

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

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 : **TECHNIQUES ET GESTION DE L'EAU**

PRESENTE PAR

Mlle **IRATNI Nawal**

SUJET DU MEMOIRE

Modélisation hydrologique de quelques sous bassins versant de la Tafna

SOUTENU LE: 12 Mars 2014 à 11H00 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

Membres de jury :

Nom et prénoms	Grade	Etablissement	
Mr. ERRIH Mohamed	Professeur	USTO-MB	PRESIDENT
Mr. CHERIF El-Amine	Professeur	USTO-MB	RAPPORTEUR
Mr. YEBDRI Djilali	Maitre de Conférences A	USTO-MB	EXAMINATEUR
Mr. BOUDJEMLINE Djamel	Maitre de Conférences A	USTO-MB	EXAMINATEUR

RESUME

Les aménagements de protection contre les phénomènes de crues et d'inondations qui se manifestent de façon catastrophique, leur dimensionnement, la sécurité et la bonne exploitation des ouvrages hydrauliques sont toujours liés à une évaluation saine non seulement des débits disponibles en moyenne mais surtout des débits extrêmes (crue - étiage).

Par conséquent, plusieurs modèles transformant les pluies en débits ont été développés pour simuler les hydrogrammes de crues

Dans ce contexte cette étude a été élaborée en utilisant le modèle hydrologique HEC-HMS (Système de modélisation hydrologique) qui s'intéresse à la transformation pluies-débits dans les bassins versants ruraux et urbains.

La détermination de l'ensemble des paramètres géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et climatiques des sous bassins versants de l'oued Sikkak et l'introduction de ces caractéristiques du bassin et des données des pluies maximales journalières et /ou pluies fréquentielles dans le modèle hydrologique universel HEC-HMS, a permis de calculer les différents hydrogrammes de crue correspondant à un événement spécifique ou à différentes fréquences, après avoir calé le modèle. Les hydrogrammes de crue observés et simulés au niveau des stations hydrométriques et ceux déterminés par les formules empiriques ont été comparés.

Mots clés : modélisation hydrologique, pluie-débit, bassin versant, débits extrêmes, modèle HEC-HMS.

SUMMARY

Installations to protect against the phenomena of floods and floods that occur in a catastrophic way, their design, security and the proper operation of hydraulic structures are always linked to a sound evaluation not only speeds available but above average rates extremes (flood - low water).

Therefore, several models transform rainfall rates have been developed to simulate the flood hydrographs

In this context this study was developed by using the hydrologic model HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), which is interested in the rainfall-runoff transformation in rural and urban watersheds.

The determination of all geomorphological, geological, hydrological and climatic parameters in watersheds Sikkak wadi and the introduction of basin characteristics and data of maximum daily rainfall and / or rainfall frequency in the universal hydrological model HEC-HMS was used to calculate the different flood hydrographs corresponding to a specific event or at different frequencies, after stalling the model. Flood hydrographs observed and simulated at the hydrometric stations and those determined by empirical formulas were compared.

Key words: hydrological modeling, rain-flow, watershed, extreme rates, model HEC-HMS.

REMERCIEMENTS

Je saisi l'occasion à travers ce modeste travail pour présenter mes remerciements

D'abord au bon dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la santé, la volonté et la patience pour accompli ce travail qui a été pour moi l'occasion de découvrir le monde de la recherche. En suite a mon encadreur **MR** : CHERIF El Amine qui a été présent par ces conseils et son savoir.

C'est ainsi que je remercie beaucoup tous membres de jury, Mr ERRIH Mohamed, Mr YEBDRI Djilali, Mr BOUDJEMLINE Djamel.

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

Je n'oublie pas l'Agence National des Ressources Hydriques (ANRH) de la willaya d'Oran qui ont contribué au mémoire par les données pluviométriques.

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

DEDICACE

C'est avec l'aide de tout puissant que j'arrive à terme de ce modeste travail que je dédie à toutes les personnes que j'aime et en particulier:

A toi ma chère mère, qui à guidée mes pas d'enfances et veille sur moi, et qui m'a toujours apporté amour et affection.

A mon chère père le guide affectueux et attentif en reconnaissance pour soutien moral et pour toutes les charges assurées au cours des ces longues années.

A tout mes sœurs.

A toute ma famille

A tout mes amis(es) et mes connaissances.

Nawal IRATNI

SOMMAIRE

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale.....	2

CHAPITRE I :

ETUDE CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE

I.1. Introduction	5
I.2. Présentation de la zone d'étude	5
I.2.1. Bassin versant de la Tafna.....	5
I.2.2. Bassin versant de l'oued Sikkak	8
I.3. Etude du climat.....	11
I.3.1. Pluviométrie.....	11
I.3.2. Température.....	13
I.3.7. Détermination du type de climat	15
I.4. Etude du bassin versant de l'oued Sikkak	16
I. 4.1. Les caractéristiques géométriques	16
I. 4.2. Caractéristique de forme	16
I. 4.3. Caractéristiques de relief.....	18
I. 4.3.1. Courbe hypsométrique	18
I. 4.3.2. Hauteurs caractéristiques	22
I. 4.3.3. Les indices de pente	24
I.4.3.4. La dénivelée.....	26
I.4.3.5. La dénivelée Spécifique « Ds »	26
I.5. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant	27
I.5.1. Le chevelu hydrographique.....	27
I.5.2. Densité de drainage	29
I.5.3. La fréquence des thalwegs d'ordre 1 (F1)	29
I.5.4. Le coefficient de torrentialité (Ct)	29
I.5.5. Temps de concentration	29
I.5.6. Vitesse de ruissellement	32
I.5.7. Profil en long de l'axe de l'oued	32
I.6.11. conclusion	33

CHAPITRE II : ETUDE GEOLOGIQUE

II.1. Introduction	35
II.2. Aperçu géologique de l'Algérie.....	35
II.3. Cadre géologique du bassin de la Tafna	38
II.3.1. Les zones montagneuses	39
II.3.2. Les zones des plaines et des plateaux	39
II.3.3. Cadre géologique du bassin	40

CHAPITRE III : ANALYSE DES PLUIES

III.1. Introduction	46
III.2. Etude des précipitations	46
III.3. Variation interannuelle de la pluviométrie	50
III.4. Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles	51
III.5. Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité	56
III.6. Précipitations mensuelles et les régimes saisonniers	58
III.7. Modélisation des précipitations	62
III.8. Les précipitations extrêmes et les averses facteur générateur des crues	64
III.9. Les pluies de courte durée	69

CHAPITRE IV ETUDE DES APPORTS ET DE CRUE

IV.1. Introduction	75
IV.2. Etudes des apports	75
IV.2.1. Estimation de l'apport moyen annuel (A_0)	75
IV.2.1.1. Formule de DERI I	75
IV.2.1.3 Formule de TURC	76
IV.2.1.4 Formule de SAMIE	76
IV.2.1.5 Formule de CHAUMONT	76
IV.2.1.6 Formule d'ARNH	76
IV.2.1.7 Formule de DERI II	77
IV.2.2 Module de l'écoulement	77
IV.2.3 Module de l'écoulement relatif	77
IV.2.4 Coefficient de l'écoulement	77
IV.2.5 Coefficient de variation	77

IV.2.5.1 Formule de SOKOLOVSKY	77
IV.2.5.2 Formule d'OURKGUIPROVODKHOZ	77
IV.2.5.3 Formule de L'ANTONOV	78
IV.2.5.4 Formule de KRISTEKLY MENKEL	78
IV.2.6 Irrégularité des apports	78
IV.2.6.1 Estimation fréquentielle des apports	78
IV.3 Etude des crues.....	79
IV.3.1 Formules empiriques pour la détermination de la crue	80
IV.3.1.1 Formule de MALLET-GAUTHIER	80
IV.3.1.2 Formule de SOKOLOVSKY	80
IV.3.1.3 Formule de POSSENTI	82
IV.3.1.4 Formule Rationnelle (TURRAZA)	82
IV.3.1.5 Formule de GIANDOTTI.....	83
IV.3.2. Hydrogramme de crue	84
IV.3.2.1 Construction des hydro grammes des crues (SOKOLOVSKY)	84
IV.4. Conclusion	89

CHAPITRE V

THEORIE DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-HMS

V.1 Introduction.....	91
V.2 Modélisation des précipitations	92
V.3 Modélisation de l'Evapotranspiration (ETP)	92
V.4 Modélisation des pertes	93
V.4.1 Concept de base	93
V.4.2 Le modèle de pertes initiales et à taux constant.....	93
V.4.3 Le modèle du Curve Number (CN).....	95
V.4.4 La méthode CN en grille.....	96
V.4.5 Le modèle de Green & Ampt.....	96
V.4.6 Le modèle continue SMA (Sol-Moisture Accounting).....	98
V.4.7 Limites d'application des modèles de ruissellement utilisés avec le HEC-HMS.....	98
V.5 Modélisation du ruissellement direct.....	100
V.5.1 Les modèle liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU).....	100
V.5.1.1 Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur	101
V.5.1.2 Hydrogramme unitaire paramétrique.....	101
V.5.2 Modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques.....	102

V.5.2.1 Le modèle de SNYDER	102
V.5.2.2 Le modèle du SCS (Soil Conservation Service)	103
V.5.2.3 Le modèle de CLARK (ModCLARK)	103
V.5.3 Modèle de l'onde cinématique.....	104
V.6 Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS.....	105
V.6.1 Modèle de Puls (modified puls).....	106
V.6.2 Modèle de Muskingum.....	107
V.6.3 Le modèle du décalage (lag model).....	108
V.6.4 Le modèle de l'onde cinématique.....	108
V.6.5 Le modèle Muskingum-Cunge.....	109
V.7 Conclusion	110

CHAPITRE VI

APPLICATION DU MODELE HEC-HMS

VI.1 Introduction	112
VI.2 Fonctionnalités	112
VI.3 Préparation des entrées du modèle HEC-HMS	114
VI.4 Modélisation du bassin versant	114
VI.4.1 Les éditeurs d'éléments	116
VI.4.1.1 L'éditeur de sous bassin	116
VI.4.1.2 L'éditeur de tronçon.....	117
VI.4.1.3 L'éditeur de réservoir.....	118
VI.4.2 Les caractéristiques du modèle de bassin.....	119
VI.5 Modèles météorologiques.....	119
VI.5.1 Les modèles de précipitations	120
VI.5.2 Les modèles d'évapotranspiration.....	120
VI.6 Spécifications de Contrôle.....	121
VI.6.1 Dates et Temps.....	121
VI.6.2 Les pas de temps.....	121
VI.7 Réalisation de Simulations et Visualisation des Résultats.....	122
VI.7.1 Créer et gérer une exécution.....	122
VI.7.2 Configuration et options de la simulation.....	122
VI.7.3 Visualisation des résultats.....	123
VI.8 Le calage du modèle.....	123

VI.8.1 La barre de menu.....	124
VI.8.2 Résultats des essais.....	124
VI.9 Etapes d’une simulation avec HEC-HM.....	125
VI.10 Modélisation du bassin versant.....	126
VI.10.1 Infiltrations	127
VI.10.2 Ruissellement	127
VI.10.3 Ecoulement en rivière.....	128
VI.10.4 Les données de bases d’entrée	129
VI.11 Modélisation de la météorologie	130
VI.12 Les données de spécifications de contrôle.....	131
VI.13 Calage du modèle	131
VI.14 Exploitation des résultats.....	133
VI.15 conclusion et recommandations	138
Conclusion générale	140
Bibliographie	142
Annexe	145

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1 : Bassins versants Algériens (ABH, 2009)
- Figure I.2 : Le bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui (ABH, 2009)
- Figure I.3 : Réseau hydrographique de la Tafna
- Figure I.4 : Situation géographique du bassin versant de l'oued Sikkak (image Google earth)
- Figure I.5 : Réseau hydrographique du Bassin versant de l'oued Sikkak et l'oued Amieur
- Figure I.6 : Précipitations moyennes annuelles des cinq stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Sikkak (1984-2006)
- Figure I.7 : Répartition mensuelle de précipitation
- Figure I.8: Répartition mensuelle de Température au niveau de la Station de Tlemcen
- Figure I.9 : Abaque d'indice annuel d'aridité de De Martonne (1926)
- Figure I.10 : Rectangles équivalents de sous bassins et du bassin de l'oued Sikkak
- Figure I-11 : Courbe hypsométrique « Oued Sikkak »
- Figure I-12 : Courbe hypsométrique « Oued Amieur »
- Figure I-13 : Courbe hypsométrique du bassin versant total
- Figure I-14 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Sikkak
- Figure I-15 : Réseau hydrographique du bassin de l'oued Sikkak (classification de Horton)
- Figure I-16 : Profil en long du cours d'eau principale « Oued Sikkak »
-
- Figure II-1 : Carte géologique du Nord-ouest de l'Algérie (ABH)
- Figure II-2 : Carte géologique du bassin de L'oued Sikkak
- Figure. II.3 : Cadre géographique du bassin de la Tafna et de la wilaya de Tlemcen.
- Figure II.4 : Cadre géologique du bassin versant de la Tafna
- Figure II.5 : Colonne lithostratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines
-
- Figure III-1 : Localisation des stations pluviométriques, hydrométrique dans le bassin de l'oued Sikkak
- Figure III-2 : Régression lainière entre les pluies annuelles des stations de Tlemcen et Hennaya
- Figure III-3 : Régression lainière entre les pluies annuelles des stations de Tlemcen et Lalla Setti
- Figure III-4 : Régression lainière entre les pluies annuelles des stations de Tlemcen et Bensekran
- Figure III-5: Régression lainière entre les pluies annuelles des stations de Tlemcen et Mefrouch
- Figure III-6 : Précipitations moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin de l'oued Sikkak
- Figure III-7 : Variation interannuelle des précipitations moyennes annuelles de la station de Hennaya
- Figure III-8 : Variation interannuelle des précipitations moyennes annuelles de la station de Tlemcen
- Figure III-9 : Variation interannuelle des précipitations moyennes annuelles de la station de Lalla Setti
- Figure III-10: Variation interannuelle des précipitations moyennes annuelles de la station de Bensekran
- Figure III-11: Variation interannuelle des précipitations moyennes annuelles de la station de Mefrouch

- Figure III-12 : Carte en isohyète de Bassin Sikkak
 Figure III-13 : Corrélation linéaire des pluies annuelles en fonction des altitudes
 Figure III-14 : Ajustement de pluviométrie moyenne annuelle à la station de Hennaya (1985-2006)
 Figure III-15: Ajustement de pluviométrie moyenne annuelle à la station de Tlemcen (1985-2006)
 Figure III-16 : Ajustement de pluviométrie moyenne annuelle à la station de Lalla Setti (1985-2006)
 Figure III-17 : Ajustement de pluviométrie moyenne annuelle à la station de Bensekran (1985-2006)
 Figure III-18 : Ajustement de pluviométrie moyenne annuelle à la station de Mefrouch (1985-2006)
 Figure III-19: Variations mensuelles de la pluviométrie dans le bassin de l'oued Sikkak
 Figure III-20: Variation mensuelle de coefficient de variation
 Figure III-21: Variation saisonnière des précipitations dans le bassin de l'oued Sikkak
 Figure III-22: Illustration de la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes.
 Figure III-23: Illustration de la méthode des polygones de Thiessen de bassin de l'oued Sikkak
 Figure III-24 : Ajustement comparatif des trois lois de la station de Mefrouch
 Figure III-25 : Ajustement comparatif des trois lois de la station de Tlemcen
 Figure III-26 : Ajustement comparatif des trois lois de la station de Lalla Setti
 Figure III-27: Ajustement à la loi de Gumbel de la station de Mefrouch
 Figure III-28 : Ajustement à la loi de Gumbel de la station de Tlemcen
 Figure III-29 : Ajustement à la loi de Gumbel de la station de Lalla Setti
 Figure III-30 : Courbe des pluies à courte durée à Mefrouch
 Figure III-31 : Courbe Intensité-Durée-Fréquence à Mefrouch
 Figure III-32 : Courbe des pluies à courte durée à Tlemcen
 Figure III-33 : Courbe Intensité-Durée-Fréquence à Tlemcen
 Figure III-34 : Courbe des pluies à courte durée à Lalla Setti
 Figure III-35 : Courbe Intensité-Durée-Fréquence à Lalla Setti
- Figure IV-1: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour de Sikkak
 Figure IV-2: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour d'Amieur
 Figure IV-3: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour d'oued Sikkak
- Figure V.1 : Schéma conceptuel de l'algorithme du modèle SMA.
 Figure V.3: Modélisation d'un modèle de bassin pour le modèle d'onde cinématique.
 Figure V.3 : Exemple de modèle Lag.
- Figure VI.1 : Vue de l'écran HEC HMS.
 Figure VI.2 : Fenêtre du bassin.
 Figure VI.3 : Les différentes méthodes de production et de transfert.
 Figure VI.4 : Inclure les données dans les éditeurs des basins versants.
 Figure VI.5 : Les méthodes des écoulements fluviaux.
 Figure VI.6 : Les données de réservoir.
 Figure VI.7 : Les modèles météorologiques (Précipitation et Evapotranspiration).
 Figure VI.8 : Fenêtre de spécifications de contrôle.

- Figure VI.9 : Fenêtre d'exécution de simulation.
- Figure VI.10 : Les bassins versants de l'oued Sikkak
- Figure VI.11: Représentation du bassin versant de Sikkak dans le modèle HEC-HMS.
- Figure VI.12 : Fenêtres des données de l'élément (sous bassin)
- Figure VI.13: Fenêtres des données météorologiques de fréquence de 1%
- Figure VI.14 : Fenêtre des paramètres avant et après le calage
- Figure VI.15 : Fenêtre de moteur de calcul
- Figure VI.16 : Débits et volumes apportés par les sous bassins de fréquence 1%
- Figure VI.17 : Fenêtre de la comparaison des hydrogrammes de crue observé et simulé a l'exutoir « Ain Youcef »
- Figure VI.18 : Débits et volumes apportés par le sous bassin Amieur de fréquence 1%
- Figure VI.19 : Fenêtre du tableau de résultats et de hydrogramme de crue de sous bassin Amieur
- Figure VI.20 : Débits et volumes apportés par le sous bassin Sikkak de fréquence 1%
- Figure VI.21: Fenêtre du tableau de résultats et de hydrogramme de crue de sous bassin Sikkak
- Figure VI.22 : Débits et volumes apportés par le bassin Oued Sikkak de fréquence 1%
- Figure VI.23 : Fenêtre du tableau de résultats et de hydrogramme de crue de bassin Sikkak exutoire Ain youcef
- Figure VI.24 : Débits calculés et simulés à chaque sous bassin a fréquence d'étude 1%

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau I.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques (L'ANRH)
- Tableau I.2 : Précipitations moyennes annuelles des cinq stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Sikkak (1984-2006)
- Tableau I.3 : Les valeurs des pluies moyennes mensuelles, ainsi que leur répartition dans l'année
- Tableau I.4 : Les températures moyennes mensuelles et annuelles
- Tableau I.5: Caractéristique de la forme de sous bassins de Sikkak
- Tableau I.6 : Répartition altimétrique du sous bassin Sikkak
- Tableau I.7: Répartition altimétrique du sous bassin Amieur
- Tableau I.8 : Répartition altimétrique du sous bassin Sikkak
- Tableau I.9 : Les hauteurs caractéristiques des sous bassins de l'oued sikkak
- Tableau I.10 : Détermination de la pente M.Roche Ip Sikkak
- Tableau I.11 : Détermination de la pente M.Roche Ip Amieur
- Tableau I.12 : détermination de la pente M.Roche Ip du bassin versant total
- Tableau I.13 : La classification d'O.R.S.T.O.M ⁽¹⁾
- Tableau I.14 : La dénivelée et la dénivelée spécifique et leur classe
- Tableau I-15 : Temps de concentration.
- Tableau I-16 : Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant
-
- Tableau III-1: Caractéristiques des stations pluviométriques
- Tableau III-2: Paramètres de corrélation entre les différentes stations avec celle Tlemcen
- Tableau III-3: Caractéristiques de la précipitation annuelle des stations pluviométriques du Bassin de l'oued Sikkak
- Tableau III-4: Pluie moyenne Annuelles de sous bassins de l'oued Sikkak
- Tableau III-5: Paramètre statistique des pluies du bassin
- Tableau III-6: Variation de pluviométrie annuelle en fonction de l'altitude de stations de bassin Sikkak
- Tableau III-7: Précipitations pour des périodes de récurrences dans quelques stations de Sikkak
- Tableau III-8: Les pluies moyennes mensuelles et leurs paramètres statistiques du bassin de l'oued Sikkak
- Tableau III-9: Résultats de la méthode des polygones de Thiessen.
- Tableau III-10: Les paramètres statistiques des pluies maximales journalières
- Tableau III-11: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station de Mefrouch
- Tableau III-12: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station de Tlemcen
- Tableau III-13: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station de Lalla Setti
- Tableau III-14: Valeurs de l'exposant climatique pour les trois stations pluviométriques de l'oued Sikkak
- Tableau III-15: Pluies de courtes durées et leurs intensités.
-
- Tableau IV.1 : Les apports fréquentiels de bassin Sikkak
- Tableau IV.2 : Les apports fréquentiels de bassin Amieur
- Tableau IV.3: Les apports fréquentiels d'Oued Sikkak (Globale)
- Tableau IV.4: Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de MALLET-GAUTHIER)
- Tableau IV-5: valeur de γ en fonction de bassin versant
- Tableau IV.6: Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de SOKOLOVSKY)

- Tableau IV.7: Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de POSSENT)
- Tableau IV.8: Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de TURRAZA)
- Tableau IV-9: Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de GIANDOTTI)
- Tableau IV-10: Récapitulatif des résultats de débit de crue
- Tableau IV-11 : Coefficient de forme de l'Hydrogramme de crue γ .
- Tableau IV-12: Tableau récapitulatif des temps de concentration, de montée et de décrue
- Tableau IV-13: Hydrogramme de crues pour différentes périodes de retour de Sikkak
- Tableau IV-14: Hydrogramme de crues pour différentes périodes de retour d'Amieur
- Tableau IV-15: Hydrogramme de crues pour différentes périodes de retour d'oued Sikkak
-
- Tableau V.1 : Le taux de pertes constant pour les différents types du sol.
- Tableau V.2 : Estimation des différentes classes de la texture du sol
- Tableau V.3 : Les avantages et les inconvénients des modèles de pertes incluent dans le modèle HEC-HMS.
- Tableau V.4 : Diverses informations à connaître pour chaque élément du bassin.
- Tableau V.5: Valeurs minimales et maximales des différents modèles incluent dans le modèle HEC HMS.
-
- Tableau VI.1 : Données de base des sous-bassins
- Tableau VI.2 : Les données pluviométriques de chaque fréquence
- Tableau VI.3: Les valeurs de tous les paramètres optimisés.
- Tableau VI.4 : Comparaison des résultats obtenus de chaque site d'étude pour la fréquence de 1%, de

INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

L'hydrologie joue un rôle capital dans le domaine des sciences environnementales. Elle est liée à des sciences telles que : l'hydraulique, la statistique mathématique, la mécanique de sols, la géographie physique, etc.... Elle concerne aussi bien les mécanismes d'écoulement des eaux dans les systèmes naturels (bassin versant) ou anthropisés que le dimensionnement des ouvrages hydrauliques utiles à l'exploitation et à la gestion des eaux. Elle permet également de mieux comprendre et simuler le comportement dynamique des eaux dans les zones où elles se répandent et de mieux saisir les impacts des aménagements hydrauliques sur l'environnement.

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.

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.

La modélisation hydrologique a pour objectif de représenter mathématiquement les processus hydrologiques. La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants touche plusieurs domaines d'application (gestion des ressources en eau, aménagement du territoire ...). Dans un contexte opérationnel, les modèles hydrologiques sont utilisés pour répondre à deux problématiques principales :

- L'évaluation des risques hydrologiques liés aux phénomènes de crues et la gestion,
- De la ressource en eau liée à l'apparition des étiages.

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit. Un grand nombre de modèles de structures différentes, combinant généralement des fonctions linéaires et non-linéaires ont été développés depuis le début des années 1960.

Les réponses résultant de ces modèles (hydrogrammes de débits) reposent essentiellement sur les caractéristiques physiques du bassin versant et de type d'information disponibles.

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.

Dans ce cadre, le but de cette étude est la modélisation quantitative de l'écoulement pour le bassin versant de l'Oued Sikkak. Ceci, en appliquant un modèle hydrologique de gestion des eaux pluviales intitulé HEC-HMS.

Ce travail est structuré en six chapitres:

Dans le premier chapitre, la zone d'étude est définie, et décrit une présentation détaillée du bassin versant de l'Oued Sikkak qui fait partie du bassin hydrographique de La Tafna (Nord ouest algérien),

Le deuxième chapitre, englobe les caractères généraux sur la géologie du bassin versant de l'Oued Sikkak, en se basant sur la bibliographie existante ainsi que les cartes.

Le troisième chapitre, est consacré à l'étude hydroclimatique telle que la pluviométrie, la température, etc....

Dans le quatrième chapitre, l'étude des crues est présentée.

Dans le cinquième chapitre, Une étude de la modélisation hydrologique pluie-débit est établie, une description de la théorie du modèle hydrologique HEC-HMS est effectuée.

Dans le sixième chapitre, Il est décrit l'utilisation du modèle de simulation hydrologique HEC-HMS ainsi que son application aux sous-bassins de l'oued Sikkak afin de générer les hydrogrammes de crue.

Enfin une conclusion générale.

CHAPITRE I

Etude climatique et hydrologique

I.1. Introduction :

L'hydrologie est une science pluridisciplinaire. En dehors de l'hydraulique, elle fait appel aux sciences physiques (météorologie, physique du globe..), aux sciences naturelles (géologie, géomorphologie..), aux mathématiques (statistique, calcul opérationnel, informatique..) et à la technologie (appareil de mesure, télédétection...)

Actuellement, l'hydrologie est devenue une science importante de l'art de l'ingénieur intéressé à l'exploitation et au contrôle des eaux naturelles. Des études hydrologiques plus ou moins poussées sont indispensables pour toute mise en œuvre de tout aménagement ou projets hydrauliques.

(Séminaire-retenu Collinaire, 2009)

L'étude hydrologique dans ce chapitre a pour but de définir les paramètres hydrologiques et morphologiques des sous bassins de l'oued Sikkak afin d'évaluer l'importance de la crue exceptionnelle qui conditionnera les dimensions des ouvrages hydrauliques existant ou projeté.

I.2. Présentation de la zone d'étude :**I.2.1. Bassin versant de la Tafna :**

Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord ouest du territoire algérien; c'est le numéro 16 de l'ensemble des bassins de l'Algérie, selon la codification de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (**ANRH**). Il s'étend entre la latitude $34^{\circ}47'$ et $35^{\circ}10'$ et la longitude entre -2° et 1° (Figure I.1).

Le bassin s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km². Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l'ensemble de l'Oranie –Chott Chergui (Figure I .2).

