum est incluse. La méthode des impulsions modifiée peut être aussi utilisée pour simuler la propagation de l'onde de crue sur un tronçon en le représentant en une série de réservoirs dont l'utilisateur désignera les niveaux grâce aux relations stockage-débit évacué (laminé).

Les canaux aux sections trapézoïdales, rectangulaires, triangulaires ou circulaires peuvent être modélisés avec les méthodes de l'onde cinétique ou celle de Muskingum-Cunge. Les canaux à zones (champs) inondables peuvent être simulés avec la méthode de Muskingum-Cunge en considérant une section transversale du lit de l'oued constituée de huit points.

Cette méthode fait appel aux caractéristique physiques du lit de la rivière c'est à dire sa section que nous considèrerons a huit points, la longueur et la largeur du bief, la pente de la ligne d'énergie considérée ici comme la pente du bief. Ces données proviennent d'observation de la rivière.

VI.3.4 Les données de bases d'entré

Les données nécessaires à la modélisation des sous-bassins dépendent des méthodes utilisées pour l'infiltration, le ruissellement et les écoulements souterrains. Nous ne considèrerons ici aucun écoulement souterrain compte tenu du fait que nous n'avons pas de données les qualifiants, qui laisse sous entendre une influence négligeable de ces écoulements.

Les données de base d'entre du basin versant utilisées sont présentées dans le tableau suivant ; et la seule donnée invariante est la superficie de chacun de ces sous bassins :

Tableau VI.1 : *Données de base des sous-bassins*

Désignations	Sous bassin 01	Sous bassin 02	Sous bassin 03	Sous bassin 04	Sous bassin 05	Sous bassin 06
Surface (km^2)	304	2197	470	927	1553	680
Curve number (CN)	45	42	55	45	40	40
Standard lag (min)	226	539	366	431	568	412
Initial abstraction (mm)	0	0	0	0	0	0
Imperméabilité (%)	3.0	8.0	20.0	10.0	5.0	5.0

Les paramètres propres à chaque sous-bassin et au tronçon de rivière sont incorporés en cliquant sur l'icône correspondant à l'élément choisi dans l'explorateur et en précisant les paramètres des onglets ***Loss***, ***Transform***, ***Baseflow***, ***Subbasin*** et ***Routing*** de l'**Éditeur**.

L'élément de sous bassin représente un bassin complet. Les suppositions sont faites pour étudier les trois processus suivants séparément : **perte** (*loss*), **transformation** (*transform*), et **écoulement de base** (*baseflow*). La partie de la précipitation qui tombe sur la surface de terre s'infiltre finalement dans le sol devenir un écoulement souterraine ou filtration profonde : cette partie représente les **pertes** de précipitations.

Tous les processus de l'infiltration sont représentés avec une méthode d'estimation des pertes. La pluie qui ne s'infiltre pas est automatiquement transformée en un ruissellement. Tous les processus hydrologiques et hydrauliques représentant la genèse de l'écoulement concentré dans les cours d'eau sont considérés dans les modèles de **transformation**. On suppose dans notre cas qu'on à pas un **écoulement de base** ou débit d'étiage (*None*).

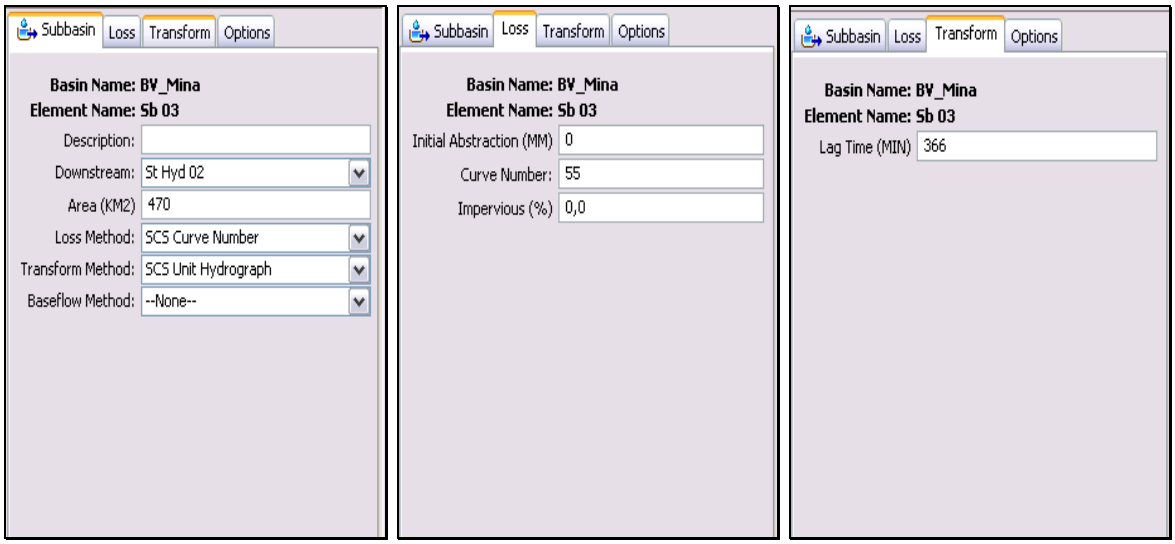


Figure VI.3 : *Fenêtres des données de l'élément (sous bassin)*

Les données relatives aux écoulements en rivière dépendent elles aussi de la méthode choisie. Donc les données nécessaires à la méthode de Muskingum-Cunge sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau VI.2 : *Données de base des écoulements en rivière*

Tronçon	Longueur	Pente	Nombre d'affluents	Coefficient de Manning
Tr 01	17	0,0046	12	0,035
Tr 02	16	0,0035	27	0,035
Tr 03	36	0,0034	23	0,035
Tr 04	14	0,0036	34	0,035
Tr 05	42	0,0036	45	0,035

La valeur du coefficient de Manning (coefficient représentatif de la rugosité de la rivière et égal à l'inverse du nombre de Strickler), est fixé à 0,035 pour tous les biefs ce qui correspond à une valeur courante de ce nombre pour ce type de rivière.

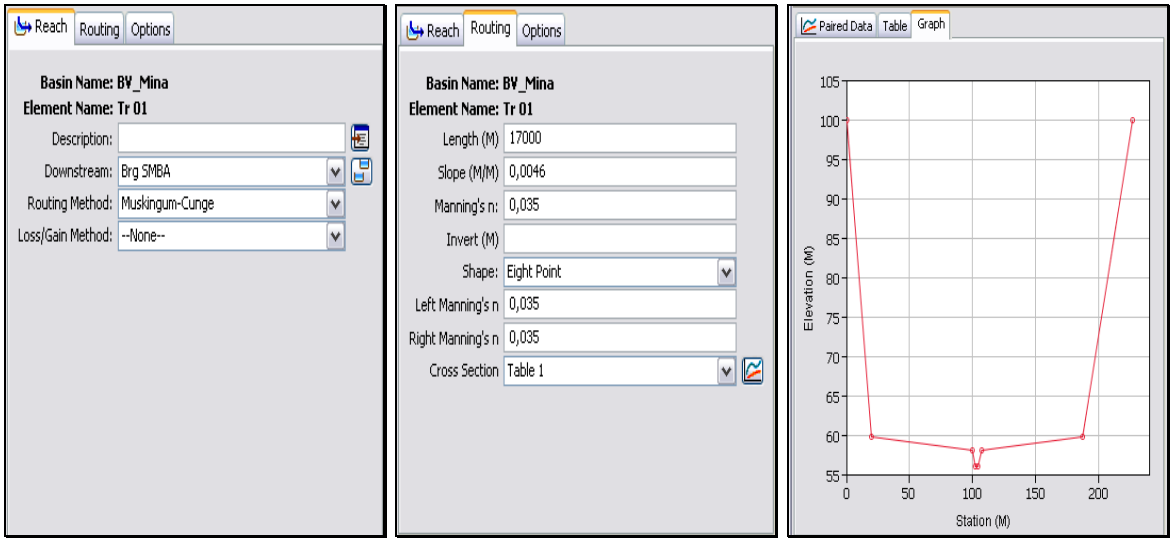


Figure V.4 *: Fenêtres de saisie des données pour chaque tronçon*

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

VI.4 Modélisation de la météorologie

Diverses méthodes sont proposées pour la modélisation d'un épisode pluvieux, connu ou non. Nous disposons cependant la pluie hypothétique basée sur la fréquence (*Frequency storm)*. Pour chaque fréquence nous avons calculé les quantités de pluies correspondantes à différents pas de temps (15min, 1, 2, 3, 6, 12, 24, …).

A partir de la formule (VI.3). Nous avons obtenu donc une série de données des précipitations pour chaque pas de temps et de chaque fréquence, les résultats sont présentés dans le tableau ci-après qui représente les données météorologiques utilisées dans le modèle HEC HMS :

Tableau VI.3 : *Les données pluviométriques de chaque fréquence*

Temps (heur)			**0,25**	**1**	**2**	**3**	**6**	**12**	**24**
Fréq (%)	1	Précip (mm)	14,18	24,27	31,77	37,18	48,65	63,67	83,32
	2		12,89	22,08	28,90	33,82	44,26	57,92	75,79
	5		11,19	19,16	25,07	29,34	38,40	50,25	65,76
	10		09,86	16,89	22,10	25,86	33,84	44,29	57,96

Pour notre projet on a utilisé la méthode de l'averse fréquentielle (*frequency storm*), cette dernière peut être utilisée pour créer une pluie synthétique à une probabilité connue.