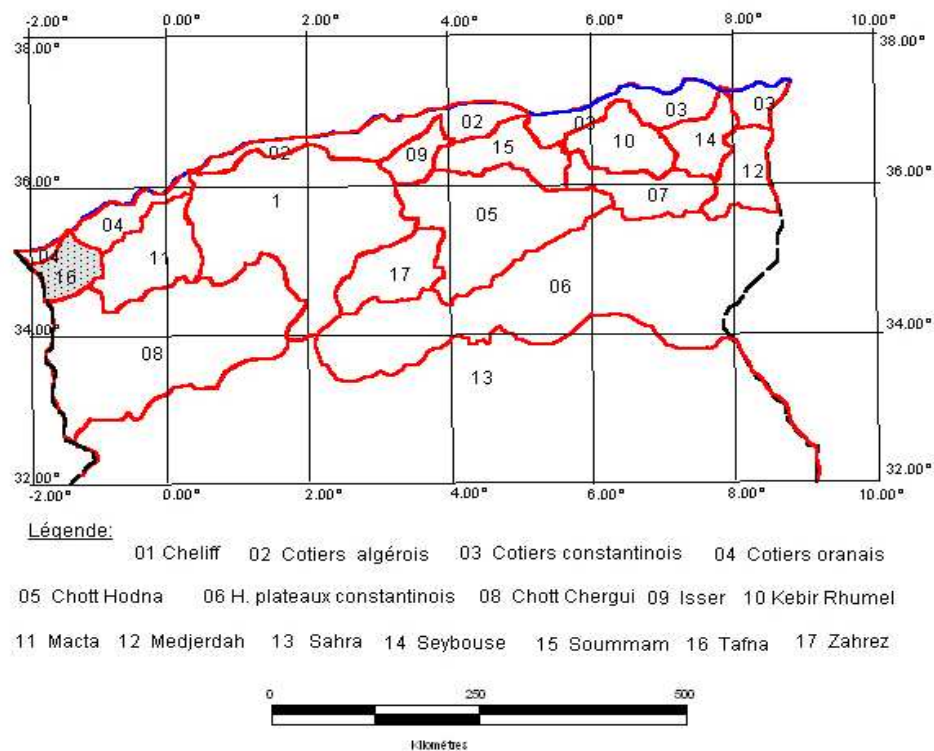


Figure I.1 : Bassins versants Algériens (ANRH)



Figure I.2 : Le bassin versant de la Tafna dans l'ensemble Oranie Chott Chergui (ABH, 2009)

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties:

- Partie orientale avec comme principaux affluents l'oued Isser et l'oued Sikkak),
- Partie occidentale comprenant la Haute Tafna (oued Sebdou et oued Khemis) et l'oued Mouilah
- Partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rachgoune, embouchure de la Tafna sur la mer. Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

Les plaines du bassin de la Tafna s'étendent aux pieds des monts de Tlemcen en avant des massifs de Traras et du Tessala, elles sont entourées de massifs aux reliefs élevés dessinant un édifice régulier formé essentiellement de terrains mésozoïques et cénozoïques.

Les monts des Traras au Nord Ouest dressent une barrière entre le bassin et la mer, ils correspondent à une série de crêtes de direction NE – SW culminant à 1136 m au djebel Fillaoucène.

L'oued Tafna est un cours d'eau de 170 Km de long, il prend sa source dans les Monts de Tlemcen (Figure I .3). Le cours de cet oued peut se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna. **(BOUANANI, 2004)**

- **La haute Tafna** : l'oued prend naissance dans les Ouled Ouriach et s'affirme après la jonction d'un grand nombre de ramifications creusées dans les terrains jurassiques et descendent de crêtes atteignant 1500m. Ces ramifications se réunissent aux environs de Sebdou à une altitude d'environ 900m. A partir de cet endroit et jusqu'à Sidi Medjahed, l'oued suit un cours dans une vallée encaissée creusée dans les terrains jurassiques. Dans cette région montagneuse, l'oued Tafna reçoit l'oued Khemis (rive droite) et l'oued Sebdou (rive gauche).

- **La moyenne Tafna** : à partir de Sidi Medjahed, l'oued pénètre dans le bassin tertiaire et coule dans une vallée peu profonde dans des terrains plus ou moins argileux, Cette partie du bassin tertiaire est sillonnée par de nombreux affluents parmi lesquels certains sont importants :

- Sur la rive gauche: les affluents sont moins importants que sur la rive droite, seul l'oued Mouilah qui prend naissance au Maroc est remarquable par son parcours et son débit. L'oued Boukiou, moins important, prend naissance dans les monts des Traras pour rejoindre le cours de la Tafna dans la plaine des Ghossel. **(BOUANANI, 2004)**

- Sur la rive droite: la Tafna reçoit l'oued Boumessaoud, l'oued Zitoun et enfin l'oued Isser, affluent le plus important par son long parcours que par son fort débit. L'oued Isser prend naissance dans les terrains jurassiques, des monts de Tlemcen et s'étend ainsi vers l'Est de la

région de la haute Tafna. A son entrée dans le bassin tertiaire, Il est grossi au Nord d'Ouled Mimoun par l'oued Lakhdar (Ex : Chouly) (rive gauche) et l'oued Aïn Tellout (rive droite).

Au Nord de la plaine d'Ouled Mimoun, il traverse la petite plaine d'El Fehoul. A l'extrémité occidentale de cette plaine, il reçoit sur la gauche un cours d'eau assez important : L'oued Sikkak, descendu du plateau de Terny. (BOUANANI, 2004)

La basse Tafna: le cours inférieur de la Tafna s'étend depuis les gorges de Tahouaret vers le village de Pierre Chat jusqu'à la plage de Rachgoune en mer Méditerranée, sur une distance de 20 Km.

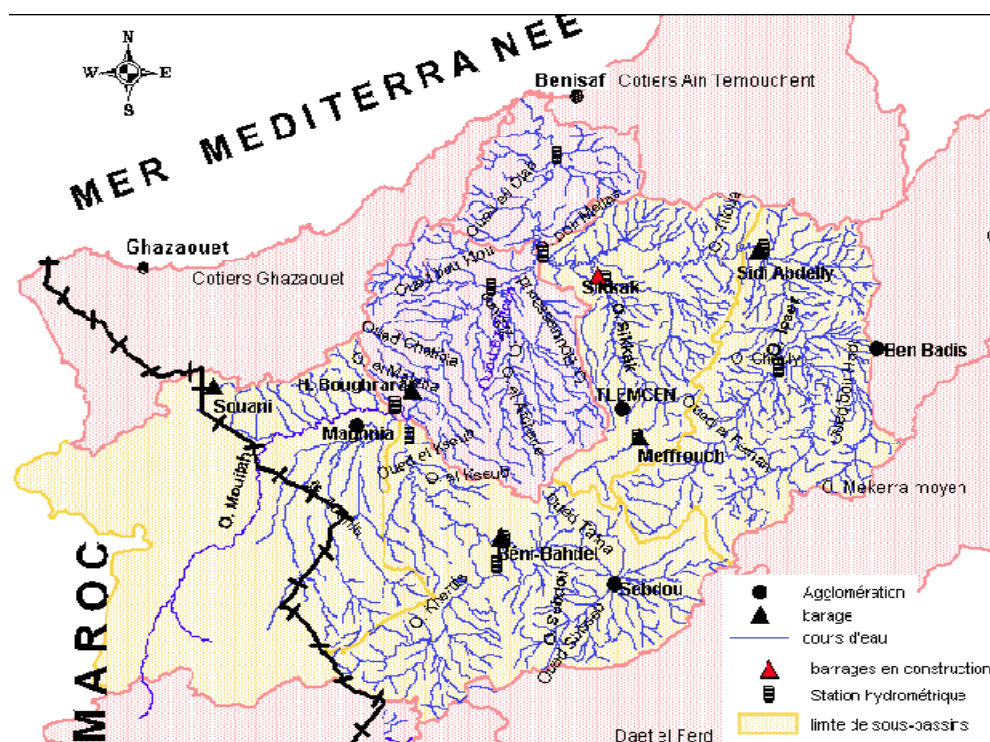


Figure I.3 : Réseau hydrographique de la Tafna (BOUANANI, 2004)

I.2.2. Bassin versant de l'oued Sikkak :

Le bassin versant de l'Oued Sikkak fait partie du grand bassin versant de la Tafna Il est de forme allongé. L'oued Sikkak est un affluent de rive gauche de l'oued Isser qui est un tributaire de rive droite de l'oued Tafna. Il est le prolongement de l'Oued En nachef qui est coupé par le barrage Mefrouch en amont des cascades.

L'Oued Sikkak est un cours d'eau assez important, descendu du massif de la Haute Tafna sous le nom d'Oued Mafroufh et qui pénètre dans le bassin tertiaire sous le nom d'Oued Saf-Saf. Avant son confluent avec l'Isser, la Sikkak reçoit l'Oued Bezaz et l'Oued Amieur, descendu des Dj. Karolya, Tiddag, Dj. el Abiod, dans les Béni Ouazzane. L'Isser longe ensuite le plateau de Remchi et débouche dans la Tafna, après de nombreux méandres, au pied de ce plateau, au Nord de Remchi.



Figure I.4 : Situation géographique du bassin de l'Oued Sikkak (image Google earth)

On a utilisé des cartes d'état major à l'échelle 1/25.000 (Feuille Bensekrane 5-6 ; 7-8 et Tlemcen 1-2 ; 3-4) pour délimiter le bassin versant de l'oued Sikkak et l'oued Amieur à main levée en passant par les lignes de partage des eaux et les crêtes.

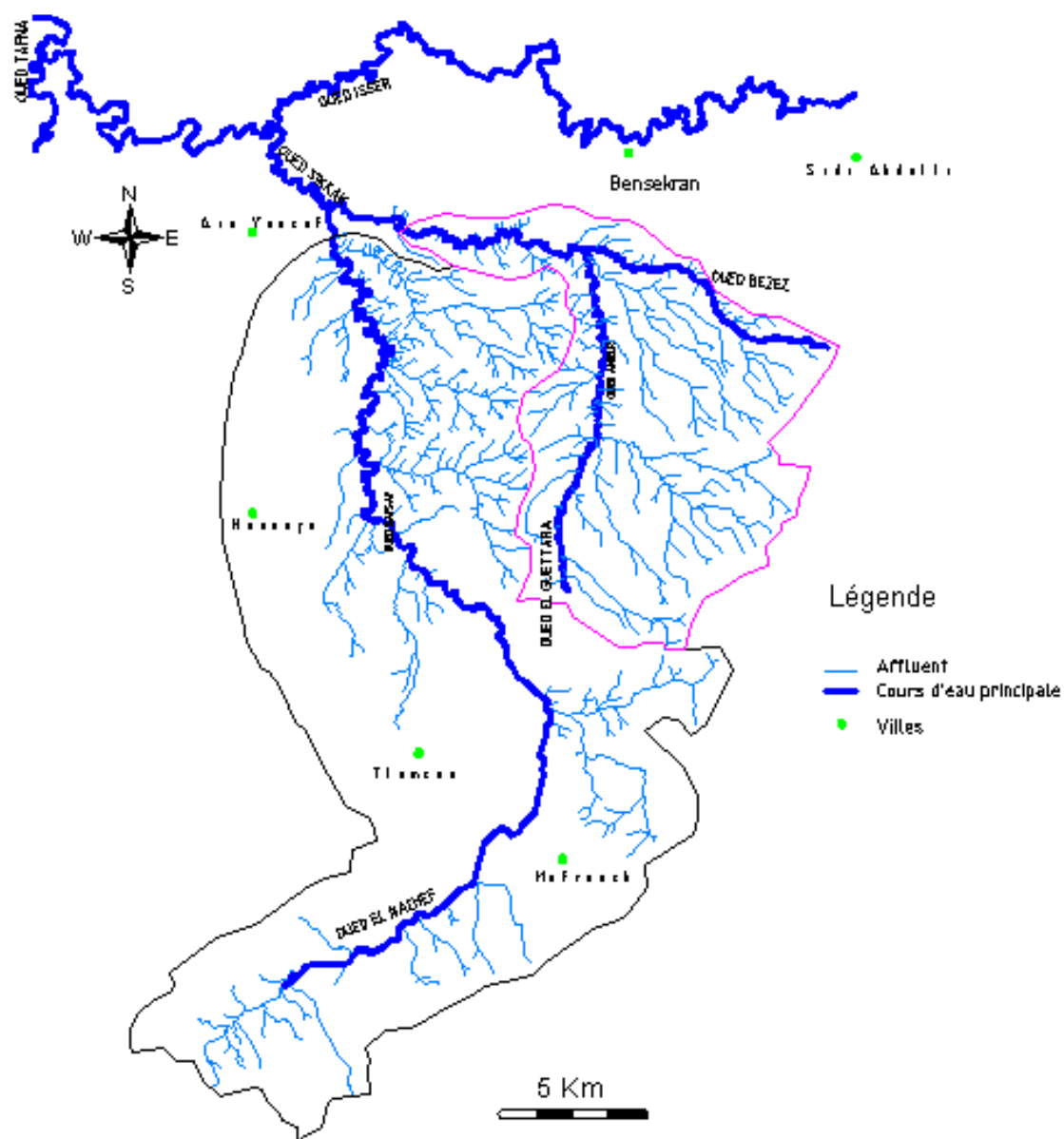


Figure I.5 : Réseau hydrographique du Bassin versant de l'oued Sikkak et l'oued Amieur

I.3. Etude du climat :

Les conditions climatiques du bassin jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau. Les facteurs qui déterminent le climat sont :

La précipitation avec sa distribution dans le temps et dans l'espace, l'humidité, la température le vent qui a une influence sur l'évaporation et la transpiration.

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.

La région de Tlemcen se trouve entre deux domaines géographiques contrastés : les monts de Tlemcen au Sud et la zone des plaines qui s'étendent vers le Nord. La Tafna présente en général la même configuration géographique.

I.3.1. Pluviométrie :

La région à la quelle appartient le bassin versant dispose d'un nombre important de station pluviométriques ayant des données sur des périodes relativement longues. La pluie varie avec l'altitude, pour cela, nous avons jugé adéquat d'utiliser cette dépendance pour l'estimation de la pluie moyenne du bassin versant.

Cette méthode a pour avantage d'utiliser l'ensemble de l'information disponible dans la région, pour cela, nous avons utilisé cinq (05) stations pluviométriques dont les caractéristiques sont reportées dans le (tableau I.1).

Tableau I.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques (ANRH)

N°	Code	Nom de la station	Période d'observation	Longitude (m)	Latitude (m)	Altitude (m)	Pluie moyenne annuelle (mm)
01	16 07 24	Tlemcen	1985-2006	132.90	183.53	832	494.34
02	16 07 01	Mefrouche	1985-2006	135.55	180.20	1120	546.36
03	16 05 16	Hennaya	1985-2006	126.75	188.25	510	378.50
04	16 07 02	Bensekrane	1985-2006	143.42	205.35	260	343.76
05	16 07 05	Lalla Setti	1985-2006	133.95	181.85	1020	485.96

La variabilité de la pluviométrie est illustrée dans la (Figure I .6) et le (Tableau I.2) qui représente des relevés pluviométriques annuelles des cinq stations couvrent la longueur du bassin.

Tableau I.2 : Précipitations annuelles des cinq stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Sikkak (1984-2006)

Année	Hennaya	Tlemcen	Lalla Setti	Bensekrane	Mefrouche
1984-1985	411.2	761.7	544.3	477.1	677.9
1985-1986	433.2	532.8	666.1	399.0	727.5
1986-1987	226.4	417.0	347.5	237.4	353.0
1987-1988	384.6	727.9	499.8	281.6	463.1
1988-1989	331.2	478.0	458.9	356.7	522.2
1989-1990	438.9	614.0	574.0	432.3	731.2
1990-1991	499.5	638.5	590.9	346.9	661.5
1991-1992	322.0	442.0	410.3	335.1	444.8
1992-1993	297.0	374.7	386.5	311.4	450.2
1993-1994	426.6	505.8	475.6	362.3	520.4
1994-1995	498.4	660.2	681.0	429.8	840.2
1995-1996	394.6	394.1	385.7	297.6	437.9
1996-1997	464.7	528.2	536.3	446.9	560.2
1997-1998	352.2	474.5	451.3	288.8	488.5
1998-1999	255.1	338.8	325.7	265.9	342.4
1999-2000	339.1	465.1	442.7	419.8	556.9
2000-2001	474.4	577.6	514.3	391.1	581.9
2001-2002	391.3	546.9	521.7	399.2	639.9
2002-2003	471.7	637.3	656.6	380.1	693.5
2003-2004	330.6	376.6	345.9	307.3	395.6
2004-2005	333.7	461.3	411.1	299.3	467.6
2005-2006	280.9	403.8	442.9	133.4	480.5

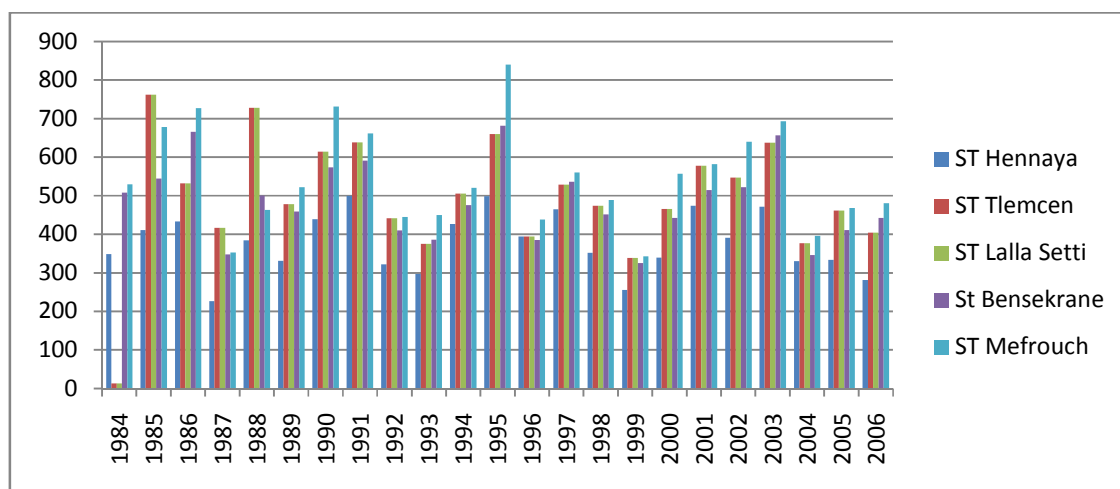


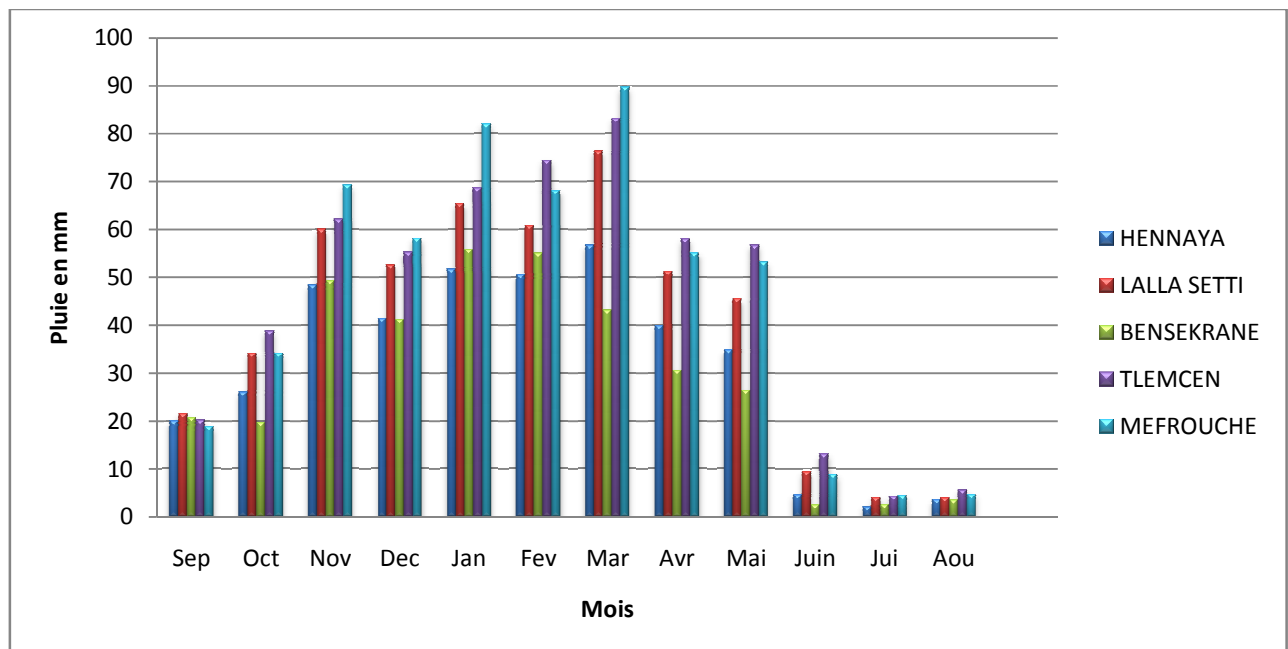
Figure I.6 : Précipitations annuelles des cinq stations pluviométriques du bassin versant de l'oued Sikkak (1984-2006)

Tableau I.3 : Les valeurs des pluies moyennes mensuelles, ainsi que leur répartition dans l'année :

Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou
HENNAYA	20	26	48	41	52	51	57	40	35	5	2	4
LALLA SETTI	21	34	60	53	65	61	76	51	46	9	4	4
BENSEKRANE	21	20	49	41	56	55	43	31	26	3	3	4
TLEMCEN	20	39	62	55	69	74	83	58	57	13	4	6
MEFROUCHE	19	34	69	58	82	68	90	55	53	9	4	5

La répartition mensuelle de la précipitation est présentée en figure I.7.

Nous remarquerons que les lames précipitées durant les mois d'octobre à mai sont à peu près de même ordre de grandeur et représente plus de 80 % du total pluviométrique annuel néanmoins, on note une pointe en Mars.

**Figure I.7 :** Répartition moyenne mensuelle de précipitation.

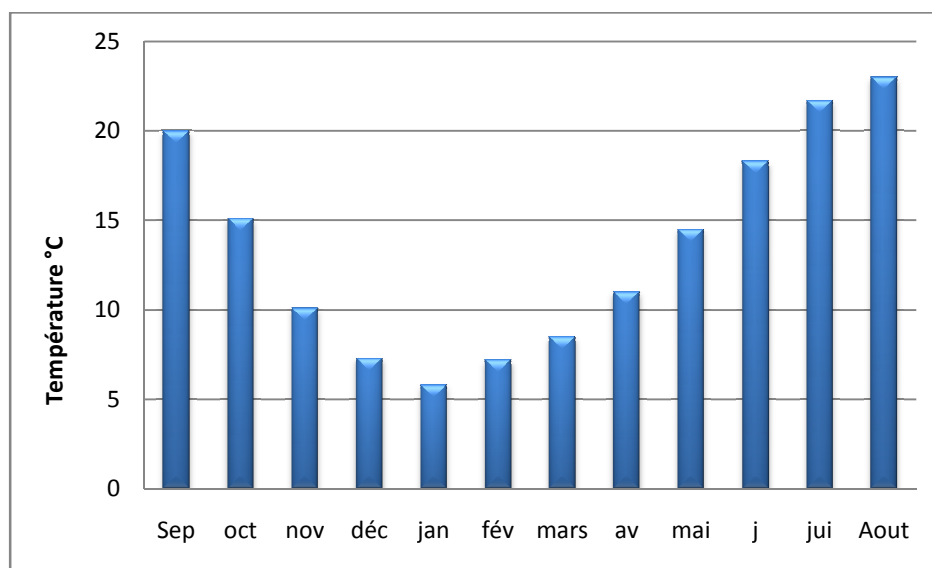
I.3.2. Température :

Les températures de la région d'étude sont traitées à partir de cinq stations climatologiques d'ANRH à savoir la station de Tlemcen, Mefrouch, Hennaya, Zenata et Terny pour une période d'observation allant de 1926 à 1980 (Tableau I.4).

Tableau I.4 : Les températures moyennes mensuelles et annuelles (1926 à 1980)

Mois Stations	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Av	Mai	Jui	Juil	Aout	Moy An.
Tlemcen Tmin	16.6	12.6	9.0	6.2	5.5	5.9	7.4	9.0	11.6	15.2	18.8	19.3	11.4
Tlemcen Tmax	25.5	21.9	16.9	13.1	12.6	14	15.9	17.9	21.6	26.4	26.4	31.2	20.3
Tlemcen Tmoy	21.1	17.3	13.0	9.7	9.1	10.0	11.7	13.5	16.6	20.8	22.6	25.3	15.9
Mefrouche Tmoy	20.0	15.1	10.1	7.3	5.8	7.2	8.5	11.0	14.5	18.3	21.7	23.0	13.5
Hennaya Tmoy	22.0	18.1	14.4	12.7	11.1	11.3	13.6	14.4	17.8	21.7	25.5	26.3	17.4
Zenata Tmoy	23.9	19.9	16.09	10.03	10.03	11.5	13.6	15.4	18.02	22.3	25.8	26.5	17.8
Terny Tmoy	19.2	14.50	9.2	6.2	6.5	6.5	8.2	10.5	14.10	18.0	23.5	24.0	13.4

Comme le montre le (Tableau I.4), la température moyenne annuelle pour notre région d'étude est de 15.6 °C. Le climat de cette région se caractérise par un été sec et chaud et un hiver humide mais assez tempéré. Le mois le plus chaud est Aout, par contre le mois le plus froid est Janvier.

**Figure I.8:** Répartition mensuelle de Température au niveau de la Station de Tlemcen

I.3.3. Détermination de type de climat :

L'indice annuel d'aridité de De Martonne 1926 noté I_a exprime le rapport entre les précipitations et les températures et permet de trouver le type de climat qui règne dans la région. Il se calcule par la formule suivante :

$$I_a = \frac{P}{T+10} \quad (I-1)$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle 448.13mm

T : Température moyenne annuelle 15.6 °C

$$I_a = 27$$

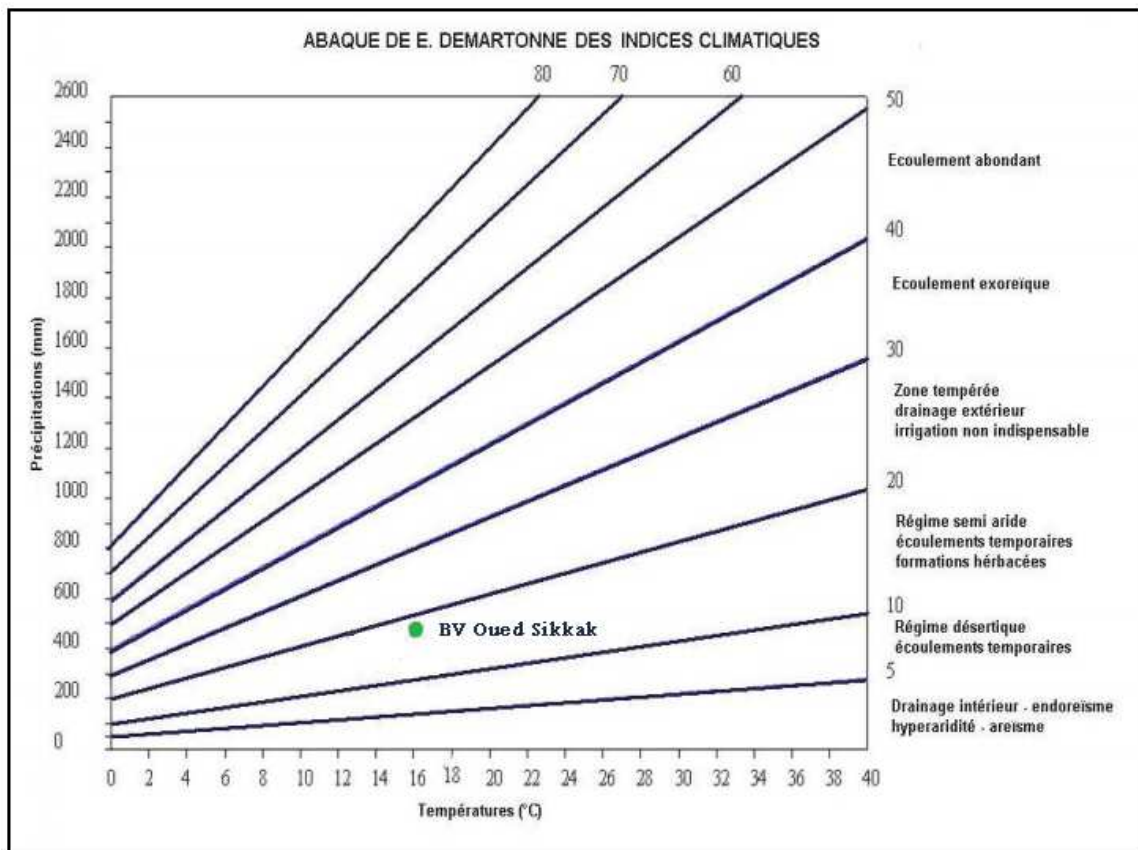


Figure I.9 : Abaque d'indice annuel d'aridité de De Martonne (1926)

Selon la classification de climat adoptée par De Martonne le bassin de l'oued Sikkak est classé **régime semi aride** avec écoulement temporaire (figure I .9)

I.4. Etude du bassin versant de l'oued Sikkak :

I.4.1 Les caractéristiques géométriques :

1- La superficie du bassin versant est mesurée à l'aide de logiciel Mapinfo7.5 après calage des cartes topographiques. la Surface du bassin est: **S = 463 km²**

2- La longueur du thalweg principal est mesurée à l'aide de logiciel Mapinfo7.5, soit :

$$\mathbf{L_p = 48.48 \text{ km}}$$

3- Par Mapinfo aussi on mesure le périmètre P du bassin versant : **P = 116 km**

I.4.2 Caractéristiques de forme :

I.4.2.1 Indice de compacité de Gravelius K_c (1914) : (BENINA Touabia, 2005)

Appelé aussi indice de forme, cet indice caractérise la forme du bassin versant.

Cet indice est le rapport entre le périmètre du bassin P et la circonférence du cercle P_c de rayon R ayant la même superficie S que bassin, soit :

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (\text{I-2})$$

P : périmètre du bassin versant (Km) ;

S : surface du bassin versant (Km²).

Si $K_c = 1 \Rightarrow$ bassin circulaire

Si $K_c > 1,12 \Rightarrow$ bassin allongé

Si $K_c = 1,12 \Rightarrow$ bassin carré

Tableau I.5: Caractéristique de la forme de sous bassins de Sikkak

Bassin Versant	SB Sikkak	SB Amieur	L'ensemble
S (km²)	340	123	463
P (km)	106	58.6	116
Lp (km)	48.48	25.08	48.48
Kc	1.61	1.48	1.51

Selon la valeur de K_C (Tableau I-5) on peut dire que notre bassin est de forme allongée.

Les valeurs de l'indice de compacité montrent que le sous bassin Sikkak ($K_C = 1.61$) est le plus allongé correspond à celui de l'oued Amieur ($K_C = 1.48$).

I.4.2.2. Coefficient d'allongement :

Il est donné par la formule suivante : $K_p = \frac{l^2}{S} \dots\dots\dots(I-3)$

I.4.2.3 Rectangle équivalent ou Rectangle de Gravelius : (BENNIA Touabia, 2005)

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimensions (L et l) ayant la même surface que le bassin versant. Il permet de comparer les bassins versants entre eux de points de vue de l'écoulement. Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petits cotés du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petits cotés.

Le rectangle équivalent de dimensions (L et l) définit respectivement par les formules suivantes :

$$L = \frac{K_C \sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (I-4)$$

$$l = \frac{K_C \sqrt{S}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \dots\dots\dots (I-5)$$

Avec L : longueur du rectangle équivalent en (Km) ;
 l : largeur du rectangle équivalent en (Km) ;
 S : La superficie du bassin versant (Km^2) ;
 K_C : Le coefficient de compacité ou de Gravelius.

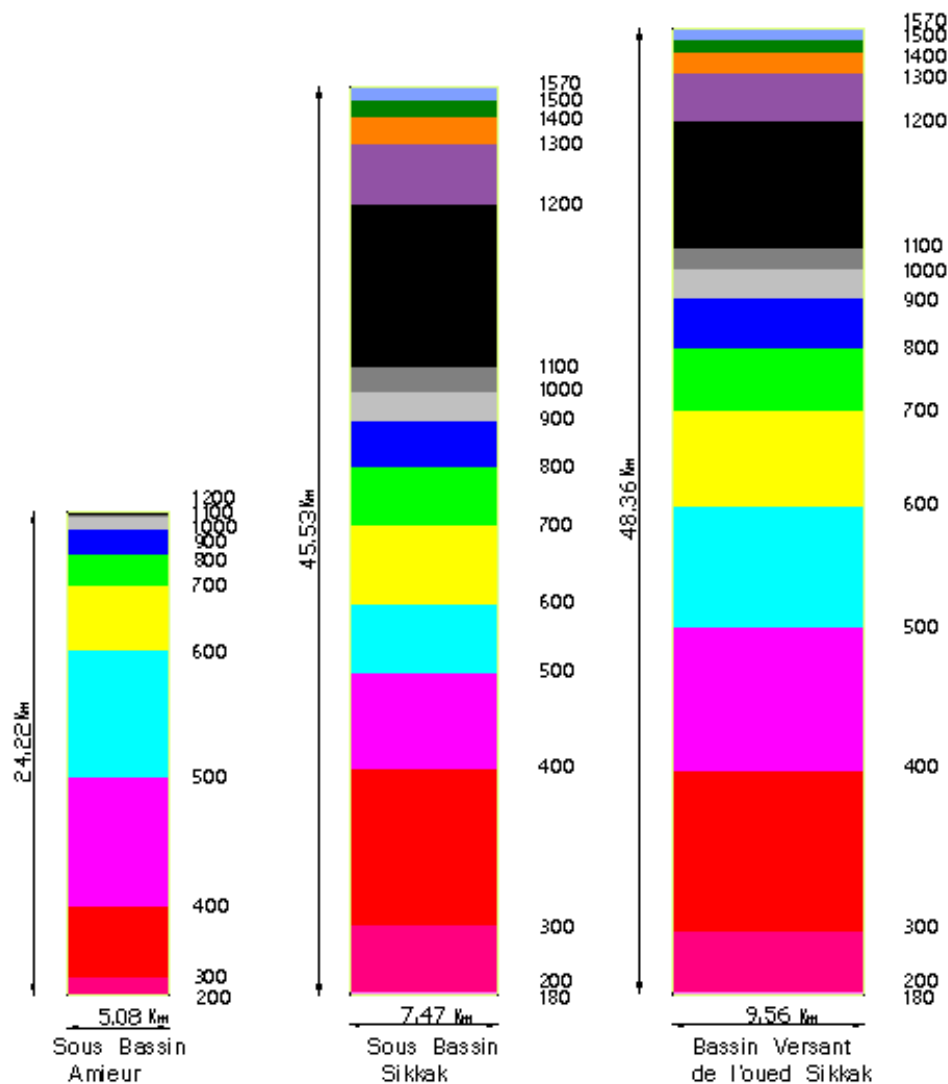


Figure I.10 : Rectangles équivalents de sous bassins et du bassin de l'oued Sikkak

I.4.3 Caractéristiques de relief

I.4.3.1 Courbe hypsométrique

Le processus météorologique et le phénomène de ruissellement étant affectés par le relief, il est important de tracer la courbe hypsométrique.

Cette courbe est tracée selon les résultats des mesures de la répartition du bassin versant par tranche d'altitude, et surfaces partielles

Les tableaux (I-6 ; I-7 ; I-8) exposent explicitement les résultats des mesures effectuées sur la carte topographique.

Tableau I.6 : Répartition altimétrique du sous bassin Sikkak

	Altitudes (m)	Altitudes Moyennes (m)	Superficies Partielles		Superficies Cumulées	
			(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Sous Bassin Sikkak	1570-1500	1535	4.61	1.36	4.61	1.36
	1500-1400	1450	6.65	1.95	11.26	3.31
	1400-1300	1350	10.1	2.97	21.36	6.28
	1300-1200	1250	23.53	6.92	44.89	13.20
	1200-1100	1150	59.68	17.54	104.57	30.74
	1100-1000	1050	9.4	2.76	113.97	33.50
	1000-900	950	10.68	3.14	124.65	36.64
	900-800	850	17.66	5.19	142.31	41.84
	800-700	750	21.73	6.39	164.04	48.22
	700-600	650	29.47	8.66	193.51	56.89
	600-500	550	26.05	7.66	219.56	64.55
	500-400	450	35.6	10.47	255.16	75.01
	400-300	350	58.95	17.33	314.11	92.34
	300-200	250	25.31	7.44	339.42	99.78
	200-180	190	0.74	0.22	340.16	100
Superficie Total		340.16 km²				

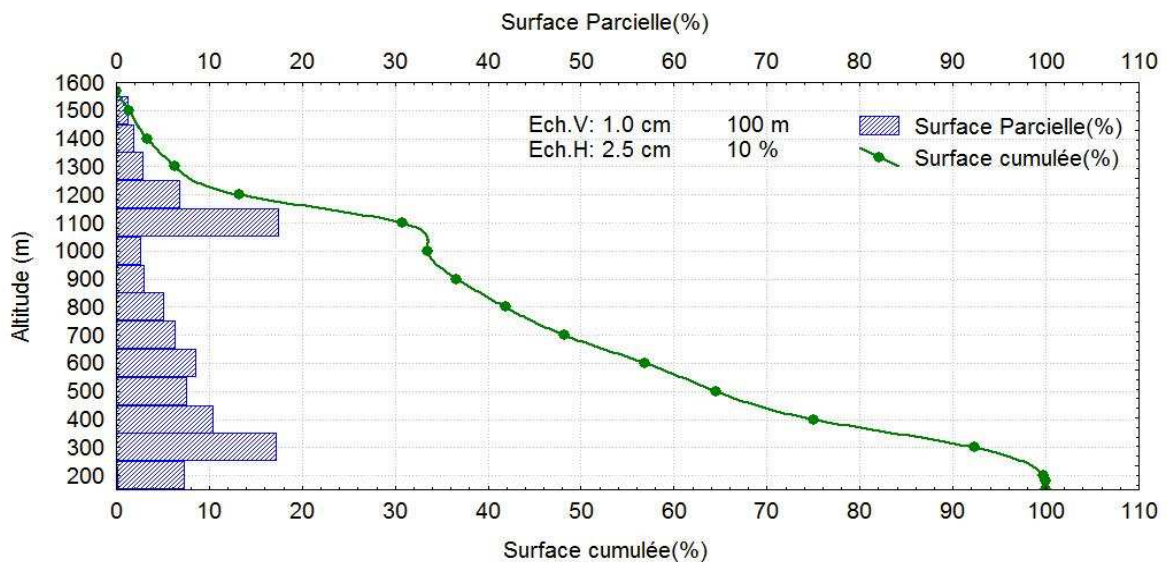
**Figure I-11 : Courbe hypsométrique « Oued Sikkak »**

Tableau I.7: Répartition altimétrique du sous bassin Amieur

	Altitudes (m)	Altitudes Moyennes (m)	Superficies Partielles		Superficies Cumulées	
			(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Sous Bassin Amieur	1200-1100	1150	0.32	0.26	0.32	0.26
	1100-1000	1050	0.9	0.73	1.22	0.99
	1000-900	950	2.82	2.30	4.04	3.29
	900-800	850	6.47	5.27	10.51	8.56
	800-700	750	7.9	6.43	18.41	14.99
	700-600	650	16.53	13.46	34.94	28.44
	600-500	550	32.63	26.56	67.57	55.01
	500-400	450	32.54	26.49	100.11	81.50
	400-300	350	18.2	14.82	118.31	96.31
	300-200	250	4.53	3.69	122.84	100.00
Superficie Total		122.84 km²				

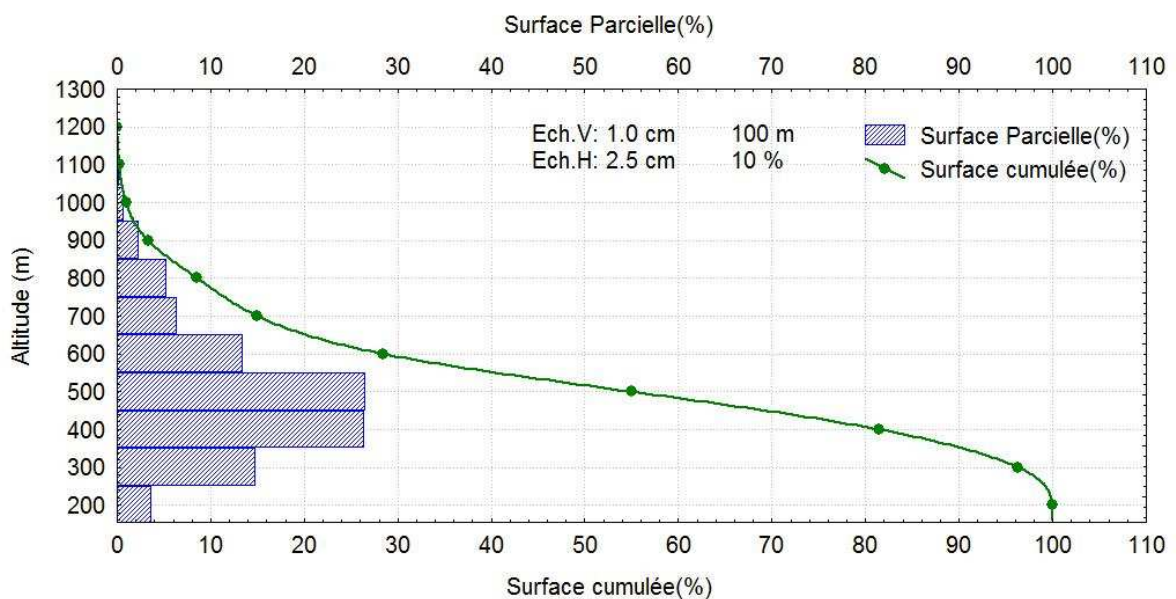
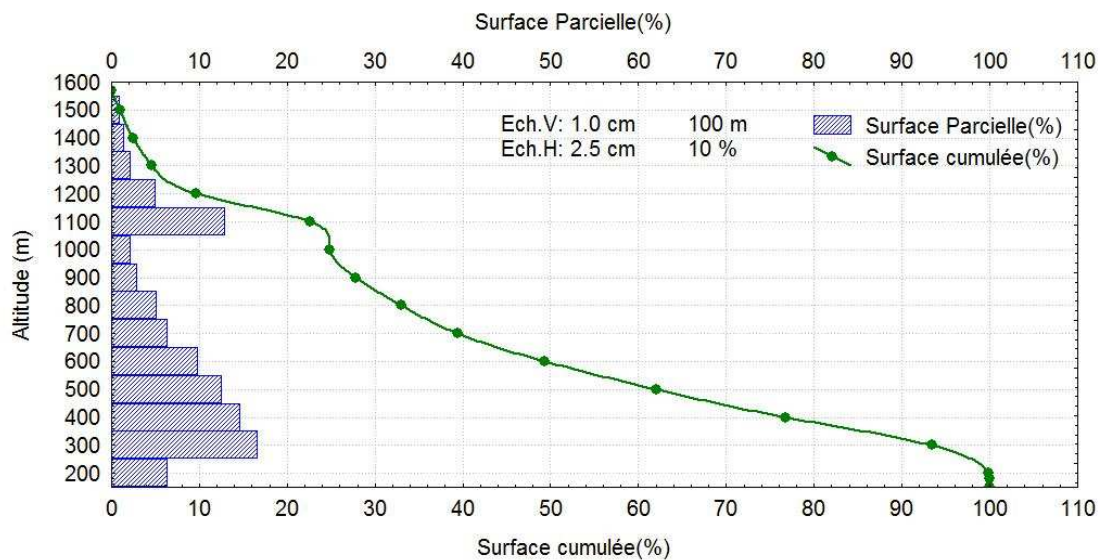
**Figure I-12 :** Courbe hypsométrique « Oued Amieur »

Tableau I.8 : Répartition altimétrique du sous bassin Sikkak

Bassin Versant	Altitudes (m)	Altitudes Moyennes (m)	Superficies Partielles		Superficies Cumulées	
			(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Oued Sikkak	1570-1500	1535	4.61	1.00	4.61	1.00
	1500-1400	1450	6.65	1.44	11.26	2.43
	1400-1300	1350	10.1	2.18	21.36	4.61
	1300-1200	1250	23.53	5.08	44.89	9.70
	1200-1100	1150	60	12.96	104.89	22.65
	1100-1000	1050	10.3	2.22	115.19	24.88
	1000-900	950	13.5	2.92	128.69	27.79
	900-800	850	24.13	5.21	152.82	33.01
	800-700	750	29.63	6.40	182.45	39.41
	700-600	650	46	9.94	228.45	49.34
	600-500	550	58.68	12.67	287.13	62.02
	500-400	450	68.14	14.72	355.27	76.73
	400-300	350	77.15	16.66	432.42	93.40
	300-200	250	29.84	6.44	462.26	99.84
	200-180	190	0.74	0.16	463	100
Superficie Total		463 km ²				

**Figure I-13 : Courbe hypsométrique du bassin versant totale**

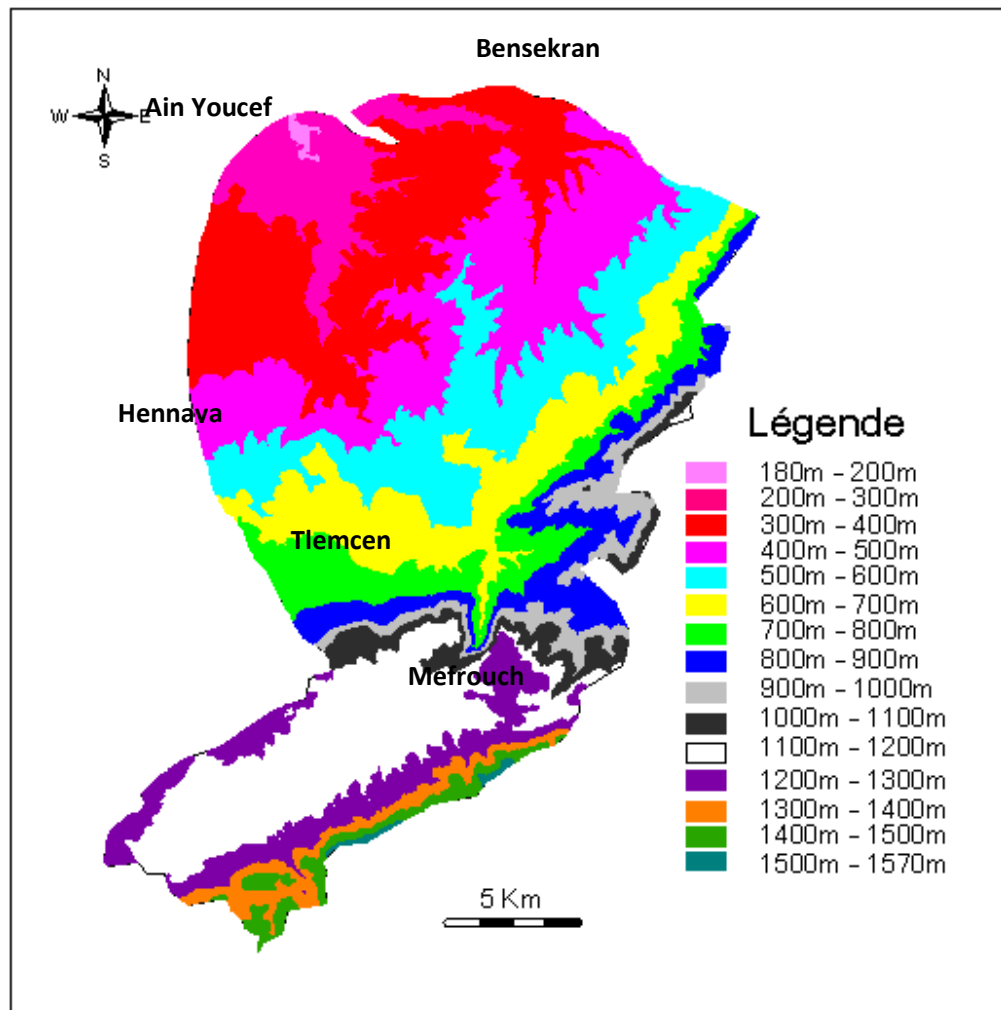


Figure I-14 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'oued Sikkak

I.4.3.2 Hauteurs caractéristiques :

a. Altitude maximale et minimale :

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température et la précipitation. (MUZY André, 1998)

b. Altitude moyenne du bassin versant : (SARI Ahmed)

L'altitude moyenne du bassin est un indice important qui intègre et présente l'influence de la zonalité climatique verticale et elle est déterminée par la somme du produit de la surface partielle S_i comprise entre les courbes de niveau, et des altitudes moyennes correspondantes H_i

$$H_{moy} = \frac{\sum(h_i.S_i)}{S} \dots\dots\dots (I-6)$$

Avec :

S_i : Surface partielle entre deux courbes de niveau (km^2) ;

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau consécutives en (m) ;

S : Superficie du bassin versant (km^2).

c. L'altitude médiane :

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique, cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne si la pente de la courbe est régulière.

d. L'altitude $H_{95\%}$:

L'altitude $H_{95\%}$ correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 95% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique,

e. L'altitude $H_{5\%}$:

L'altitude $H_{5\%}$ correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 5% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique,

Tableau I.9 : Les altitudes caractéristiques des sous bassins de l'oued Sikkak

Hauteurs caractéristique	Valeur (m)		
	Sikkak	Amieur	L'ensemble
$H_{moyenne}$	704.17	488.71	646.93
H_{95}	260	310	280
H_5	1320	860	1280
H_{max}	1570	1207	1570
H_{min}	180	280	180
$H_{méd}$	690	560	650

I.4.3.3. Les indice de pente :

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications. Les indices de pente se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin.

a. Indice de pente de Roche I_p : (CHRISTOFE HEIGY, 1998)

I_p est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre deux courbes de niveau H_i et H_{i-1} . Il est donné par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{S_i} (H_i - H_{i-1}) \quad \text{..... (I.7)}$$

Où : I_p : Indice de pente de Roche

L : Longueur de rectangle équivalent (m)

S_i : Surface partielle en(%) comprise entre deux altitudes H_i et H_{i-1} .

a.1. Sous bassin Sikkak :

Tableau I.10 : Détermination de la pente M.Roche I_p Sikkak

$H_i - H_{i-1}$	$D_i = H_i - H_{i-1}$	A_i (Km ²)	$S_i = A_i/S$ (%)	$\sqrt{S_i \times D_i}$
180-200	20	0.74	0.22	2.09
200-300	100	25.31	7.44	27.28
300-400	100	58.95	17.33	41.63
400-500	100	35.6	10.47	32.35
500-600	100	26.05	7.66	27.67
600-700	100	29.47	8.66	29.43
700-800	100	21.73	6.39	25.27
800-900	100	17.66	5.19	22.79
900-1000	100	10.68	3.14	17.72
1000-1100	100	9.4	2.76	16.62
1100-1200	100	59.68	17.54	41.89
1200-1300	100	23.53	6.92	26.30
1300-1400	100	10.1	2.97	17.23
1400-1500	100	6.65	1.95	13.98
1500-1570	70	4.61	1.36	9.74
Somme		340.16	100.00	351.99

a.2. Sous bassin Amieur :**Tableau I.11 : Détermination de la pente M.Roche Ip Amieur**

Hi _ Hi-1	Di=Hi-Hi-1	Ai (Km ²)	Si=Ai/S (%)	$\sqrt{S_i \times D_i}$
200-300	100	4.53	3.69	19.20
300-400	100	18.2	14.82	38.49
400-500	100	32.54	26.49	51.47
500-600	100	32.63	26.56	51.54
600-700	100	16.53	13.46	36.68
700-800	100	7.9	6.43	25.36
800-900	100	6.47	5.27	22.95
900-1000	100	2.82	2.30	15.15
1000-1100	100	0.9	0.73	8.56
1100-1200	100	0.32	0.26	5.10
Somme		122.84	100.00	274.51

a.3. Bassin versant de l'oued Sikkak :**Tableau I.12 : détermination de la pente M.Roche Ip du bassin versant total**

Hi _ Hi-1	Di=Hi-Hi-1	Ai (Km ²)	Si=Ai/S (%)	$\sqrt{S_i \times D_i}$
180-200	20	0.74	0.16	1.79
200-300	100	29.84	6.44	25.39
300-400	100	77.15	16.66	40.82
400-500	100	68.14	14.72	38.36
500-600	100	58.68	12.67	35.60
600-700	100	46.00	9.94	31.52
700-800	100	29.63	6.40	25.30
800-900	100	24.13	5.21	22.83
900-1000	100	13.5	2.92	17.08
1000-1100	100	10.30	2.22	14.92
1100-1200	100	60.00	12.96	36.00
1200-1300	100	23.53	5.08	22.54
1300-1400	100	10.10	2.18	14.77
1400-1500	100	6.65	1.44	11.98
1500-1570	70	4.61	1.00	8.35
Somme		463	100.00	347.24

b. Indice de pente globale I_g (P.Dubreuil, 1974)

L'indice de Roche étant cependant trop long à évaluer pour des études rapides, on a proposé un indice encore plus simple ; c'est l'indice de pente globale à partir de la courbe hypsométrique, nous déduisant les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$.

$$I_g = \frac{D}{L} \dots\dots\dots (I-8)$$

Où

D : Dénivelée entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ (m) ;

$H_{5\%}$ et $H_{95\%}$: sont les altitudes correspondantes à $S_{5\%}$ et $S_{95\%}$ (m) ;

L : Longueur du rectangle équivalent (km)

c. Indice de pente moyenne du bassin versant I_m :

L'indice de pente moyenne est le rapport entre la dénivelée et la longueur de rectangle équivalent.

$$I_m = \frac{\Delta}{L} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \dots\dots\dots (I-9)$$

$H_{\max}$ et $H_{\min}$: sont les altitudes maximal et minimal (m) ;

I.4.3.4. La dénivelée :

Elle est calculée par la formule suivante :

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \dots\dots\dots (I-10)$$

I.4.3.5. La dénivelée Spécifique « D_s » : (MUZY André, 1998)

Elle est calculée par la formule suivante :

$$D_s = I_g \times \sqrt{S} = \frac{D}{L} \times \sqrt{S} \dots\dots\dots (I-11)$$

Avec:

L : Longueur du rectangle équivalent (m) ;

S : Surface du bassin versant (km^2).