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

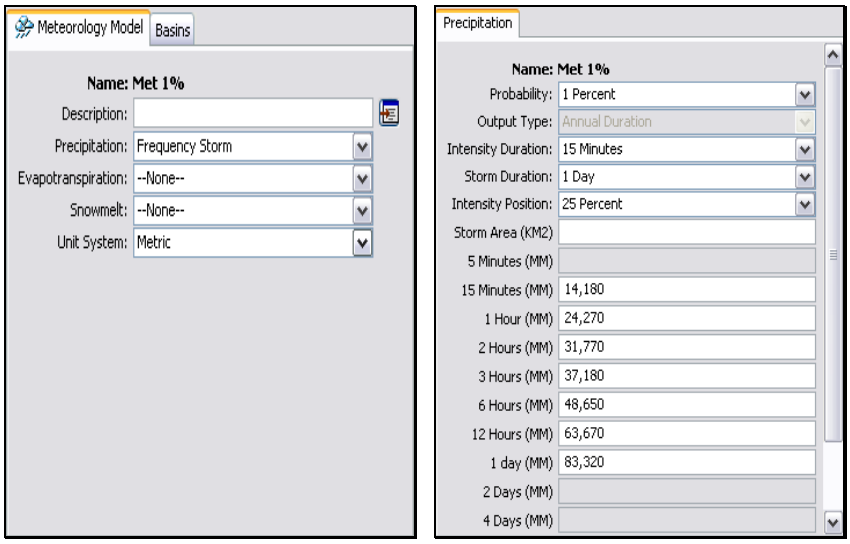


Figure VI.5 : *Fenêtres des données météorologiques de fréquence de 1%*

Remarque

Rappelons que le modèle permet de calculer l'évapotranspiration par une seule méthode qui utilise les valeurs mensuelles avec un coefficient de correction. Les pertes par évaporation étant négligeables en période de l'événement de crue aussi on n'a pas considéré le facteur évapotranspiration.

VI.5 Les données de spécifications de contrôle

Les spécifications de contrôle sont l'une des composantes exigées pour une exécution du logiciel, avec un modèle de bassin versant et un modèle climatique. La date initiale et le temps de calcul ainsi que la date et le temps finaux sont spécifiés dans la fenêtre *(Control spicification)* voir figure VI.6. L'intervalle du temps, aussi a appelé pas de temps de calcul, est aussi spécifié. L'intervalle du temps (Δt) détermine la précision dans les résultats de calcul. La gamme des intervalles disponibles comprenant les intervalles de 1 minute à 24 heures est donnée comme suit :

$$\Delta t \leq 0.29 T_{Lag} = 0.174 T_c$$

T_c : temps de concentration.

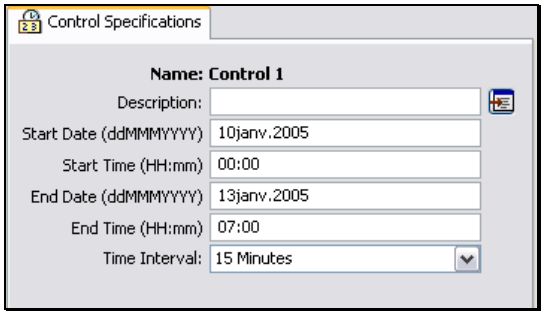


Figure VI.6 : *Fenêtre de spécifications du contrôle*

VI.6 Calage du modèle

Le logiciel HEC-HMS nous permet, à partir de relevé de données physiques relevées sur le terrain tel que le débit, d'optimiser certains paramètres caractérisant les éléments du bassin versant. Il a donc été possible en entrant la courbe du débit à l'exutoire lors de l'événement pluvieux de caler certains paramètres sur la crue.

Pour chaque sous-bassin, le logiciel peut optimiser:

- Le numéro de la courbe (CN) dans notre modèle d'infiltration,
- Le temps de concentration et le temps de décalage (Tlag).

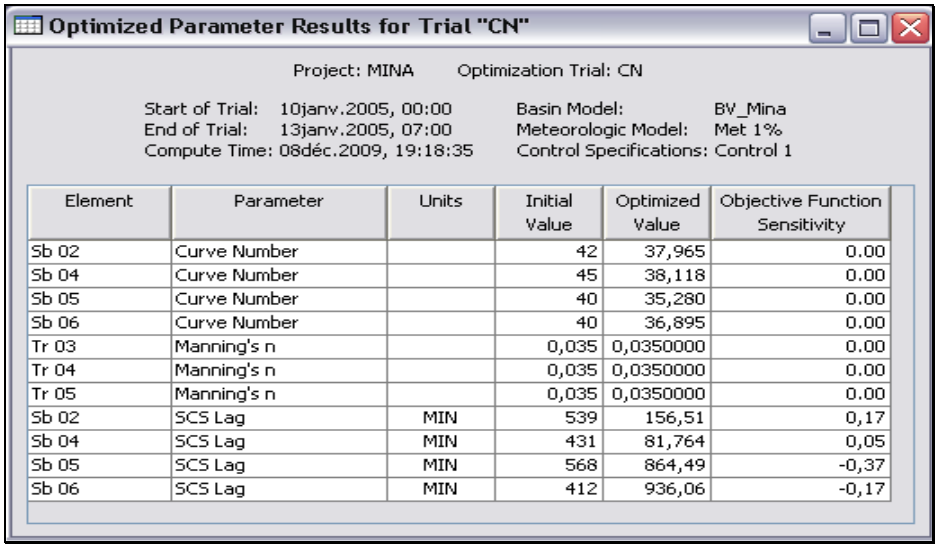
Pour chaque paramètre à optimiser nous pouvons entrer une valeur de départ et des valeurs limites à ne pas franchir. Nous avons aussi le choix entre quatre critères de convergences dont deux ont donné des résultats satisfaisants au niveau du volume de crue.

Pour des raisons de gain de temps de calcul notamment mais aussi pour la cohérence des valeurs obtenues nous n'avons pas fait optimiser tous les paramètres. Les valeurs des paramètres optimisés comparées avec les valeurs de départ sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau VI.4: *Les valeurs de tous les paramètres optimisés.*

BASSIN VERSANT	Curve number (CN)		Standard lag (min)		Coefficient de Manning	
	Avant calage	Apres calage	Avant calage	Apres calage	Avant calage	Apres calage
SB 01	45	39,2	226	206	0,035	0,035
SB 02	42	37,9	539	156,5	0,035	0,035
SB 03	55	48,5	366	278	0,035	0,035
SB 04	45	38,1	431	81,7	0,035	0,035
SB 05	40	35,3	568	864	0,035	0,035
SB 06	40	36,9	412	936	0,035	0,035

Dans l'ensemble les résultats semblent cohérents et restent assez proches de nos estimations, le temps de décalage est un peut diffère a celui qu'on à prés avant le calage ce qui correspondent en général aux grands sous-bassins versants.



Optimized Parameter Results for Trial "CN"

Project: MINA Optimization Trial: CN

Start of Trial: 10janv.2005, 00:00 Basin Model: BV_Mina
End of Trial: 13janv.2005, 07:00 Meteorologic Model: Met 1%
Compute Time: 08déc.2009, 19:18:35 Control Specifications: Control 1

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
Sb 02	Curve Number		42	37,965	0.00
Sb 04	Curve Number		45	38,118	0.00
Sb 05	Curve Number		40	35,280	0.00
Sb 06	Curve Number		40	36,895	0.00
Tr 03	Manning's n		0,035	0,0350000	0.00
Tr 04	Manning's n		0,035	0,0350000	0.00
Tr 05	Manning's n		0,035	0,0350000	0.00
Sb 02	SCS Lag	MIN	539	156,51	0,17
Sb 04	SCS Lag	MIN	431	81,764	0,05
Sb 05	SCS Lag	MIN	568	864,49	-0,37
Sb 06	SCS Lag	MIN	412	936,06	-0,17

Figure VI.7 : *Fenêtre des paramètres avant et après le calage*

VI.7 Exploitation des résultats

VI.7.1 Calculs effectués

Les derniers paramètres à fixer avant de lancer les calculs sont la durée de calcul et le pas de temps. Leurs valeurs sont saisies dans la fenêtre de figure VI.5. Après le calage des données nécessaires, le modèle contient un moteur de calcul (*HMS * compute*), qui est représenté dans la figure ci-dessous. Dans le cas ou il y a un problème dans l'exécution (manque de données ou autre), le moteur arrête les calculs et dirige l'utilisateur vers un rapport affichant les motifs de suspension des calculs et les erreurs correspondantes.

Figure VI.8 : *Fenêtre de moteur de calcul*

Nous avons ainsi effectué plusieurs simulations sur une durée un peu plus longue que l'événement pluvieux :

- Le premier essai fut un test et lancé avec les paramètres estimés, le modèle de précipitation fréquentielle avec un pas de temps plus fin (15 minutes).

- Ensuite un calcul a été effectué avec un pas de temps grand (30 minutes) pour les paramètres non calés.

- Enfin nous lancé le calage du modèle avec un pas de temps plus grand (1 heure), ceci afin de diminuer le temps de calcul qui devenait assez grand lorsque nous faisions caler tous les paramètres et pour des pas de temps plus petits.

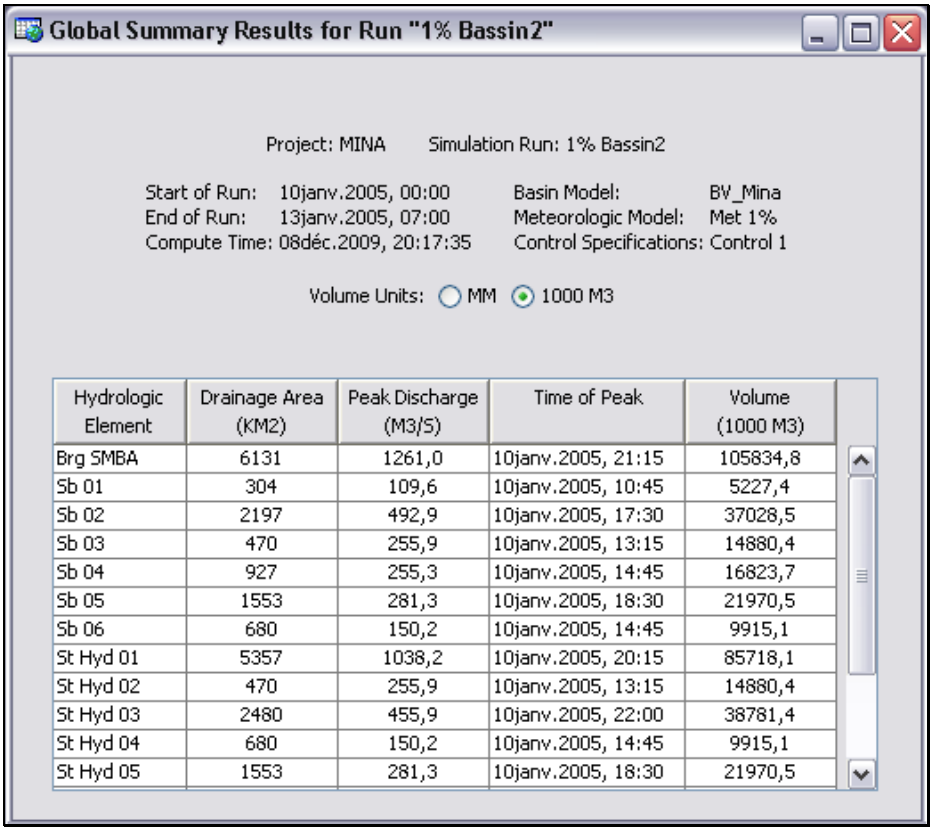
VI.7.2 Débits et volumes obtenus

Le tableau suivant représente le débit de pointe des pas de temps de simulation dans le cas où le barrage de Bekhada est plein.