Tableau I.13 : La classification d'O.R.S.T.O.M ⁽¹⁾

La classification	Etat du relief	L'intervalle de Ds
R1	Relief très faible	Ds<10m
R2	Relief faible	10m<Ds<20m
R3	Relief assez	25m<Ds<50m
R4	Relief modéré	50m<Ds<100m
R5	Relief assez fort	100m<Ds<250m
R6	Relief fort	250m<Ds<500m
R7	Relief très fort	Ds>500m

(1): Office de la recherche scientifique et technique outre-mer

Tableau I.14 : La dénivelée et la dénivelée spécifique et leur classe

Bassin versant	Dénivelée (m)	Dénivelée Spécifique (m)	Classe
SB Sikkak	1060	403.16	Relief fort
SB Amieur	550	243.21	Relief assez fort
Bassin oued Sikkak	1000	443.84	Relief fort

I.5. Caractéristiques hydrographiques du bassin versant :

I.5.1. Le chevelu hydrographique :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement, Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin.

Les réseaux hydrographiques de bassins de l'oued Sikkak et classification de chevelu hydrographique sont représentés dans les figures (I-15)

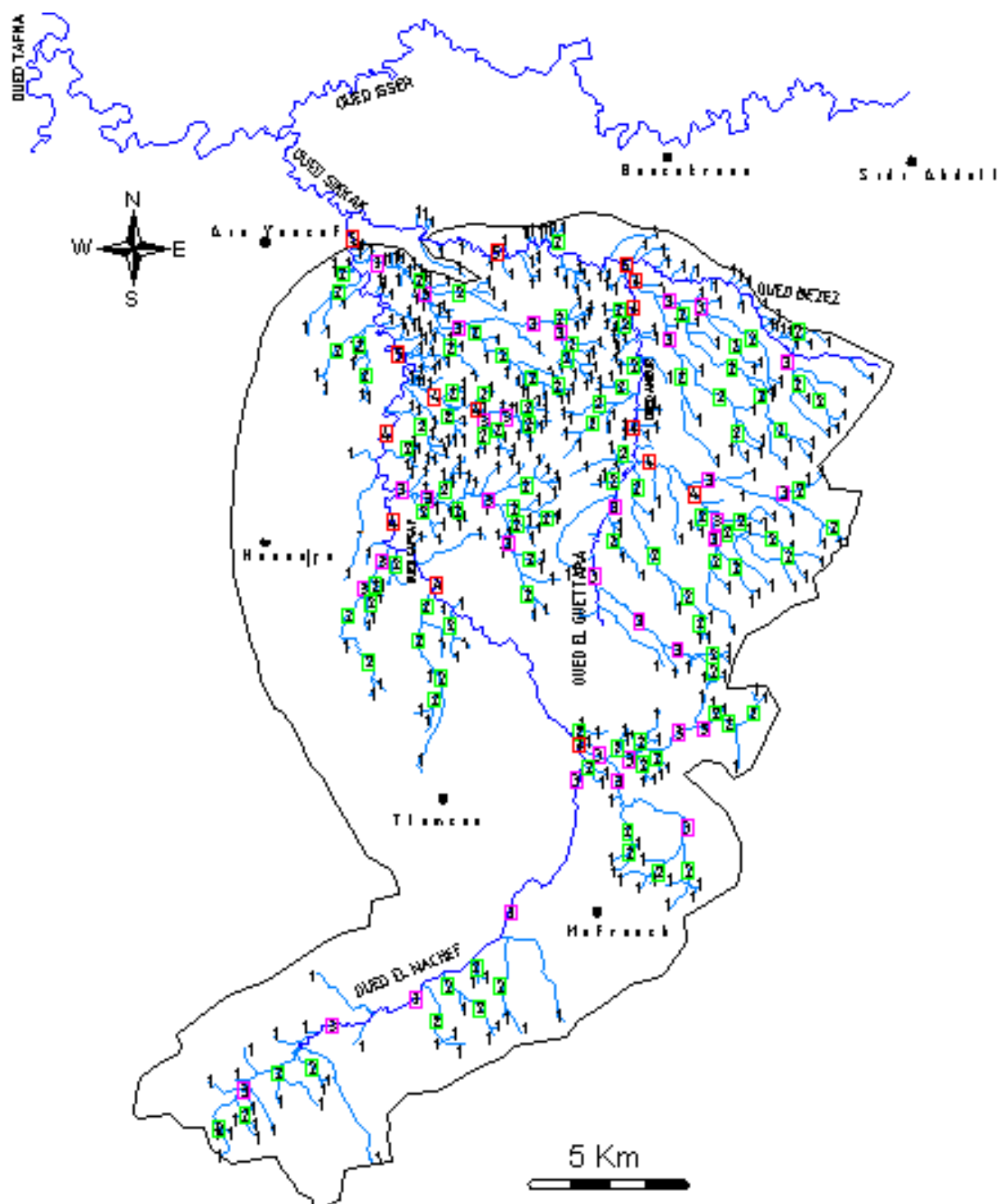


Figure I-15 : Réseau hydrographique du bassin de l'oued Sikkak (Classification de Horton)

I.5.2. Densité de drainage Dd :

C'est le rapport entre la longueur totale de tous les talwegs « Li » du bassin versant, à la surface « S ». Elle reflète la dynamique du bassin, la stabilité du chevelu hydrographique et le type de ruissellement de surface. Elle est exprimée en Km/Km².

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n Li}{S} \dots\dots\dots (I-12)$$

Avec :

$\sum_{i=1}^n Li$: La longueur totale de tous les cours d'eau.

S : Superficie du bassin versant en (Km²).

I.5.3. La fréquence des talwegs d'ordre 1 :

C'est le rapport du nombre total de talwegs d'ordre 1 à la surface du bassin versant

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \dots\dots\dots (I-13)$$

N₁ : Nombre de talwegs d'ordre 1.

S : Superficie du bassin versant.

I.5.4. Coefficient de torrentialité :

Il est défini comme étant :

$$C_t = D_d \cdot F_1 \dots\dots\dots (I-14)$$

I.5.5. Temps de concentration du bassin versant Tc :

C'est le temps que met une particule d'eau provenant de point hydrauliquement le plus éloigné du bassin pour arriver à l'exutoire considéré. **(SOUKATCHOFF Merriem)**

Dans le contexte algérien et pour les grands bassins versants, il peut être notamment calculé par les formules suivantes :

• **La formule de GIANDOTTI (1937) :** (CHAUMONT M.)

$$T_c = \frac{a\sqrt{S} + bL_{cp}}{c\sqrt{hm}} \dots\dots\dots (I-15)$$

Avec : $a = 4$; $b = 1.5$; $c = 0.8$ (pour les grands et moyens bassins d'Afrique du Nord);

S : surface du bassin versant en (Km^2);

L_{cp} : longueur du chenal principal hydrographique en (Km);

T_c : temps de concentrations exprimé en heure;

h_m : altitude moyenne relative du bassin en (Km) (différence entre l'altitude moyenne pondérée et l'altitude de l'exutoire $H_{moy} - H_{min}$).

Cette formule a été éprouvée en Afrique du Nord et parait fournir une bonne valeur du temps de concentration pour les grands et moyens bassins (de 400 à 10000 Km^2).

Pour les petits bassins ; on lui préfère la formule de Ventura. (CHAUMONT M.)

• **La formule de VENTURA :**

$$T_c = 0,1275\sqrt{\frac{S}{I}} \dots\dots\dots (I-18)$$

Avec :

S : surface du bassin versant en (Km^2);

I : indice de pente en (m/km).

• **La formule de BASSO :**

$$T_c = 0,067 \times \frac{L_p^{1,115}}{(H_{max} - H_{min})^{0,385}} \dots\dots\dots (I-16)$$

Avec :

T_c : temps de concentration en Heures ;

L_p : longueur du bassin versant (Km) ;

H_{min} : altitude minimal (Km);

H_{max} : altitude maximal (Km).

- **La formule de KIRPICH**

$$T_c = 0.6615 \times (L_{cp})^{0.77} \times (I_g)^{-0.385} \dots\dots\dots (I-17)$$

Avec :

L_{cp} : longueur du chenal principal hydrographique en (Km);

I_g : indice de la pente globale (%).

- **Formule de SOKOLOVSKY :**

$$T_c = 4 \left(\frac{(S \times L)^{0.333}}{\sqrt{I}} \right)^{0.75} \dots\dots\dots (I-19)$$

Avec :

L: longueur du talweg principale en (Km) ;

S : surface du bassin versant en (Km²);

I : indice de pente en (m/km).

- **Formule de L'ANRH : (SOGREAH 1986/1989)**

Cette formule a été développée par Sogreah sur demande de l'ANRH elle est vérifiée et recommandée pour les petits bassins versants de l'Algérie ; s'écrit

$$T_c = 3 \left[\frac{S_{BV} \times L_{CP}}{(10 I_{BV})^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (I-20)$$

Avec :

I_{BV} : la pente du bassin versant en (%) ;

L_{cp} : longueur du chenal principal hydrographique en (Km);

S_{BV} : Surface du bassin versant en (Km²).

Les résultats de différentes méthodes sont présents dans le Tableau suivant (Tableau I-15).

On a utilisé la formule de GIANDOTTI pour le sous bassin de Sikkak et pour l'ensemble où la superficie est entre (400 et 10000 Km²) et la formule de l'ANRH pour le sous bassin Amieur.

Tableau (I-15) : Temps de concentration.

Formule	T _c (heure) Sikkak	T _c (heure) Amieur	T _c (heure) L'ensemble
GIANDOTTI	8	7.09	9.19
KIRPICH	9.49	5.77	9.94
L'ANRH	9.66	5.77	10.43

I.5.6. Vitesse de ruissellement :

On entend par ruissellement l'écoulement par gravité à la surface du sol suivant la pente du terrain, et dans le micro-réseau hydrographique des eaux météoriques qui ont échappé à l'infiltration à l'évaporation et au stockage superficiel.

Cette vitesse est déterminée par la formule suivante :

$$V_r = \frac{L}{T_c} \dots\dots\dots (I-20)$$

L : Longueur du thalweg principal (Km) ;

T_c : Temps de concentration (h).

I.5.7. Profil en long de l'axe de l'oued :

L'oued Sikkak présente un profil en long non régulier, Ce profil est tracé à partir de la carte topographique, Il est dessiné dans la figure (I-16).

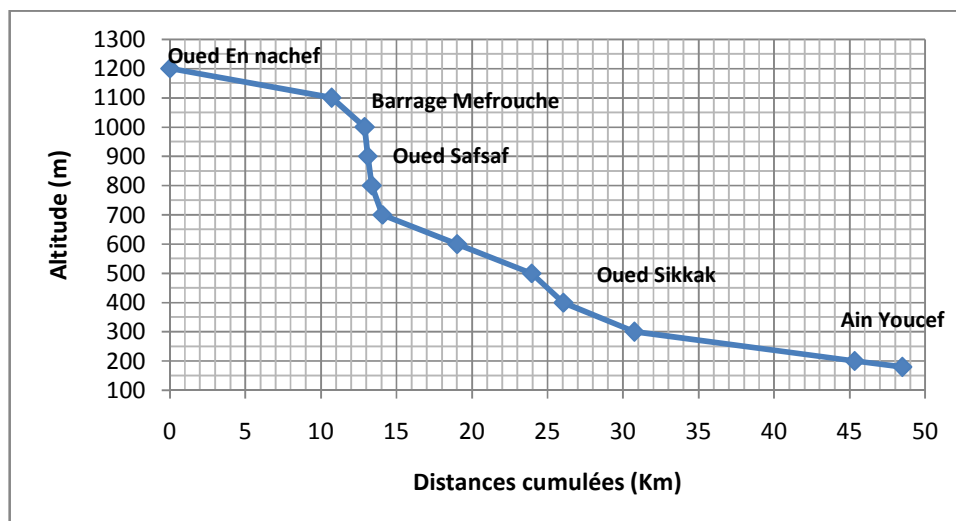
**Figure I-16 : Profil en long du cours d'eau principal « Oued Sikkak »**

Tableau (I-16) : Caractéristiques hydromorphométriques du bassin versant

Désignation		Sy	Unités	Sikkak	Amieur	L'ensemble
Superficie		S	km ²	340	123	463
Périmètre		P	km	106	58.6	116
Longueur du thalweg principal		L	km	48.48	25.08	48.48
Indice de compacité		K _C		1.61	1.48	1.51
Coefficient d'allongement		K _P		6.91	5.11	5.08
Rectangle équivalent	longueur	L _r	km	45.53	24.22	48.44
	largeur	l _r	Km	7.47	5.08	9.56
Altitudes	maximale	H _{ma}	m	1570	1207	1570
	moyenne	H _{mo}	m	704.17	488.71	646.93
	Minimale	H _{mi}	m	180	280	180
Indice de pente de Roche		I _p	m/Km	52	55.78	48.87
Indice de pente globale		I _g	m/Km	23.28	22.71	20.62
Indice de pente moyenne		I _m	m/Km	28.67	36.96	28.67
Densité de drainage		D _d	Km/Km ²	1.48	1.59	1.51
Coefficient de torrentialité		C _t	Km ⁻³	1.89	2.27	2.81
Temps de concentration		T _c	h	8	5.77	9.19
Vitesse de ruissellement		V _r	Km/h	6.06	4.35	5.27

I.6.Conclusion:

Les paramètres morphométriques montrent que les sous bassins versants de l'oued Sikkak présentent une forme assez allongée dans l'ensemble (**1,48 < K_c < 1,61**), malgré la différence de taille.

Le bassin est moyennement drainée dans les sous bassins (**1,48 < D_d < 1,59**). L'indice de pente moyenne est très fort, donc on assistera à un écoulement rapide.

Selon la taille, les reliefs des bassins et la densité de drainage; Le coefficient de torrentialité varie et il est de **1,89** pour le sous bassin de Sikkak et **2,27** pour le sous bassin de Amieur.

Les temps de concentration varient ainsi de **6 h à 9 h**.

CHAPITRE II

Etude géologique

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie du bassin de l'oued Sikkak. Cette étude nous permet de différencier toutes les unités géologiques en fonction des paramètres lithologique et hydrodynamique (niveau de perméabilité) qui influence sur l'écoulement des eaux de surface au niveau de notre bassin.

II.2 Aperçu géologique de l'Algérie :

L'histoire géologique des bassins sédimentaires Algériens comme indique la figure (II-1), s'inscrit dans le processus de géodynamique globale de la tectonique des plaques qui a structuré l'Algérie en deux domaines:

- au nord, l'Algérie alpine;
- au sud, la Plate-forme saharienne.

□ Algérie alpine

Le domaine septentrional est constitué de reliefs jeunes, modelés au cours du Tertiaire par les mouvements alpins. L'Algérie alpine est composée des ensembles structuro-sédimentaires suivants, du nord au sud:

1. Le plateau continental algérien réduit, à dépôts tertiaires et quaternaires (1000 à 3500m), repose sur un socle métamorphique.
2. L'atlas tellien est le domaine des nappes, avec des bassins de type intra montagneux (ex. bassin du Chélif), dont la série sédimentaire s'étend du Jurassique au Miocène.
3. Le Hodna est un bassin d'avant-fosse dont la séquence de remplissage débute par des dépôts continentaux d'âge.
4. Les hauts plateaux, avant-pays alpin, à couverture sédimentaire réduite, où les processus locaux de distension ont permis la formation de bassins intra montagneux comme ceux de Telagh et de Tiaret.
5. L'atlas saharien est né d'un long sillon subsidient pincé entre les hauts plateaux et la Plate-forme Saharienne. Au Mésozoïque, ce sillon fut comblé par une puissante série sédimentaire (7000 à 9000 m). Durant le Tertiaire, une tectonique compressive réactive les structures extensives antérieures en failles et structures inverses aboutissant à la formation de cette chaîne montagneuse. L'objectif pétrolier principal est le Jurassique.

6. Les bassins du Chott Melrhir dans le SE constantinois, structurés au Tertiaire, à remplissage crétacé (5000 m), ont engendré et accumulé des hydrocarbures principalement dans le Crétacé (Djebel Onk, Rass Toumb, Guerguet El Kihal Nord).

□ La plate-forme saharienne

Elle est située au sud de l'Algérie alpine et appartient au Craton Nord Africain. Elle comprend un socle précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire, structurée au Paléozoïque en plusieurs bassins séparés par des zones hautes. On distingue d'ouest en est:

1. Les bassins de Tindouf et de Reggane situés sur les bordures nord et nord-est du bouclier Reguibat. La couverture sédimentaire atteindrait (8000m) dans le bassin de Tindouf et (6500 m) dans celui de Reggane.
2. Le bassin de Béchar limité au nord par le Haut Atlas, au sud et à l'ouest par la chaîne d'Ougarta. Sa couverture sédimentaire atteindrait (8000 m).
3. Le bassin d'Ahnet-Timimoun limité au nord par le haut fond d'Oued Namous, à l'ouest par la chaîne d'Ougarta, au sud par le bouclier Touareg et à l'est par la dorsale d'Idjerane-Mزاب. La couverture serait en moyenne de (4000 m).
4. Les bassins du Mouydir et de l'Aguemour-Oued Mya sont limités à l'ouest par la dorsale d'Idjerane-Mزاب et à l'est par la dorsale Amguid-El Biod. Au sud, les sédiments paléozoïques affleurent dans le Mouydir. Au nord, dans la dépression d'Aguemour-Oued Mya, comblée par une puissante série paléozoïque et méso-cénozoïque (5000m à Oued Mya),
5. la synclise d'Illizi-Ghadamès est limitée à l'ouest par la dorsale d'Amguid-El Biod et à l'est par le môle de Tihemboka et les confins tuniso-libyens. Dans le bassin de Ghadamès, la couverture sédimentaire (supérieure à 6000 m), renferme des gisements d'hydrocarbures dans le Paléozoïque et le Trias.

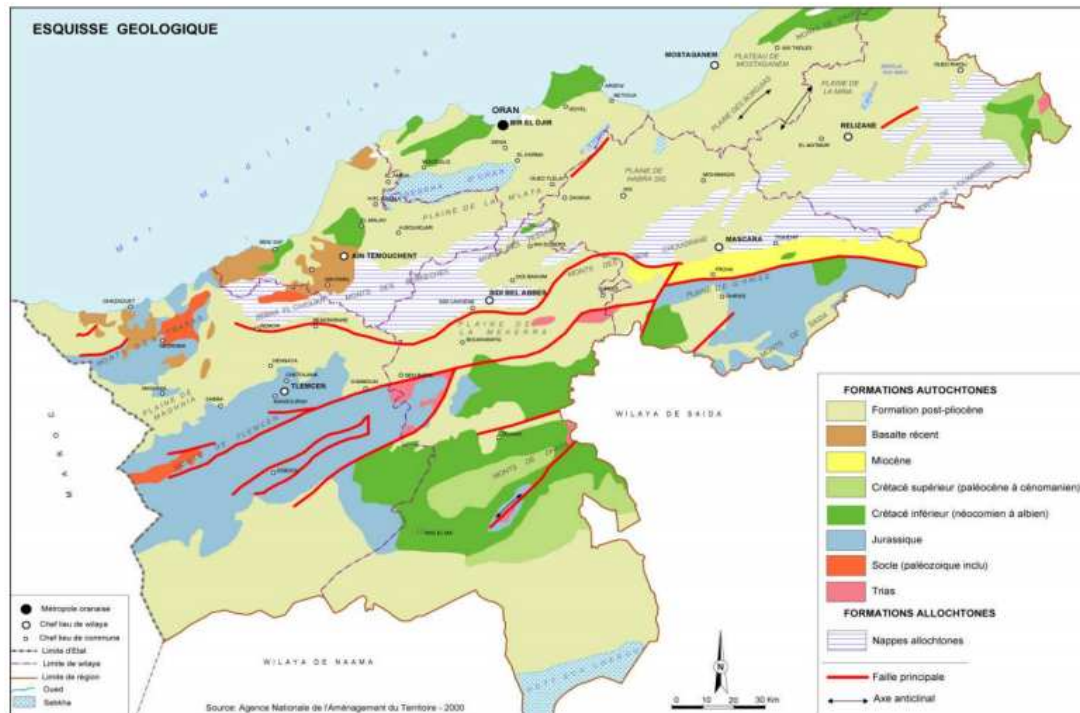


Figure II-1 : Carte géologique du Nord-ouest de l'Algérie (ABH)

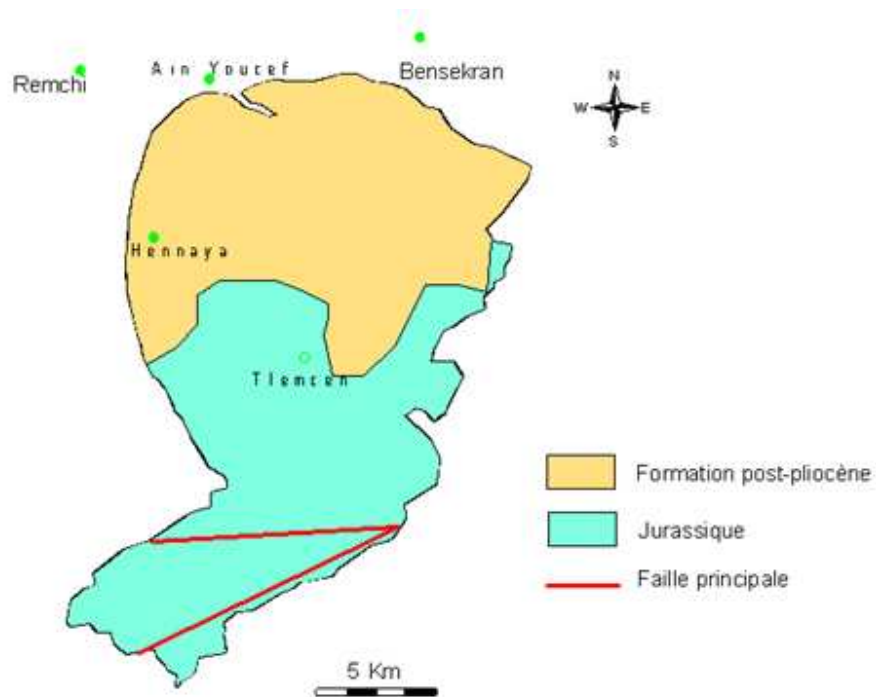


Figure II-2 : Carte géologique du bassin de L'oued Sikkak

II.3. Cadre géographique du bassin de la Tafna: (HAMLET AEK, 2005)

Le bassin de la Tafna présente une géographie diversifiée. On distingue principalement trois domaines (Figure. II .3)

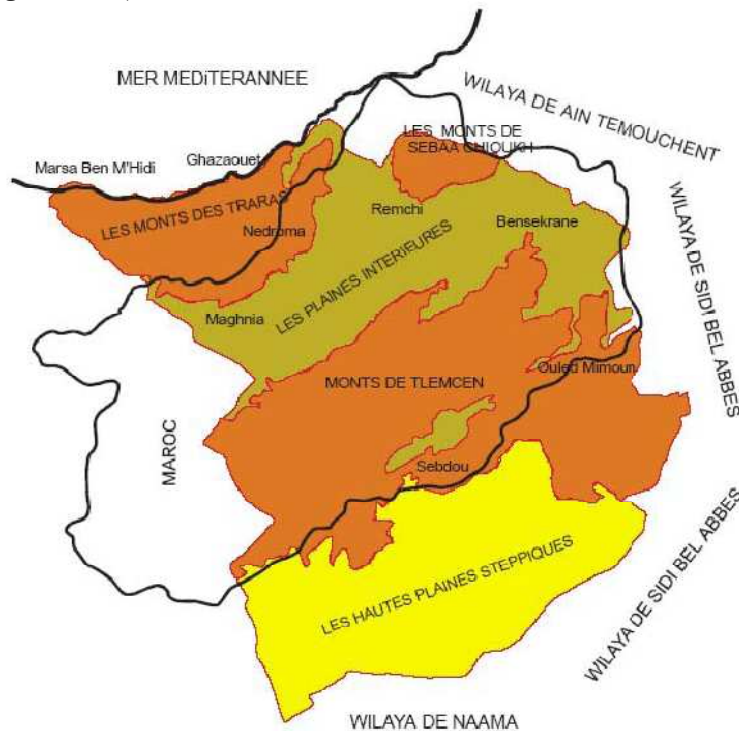


Figure. II .3 : Cadre géographique du bassin de la Tafna et de la wilaya de Tlemcen.
(HAMLET AEK, 2005)

- ⌚ Au Nord, une chaîne montagneuse dresse une barrière entre le bassin versant et la mer représentant les massifs des Traras et de Sebba Chioukh.
- ⌚ Au centre, on trouve une zone de plaine et de plateaux intérieurs. Elle est formée par la plaine de Maghnia à l'Ouest se prolongeant par les plaines d'Angad au Maroc et les plaines des Ghossels à l'Est.
- ⌚ Au sud se dressent les monts de Tlemcen formant la bordure sud du bassin avec une altitude maximale dépassant les 1500m.

La plaine des Ghossels est parcourue par l'oued Tafna et ses affluents. Ce dernier prend ses sources dans les monts de Tlemcen. C'est un cours d'eau permanent de 117 km de long et reçoit deux affluents importants : Oued Mouillah à l'Ouest et Oued Isser à l'Est.

II-3-1 / Les zones montagneuses :

Les zones montagneuses entourent en quelque sorte le bassin de la Tafna du côté Nord-Ouest, du côté sud et du côté Nord pour laisser au centre une zone de plaine et de dépressions. Ces zones sont représentées par:

- **Les monts des Traras :** C'est une chaîne montagneuse côtière de 1250km² occupant le Nord-Ouest de la wilaya de Tlemcen. Cette zone se caractérise par de fortes pentes, l'érosion y est donc intense. Le couvert forestier est localisé essentiellement dans la partie centrale aux alentours des monts les plus culminants (Djebel Fellaoucène).
- **Les monts de Sebaa Chioukh :** C'est une chaîne montagneuse de 250km² située au Nord-Est de la wilaya de Tlemcen. Elle forme le prolongement du côté Est des monts des Traras. Ces terrains ont des pentes dépassant les 25%.
- **Les monts de Tlemcen :** Les monts de Tlemcen se situent au sud de la wilaya de Tlemcen formant la frontière sud du bassin versant. Ils occupent une superficie de 3000km² et s'étendent à l'ouest jusqu'au royaume du Maroc et à l'est jusqu'à la wilaya de Sidi Bel Abbès. Ils ont un relief très accidenté avec de fortes pentes et des altitudes moyennes entre 1200 et 1500m avec comme point culminant Djebel Chenoufi à 1843m.

II-3-2 / Les zones des plaines et des plateaux :

Les plaines et les plateaux occupent la partie centrale du bassin enfermée entre les zones montagneuses. La population se concentre principalement dans cette région. On distingue de l'Ouest à l'Est:

- **La plaine de Maghnia :** Elle est limitée au Nord et Nord-Est par les piémonts sud des Traras, au Sud par les piémonts Nord des monts de Tlemcen et à l'Ouest par un prolongement naturel formant la plaine des Angad (Maroc). Cette plaine a une grande partie recouverte de limons très fertiles. Les sols de la plaine sont limités en profondeur par des croûtes calcaires.
- **La plaine de Hennaya :** Elle est limitée au Sud par les piémonts Nord des monts de Tlemcen, au Nord par le plateau de Zenata. Ces sols sont formés par des dépôts d'alluvions récents. Par la position géographique et la structure granuleuse des sols, la plaine profite de la proximité des points d'eau (cours d'eau, nappe phréatique).

• **Plateau de Zenata-Ouled Riah** : Le plateau de Zenata-Ouled Riah est situé au nord-ouest de la plaine de Hennaya, il est constitué de sols rouges méditerranéens reposant sur des encroûtements où parfois sur la carapace calcaire, la texture du sol est argilo-limoneuse.

• **Plateau Sidi Abdelli-Aïn Nahala** : Le plateau est formé des sols bruns calcaires contenant de l'argile. A la suite de la variation de l'humidité de ces sols, la structure se dilate en été donnant naissance à de larges fentes.

II.3.3 Cadre géologique du bassin : (HAMLET AEK, 2005)

Le bassin versant de la Tafna est caractérisé par une géologie complexe et diversifiée. L'évolution des terrains au niveau du bassin va du primaire au plio-quaternaire

1 / Le primaire :

Il est caractérisé par la présence d'une formation schisto-quartzite, d'âge silurien à dévonien, fortement plissée recouvrant une grande surface. Les schistes sont de couleur brune et altérés avec des quartzites très compacts.

2 / Le secondaire :

2.1. Le Trias

Le trias est localisé essentiellement dans la région de Béni-Bahdel et au nord de Aïn Tellout. Il est constitué par des argiles plus ou moins dolomitiques et gypseuses et des marnes bariolées fortement teintées. Il est souvent traversé par des pointements d'ophite d'âge plus récent (Jurassique ou crétacé) s'accompagnant d'un léger métamorphisme.

2.2- Le Jurassique:

2.2.1- Jurassique inférieur: caractérisé par les séries du Lias visible au niveau de Rhar Roubane. On y distingue du bas vers le haut :

- **Lias inférieurs** : représenté généralement par des calcaires massifs karstifiés surmontant des marnes vertes ou rouges.

- **Lias moyen:** représenté par des calcaires d'âge Carixien-Domérien. Cette formation débute souvent par un calcaire biodétritique rougeâtre à éléments bréchiques.

- **Lias supérieur:** représenté par:

⌚ **Toarcien:** représenté par des alternances de marnes et de calcaires de plus en plus rapprochés vers le haut où les niveaux calcaires prennent de l'ampleur.

⌚ **Aaléno-Bajocien:** Cette formation débute par des calcaires oolithiques en bancs décimétriques surmontés par des dolomies massives beiges cristallines.

2.2.2- Jurassique moyen : Il est représenté par :

- **Bathonien inférieur et moyen**: cette formation montre une variation d'épaisseur et de faciès. Ce sont des calcaires en bancs centimétriques à décimétriques gris foncés à verdâtres, affleurant aux monts de Rbar-Roubane.
- **Callovo-oxfordien** : C'est une formation, d'épaisseur variable, correspondant à des dépôts argileux et marneux, parfois schisteux à passées gréseuses.

2.2.3- Jurassique supérieur : Il est représenté par :

- **Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur** : C'est une formation à dominance gréseuse, avec des passées argileuses masquées le plus souvent, par des éboulis ou la végétation. Ces grès sont particulièrement développés dans les forêts de Zarifet et d'Hafir.
- **Kimméridgien supérieur**: représenté par les calcaires de Zarifet surmontant les grès de Boumediene. Il s'agit de bancs calcaires séparés par de minces intercalations de calcaires marneux écailleux.
- **Kimméridgien terminal**: Il forme les dolomies de Tlemcen. Il s'agit de dolomies cristallines grises à patine rousse et à cassure grise. Elles se rencontrent autour d'Ain Fezza, dans la forêt de Zarifet, au Nord de Tlemcen et sur le plateau de Terny.
- **Tithonique basal**: C'est une formation de marnes grises, blanchâtres en surface, intercalées de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs (marno - calcaires de Raouraï). Cette formation affleure sur le plateau de Terny et à l'Est de Ain Fezza.
- **Tithonique inférieur** : Se sont des dolomies parfois vacuolaires avec de nombreuses stratifications obliques et un aspect très massif. Elles sont développées au niveau du plateau des Azails, de Terny et près du barrage d'El-Mefrouch et au Sud d'Ouled Mimoun.
- **Tithonique supérieur**: C'est une alternance de calcaires et de marnes plus ou moins tendres formant les marno-calcaires de djebel El Guern et de celui de Bouchiba.
- **Tithonique Supérieur à Berriasien basal**: Cette formation renferme les couches de passage du Jurassique au Crétacé. Elle est limitée à sa base par les grès de Merchich et à sa supérieure par le toit d'une corniche de calcaires. Elle forme les marno-calcaires d'Ouled Mimoun.

2.3- Le Crétacé

Il est représenté par la série du Crétacé inférieur, on y distingue du bas vers le haut :

2.3.1- Berriasien moyen –Valanginiens : C'est une formation argilogréseuse, nettement calcaire au sommet formant les argiles de Lamoricière (Ouled-Mimoun).

2.3.2- Hauterivien : C'est une formation caractérisée par une récurrence de la smectite et surtout par la présence du chlorite. Elle se rencontre au Sud Ouest du fossé de Sebdu.

2.3.3- Barremien-Aptien : Il représente le passage entre le Crétacé et l'Eocène. Cette formation affleure à Sebdu

3 / Le tertiaire :

3.1. L'Eocène

La formation affleure sur une très faible surface au niveau de Aïn Berkouk. C'est un ensemble gréseux avec passage de bancs de poudingues. Dans la vallée d'Oued Isser près de la confluence avec Oued Tafna, le massif des Sbeaa Chioukh est constitué de grès siliceux, jaunes à rougeâtres, assez friables à ciment argileux alternant avec des marnes argileuses verdâtres.

3.2. Le Miocène

• **Le Miocène inférieur (Burdigalien)**: Il débute par un niveau de poudingue très dur à blocs bien roulés, hétérométriques et polygéniques, formés par des éléments calcaires, dolomitiques à ciment calcaire-gréseux très résistants. Cette formation affleure de part et d'autre de la Tafna, essentiellement entre la vallée de oued Zitoun et djebel Fellaoucène.

• **Le Miocène moyen (Serravalien)**: Il repose souvent en transgression et en discordance sur le Burdigalien déformé et partiellement érodé. Il est constitué une épaisse série d'argiles marneuses grises ou bleutées dans la masse devenant ocre à l'affleurement. Il se rencontre à l'est de Hammam Boughrara.

• **Le Miocène supérieur (Tortonien)** : Il est formé par des dépôts de grès durs, jaunes d'or à citron, peu consolidés. Ces grès s'appuient sur des marnes serravaliennes, entre Tlemcen et Remchi, ou directement sur le Jurassique au Nord et au Sud.

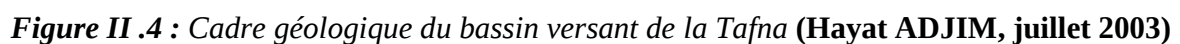
4 / Le plio-quaternaire :

Représenté par des sédiments continentaux d'âge comparables bien que de natures variables. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérométriques et hétérogènes. Les faciès suivants sont rencontrés :

⌚ • **Les travertins Villafranchiens** : Situés en bordure des monts de Tlemcen, et représentés par des travertins fortement consolidés et des calcaires lacustres ;

⌚ • **Le complexe de sédiments Plio-Villafranchiens** : La bordure des massifs secondaires est soulignée par des éboulis de piémonts plus ou moins encroûtés et remaniés d'épaisseur très variable mais toujours assez faible ;

- Les figures suivantes (Figure II.4 et Figure II.5) résume sommairement ce contexte géologique du bassin de la Tafna.



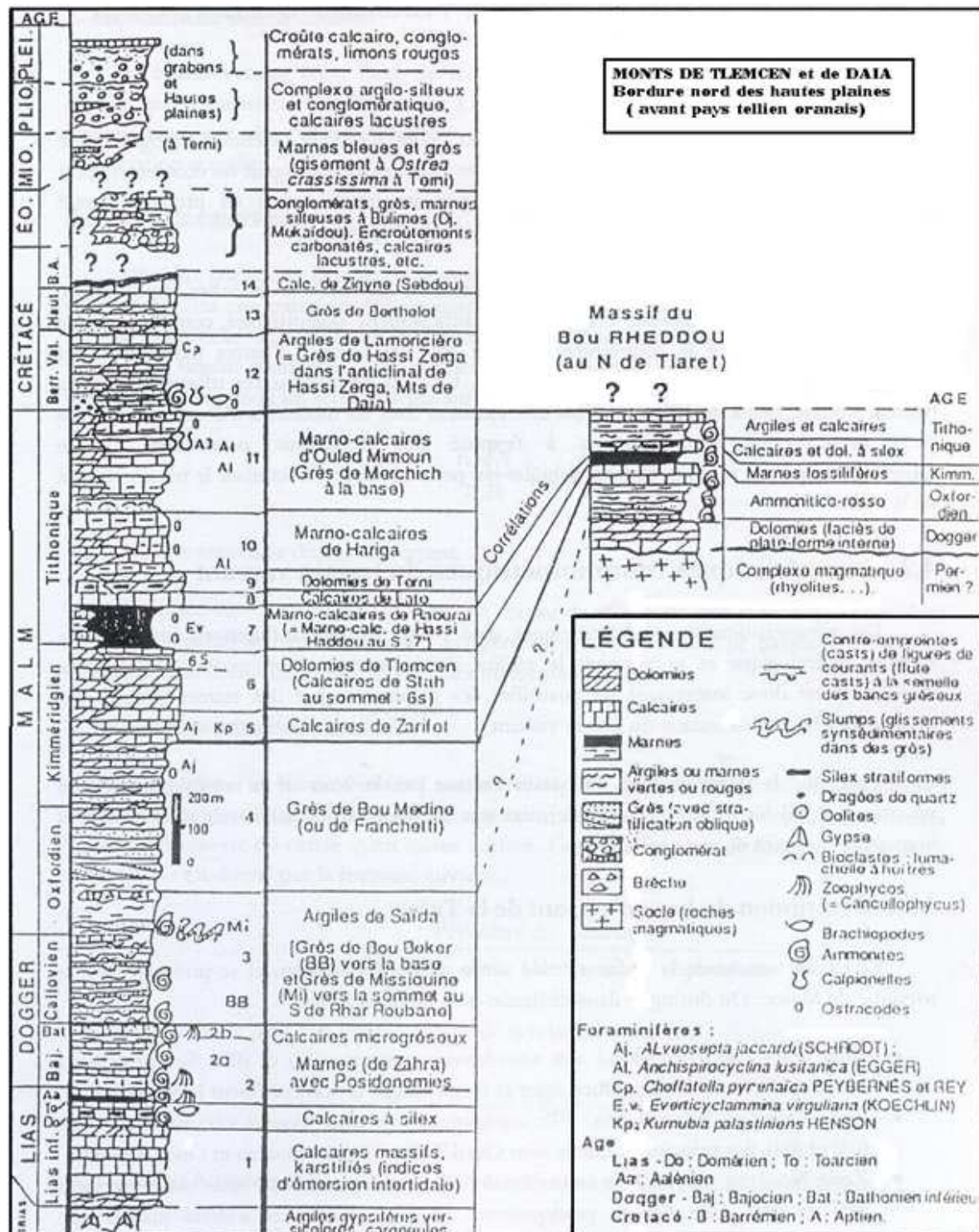


Figure II.5 : Colonne lithostratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Hayat ADJIM, juillet 2003)

CHAPITRE III

Analyse des pluies

III.1. Introduction :

La Pluviométrie en Algérie a été étudiée par plusieurs auteurs, (P.Seltzer, 1913-1938, H.Gaussen, 1918-1947, G.Medinger, 1913-1953, M.Chaumont et C.Paquin, 1913-1963). La plupart des stations du bassin ont été arrêtées pendant la guerre d'Algérie, d'autres ont subi des modifications après 1962. Ceci se traduit par des résultats entachés d'erreurs et le nombre élevé de lacunes à l'échelle mensuelle et annuelle. D'autre part bon nombre de stations ont été installées lors de la restructuration du réseau pluviométrique algérien et leurs données sont très utiles pour l'établissement d'une série pluviométrique récente (1970-1998). L'intérêt et le but de cette série est de permettre la confrontation avec l'écoulement correspondant afin de dégager une étude hydro pluviométrique et d'estimer la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin.

Par ailleurs, vu la qualité médiocre des observations, les données ne sont pas toujours dépourvues d'erreurs pour résoudre ce problème de fiabilité des données, l'emploi d'outils statistiques et graphiques est nécessaire pour contrôler la qualité des échantillons pluviométriques et déceler l'anomalie qui pourrait les affecter en vue de leur homogénéisation. Cette dernière opération est indispensable si l'on veut déterminer de façon plus ou moins précise les caractéristiques des précipitations.

I.2. Etude des précipitations :

Pour mieux cerner l'étude de la pluviométrie, nous avons retenu des séries des pluies moyennes mensuelles pour les stations pluviométriques du bassin de l'oued Sikkak. Ces stations se répartissent dans ce bassin comme l'indique la figure (III-1) Les caractéristiques géographiques (coordonnées Lambert) avec leurs périodes d'observations sont données dans le tableau (III-1).

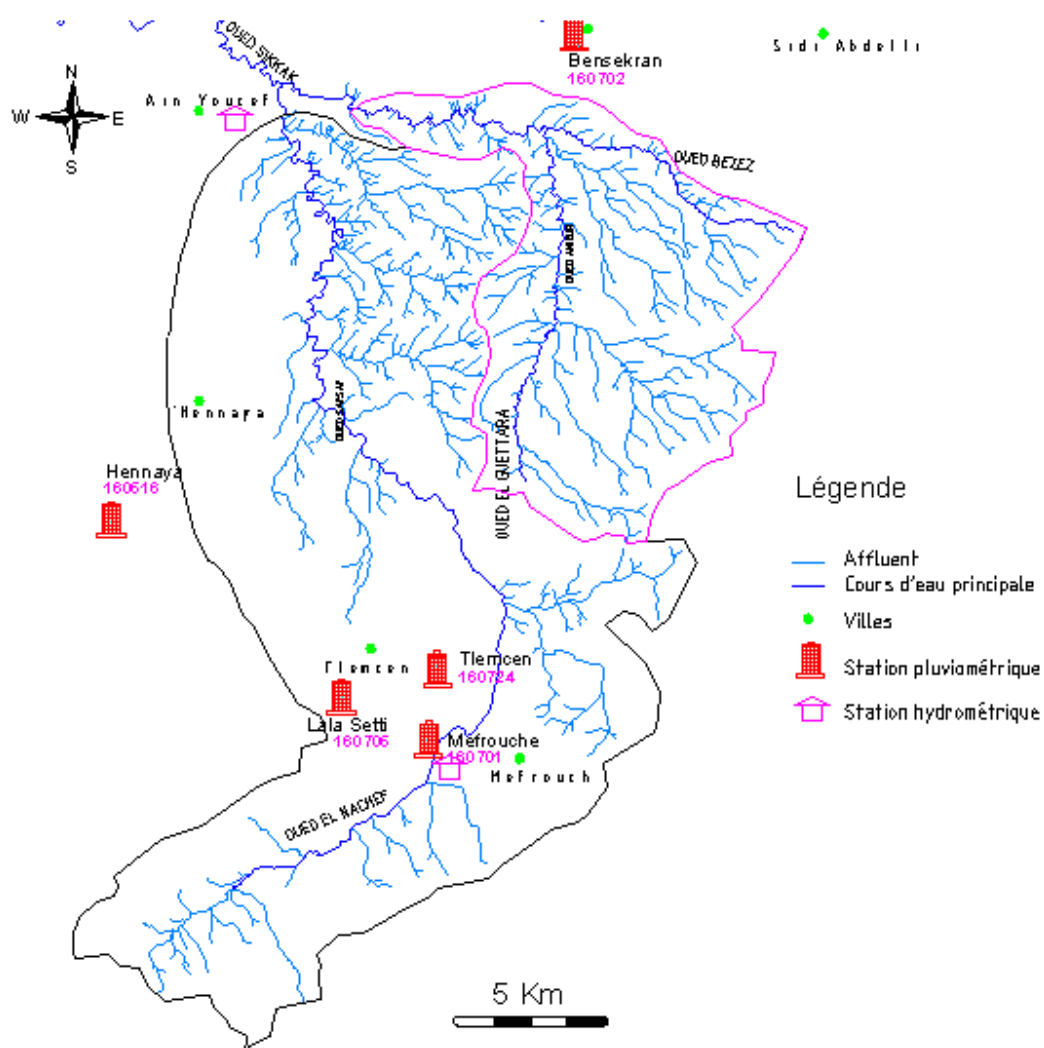


Figure III-1 : Localisation des stations pluviométriques, hydrométrique dans le bassin de l'oued Sikkak

Tableau (III-1) : Caractéristiques des stations pluviométriques

N°	Nom de la station	Code	Période d'observation	Longitude (m)	Latitude (m)	Altitude (m)
01	Tlemcen	160724	1985-2006	132.9	183.5	832
02	Meffrouch	160701	1985-2006	135.6	180.2	1120
03	Hennaya	160516	1985-2006	126.8	188.2	510
04	Bensekrane	160702	1985-2006	143.4	205.3	260
05	Lalla Setti	160705	1985-2006	133.9	181.8	1020

Le tableau ci-dessus (III-1), montre que toutes les stations de bassin versant ont une longue période d'observation qui s'étend de 1985 jusqu'à 2006 et ne contiennent pas de lacune.

La méthode du double cumul s'effectue afin de vérifier l'homogénéité des totaux annuels de la série du poste pluviométrique à la station de Tlemcen, les figures (III-2), (III-3), (III-4), (III-5), confirme cette homogénéité.

Les résultats d'analyse de corrélation pour les relevés pluviométriques des différentes stations, sont donnés dans le tableau (III-2).

En général, nous observons que l'alignement des points d'observations est acceptable ; et la corrélation entre les données de ces stations avec celles de Tlemcen est satisfaisante, car le coefficient de corrélation est très élevé.

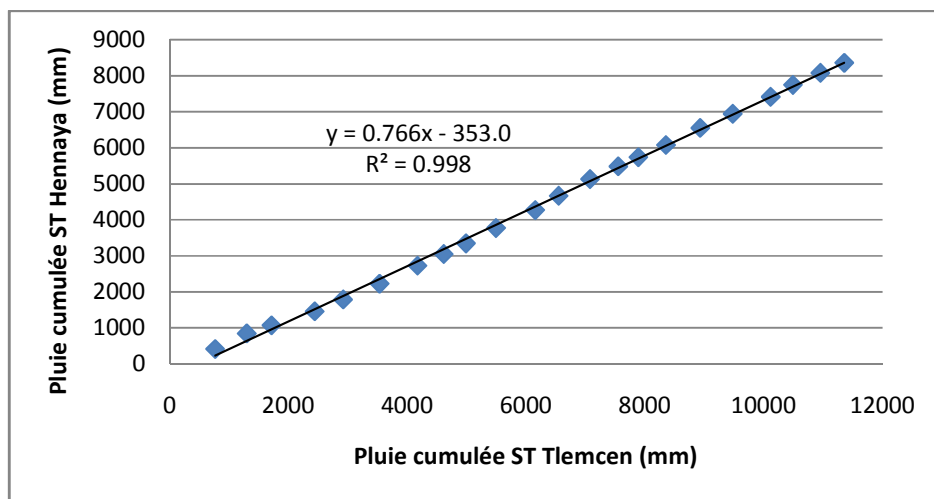


Figure III-2 : Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Tlemcen et Hennaya

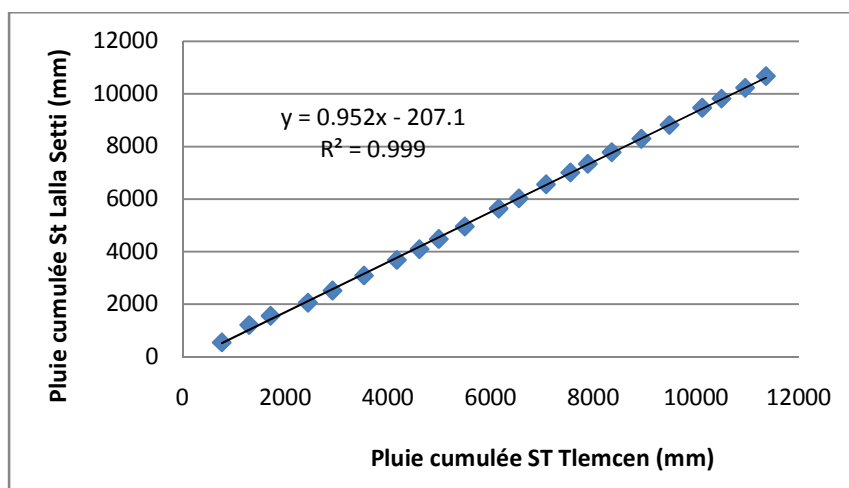


Figure III-3 : Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Tlemcen et Lalla Setti

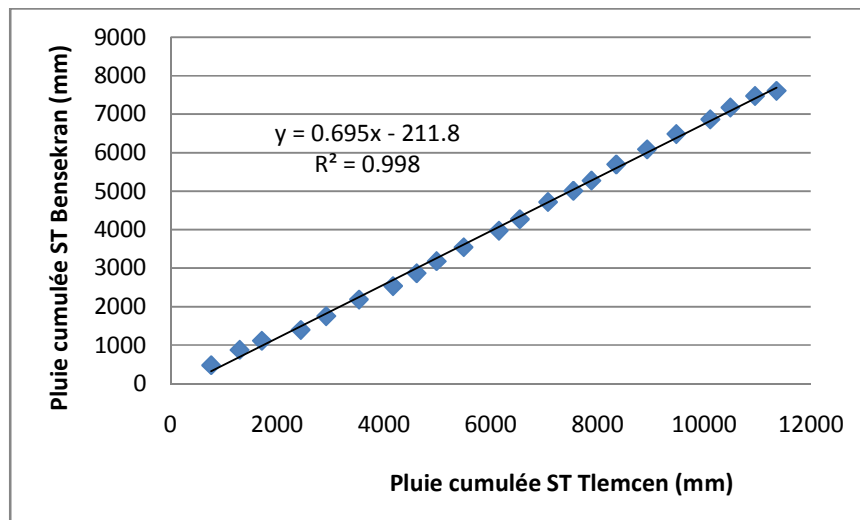


Figure III-4 : Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Tlemcen et Bensekran

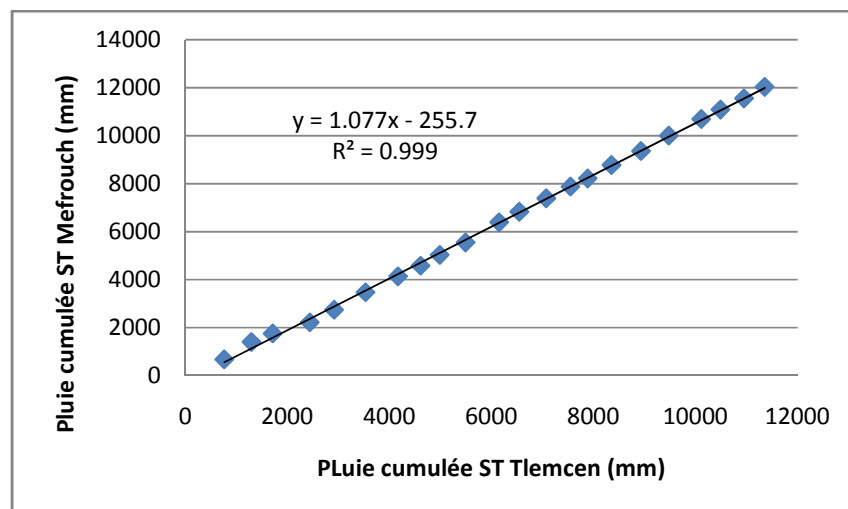


Figure III-5: Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Tlemcen et Mefrouch

Tableau (III-2): Paramètres de corrélation entre les différentes stations avec celle Tlemcen

Station	Coefficient de corrélation (R^2)	Droite de régression
Tlemcen/Hennaya	0.998	$y=0.766x-353.0$
Tlemcen/Lalla Setti	0.999	$y=0.952x-207.1$
Tlemcen/Bensekran	0.998	$y=0.695x-211.8$
Tlemcen/Mefrouch	0.999	$y=1.077x-255.7$

III.3. Variation interannuelle de la pluviométrie :

Pour déterminer la variation interannuelle de pluviométrie pour chaque station du bassin de l'oued Sikkak, nous avons utilisé des paramètres statistiques tels que la moyenne annuelle.

Vu que les stations sont bien réparties et les valeurs de la pluie annuelle aux stations étudiées, est presque égales, donc nous avons appliqué la méthode de la moyenne arithmétique.

Cette dernière se base sur le calcul de la moyenne des pluies annuelles de ces stations, et le coefficient d'immodération donné par le rapport des pluies extrêmes (P_M/P_m) sont données dans le tableau (III-3).