Tableau VI.5 : *Résultats pour différents pas de temps*

Pas de temps		15min	30min	1hr
Débit de pointe (m^3/s)	SB 01	109,6	107,9	105,8
	SB 02	492,9	490,2	486,4
	SB 03	255,9	253,2	248,4
	SB 04	255,3	253,3	250,5
	SB 05	281,3	280,0	278,4
	SB 06	150,2	149,1	147,6
	Oued El Abtal	1038,2	1035,6	1030,2
	Brg SMBA	1261,0	1256,0	1246,3

La figure ci-dessous définit les potentialités superficielles simulées au niveau de chaque site ainsi que les volumes apportés durant l'événement par chaque sous bassins du modèle et le volume total écoulé, particulièrement à l'exutoire du site du Barrage de Sidi M'hamed Be Aouda où est évalué le débit de pointe de crue de fréquence 1% à prés de 1261,0 m^3/s, avec un apport liquide d'environ de 105.83 Hm^3.

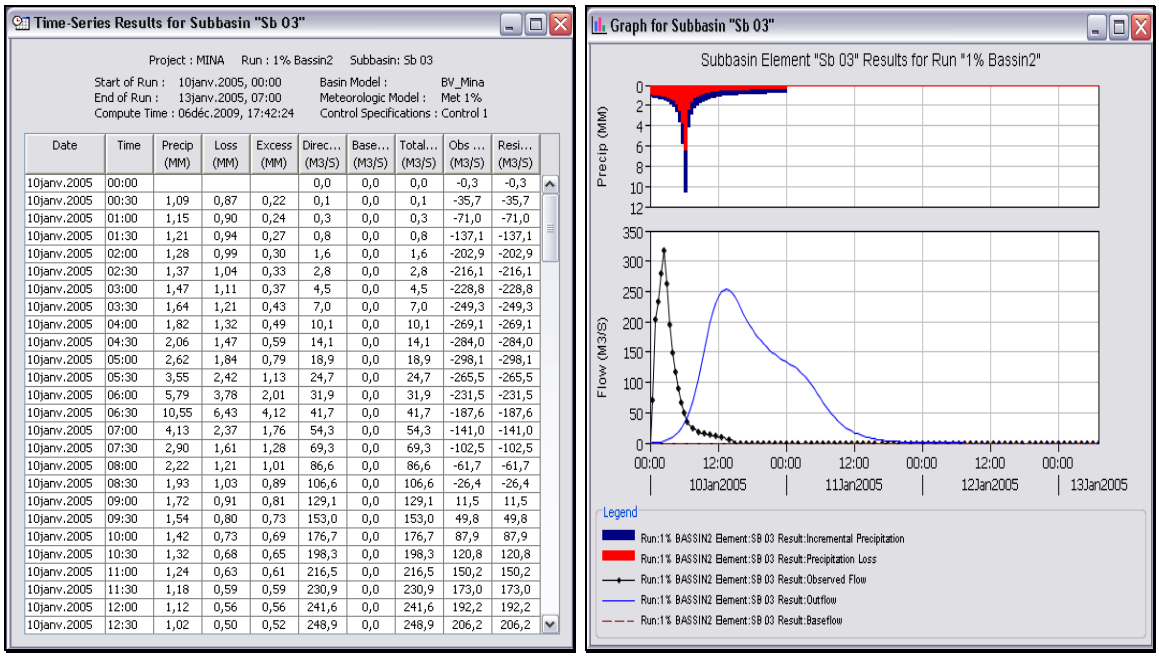


Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
Brg SMBA	6131	1261,0	10janv.2005, 21:15	105834,8
Sb 01	304	109,6	10janv.2005, 10:45	5227,4
Sb 02	2197	492,9	10janv.2005, 17:30	37028,5
Sb 03	470	255,9	10janv.2005, 13:15	14880,4
Sb 04	927	255,3	10janv.2005, 14:45	16823,7
Sb 05	1553	281,3	10janv.2005, 18:30	21970,5
Sb 06	680	150,2	10janv.2005, 14:45	9915,1
St Hyd 01	5357	1038,2	10janv.2005, 20:15	85718,1
St Hyd 02	470	255,9	10janv.2005, 13:15	14880,4
St Hyd 03	2480	455,9	10janv.2005, 22:00	38781,4
St Hyd 04	680	150,2	10janv.2005, 14:45	9915,1
St Hyd 05	1553	281,3	10janv.2005, 18:30	21970,5

Figure VI.9 : *Débits et volumes apportés par les sous bassins de fréquence 1%*

Le modèle donne des résultats, pour chaque sous bassin, dans un tableau présentant le débit de pointe, les précipitations et les pertes à chaque pas de temps. Le passage du l'hyétogramme de pluie à l'hydrogramme de crue fait intervenir toutes les caractéristiques météorologiques, physiques et hydrologiques du bassin versant considéré. Dès lors, on comprendra aisément que la détermination d'une relation analytique rigoureuse entre les précipitations et les débits est une tâche très difficile. Toutefois, l'analyse de séries de couples pluies-débits permet d'obtenir des informations pertinentes sur la fonction de transfert du bassin versant.

Le modèle donne aussi un hydrogramme de crue, avec un hyétogramme des précipitations et les pertes comme le montre la figure suivante (exemple sous bassin 03):



Date	Time	Precip (MM)	Loss (MM)	Excess (MM)	Direc... (M3/S)	Base... (M3/S)	Total... (M3/S)	Obs ... (M3/S)	Resi... (M3/S)
10janv.2005	00:00				0,0	0,0	0,0	-0,3	-0,3
10janv.2005	00:30	1,09	0,87	0,22	0,1	0,0	0,1	-35,7	-35,7
10janv.2005	01:00	1,15	0,90	0,24	0,3	0,0	0,3	-71,0	-71,0
10janv.2005	01:30	1,21	0,94	0,27	0,8	0,0	0,8	-137,1	-137,1
10janv.2005	02:00	1,28	0,99	0,30	1,6	0,0	1,6	-202,9	-202,9
10janv.2005	02:30	1,37	1,04	0,33	2,8	0,0	2,8	-216,1	-216,1
10janv.2005	03:00	1,47	1,11	0,37	4,5	0,0	4,5	-228,8	-228,8
10janv.2005	03:30	1,64	1,21	0,43	7,0	0,0	7,0	-249,3	-249,3
10janv.2005	04:00	1,82	1,32	0,49	10,1	0,0	10,1	-269,1	-269,1
10janv.2005	04:30	2,06	1,47	0,59	14,1	0,0	14,1	-284,0	-284,0
10janv.2005	05:00	2,62	1,84	0,79	18,9	0,0	18,9	-298,1	-298,1
10janv.2005	05:30	3,55	2,42	1,13	24,7	0,0	24,7	-265,5	-265,5
10janv.2005	06:00	5,79	3,78	2,01	31,9	0,0	31,9	-231,5	-231,5
10janv.2005	06:30	10,55	6,43	4,12	41,7	0,0	41,7	-187,6	-187,6
10janv.2005	07:00	4,13	2,37	1,76	54,3	0,0	54,3	-141,0	-141,0
10janv.2005	07:30	2,90	1,61	1,28	69,3	0,0	69,3	-102,5	-102,5
10janv.2005	08:00	2,22	1,21	1,01	86,6	0,0	86,6	-61,7	-61,7
10janv.2005	08:30	1,93	1,03	0,89	106,6	0,0	106,6	-26,4	-26,4
10janv.2005	09:00	1,72	0,91	0,81	129,1	0,0	129,1	11,5	11,5
10janv.2005	09:30	1,54	0,80	0,73	153,0	0,0	153,0	49,8	49,8
10janv.2005	10:00	1,42	0,73	0,69	176,7	0,0	176,7	87,9	87,9
10janv.2005	10:30	1,32	0,68	0,65	198,3	0,0	198,3	120,8	120,8
10janv.2005	11:00	1,24	0,63	0,61	216,5	0,0	216,5	150,2	150,2
10janv.2005	11:30	1,18	0,59	0,59	230,9	0,0	230,9	173,0	173,0
10janv.2005	12:00	1,12	0,56	0,56	241,6	0,0	241,6	192,2	192,2
10janv.2005	12:30	1,02	0,50	0,52	248,9	0,0	248,9	206,2	206,2

Figure VI.10 : *Fenêtre du tableau de résultats et de l'hydrogramme de crue (sous bassin)*

Résultats des débits de pointes obtenues pour chaque site et de chaque fréquence.

Tableau VI.6 : *débits de pointes obtenues pour chaque fréquence*

Fréquence		1%	2%	5%	10%
Débit de pointe (m^3/s)	SB 01	109,6	102,2	90,7	71,7
	SB 02	492,9	459,5	406,8	330,5
	SB 03	255,9	220,3	211,5	175,3
	SB 04	255,3	219,6	211,2	172,9
	SB 05	281,3	256,8	230,7	185,0
	SB 06	150,2	134,8	124,1	99,5
	Oued Abed	455,9	425,8	360,2	287,7
	Oued Abtal	1038,2	920,8	831,0	660,1
	Brg SMBA	1261,0	1120,9	1004,4	796,4

Nous présentons maintenant les hydrogrammes obtenus par la simulation de l'événement de chaque exutoire des sites étudiés ainsi que l'hydrogramme total généré par les bassins versants de l'oued Mina au site du station de Oued El Abtal et du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda.

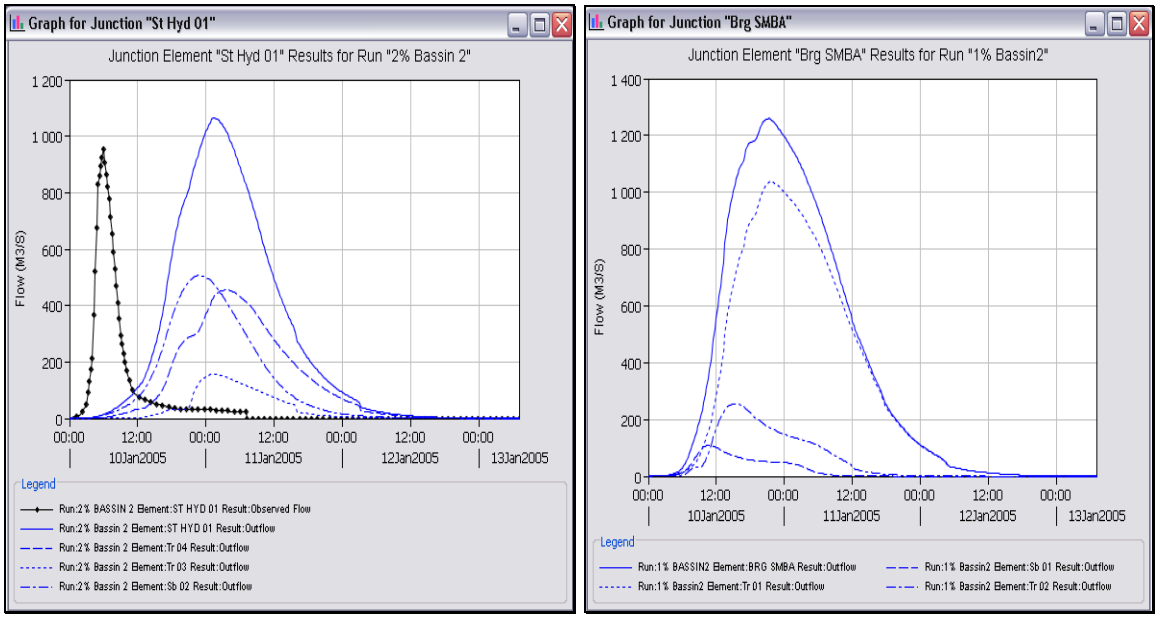


Figure VI.11 : *Hydrogrammes total obtenus au bge de SMBA.*

Le tableau ci-dessous confirme les proportions des débits simulés dans les différents affluents avec ceux estimés par les formules empiriques et avec les données observées pour la fréquence de 1%.

Tableau VI.7 : *Comparaison des résultats obtenus de chaque site d'étude pour la fréquence de 1%, de la station d'Oued el Abtal*

BASSIN VERSANT	Débit de pointe (m3/s)		
	Observé	Calculé	Simulé
SB 01	-	199,59	109,6
SB 02	-	706,78	492,9
SB 03	415,61	229,83	255,9
SB 04	-	410,10	255,3
SB 05	-	580,51	281,3
SB 06	-	309,27	150,2
Oued Abtal	1035,8	1363,26	1038,2
Brg SMBA	-	1429,06	1261,0

Sur les graphes suivants nous avons présentent les débits de chaque fréquence à la station d'Oued el Abtal et Sidi Abdelkader Djilali dans le cas des précipitations fréquentielles simulé par le modèle HEC-HMS et les débits calculé par les formules empiriques, et en comparaison au débit observé durant la durée de simulations.

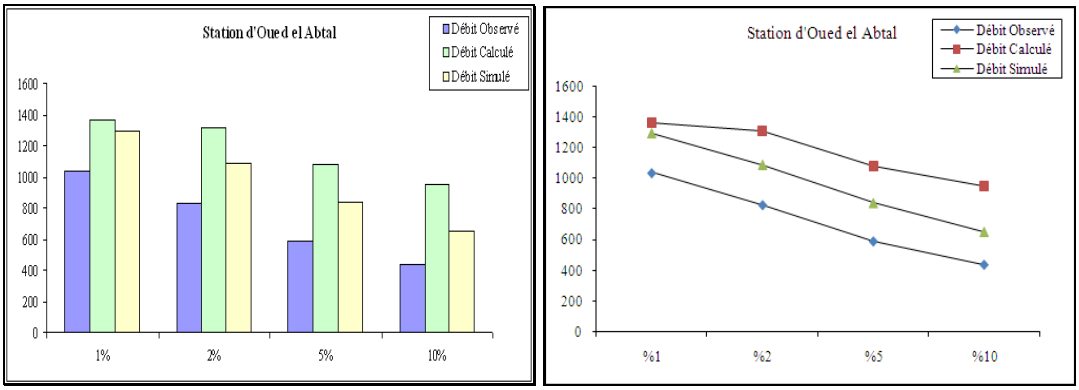


Figure VI.12 : *Débit observés et simulés à Oued el Abtal de chaque fréquence d'étude*

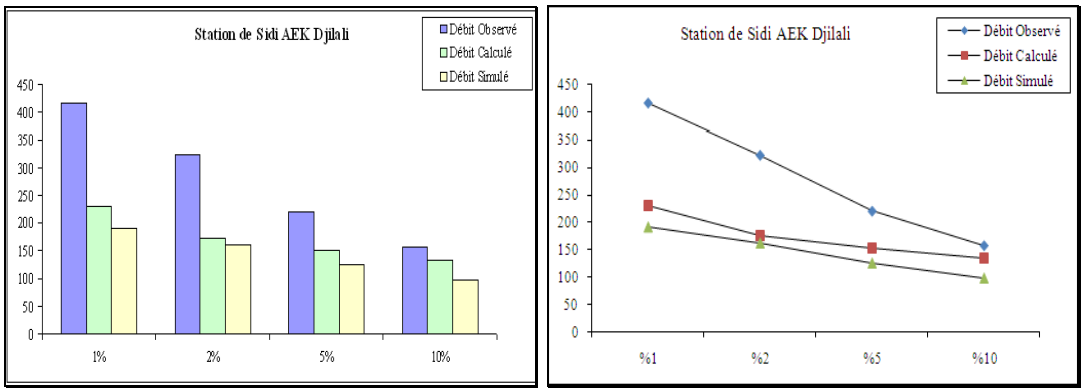


Figure VI.13 : *Débit observés et simulés à Sidi AEK Djilali de chaque fréquence d'étude*

VI.7.3 Conclusion et recommandations

A partir des résultats obtenus on remarque que le modèle donne des résultats comparables avec ceux obtenus par les formules pour la fréquence de 1%. Pour la fréquence de 10% le modèle donne des résultats un peu diffèrent avec ceux estimés par les formules.

Les résultats obtenus dans cette étude, montrent d'abord que le modèle donne des résultats plus ou moins acceptables comparativement aux valeurs calculées par les formules. Pour le débit de pointe de chaque site et chaque fréquence, la simulation des paramètres du bilan hydrique a été réalisée par la méthode du SCS. Les autres méthodes intégrées dans le modèle, demandent des paramètres peu disponibles.

La simulation donne un débit de pointe de fréquence 1% égal à 1038,2 m^3/s relativement assez comparable au résultat correspondant obtenu par les formules empiriques contrôlées sur la base des données de jaugeages disponibles au niveau de la station d'Oued el Abtal.

Le modèle HEC-HMS peut être utilisé en Algérie comme modèle performant pour le calcul des débits de pointe de projet (barrage, protection contre les inondations...) des bassins versants non jaugés.

CONCLUSION GENERALE

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dés lors que l'on s'intéresse aux problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique (inondation, sécheresse). Elle est sensée pouvoir décrire de façon fidèle les différentes étapes de la transformation pluie en débit, et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages.

Elle est sensée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement des ouvrage hydrauliques, de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique du bassin versant étudié.

L'outil de modélisation retenu dans cette étude est le modèle américaine HEC-HMS, développé par le *(US Army Corps of Engineers*). Ce modèle est conçu pour simuler les précipitations en ruissellement par plusieurs méthodes, parmi ces nombreux méthodes on a utilisés les méthodes de SCS (*Soil Conservation Service*) puisqu'elle est simple a appliquées et qui n'exigent pas beaucoup de paramètres comme les autre méthodes incluent sur ce modèle.

La simulation donne un débit de pointe de fréquence 1% égal à $1038.2 m^3/s$ relativement assez comparable avec le débit de pointe observé a la station d'Oued El Abtal et aussi aux résultats correspondant obtenu par les formules empiriques contrôlées sur la base des données de jaugeage disponibles au niveau de cette station.

Donc on peut dire que le modèle HEC-HMS peut être utilisé en Algérie comme modèle performant pour le calcul des débits de pointe de projet (barrage, protection contre les inondations,...) au niveau des bassin versant qui ne comporte aucune station hydrométrique, (aux bassins versant non jaugés).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[ACHITE, MEDDI05] M. Achite, M. Meddi, Variabilité spatio-temporelle des apports liquide et solide en zone semi-aride. Cas du bassin versant de l'oued Mina (N-O Algérien), 2005.

[BEDIENT88]. P. B. Bedient & W. C. Huber, Hydrology and floodplain analysis. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. 1988.

[DHI03]. DHI WATER & ENVIRONMENT, MIKE BASIN, A Versatile Decision Support Tool For Integrated Water Resources Management Planning, Tutorial, DHI Denmark 2003.

[GAUME00]. E. GAUME, Hydrologie: Cycle de l'eau et modélisation pluie-débit, ENPC-CEREVE, Novembre 2000.

[GAUME 06] Eric GAUME, Hydrologie de versants et de bassins versants et modélisation pluie-débit, Edition 2006.

[HEC-HMS02] Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Applications Guide, December 2002.

[HEC-HMS06] Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS, User's Manual, April 2006.

[HEC-HMS00] Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, March 2000.

[HENINE05] HENINE Hocine, Interfaçage entre un modèle hydrologique/modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG Mémoire de magister 2005.

[HUBERT84] Pierre Hubert, Une introduction à la gestion de l'eau, 1ere Edition, 1984, Ellipses, Paris, France, ISBN 2-7298-9603-1

[IDER04] K. IDER, Modélisation hydrologique d'un cours d'eau- Application à Oued Soummam- Magister, INRIA-ENP, 2004.