Tableau (III-3) : Caractéristiques de la précipitation annuelle des stations pluviométriques du Bassin de l'oued Sikkak

Station	Moyenne (mm)	Max (P_M)(mm)	Min (P_m) (mm)	Nbre d'années > moy	P_M/P_m
Hennaya	379.88	499.50	226.40	11	2.21
Tlemcen	516.22	761.70	338.80	10	2.25
Lalla Setti	484.96	681.00	325.70	10	2.09
Bensekran	345.41	477.10	133.40	12	3.58
Mefrouch	547.13	840.20	342.40	10	2.45

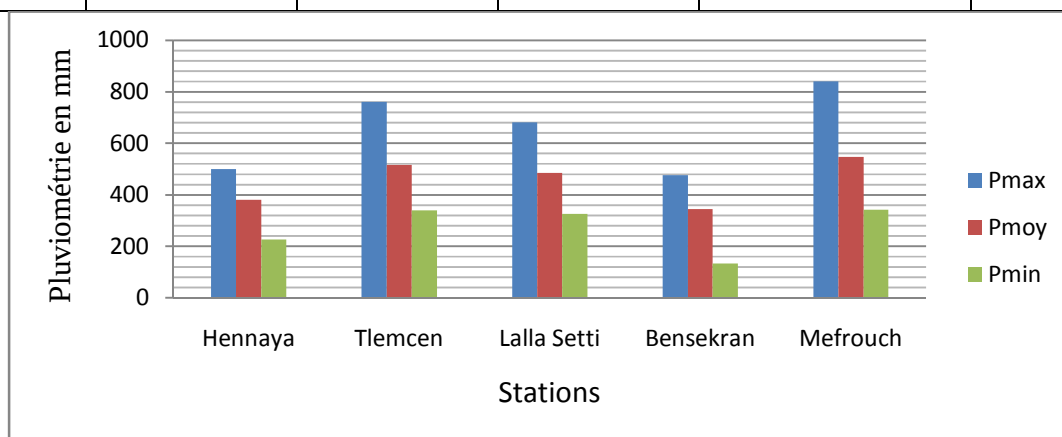


Figure III-6 : Précipitations moyennes annuelles aux stations pluviométriques du bassin de l'oued Sikkak

Les moyennes annuelles de la précipitation pour différentes stations du bassin de l'oued Sikkak comme le montre la figure ci-dessus (III-6) ne sont pas égaux. On a presque les mêmes valeurs pour la station de Tlemcen et Lalla Setti car elles sont proches. Les stations Hennaya et Bensekran ont enregistré des faibles valeurs de pluviométrie moyenne annuelle; elles se situent

dans des points plus bas. Par contre la station de Mefrouche qui située à une hauteur élevée, enregistre les plus grandes valeurs.

Le coefficient d'immodération (P_M/P_m) est petit. Ce qui indique à une régularité interannuelle de la pluviométrie.

Donc on peut dire que la répartition de la pluie dans notre bassin est plus ou moins homogène sauf station Bensekrane.

III.4. Variations spatio-temporelles des précipitations annuelles :

➤ Variations temporelles :

La pluviométrie annuelle a notablement changé au cours de la période d'étude (tableau III-4). Cette dernière traduit par des maximum hauteurs des pluies cas des années 84/85 aux stations : Tlemcen ; Bensekrane et 94/95 à les stations Lalla Setti et Mefrouche par contre le max a été enregistré entre 90/91 pour la station de Hennaya.

Tableau (III-4) Pluie Annuelles de sous bassins de l'oued Sikkak

Année	Hennaya	Tlemcen	Lalla Setti	Bensekrane	Mefrouche
1984-1985	411.2	761.7	544.3	477.1	677.9
1985-1986	433.2	532.8	666.1	399.0	727.5
1986-1987	226.4	417.0	347.5	237.4	353.0
1987-1988	384.6	727.9	499.8	281.6	463.1
1988-1989	331.2	478.0	458.9	356.7	522.2
1989-1990	438.9	614.0	574.0	432.3	731.2
1990-1991	499.5	638.5	590.9	346.9	661.5
1991-1992	322.0	442.0	410.3	335.1	444.8
1992-1993	297.0	374.7	386.5	311.4	450.2
1993-1994	426.6	505.8	475.6	362.3	520.4
1994-1995	498.4	660.2	681.0	429.8	840.2
1995-1996	394.6	394.1	385.7	297.6	437.9
1996-1997	464.7	528.2	536.3	446.9	560.2
1997-1998	352.2	474.5	451.3	288.8	488.5
1998-1999	255.1	338.8	325.7	265.9	342.4
1999-2000	339.1	465.1	442.7	419.8	556.9
2000-2001	474.4	577.6	514.3	391.1	581.9
2001-2002	391.3	546.9	521.7	399.2	639.9
2002-2003	471.7	637.3	656.6	380.1	693.5
2003-2004	330.6	376.6	345.9	307.3	395.6
2004-2005	333.7	461.3	411.1	299.3	467.6
2005-2006	280.9	403.8	442.9	133.4	480.5
Moyenne	379.88	516.22	484.96	345.41	547.13

L'analyse des paramètres statistique des quatre distributions a permis de remarquer que les coefficients de variation des séries pluviométriques sont faibles (tableau III-5).

Tableau (III-5): Paramètres statistique des pluies du bassin

Station	Moyenne (mm)	Max (mm)	Min (mm)	Ecart-type	Coefficient de variation
Hennaya	379.88	499.50	226.40	79.1	0.208
Tlemcen	516.22	761.70	338.80	118	0.229
Lalla Setti	484.96	681.00	325.70	104	0.215
Bensekran	345.41	477.10	133.40	80.1	0.232
Mefrouch	547.13	840.20	342.40	133	0.243
Moyenne	454.72	651.9	273.34	102.84	0.225

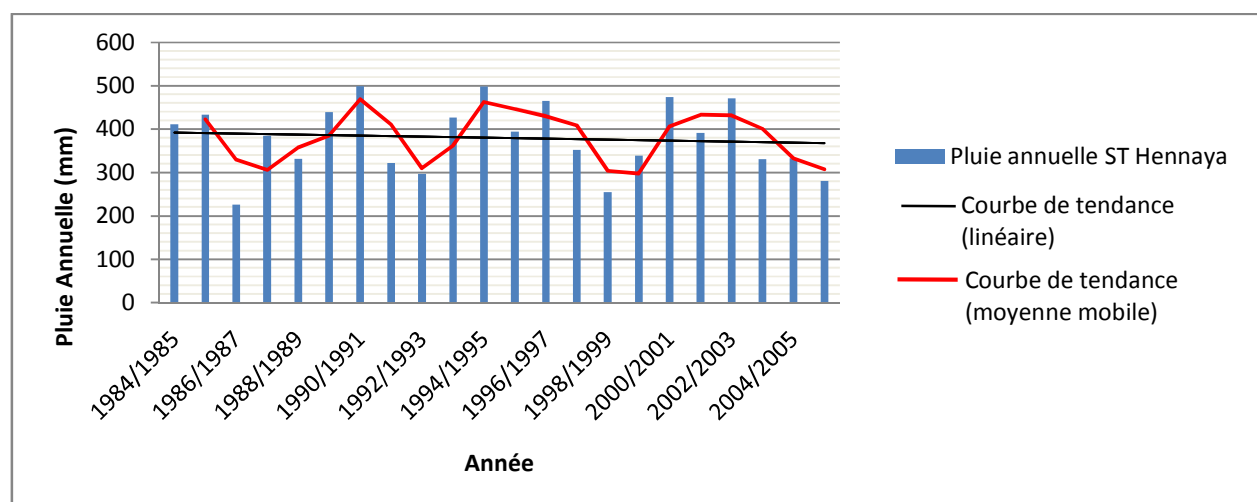


Figure III-7 : Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station de Hennaya

Commentaire :

On remarque que les précipitations annuelles varient d'une année à une autre et la courbe de tendance démunie avec le temps.

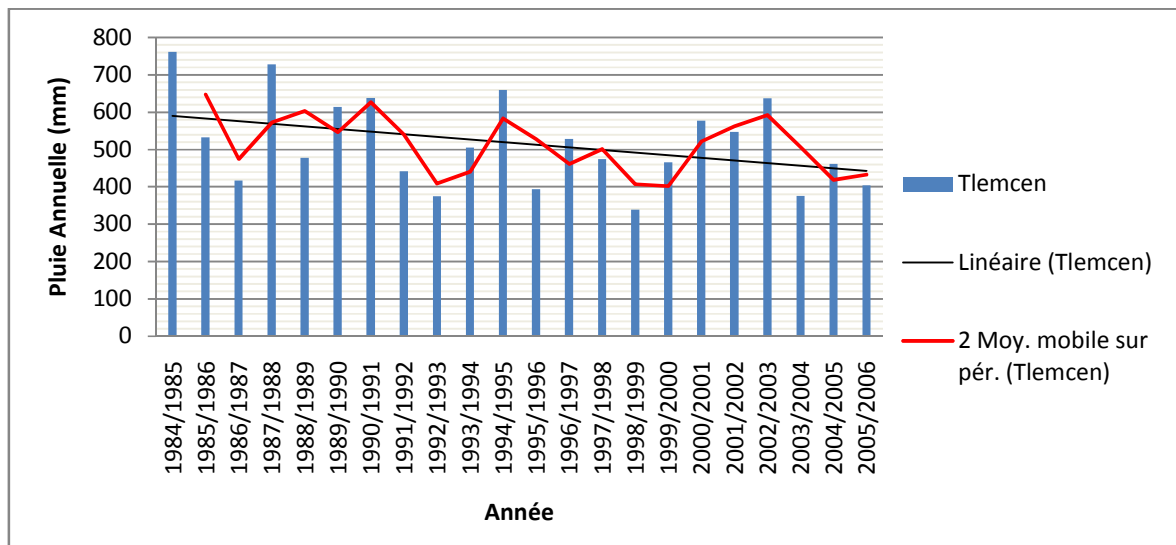


Figure III-8 : Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station de Tlemcen

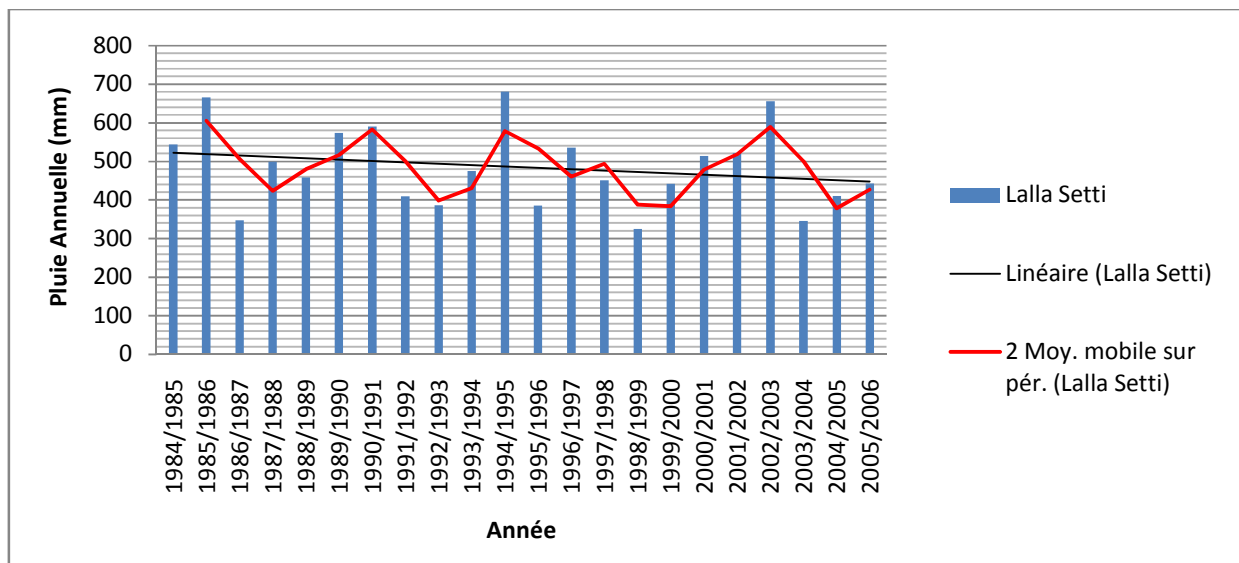


Figure III-9 : Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station de Lalla Setti

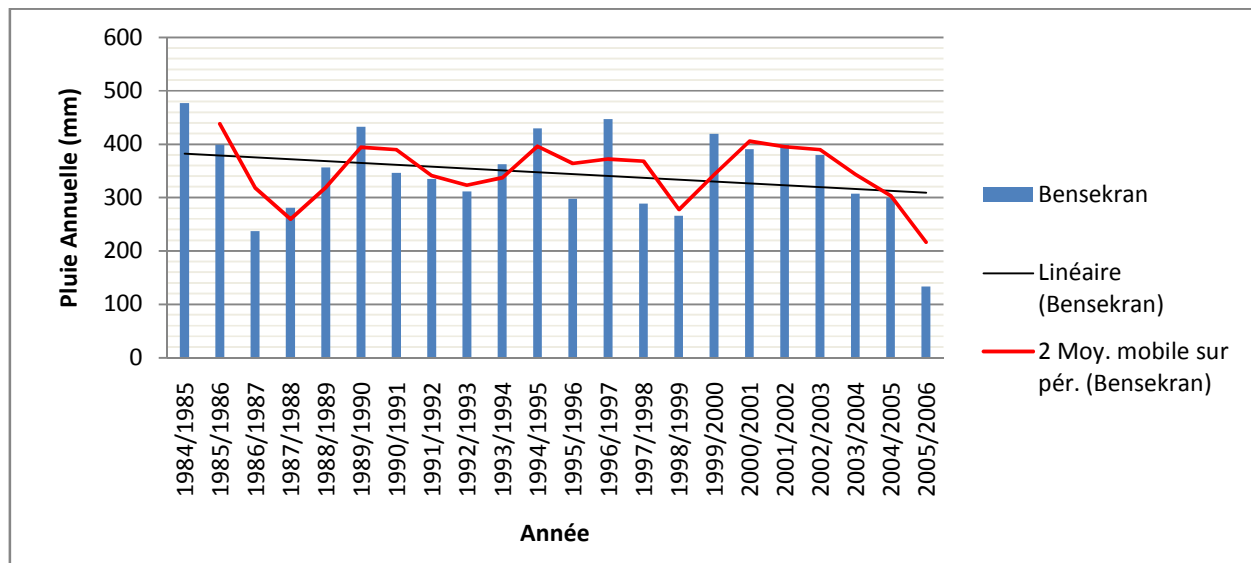


Figure III-10 : Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station de Bensekran

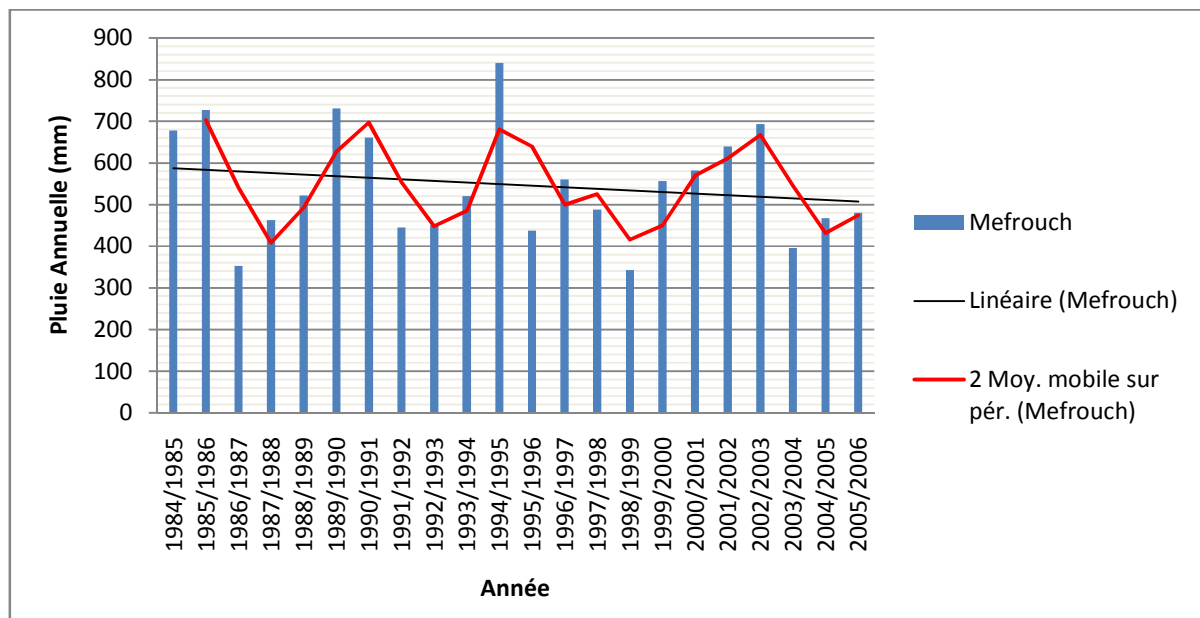


Figure III-11 : Variation interannuelle des précipitations annuelles de la station de Mefrouch

➤ Variations Spatiales :

La carte de la répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin de l'oued Sikkak (Figure III-12) représente un échantillon caractéristique de l'ouest algérien. En effet, la pluie diminue successivement lorsqu'on s'éloigne des chaînes montagneuses c'est le cas de la station de Bensekran située à une altitude de 260 m qui ne reçoit que 345.41 mm, tandis que la station de Mefrouch à une altitude de 1120 m est plus arrosée et reçoit 547.13 mm.

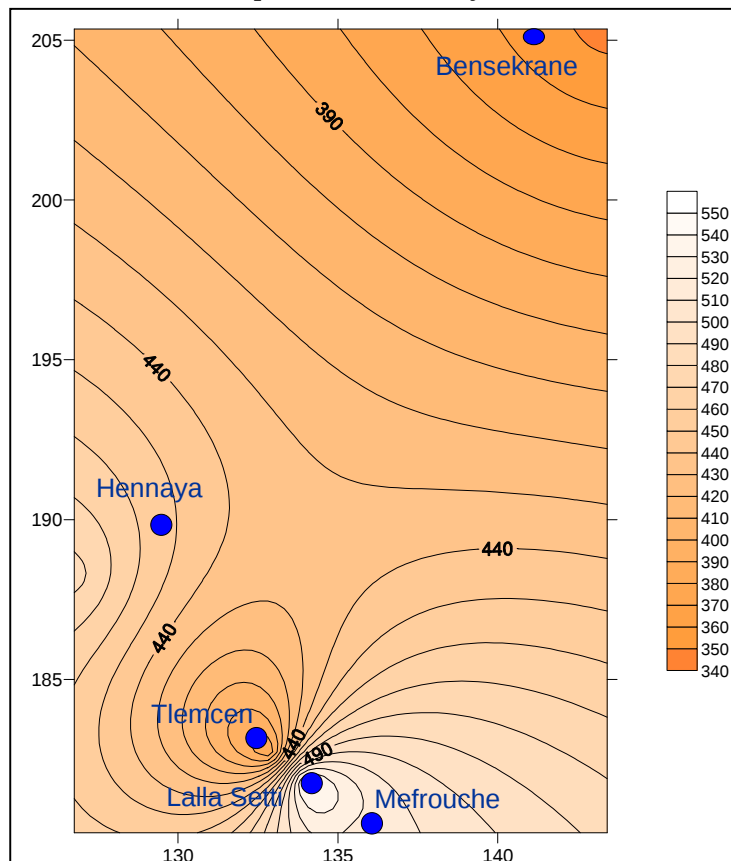


Figure III-12 : Carte en isohyète de Bassin Sikkak

Tableau (III-6): Variation de pluviométrie annuelle en fonction de l'altitude de stations de bassin Sikkak

Station	Pluie (mm)	Altitude (m)
Hennaya	379.88	510
Tlemcen	516.22	832
Lalla Setti	484.96	1020
Bensekran	345.41	260
Mefrouch	547.13	1120

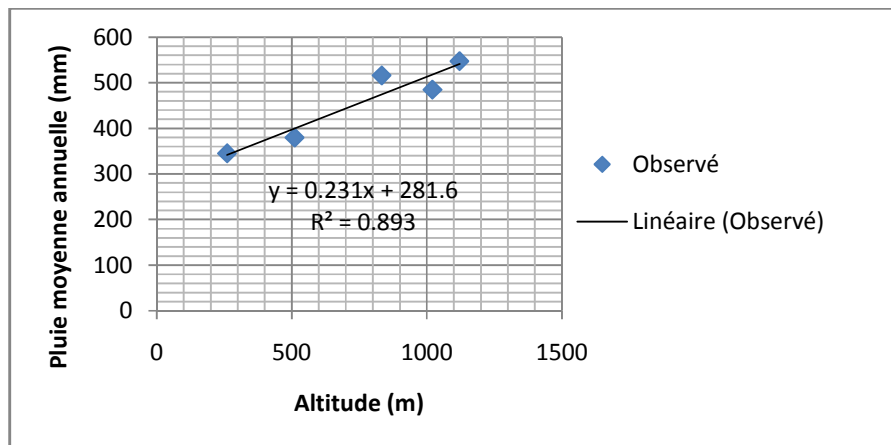


Figure III-13 : Corrélation linéaire des pluies annuelles en fonction des altitudes

III.5. Ajustement des précipitations annuelles à une loi de probabilité (LIAMAS José, 1993)

Avant de faire l'ajustement de cette irrégularité inter annuelle des précipitations qui a un rôle essentiel dans l'écoulement fluvial et, afin de caractériser le régime des précipitations annuelles, nous allons essayer de trouver une loi d'ajustement de la distribution des pluies annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement et calculer variables réduites.

L'ajustement graphique des séries pluviométriques des différentes stations de l'oued Sikkak pendant la période (1985/2006), les figures (III-14, III-15, III-16, III-17, III-18) montrent que la pluie s'ajuste en général suivant une loi normale de Gauss ou une loi log normale ou la loi de lognormale est plus juste dans notre cas. Par ailleurs nous avons calculé pour quelques stations situées dans nos bassins d'étude, les précipitations relatives à des récurrences données (Tableau III-7)

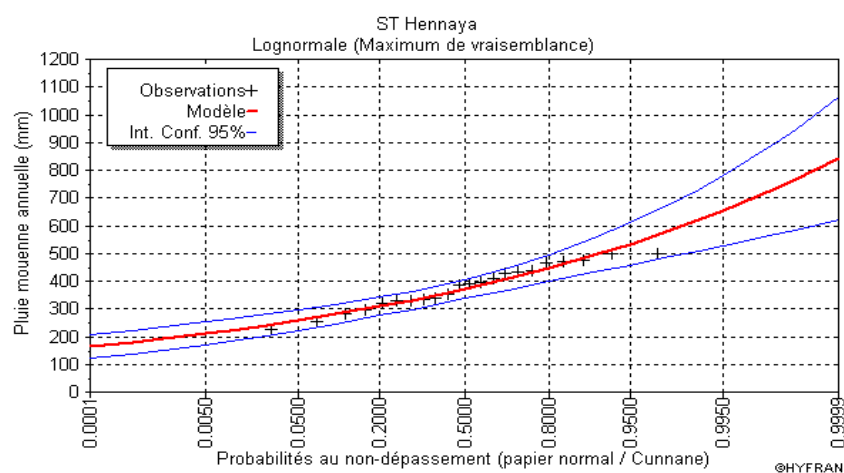


Figure III-14 : Ajustement de pluviométrie annuelle à la station de Hennaya (1985-2006)

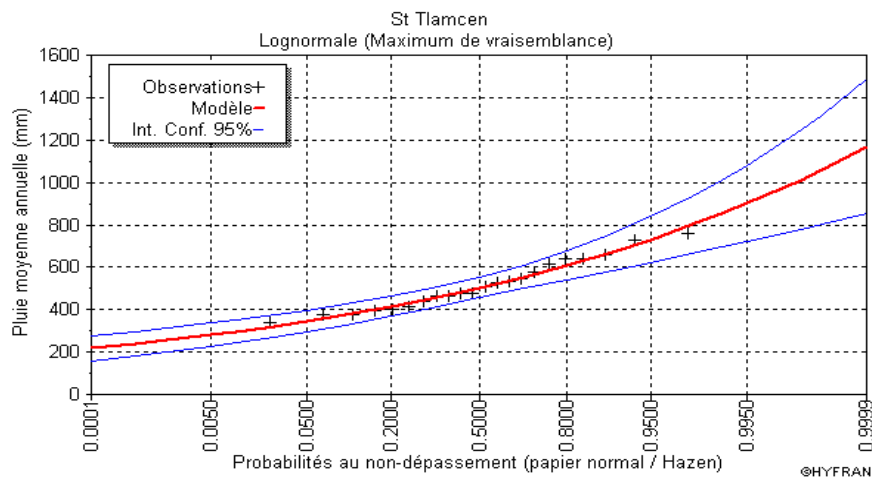


Figure III-15 : Ajustement de pluviométrie annuelle à la station de Tlemcen (1985-2006)

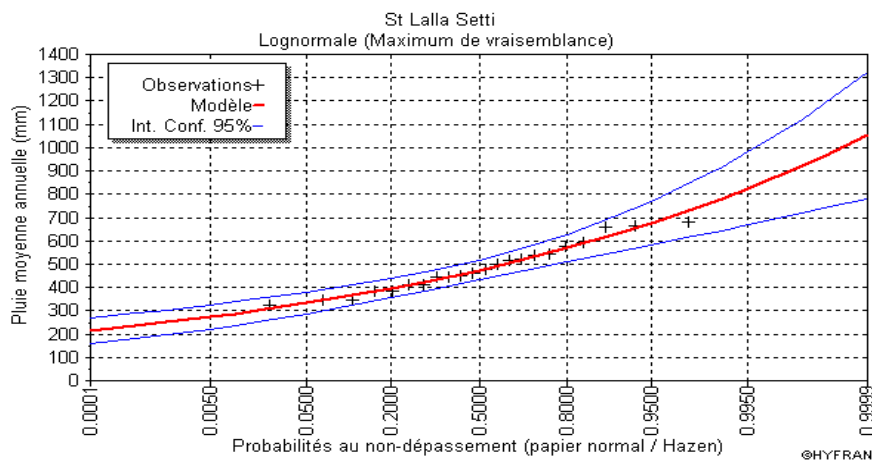


Figure III-16 : Ajustement de pluviométrie annuelle à la station de Lalla Setti (1985-2006)

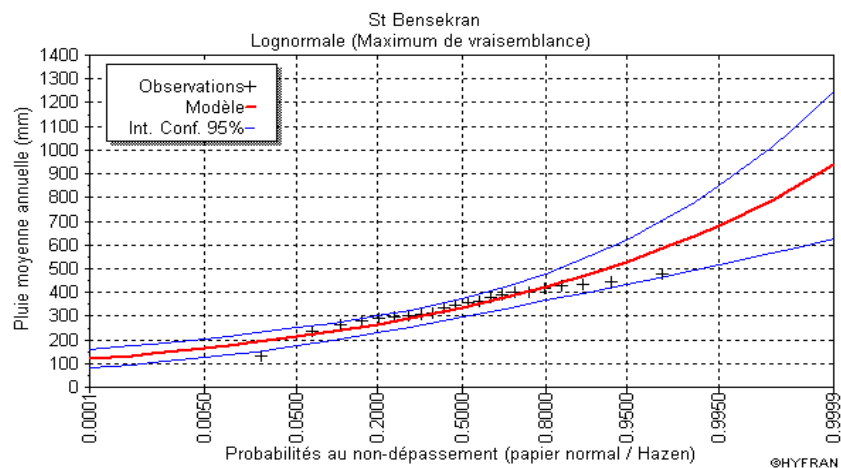


Figure III-1 : Ajustement de pluviométrie annuelle à la station de Bensekrane (1985-2006)

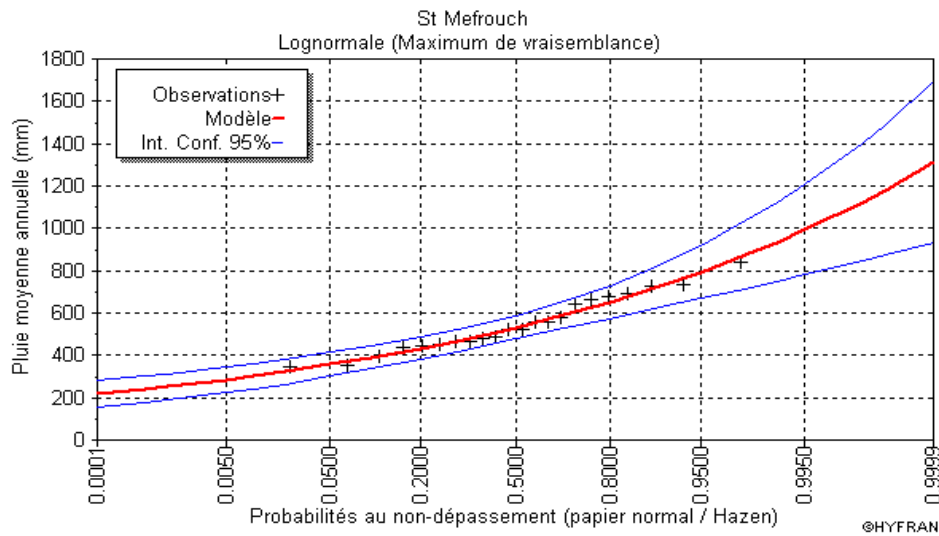


Figure III-18 : Ajustement de pluviométrie annuelle à la station de Mefrouche (1985-2006)

Tableau (III-7): Précipitations pour des périodes de récurrences dans quelques stations de Sikkak

Type de pluie Stations	Pluie moyenne (mm)	Pluie décennale (mm)	Pluie centennale (mm)	Pluie milléniale (mm)
Hennaya	380	429	620	733
Tlemcen	516	673	852	1010
Lalla Setti	485	625	781	921
Bensekrane	345	477	637	787
Mefrouche	547	726	937	1130

III.6. Précipitations mensuelles et les régimes saisonniers :

La variation mensuelle de pluviométrie influence sur le régime des cours d'eau, tels que l'érodabilité des sols et le transport des matériaux en suspension.