[LLAMAS93] J. LLAMAS, Hydrologie générale, Gaëtan Morin éditeur, 1993.

[LABORDE00] J.P. Laborde, Eléments d'hydrologie de surface, Edition 2000.

[LITELLWOOD02]. I. G. Littlewood, K Down, J. R. Parker & D. A. Post, IHACRES, Catchment-scale rainfall- Streamflow Modelling, The Australian National University, September 2003.

[MAFTAI02]. C. P. MAFTEI, Etudes concernant les écoulements superficiels modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti-Roumanie, Mai 2002

[MAISON00]. P. MAISON, Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant (approche mécaniste simplifiée de la zone saturée), (Thèse INP Toulouse-France), 2000.

[MORIN] G. MORIN, Le modèle hydrologique CEQUEAU, exemple d'utilisation, INRS-EAU, Université du Québec.

[MUSY98] André MUSY, Hydrologie générale Edition HGA, Bucarest 1998.

[VAUCLIN91]. M. VAUCLIN & G. VACHAUD, Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu naturel : approche déterministe ou stochastique ? Institut de mécanique de Grenoble, 1991

ANNEXE I
PLUVIOMETRIE DU BASSIN VERSANT

I.1 Station Oued El Abtal

I.1.1 Résultats de l'ajustement

Gumbel (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 30
Paramètres : u = 25.601331 ; alpha = 7.831849
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ;T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Pjmax (mm)	Ecart-type (mm)	Intervalle de confiance 95% (mm)	
10000.0	0.9999	97.7	11.1	76.0	119
2000.0	0.9995	85.1	9.26	67.0	103
1000.0	0.9990	79.7	8.48	63.1	96.3
200.0	0.9950	67.1	6.67	54.0	80.1
100.0	0.9900	61.6	5.89	50.1	73.2
50.0	0.9800	56.2	5.12	46.1	66.2
20.0	0.9500	48.9	4.11	40.8	56.9
10.0	0.9000	43.2	3.34	36.7	49.8
5.0	0.8000	37.3	2.59	32.3	42.4

I.1.2 Test d'adéquation

Gumbel (Maximum de vraisemblance)

Hypothèses
H0 : L'échantillon provient d'une loi Gumbel
H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Gumbel

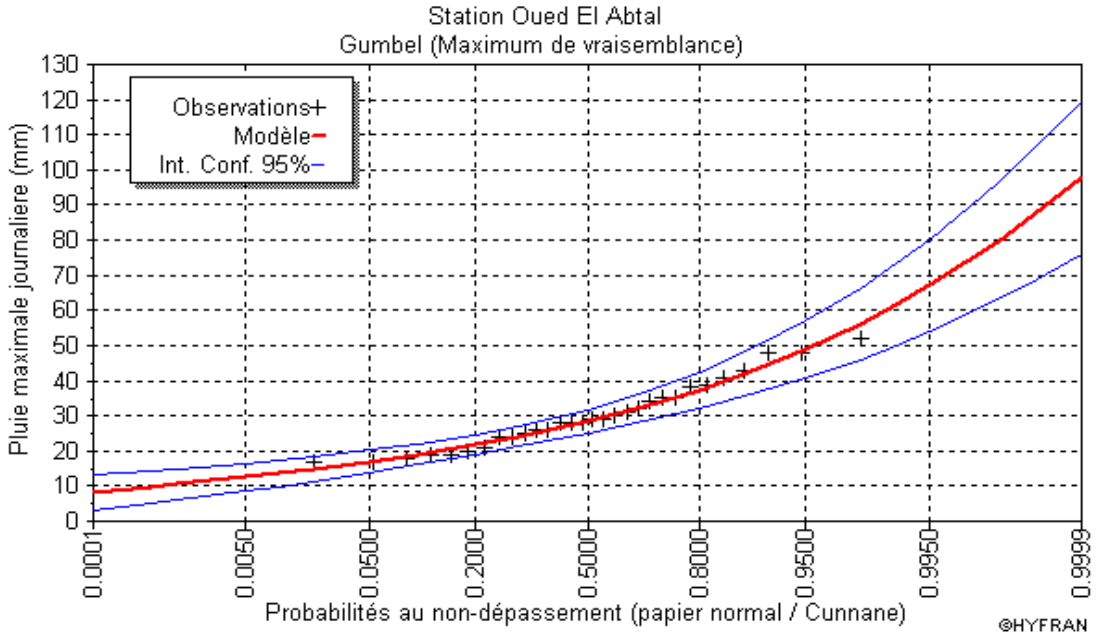
Résultats
Résultat de la statistique : $X^2 = 4.53$; p-value : p = 0.3386
Degrés de liberté : 4 ; Nombre de classes : 7

Conclusion
Nous pouvons accepter H_0 au niveau de signification de 5 %

I.1.3 Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Gumbel (Maximum de vraisemblance)

Statistiques de base	Oued El Abtal	
	Echantillon	Loi
Maximum	52.0	-
Minimum	17.0	-
Moyenne	30.1	30.1
Ecart-type	9.62	10.0
Médiane	28.5	28.5
Coefficient de variation (Cv)	0.319	0.333
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.626	1.14
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.41	2.40
Nombre d'observations	30	-



I.2 Station Sidi AEK Djilali

II.2.1 Résultats de l'ajustement

Gumbel (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 30
Paramètres : u = 22.781765 ; alpha = 7.582214
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ; T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Pjmax (mm)	Ecart-type (mm)	Intervalle de confiance 95% (mm)	
10000.0	0.9999	92.6	10.7	71.6	114
2000.0	0.9995	80.4	8.97	62.8	98.0
1000.0	0.9990	75.2	8.21	59.1	91.2
200.0	0.9950	62.9	6.45	50.3	75.6
100.0	0.9900	57.7	5.70	46.5	68.8
50.0	0.9800	52.4	4.96	42.7	62.1
20.0	0.9500	45.3	3.97	37.5	53.1
10.0	0.9000	39.8	3.24	33.5	46.2
5.0	0.8000	34.2	2.51	29.2	39.1

I.2.2 Test d'adéquation

Gumbel (Maximum de vraisemblance)

Hypothèses
H0 : L'échantillon provient d'une loi Gumbel
H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Gumbel

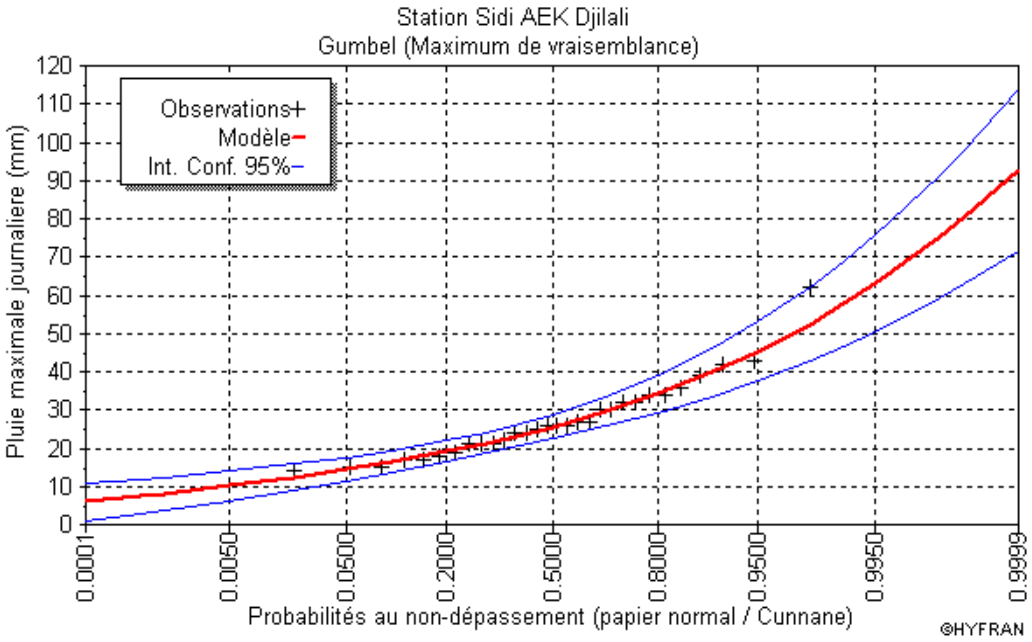
Résultats
Résultat de la statistique : $X^2 = 2.67$; p-value : p = 0.6151
Degrés de liberté : 4 ; Nombre de classes : 7

Conclusion
Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

I.2.3 Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Gumbel (Maximum de vraisemblance)

Statistiques de base	Sidi AEK Djilali	
	Echantillon	Loi
Maximum	62.0	-
Minimum	14.0	-
Moyenne	27.3	27.2
Ecart-type	10.3	9.72
Médiane	26.0	25.6
Coefficient de variation (Cv)	0.376	0.358
Coefficient d'asymétrie (Cs)	1.41	1.14
Coefficient d'aplatissement (Ck)	5.12	2.40
Nombre d'observations	30	-



I.3 Station Oued El Abtal + Station Sidi AEK Djilali

I.3.1 Résultats de l'ajustement

Gumbel (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 60
Paramètres : u = 24.174919 ; alpha = 7.745189
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ; T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Pjmax (mm)	Ecart-type (mm)	Intervalle de confiance 95% (mm)	
10000.0	0.9999	95.5	7.66	80.5	111
2000.0	0.9995	83.0	6.41	70.5	95.6
1000.0	0.9990	77.7	5.86	66.2	89.2
200.0	0.9950	65.2	4.61	56.1	74.2
100.0	0.9900	59.8	4.08	51.8	67.8
50.0	0.9800	54.4	3.55	47.4	61.4
20.0	0.9500	47.2	2.85	41.6	52.8
10.0	0.9000	41.6	2.32	37.0	46.2
5.0	0.8000	35.8	1.81	32.2	39.3
2.0	0.5000	27.0	1.17	24.7	29.3

I.3.2 Test d'adéquation

Gumbel (Maximum de vraisemblance)

Hypothèses
H0 : L'échantillon provient d'une loi Gumbel
H1 : L'échantillon ne provient pas d'une loi Gumbel