La répartition mensuelle et saisonnière des précipitations nous permet de définir les mois humides et secs dans l'année. À partir de cela nous pouvons déterminer la période qui soutient l'écoulement dans notre oued.

Les valeurs de la pluviométrie moyenne mensuelle relatives à la période 1985-2006, pour les différentes stations du bassin de l'oued Sikkak avec leurs paramètres statistiques tels que la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation sont résumées dans le tableau (III-8).

Tableau (III-8) : Les pluies moyennes mensuelles et leurs paramètres statistiques du bassin de l'oued Sikkak

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Hennaya												
Moyenne	20.0	26.0	48.4	41.4	51.7	50.5	56.7	39.9	34.8	4.63	2.10	3.58
Ecart type	17.5	17.4	34.4	28.2	41.0	36.8	56.6	36.7	34.5	6.60	5.45	6.69
Cv	0.872	0.669	0.711	0.680	0.793	0.728	0.998	0.920	0.990	1.43	2.59	1.87
Tlemcen												
Moyenne	19.9	38.8	62.1	55.2	68.7	74.4	83.2	58.0	56.7	13.1	4.31	5.56
Ecart type	14.1	26.5	44.9	38.5	54.8	67.9	75.9	47.1	50.8	20.9	10.4	9.13
Cv	0.710	0.683	0.722	0.697	0.797	0.912	0.912	0.813	0.896	1.59	2.41	1.64
Lalla Setti												
Moyenne	21.5	34.2	60.0	52.6	65.4	60.8	76.4	51.2	45.5	9.42	4.06	3.95
Ecart type	15.3	25.5	32.2	34.5	50.3	49.6	77.5	37.6	36.6	13.7	12.3	6.41
Cv	0.709	0.748	0.536	0.657	0.548	0.816	1.01	0.734	0.869	1.45	3.03	1.62
Bensekran												
Moyenne	20.7	19.7	49.3	41.2	55.8	55.0	43.1	30.6	26.4	2.52	2.58	3.52
Ecart type	24.1	19.1	32.4	26.8	45.0	49.2	44.3	22.0	27.3	3.42	6.85	6.02
Cv	1.16	0.969	0.657	0.650	0.807	0.894	1.03	0.721	1.04	1.36	2.66	1.71
Mefrouch												
Moyenne	19.2	35.4	66.6	58.4	82.1	70.3	89.5	55.9	51.0	9.22	4.69	4.87
Ecart type	13.8	27.9	43.6	38.8	65.2	60.6	95.9	40.6	47.3	13.8	13.2	7.89
Cv	0.719	0.788	0.654	0.665	0.794	0.862	1.07	0.727	0.929	1.50	2.81	1.62

Pour la représentation graphique des précipitations moyennes mensuelles (figure III-19), nous constatons que l'année hydrologique dans notre bassin se divise en trois périodes pluviométriques :

1. une période sèche qui correspond au mois (juin, juillet et août) ;
2. une période relativement sèche qui correspond au mois (Septembre, Octobre) ;
3. une période humide qui correspond au mois (Novembre jusqu'à Mai).

D'autre part, les mois les plus pluvieux, sont Janvier ; février et Mars, et les mois les plus secs sont représentés par Juillet et Aout.

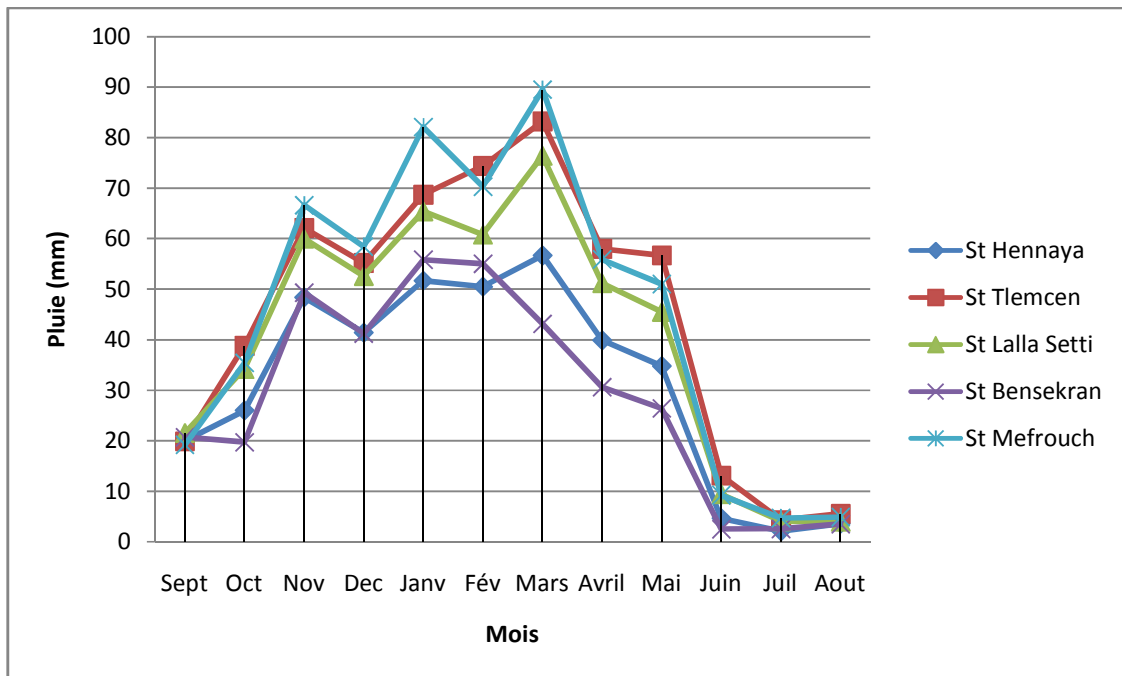


Figure III-19: Variations mensuelles de la pluviométrie dans le bassin de l'oued Sikkak

Pour mieux comprendre la variation de la pluviométrie mensuelle, nous avons établi des diagrammes représentant le coefficient de variation mensuel (tableau III-8). Ce dernier traduit clairement la variation mensuelle et saisonnière de la distribution de pluie durant l'année hydrologique.

La forte variabilité inter mensuelle des précipitations, apparaît à travers les valeurs élevées des coefficients de variation mensuelle (figure III-20). Les plus fortes valeurs concernent les mois d'été où il est compris entre 1 et 3,3. Une variabilité aussi marquée en été s'explique par une pauvreté pluviométrique des mois secs d'été qui sont parfois parsemées par de vifs orages pouvant être assez importants par leurs actions érosives violentes.

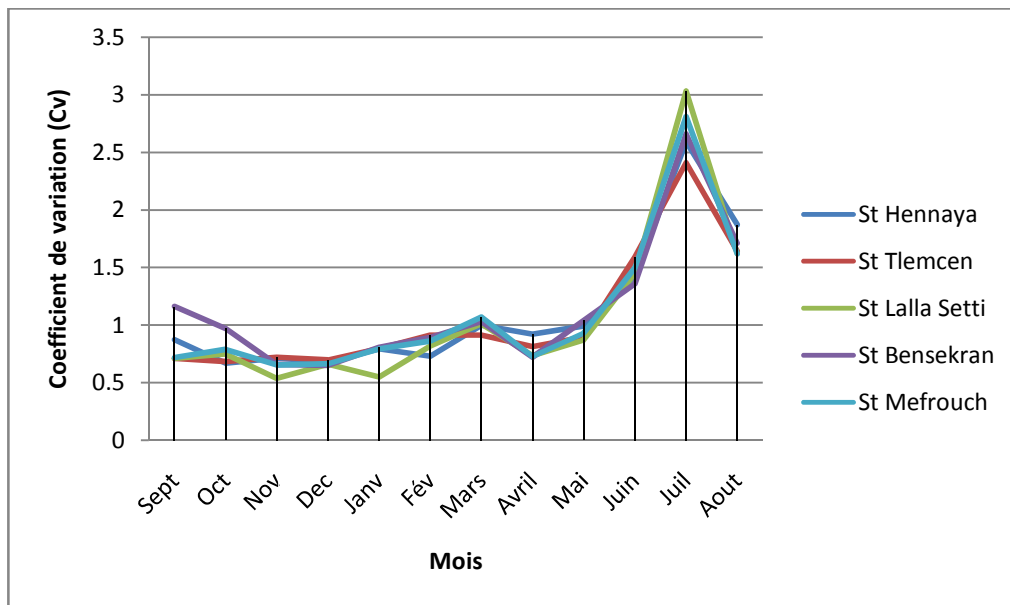


Figure III-20: Variation mensuelle de coefficient de variation

A partir de la figure (III-21) nous observons dans l'ensemble du bassin, les saisons les plus pluvieuses sont l'hiver et le printemps et la saison la plus sèche est l'été.

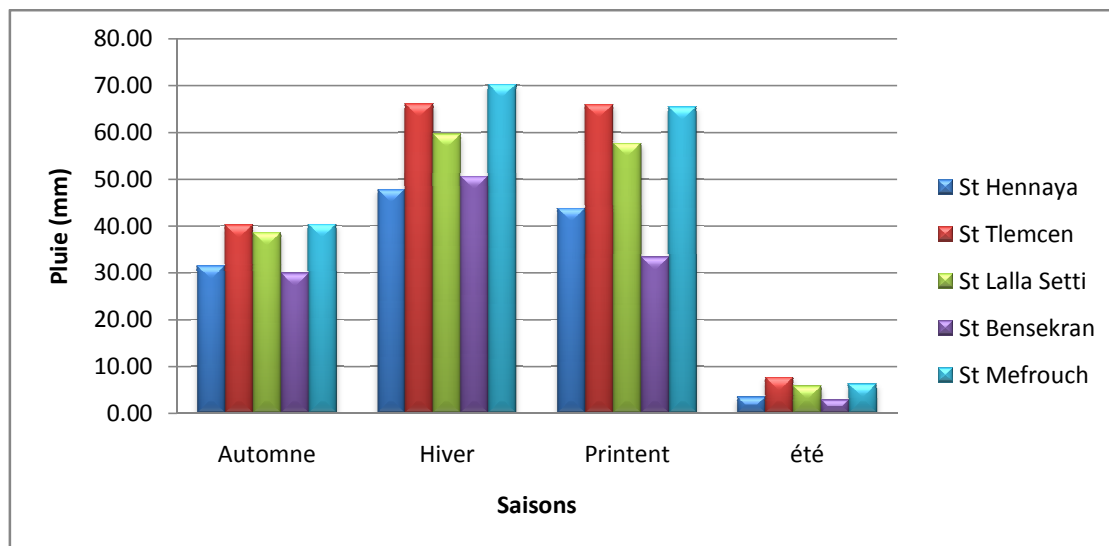


Figure III-21: Variation saisonnière des précipitations dans le bassin de l'oued Sikkak

III.7 Modélisation des précipitations :

III.7.1 Méthodes basées sur les coefficients de pondération :

III.7.1.1 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 :

$$P_{moy} = \frac{\sum_i (w_i \sum_T P_i(t))}{\sum_i w_i} \dots\dots\dots (III.1)$$

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).

$$w_i = \frac{1}{N} \dots\dots\dots (III.2)$$

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.22.a). Le coefficient de pondération est calculé par la formule suivante :

$$w_i = \frac{a_{ij}}{A_i} \dots\dots\dots (III.3)$$

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.22.b) Les coefficients de pondération peuvent être calculés de la manière suivante :

$$w_i = \frac{b_{ij}}{A_i} \dots\dots\dots (III.4)$$

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 :

$$P_{moy} = \sum_{j=1}^K w_j P_j \dots\dots\dots (III.5)$$

Avec ;

$$P_j = \frac{h_j + h_{j+1}}{2} \dots\dots\dots (III.6)$$

Avec,

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

K : nombre total d'isohyètes.

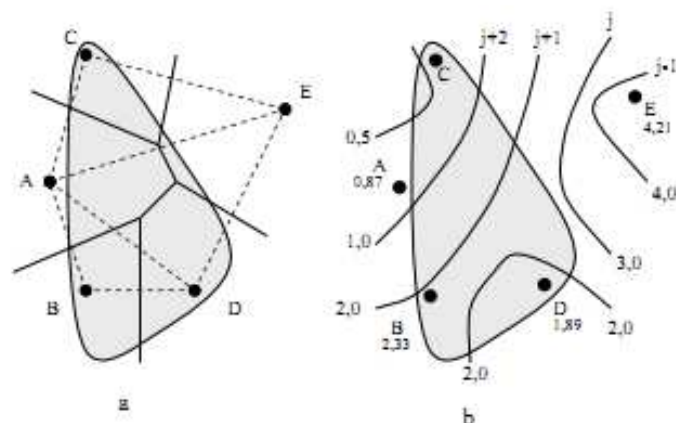
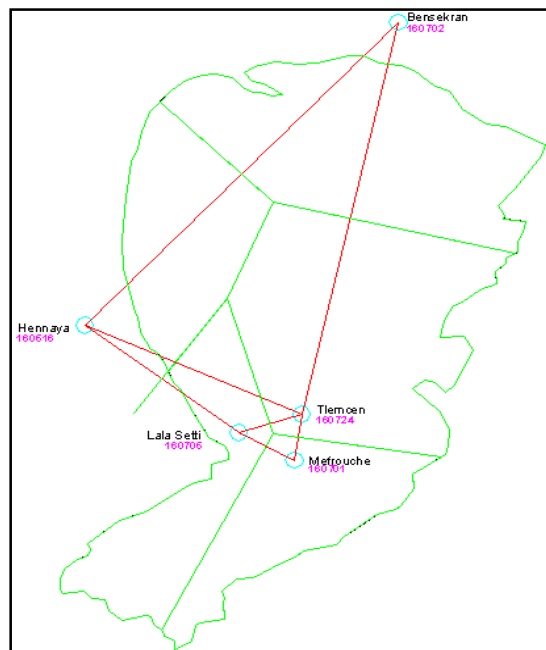


Figure (III-22) : Illustration de la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes.

Tableau (III-9): Résultats de la méthode des polygones de Thiessen.

Station	Code	Surface (km ²)	Pluviométrie	S×P
Bensekran	160702	128.34	345.41	44329.5932
Hennaya	160516	68.67	379.88	26087.1735
Mefrouche	160701	61.63	547.13	33721.0372
Lala Setti	160705	67.32	484.96	32647.1211
Tlemcen	160724	136.43	516.22	70428.7664

Arithmétique	P _{moy}	454.72
Tiessen	P _{moy}	448.13

**Figure (III-23) : Illustration de la méthode des polygones de Thiessen de bassin de l'oued Sikkak**

III.8. Les précipitations extrêmes et les averses facteur générateur des crues :

Les pluies maximales journalières sont souvent génératrices de crues exceptionnelles. Pour cela, il est important d'effectuer un ajustement statistique d'une loi de probabilité à la série d'observation afin de déterminer les précipitations maximales journalières fréquentielles.

Pour dégager une idée générale sur l'importance des pluies extrêmes, nous nous basons sur des données d'observations disponibles pour trois (03) stations.

➤ Ajustement des pluies maximales journalières

L'ajustement a été effectué à l'aide du logiciel "HYFRAN".

Parmi aux cinq lois ou modèles statistiques les plus utilisés on a effectué l'ajustement de la série des pluies maximales journalières à la loi de Gumbel (doublement exponentielle), Galton (log normale) et Pearson type III à l'aide de logiciel Hyfran, avec une comparaison des graphes des droites de régression obtenues par les ajustements (figure (III-24), (III-25) (III-26)).

Le tableau (III-10) donne les différentes caractéristiques statistiques de l'échantillon pour les différentes stations considérées et pour l'ensemble des stations représentant le secteur d'étude.

Tableau (III-10): Les paramètres statistiques des pluies maximales journalières

Statistiques de base	<i>St Mefrouche</i> (1995-2005)	<i>St Tlemcen</i> (1995-2009)	<i>St Lalla Setti</i> (1970-2009)
Nombre de données	11	15	40
Minimum	26.1	24.8	25
Maximum	73.8	93.3	157
Moyenne	48.2	44.8	53
Ecart-type	18.1	18.2	24
Médiane	43.1	42.8	49.4
Coeff. de variation (Cv)	0.376	0.406	0.453
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.108	1.46	2.16
Coeff. d'aplatissement (Ck)	1.23	3.89	9.34

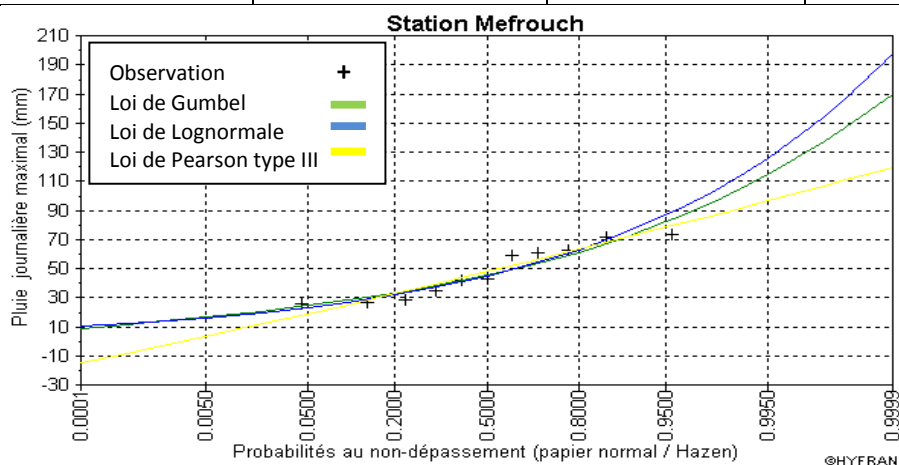


Figure III-24 : Ajustement comparatif des trois lois de la station de Mefrouche

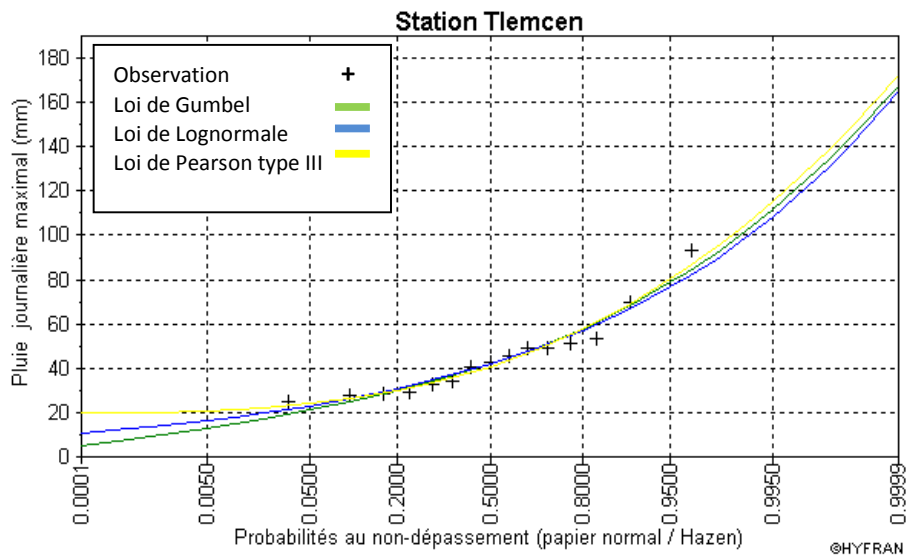


Figure III-25: Ajustement comparatif des trois lois de la station de Tlemcen

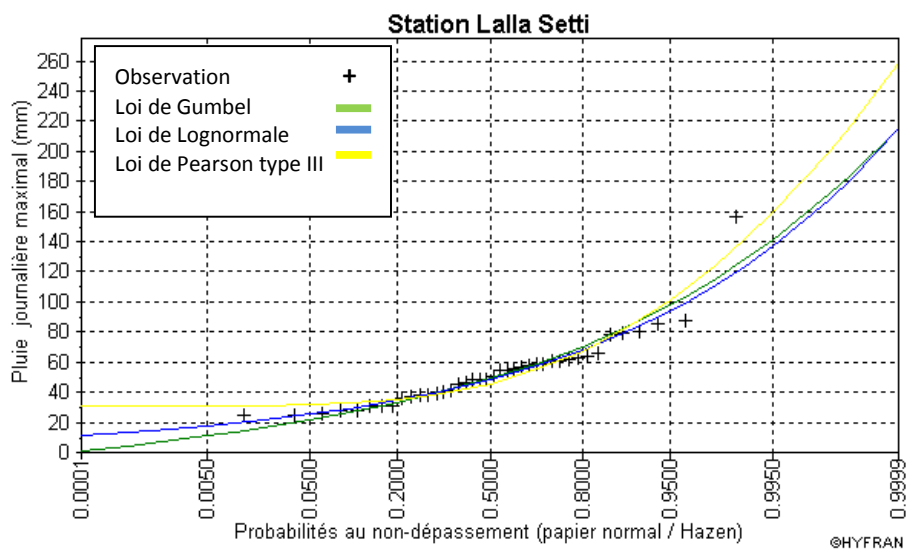


Figure III-26 : Ajustement comparatif des trois lois de la station de Lalla Setti

D'après les graphes d'ajustement pour les stations (Station de Mefrouche, station Tlemcen et station de Lalla Setti) Figures (III.24), (III.25), (III.26) on a remarqué que le modèle de Gumbel montre une adéquation plus nette.

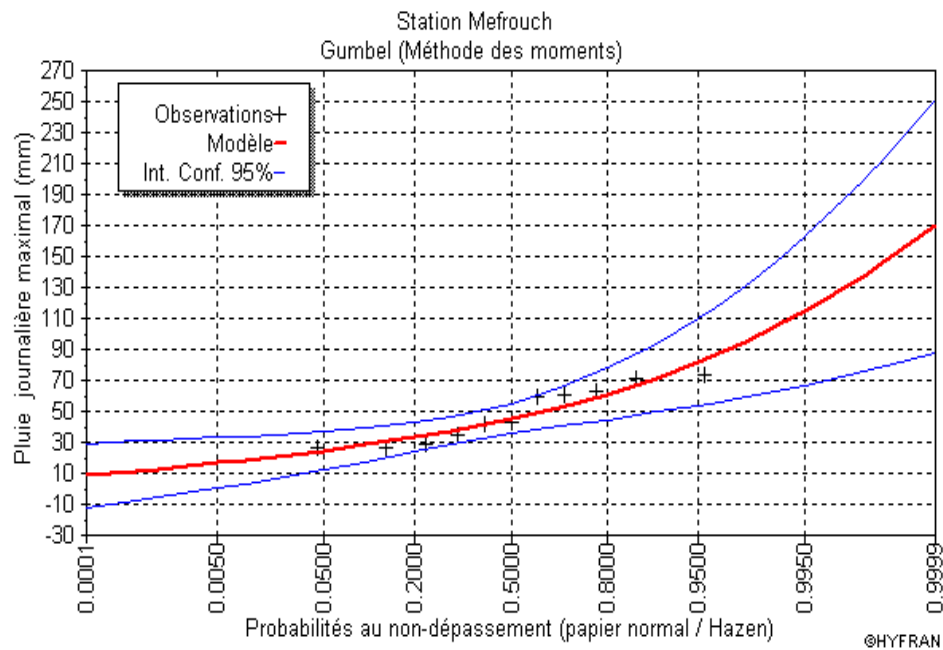


Figure III-27: Ajustement à la loi de Gumbel de la station de Mefrouche

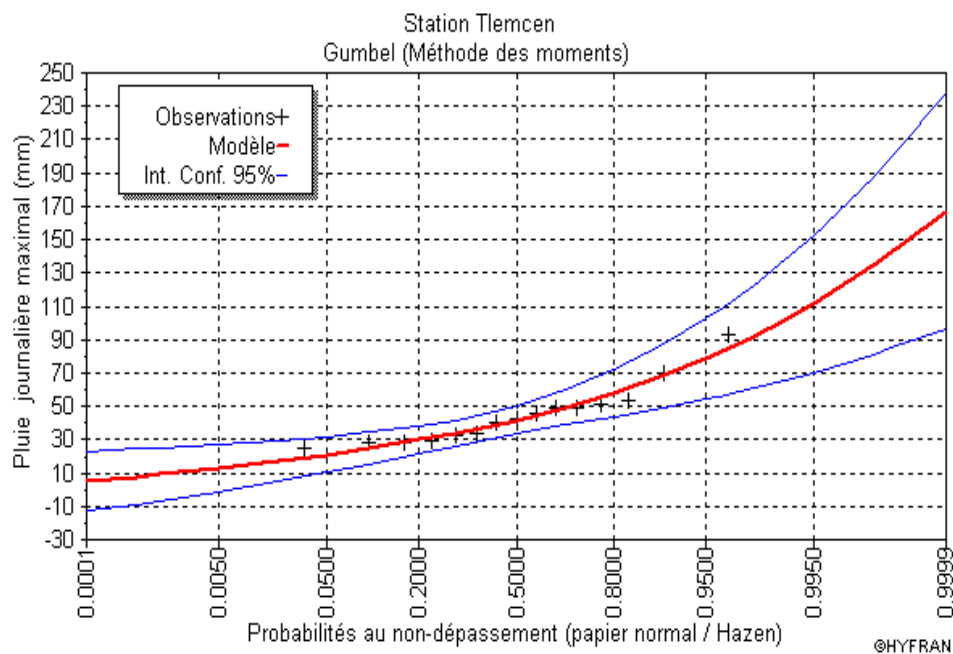


Figure III-28 : Ajustement à la loi de Gumbel de la station de Tlemcen

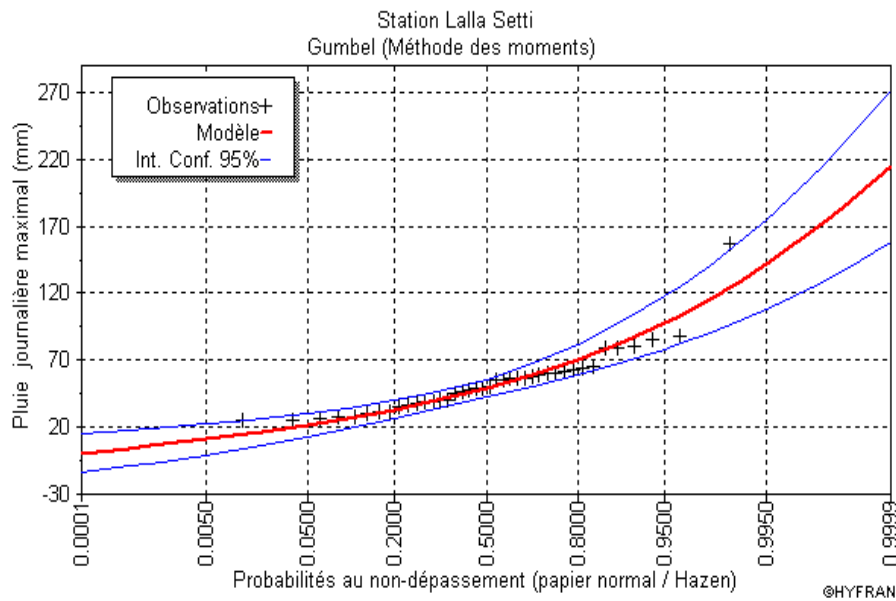


Figure III-29 : Ajustement à la loi de Gumbel de la station de Lalla Setti

Les résultats de l'ajustement de la pluie journalière maximale sont regroupés dans les tableaux (III-11), (III-12), (III-13).