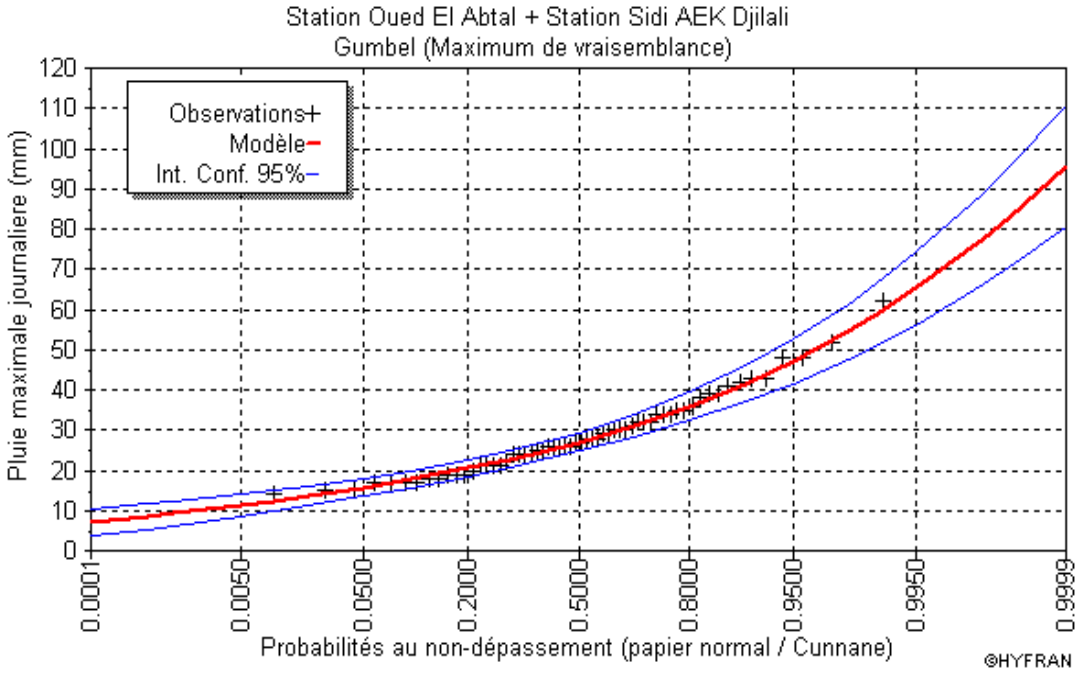
Résultats
Résultat de la statistique : $X^2 = 3.33$; p-value : p = 0.8526
Degrés de liberté : 7 ; Nombre de classes : 10

Conclusion
Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5 %

I.3.3 Comparaison des caractéristiques de la loi et de l'échantillon

Gumbel(Maximum de vraisemblance)

Statistiques de base	Ens. Des stations	
	Ech	Loi
Maximum	62.0	-
Minimum	14.0	-
Moyenne	28.7	28.6
Ecart-type	9.97	9.93
Médiane	27.0	27.0
Coefficient de variation (Cv)	0.347	0.347
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.972	1.14
Coefficient d'aplatissement (Ck)	3.79	2.40
Nombre d'observations	60	-



ANNEXE II
ETUDE DES CRUES

II.1 DEBIT MAXIMUM

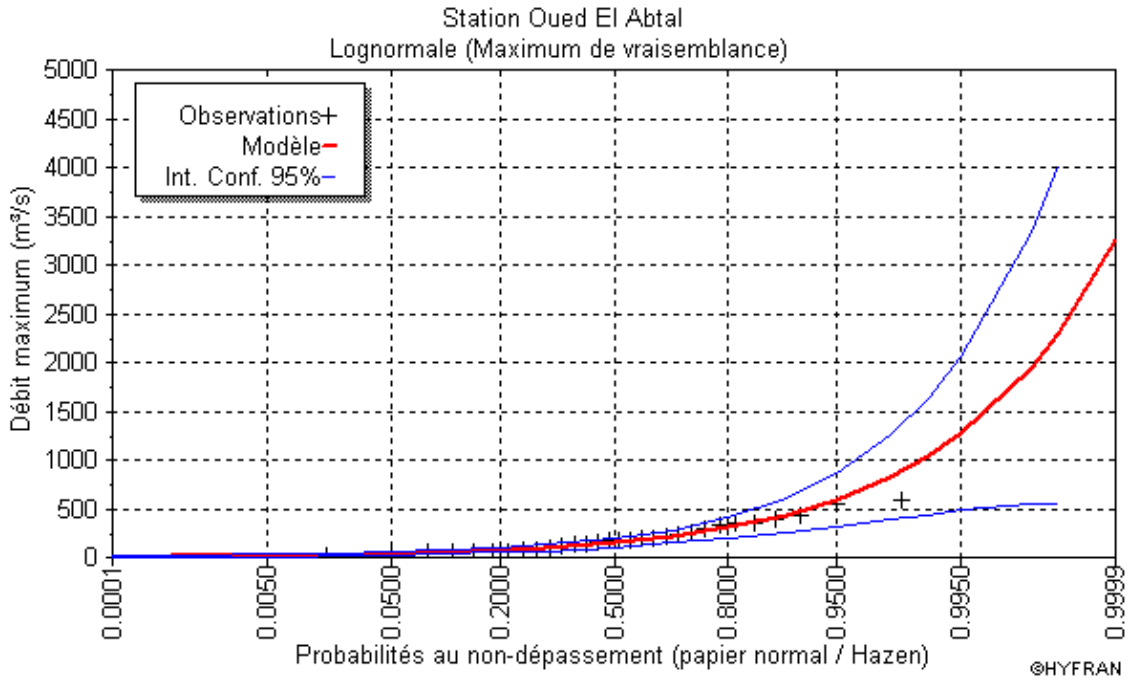
II.1.1 Station Oued El Abtal

Résultats de l'ajustement

Lognormale (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 30
Paramètres : mu = 5.025781; sigma = 0.823898
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ; T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Q_{max} (m^3/s)	Ecart-type (m^3/s)	Intervalle de confiance 95% (m^3/s)	
10000.0	0.9999	3260	1400	-	-
2000.0	0.9995	2290	886	555	4030
1000.0	0.9990	1940	712	547	3340
200.0	0.9950	1270	403	482	2060
100.0	0.9900	1040	304	440	1630
50.0	0.9800	827	222	392	1260
20.0	0.9500	591	138	321	861
10.0	0.9000	438	89.6	262	613
5.0	0.8000	305	53.6	200	410
3.0	0.6667	217	34.2	150	284
2.0	0.5000	152	22.9	107	197



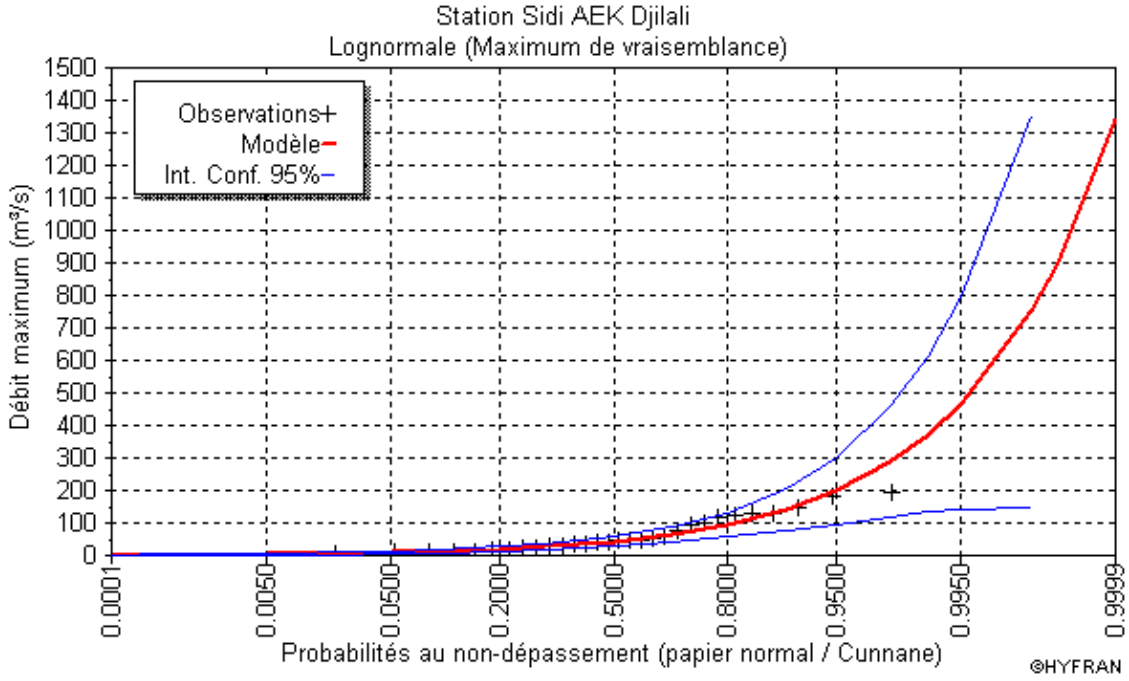
II.1.2 Station Sidi AEK Djilali

Résultats de l'ajustement

Lognormale (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 30
Paramètres : mu = 3.777561; sigma = 0.937327
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ; T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Q_{max} (m^3/s)	Ecart-type (m^3/s)	Intervalle de confiance 95% (m^3/s)	
10000.0	0.9999	1340	643	-	-
2000.0	0.9995	902	390	-	-
1000.0	0.9990	750	308	147	1350
200.0	0.9950	467	165	143	791
100.0	0.9900	371	122	132	610
50.0	0.9800	289	86.6	119	458
20.0	0.9500	198	51.6	96.8	299
10.0	0.9000	142	32.4	78.1	205
5.0	0.8000	94.4	18.6	58.0	131
3.0	0.6667	64.6	11.4	42.3	87.0
2.0	0.5000	43.5	7.32	29.1	57.8



II.2 DEBIT MOYEN

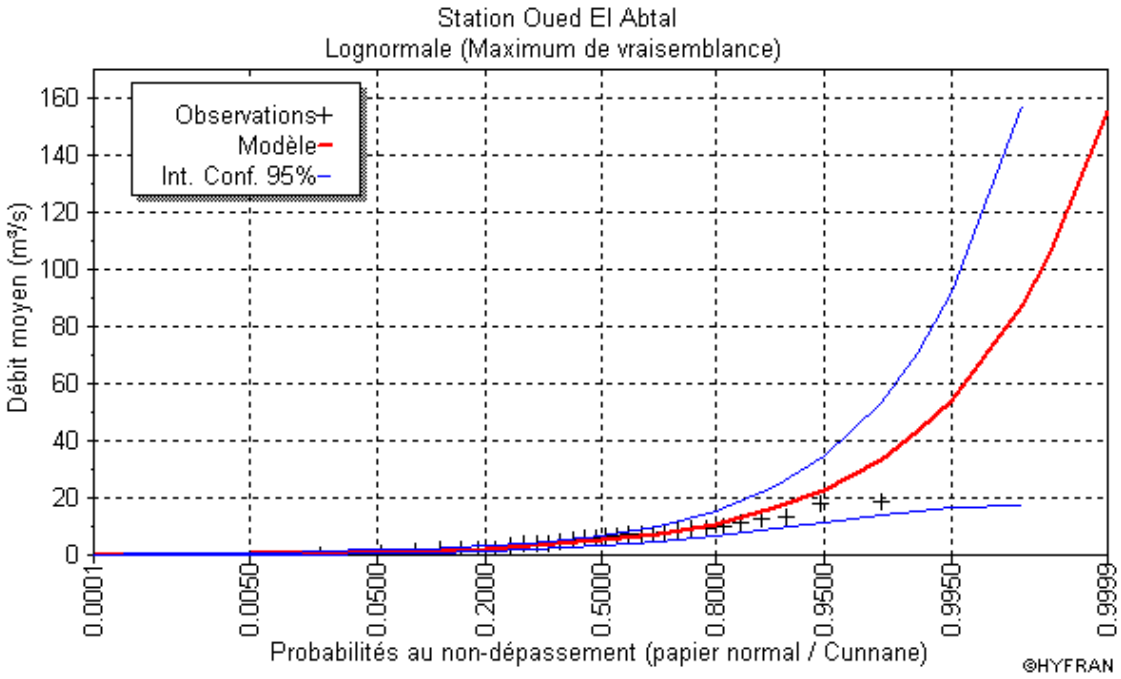
II.2.1 Station Oued El Abtal

Résultats de l'ajustement

Lognormale (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 30
Paramètres : mu = 0.713701 ; sigma = 0.656390
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ; T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Q_{moy} (m^3/s)	Ecart-type (m^3/s)	Intervalle de confiance 95% (m^3/s)	
10000.0	0.9999	23.5	8.03	7.72	39.2
2000.0	0.9995	17.7	5.45	7.02	28.4
1000.0	0.9990	15.5	4.53	6.63	24.4
200.0	0.9950	11.1	2.79	5.60	16.6
100.0	0.9900	9.40	2.20	5.10	13.7
50.0	0.9800	7.86	1.68	4.57	11.2
20.0	0.9500	6.01	1.12	3.82	8.20
10.0	0.9000	4.74	0.772	3.22	6.25
5.0	0.8000	3.55	0.497	2.57	4.52
3.0	0.6667	2.71	0.340	2.04	3.37
2.0	0.5000	2.04	0.245	1.56	2.52



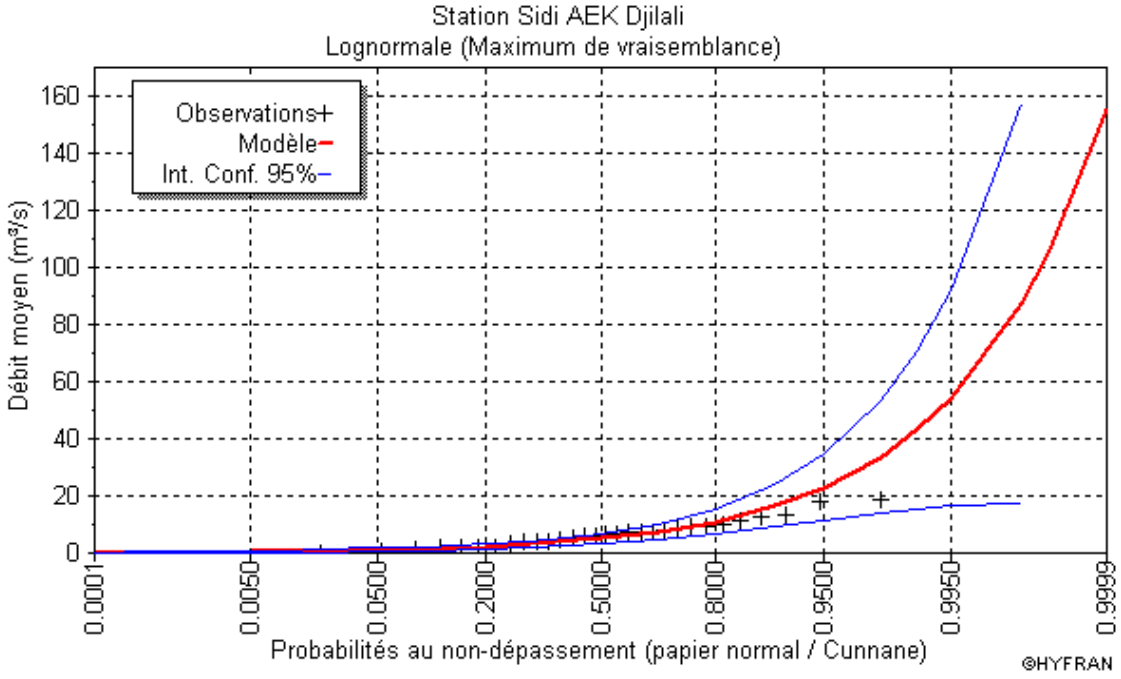
II.2.2 Station Sidi AEK Djilali

Résultats de l'ajustement

Lognormale (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 30
Paramètres : mu = -1.821753 ; sigma = 0.904815
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ; T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Q_{moy} (m^3/s)	Ecart-type (m^3/s)	Intervalle de confiance 95% (m^3/s)	
10000.0	0.9999	4.68	2.21	-	-
2000.0	0.9995	3.18	1.35	-	-
1000.0	0.9990	2.65	1.07	0.558	4.74
200.0	0.9950	1.66	0.579	0.529	2.80
100.0	0.9900	1.33	0.428	0.490	2.17
50.0	0.9800	1.04	0.306	0.438	1.64
20.0	0.9500	0.717	0.183	0.357	1.08
10.0	0.9000	0.516	0.116	0.289	0.743
5.0	0.8000	0.346	0.0669	0.215	0.477
3.0	0.6667	0.239	0.0413	0.158	0.320
2.0	0.5000	0.162	0.0267	0.109	0.214



II.3 VOLUME

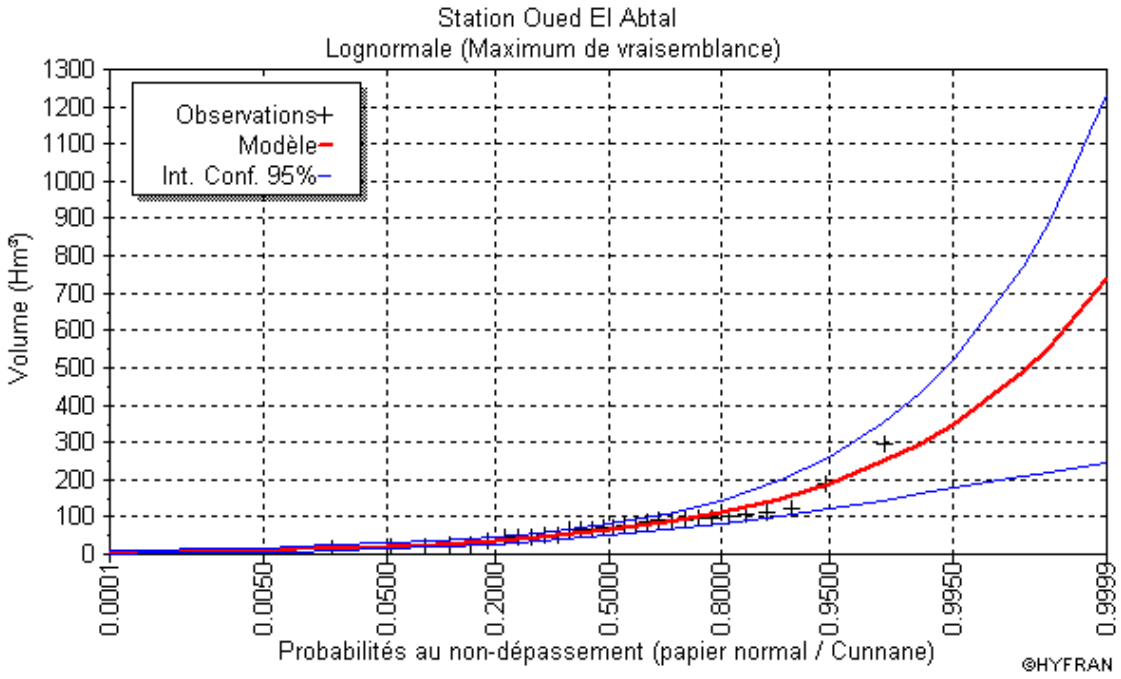
II.3.1 Station Oued El Abtal

Résultats de l'ajustement

Lognormale (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 30
Paramètres : mu = 4.16426 ; sigma = 0.656202
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ; T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Volume (Hm^3)	Ecart-type (Hm^3)	Intervalle de confiance 95% (Hm^3)	
10000.0	0.9999	739	253	243	1230
2000.0	0.9995	558	172	221	894
1000.0	0.9990	489	143	209	769
200.0	0.9950	349	88,0	176	521
100.0	0.9900	296	69,2	161	432
50.0	0.9800	248	52,9	144	351
20.0	0.9500	189	35,2	120	258
10.0	0.9000	149	24,3	102	197
5.0	0.8000	112	15,7	81,1	142
3.0	0.6667	85,4	10,7	64,4	106
2.0	0.5000	64,4	7,71	49,2	79,5



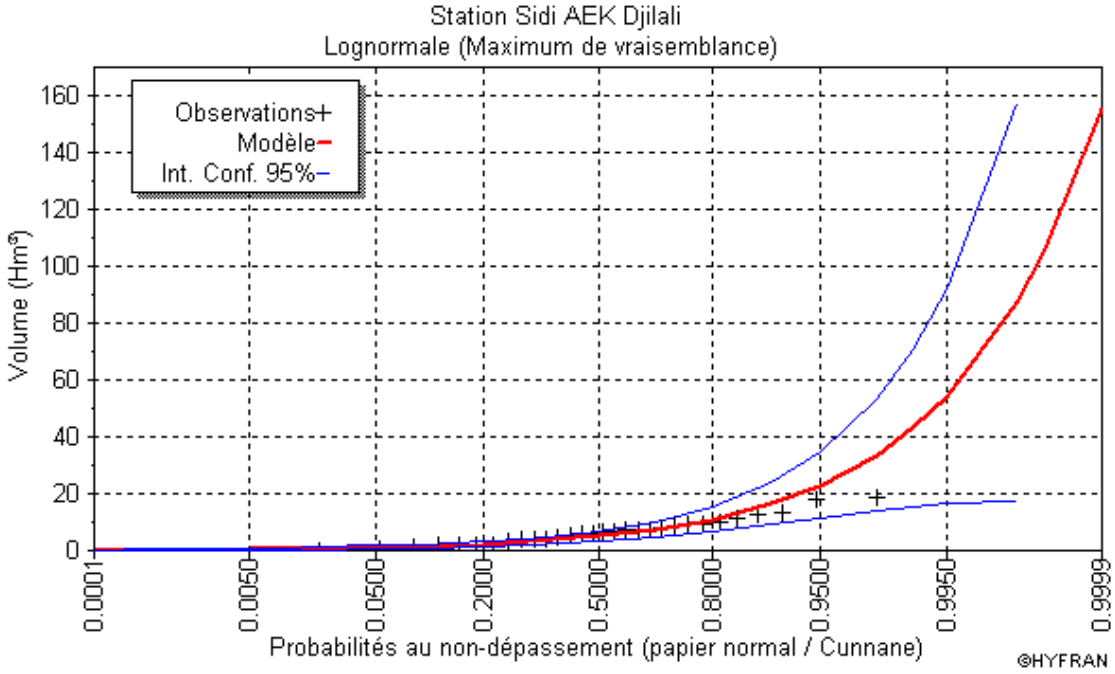
II.3.2 Station Sidi AEK Djilali

Résultats de l'ajustement

Lognormale (Maximum de vraisemblance)

Nombre d'observations : 30
Paramètres : mu = 1.6187 ; sigma = 0.92162
Quantiles : q = F(X) (probabilité au non-dépassement) ; T = 1/(1-q)

T (ans)	q (%)	Volume (Hm^3)	Ecart-type (Hm^3)	Intervalle de confiance 95% (Hm^3)	
10000.0	0.9999	155	74,7	-	-
2000.0	0.9995	105	45,3	-	-
1000.0	0.9990	87,1	35,7	17,1	157
200.0	0.9950	54,2	19,2	16,6	91,9
100.0	0.9900	43,1	14,1	15,4	70,8
50.0	0.9800	33,5	10,1	13,8	53,2
20.0	0.9500	23,0	5,99	11,2	34,7
10.0	0.9000	16,4	3,76	9,07	23,8
5.0	0.8000	11,0	2,16	6,73	15,2
3.0	0.6667	7,50	1,32	4,91	10,1
2.0	0.5000	5,05	0,85	3,38	6,71



ANNEXE III
LES VALEURS DE CN

La valeur de CN dépend de la classe hydrologique du sol et du couvert végétal. Hydrologiquement les sols sont divisés en quatre (04) groupes, à savoir :

Groupe A : regroupe les sols ayant des coefficients d'infiltrations élevées, même à l'état saturé. Ces sols présentent une transmission élevée de l'eau et concernent généralement les sables grossiers et les graviers.

Groupe B : regroupe les sols ayant des coefficients d'infiltrations moyennes, même à l'état saturé. Ces sols présentent une transmission moyenne de l'eau en profondeur et concernent généralement les sables.

Groupe C : regroupe les sols ayant des coefficients faibles une fois saturés. Ces sols empêchent le mouvement du sol de haut en bas. Ils présentent une transmission lente de l'eau et une texture fine. Ils concernent généralement les argiles.

Groupe D : regroupe les sols ayant des coefficients d'infiltration très faibles une fois saturés. Ces sols entraînent un potentiel élevé de l'écoulement superficiel. Ils présentent une transmission très lente de l'eau et une texture très fine. Ils concernent généralement les argiles se trouvant près de la surface.

En fonction de la classe hydrologique et du couvert végétal, le tableau ci-après donne la valeur de CN du sol considéré.

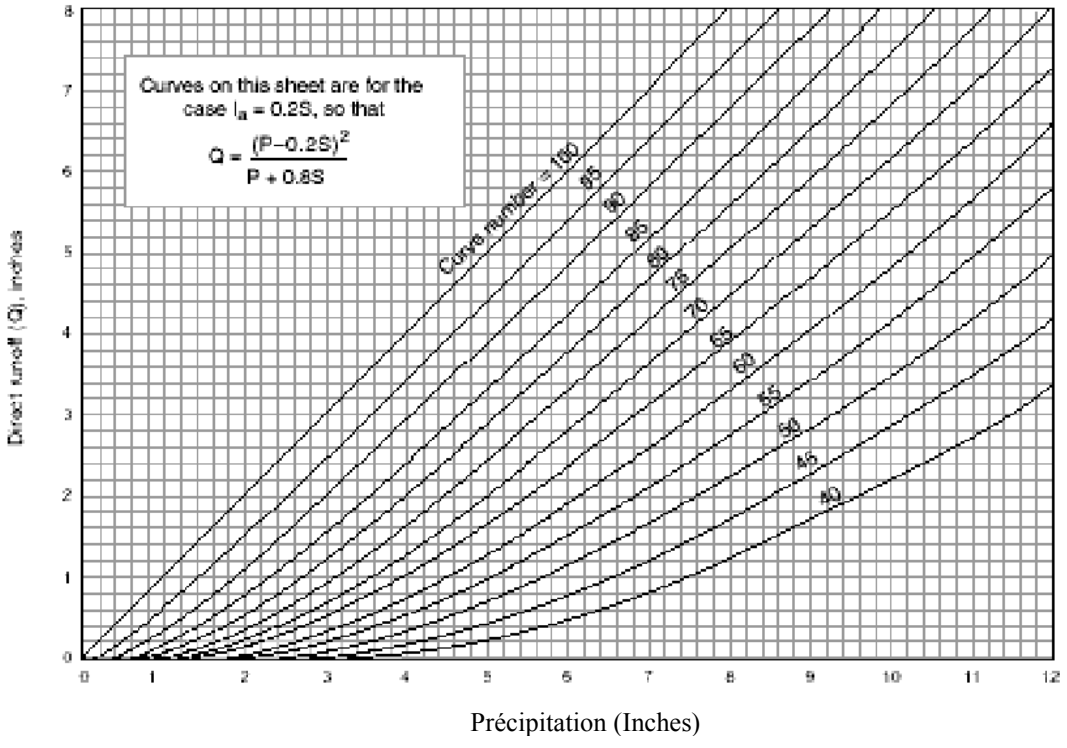


Figure N° AI-1: *Graphique de l'écoulement superficiel en fonction de la précipitation journalière par la méthode du SCS Curve Number.*

Tableau N° AI-1: *les valeurs du CN*

Utilisation de la Terre			**Groupe hydrologique**			
Récolte	**Couverture**	**Condition**	**A**	**B**	**C**	**D**
Non productif	alignement	-	77.0	86.0	91.0	94.0
Récolte rangée	alignement	pauvre	72.0	81.0	88.0	91.0
Récolte rangée	alignement	bon	67.0	78.0	85.0	89.0
Récolte rangée	contourné	pauvres	70.0	79.0	84.0	88.0
Récolte rangée	contourné	bon	65.0	75.0	82.0	86.0
Récolte rangée	Contourné et terrassé	pauvre	66.0	74.0	80.0	82.0
Récolte rangée	Contourné et terrassé	bon	62.0	71.0	78.0	81.0
Petit grain graminées	alignement	pauvre	65.0	76.0	84.0	88.0
Petit grain graminées	alignement	bon	63.0	75.0	84.0	87.0
Petit grain graminées	Contourné	pauvre	63.0	74.0	83.0	85.0
Petit grain graminées	Contourné	bon	61.0	73.0	82.0	84.0
Petit grain graminées	Contourné et terrassé	pauvre	61.0	72.0	81.0	82.0
Petit grain graminées	Contourné et terrassé	bon	59.0	70.0	78.0	81.0
Semé-fermé	alignement	Pauvre	66.0	77.0	85.0	89.0
Légumineuses	alignement	bon	58.0	72.0	81.0	85.0
Rotation	Contourné	Pauvre	64.0	75.0	83.0	85.0
Prairie	Contourné	bon	55.0	69.0	78.0	83.0
Prairie	Contourné et terrassé	Pauvre	63.0	73.0	80.0	83.0
Prairie	Contourné et terrassé	bon	51.0	67.0	76.0	80.0
Pâturage	Contourné et terrassé	pauvre	68.0	79.0	86.0	89.0
Pâturage	Contourné et terrassé	bon	49.0	69.0	79.0	84.0
Pâturage	Contourné et terrassé	Pauvre	39.0	61.0	74.0	80.0
Pâturage	Contourné	bon	47.0	67.0	81.0	88.0
Pâturage	Contourné	passable	25.0	59.0	75.0	83.0
Pâturage	Contourné	bon	6.0	35.0	70.0	79.0
Bois	-	bon	30.0	58.0	71.0	78.0
Bois	-	Pauvre	45.0	66.0	77.0	83.0
Bois	-	passable	36.0	60.0	73.0	79.0
Bois	-	bon	25.0	55.0	70.0	77.0
Ferme	-	-	59.0	74.0	82.0	86.0
Chemin	-	-	72.0	82.0	87.0	89.0
Chemin (surface imp)	-	-	74.0	84.0	90.0	92.0