Tableau III-11 : Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station de Mefrouche

Année	10	20	25	50	100
Fréquence	0.9	0.95	0.96	0.98	0.99
Pmax	71.8	81.9	85.1	95.1	105
Ecart-type	11.4	14.4	15.4	18.4	21.4
Int.Conf.	49.4-94.1	53.7-110	55-115	59-131	62.9-147

Tableau III-12: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station de Tlemcen

Année	10	20	25	50	100
Fréquence	0.9	0.95	0.96	0.98	0.99
Pmax	68.5	78.7	81.9	91.9	102
Ecart-type	9.79	12.4	13.2	15.8	18.4
Int.Conf.	49.3-87.7	54.4-103	56-108	60.9-123	65.7-138

Tableau III-13: Caractéristiques de la pluie journalière maximale à la station de Lalla Setti

Année	10	20	25	50	100
Fréquence	0.9	0.95	0.96	0.98	0.99
Pmax	84.4	97.9	102	115	128
Ecart-type	7.93	10	10.7	12.8	14.9
Int.Conf.	68.8-99.9	78.2-118	81.2-123	90.2-140	99.2-158

III.9. Les pluies de courte durée :

La pluie de courte durée est utilisée pour l'estimation des crues. Le calcul des pluies de courtes durées pour différentes fréquences à été effectuée à l'aide de la relation de Body exprimée par:

$$P_t = P_{j_{max}\%} \left(\frac{t}{24} \right)^b \dots\dots\dots (III-1)$$

P_t : pluies de courte durée de fréquence donnée en (mm)

$P_{j_{max}\%}$: Pluies journalière de fréquence donnée en (mm)

t: temps en heure.

b: exposant climatique calculé par la formule (III.2)

Les résultats sont donnés au tableau (III-14).

$$b = 1 + \frac{\ln\left(\frac{\overline{P_{j_{max}}}}{24}\right) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0.5)} \dots\dots\dots (III-2)$$

L'intensité de pluies est donnée par la formule suivante:

$$I_t = \frac{P_t}{t} \dots\dots\dots (III-3)$$

$\overline{P_{j_{max}}}$: Pluie journalière maximal (moyenne).

Tableau III-14: Valeurs de l'exposant climatique pour les trois stations pluviométriques de l'oued Sikkak

Station	$\overline{P_{j_{max}}}$ (mm)	Exposant climatique
Mefrouche	43.1	0.32
Tlemcen	42.8	0.32
Lalla Setti	49.4	0.35
Bassin (moyenne)	45.1	0.33

L'intensité et la pluie de courte durée correspondante à un pas de temps variable, sont représentées pour les trois stations et de différentes fréquences, dans le tableau (III-15) :

Tableau (III-15): Hauteur intensité durée fréquence de différentes stations

Station	t(h)	10		20		50		100	
		Pt (mm)	It (mm/h)	Pt (mm)	It (mm/h)	Pt (mm)	It (mm/h)	Pt (mm)	It (mm/h)
Mefrouch	0.25	16.68	66.74	19.03	76.12	22.10	88.39	24.40	97.60
	1	25.99	25.99	29.65	29.65	34.42	34.42	38.01	38.01
	2	32.44	16.22	37.00	18.50	42.97	21.48	47.44	23.72
	3	36.93	12.31	42.12	14.04	48.91	16.30	54.00	18.00
	5.77	45.52	7.89	51.92	9.00	60.29	10.45	66.57	11.54
	6	46.09	7.68	52.57	8.76	61.05	10.17	67.40	11.23
	8	50.53	6.32	57.64	7.21	66.93	8.37	73.90	9.24
	9.19	52.82	5.75	60.25	6.56	69.96	7.61	77.25	8.41
	10	54.27	5.43	61.90	6.19	71.88	7.19	79.36	7.94
	12	57.53	4.79	65.62	5.47	76.20	6.35	84.13	7.01
	16	63.07	3.94	71.94	4.50	83.54	5.22	92.23	5.76
	20	67.73	3.39	77.26	3.86	89.71	4.49	99.05	4.95
	22	69.83	3.17	79.65	3.62	92.49	4.20	102.12	4.64
	24	71.80	2.99	81.90	3.41	95.10	3.96	105.00	4.38
Tlemcen	0.25	16.05	64.20	18.44	73.76	21.53	86.13	23.90	95.59
	1	24.94	24.94	28.65	28.65	33.46	33.46	37.13	37.13
	2	31.09	15.54	35.72	17.86	41.71	20.85	46.29	23.14
	3	35.36	11.79	40.63	13.54	47.44	15.81	52.66	17.55
	5.77	43.54	7.55	50.02	8.67	58.41	10.12	64.83	11.24
	6	44.08	7.35	50.65	8.44	59.14	9.86	65.64	10.94
	8	48.31	6.04	55.50	6.94	64.81	8.10	71.93	8.99
	9.19	50.48	5.49	58.00	6.31	67.73	7.37	75.17	8.18
	10	51.86	5.19	59.58	5.96	69.57	6.96	77.22	7.72
	12	54.95	4.58	63.13	5.26	73.72	6.14	81.83	6.82
	16	60.21	3.76	69.18	4.32	80.78	5.05	89.66	5.60
	20	64.64	3.23	74.27	3.71	86.72	4.34	96.26	4.81
	22	66.63	3.03	76.55	3.48	89.39	4.06	99.22	4.51
	24	68.50	2.85	78.70	3.28	91.90	3.83	102.00	4.25
Lalla Setti	0.25	16.698	66.792	19.369	77.475	22.752	91.008	25.324	101.296
	1	27.314	27.314	31.683	31.683	37.217	37.217	41.424	41.424
	2	34.934	17.467	40.522	20.261	47.600	23.800	52.980	26.490
	3	40.342	13.447	46.795	15.598	54.968	18.323	61.182	20.394
	5.77	50.885	8.819	59.025	10.230	69.334	12.016	77.172	13.375
	6	51.596	8.599	59.849	9.975	70.303	11.717	78.251	13.042
	8	57.144	7.143	66.284	8.286	77.862	9.733	86.664	10.833
	9.19	60.028	6.532	69.629	7.577	81.791	8.900	91.037	9.906
	10	61.855	6.185	71.749	7.175	84.281	8.428	93.808	9.381
	12	65.990	5.499	76.546	6.379	89.916	7.493	100.080	8.340
	16	73.086	4.568	84.776	5.298	99.584	6.224	110.841	6.928
	20	79.111	3.956	91.764	4.588	107.793	5.390	119.978	5.999
	22	81.833	3.720	94.922	4.315	111.502	5.068	124.107	5.641
	24	84.4	3.517	97.9	4.079	115.0	4.792	128.0	5.333

Les graphes représentant les courbes des pluies à courte durée et les courbes Intensité-Durée-Fréquence pour les trois stations et à différentes fréquences sont données dans les figures (III- 30, 31, 32,33, 34 et 35).

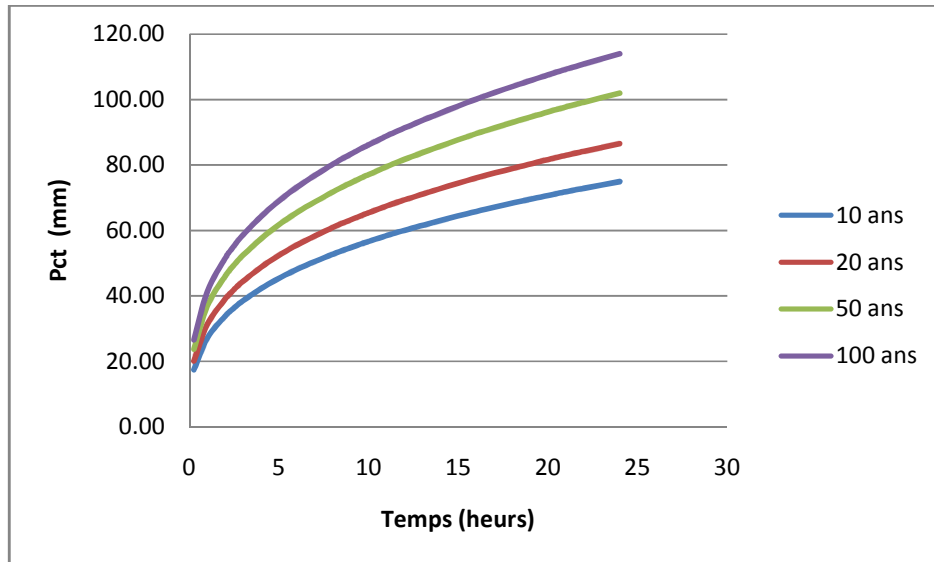


Figure III-30 : Courbe des pluies à courte durée à Mefrouche

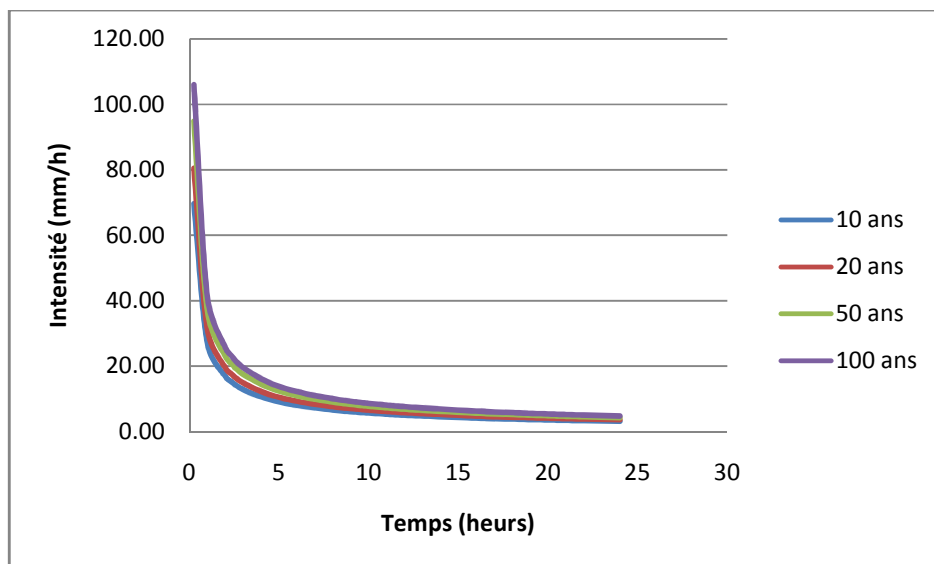


Figure III-31 : Courbe Intensité-Durée-Fréquence à Mefrouche

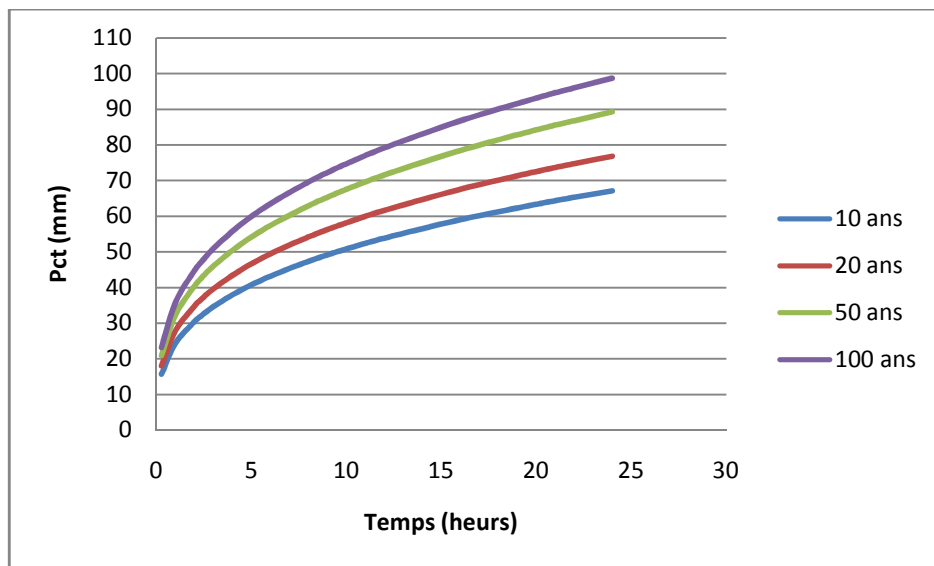


Figure III-32 : Courbe des pluies à courte durée à Tlemcen

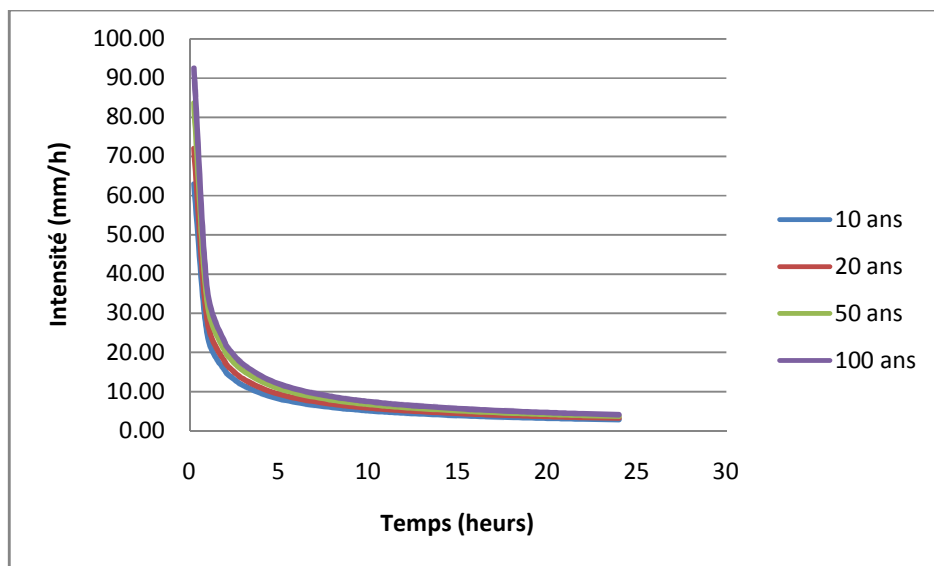


Figure III-33 : Courbe Intensité-Durée-Fréquence à Tlemcen

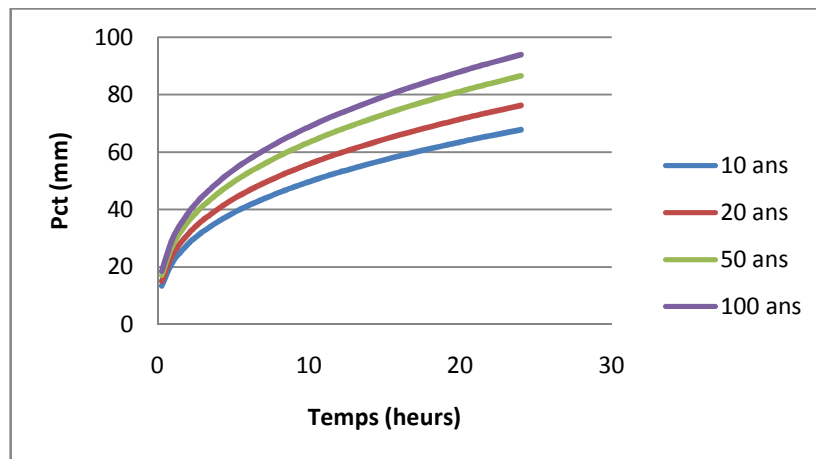


Figure III-34 : Courbe des pluies à courte durée à Lalla Setti

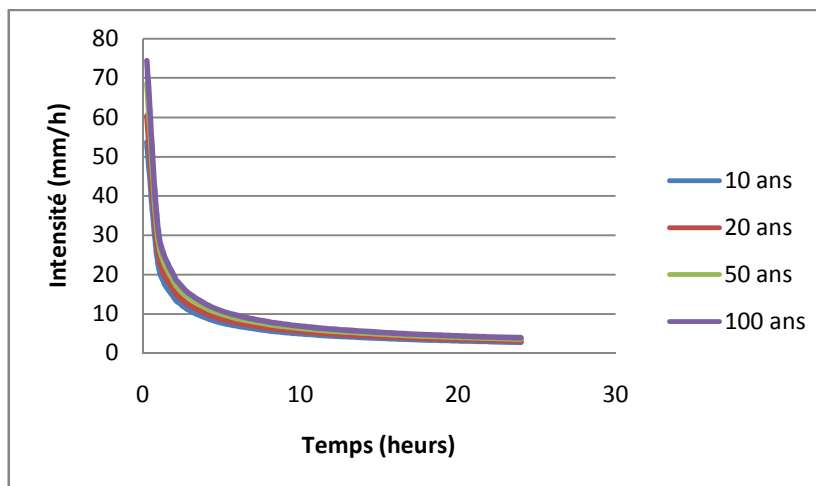


Figure III-35 : Courbe Intensité-Durée-Fréquence à Lalla Setti

Parmi les trois lois de l'ajustement, la droite de Gumbel donne, dans notre cas, la meilleure loi d'ajustement des précipitations maximales journalières.

A la station de Mefrouche, la pluie maximale journalière (figure III-30) correspondante au temps de concentration 9.19 h et pour une période de récurrence de 100 ans, est de 77.25 mm, et l'intensité maximale (figure III-31) est de (8.41 mm/h).

A la station de Tlemcen, la pluie maximale journalière (figure III-32) correspondante au temps de concentration 9.19 h et pour une période de récurrence de 100 ans, est de 75.17 mm, et l'intensité maximale (figure III-33) est de (8.18 mm/h).

A la station de Lalla Setti, la pluie maximale journalière (figure III-34) correspondante au temps de concentration 9.19 h et pour une période de récurrence de 100 ans, est de 91.04 mm, et l'intensité maximale (figure III-35) est de (9.91 mm/h).

CHAPITRE IV

Etude des apports et de crue

IV.1. Introduction :

Le bassin versant de l'oued Sikkak se caractérise aussi par une pluviosité assez irrégulière, tombant sous forme d'averses générant ainsi d'importantes crues.

Les orages sont fréquents généralement de septembre à octobre et accompagnés de pluies torrentielles. Ce qui nous mène à parler des inondations ravageuses de l'oued Sikkak qui a été l'objet d'une crue régulière généralement au mois d'octobre (exemple crue 2008).

IV.2 Etudes des apports :**IV.2.1 Estimation de l'apport moyen annuel (A_0) :**

La détermination de ces apports est orientée de préférence aux observations hydrométriques, quand elles existent sur le bassin versant propre du site étudié ou par analogie avec un bassin voisin. A défaut de ces dernières, des modèles et des formules empiriques basés sur la pluviométrie devront être appliqués, ces modèles dépendent de la précipitation et du déficit.

$$Q = f(P-D) \dots \dots \dots (IV.1)$$

Avec :

Q : débit annuel d'écoulement (apport);

P : précipitation moyenne annuelle;

D : déficit qui englobe toutes les pertes du bilan hydrologique.

Puisque les données hydrométriques ne sont pas disponibles au niveau de notre talweg principal, les apports seront estimés à l'aide des formules empiriques.

IV.2.1.1 Formule de DERI I :

On a:

$$A_0 = 0.915 \cdot P_{\text{moy}}^{2.684} \cdot S^{0.842} \dots \dots \dots (IV.2)$$

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (mm);

S : Superficie du bassin versant (Km^2).

$$Le = \frac{A_0}{S} \dots \dots \dots (IV.3)$$

Le : lame d'eau écoulée (mm);

A_0 : apport moyen en (m^3);

IV.2.1.2 Formule de TURC :

$$Le = P_{moy} - D \quad \dots\dots\dots (IV.5)$$

$$D = \left[\frac{P_{moy}}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P_{moy}}{L} \right)^2}} \right] \quad \dots\dots\dots (IV.6)$$

Avec :

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (mm);

D : Déficit de l'écoulement (mm);

L : Variable théorique; $L = 300 + 25 T_{moy} + 0.05 (T_{moy})^3 \dots\dots\dots (IV.7)$

T_{moy} : Température moyenne annuelle.

IV.2.1.3 Formule de SAMIE :

$$Le = P^2 (293 - 2.2\sqrt{S}) \quad \dots\dots\dots (IV.8)$$

$$A_0 = Le. S$$

IV.2.1.4 Formule de CHAUMONT :

$$Le = (1 - 10^{-kP^2}) P \quad \text{avec} \quad k = 0.18 - 0.01 \log S \quad \dots\dots\dots (IV.9)$$

Avec :

Le : lame d'eau écoulée (mm);

A_0 : apport moyen en (m³);

S : surface en (km²);

P : précipitation moyenne en (m).

IV.2.1.5 Formule d'ANRH:

$$\text{On a:} \quad A_0 = 0.513. P^{2.603}. D_d^{0.5}. S^{0.842} \quad \dots\dots\dots (IV.10)$$

P : Pluie moyenne annuelle (mm) ;

S : Superficie du bassin versant (Km²) ;

D_d : Densité de drainage (Km/Km²).

IV.2.1.6 Formule de DERI II :

L'apport est donnée par la relation suivante :

$$A_0 = K \cdot M_0 \cdot S \quad \dots\dots\dots (IV.11)$$

Avec :

$$M_0 = 11,8 \cdot P^{2,82}$$

$$K = 31,56$$

P : la précipitation moyenne annuelle en (m) ;

S : surface du bassin versant en (Km²).

IV.2.2 Module de l'écoulement :

L'écoulement se caractérise par des modules et coefficients

Le module de l'écoulement est donné par cette formule:

$$Me = A_0 / T \quad \dots\dots\dots (IV.12)$$

A₀ : Apport moyen annuel (mm) ;

T : Temps d'une année en secondes ; T = 31.536.107 s

IV.2.3 Module de l'écoulement relatif :

$$\text{On a : } q = Me / S \quad \dots\dots\dots (IV.13)$$

Me: Module de l'écoulement (l/s) ;

S : Superficie du bassin (Km²).

IV.2.4 Coefficient de l'écoulement :

$$\text{Il est donné par : } Ce = Le / P_{moy} \quad \dots\dots\dots (IV.14)$$

IV.2.5 Coefficient de variation :

Pour le calcul du coefficient de variation Cv, et en absence d'une série d'observation, on doit utiliser les formules empiriques.

IV.2.5.1 Formule de SOKOLOVSKY :

$$Cv = 0.78 - 0.29 \log q - 0.063 \log (S + 1) \quad \dots\dots\dots (IV.15)$$

Avec:

q : Module de l'écoulement relatif ;

S : Superficie du bassin (Km²).

IV.2.5.2 Formule d'OURKGUIPROVODKHOZ:

$$Cv = \frac{0.7}{q^{0.125}} \quad \dots\dots\dots (IV.16)$$

IV.2.5.3 Formule de L'ANTONOV :

$$C_v = 0.7 / (S + 1000)^{0.097} \dots\dots\dots (IV.17)$$

IV.2.5.4 Formule de KRISTEKLY MENKEL:

$$C_v = 0.83 / (S^{0.06} \cdot q^{0.27}) \dots\dots\dots (IV.18)$$

IV.2.6 Irrégularité des apports :**IV.2.6.1 Estimation fréquentielle des apports :**

Pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, une étude des apports fréquents paraît nécessaire. L'apport fréquentiel est celui qui nous permet une irrigation de huit (08) années sur dix (10), soit un rapport fréquentiel de 80%.

Par ailleurs vu l'inexistence des stations hydrométriques permettant d'établir une étude statistique sur les données de débits d'oueds. Nous avons considéré que les débits sont proportionnels à la zone du site en question, ces précipitations suivent une loi Log Normale (Loi de Galton) qui est donnée comme suit :

$$A_{\%} = \frac{A_0}{\sqrt{C_v^2 + 1}} e^{\mu \sqrt{\ln(C_v^2 + 1)}} \dots\dots\dots (IV.19)$$

$A_{\%}$: Apport de fréquence donnée ;

μ : Variable réduite de Gauss ;

A_0 : Apport moyen annuel (m^3) ;

C_v : Coefficient de variation.

Les résultats de calcul sont donnés dans les tableaux suivants.

Tableau (IV.1) : Les apports fréquents du bassin Sikkak

Auteur	h; mm	M ; l/s/km ²	A; hm ³	Cv	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
					A _{80%} , hm ³	A _{90%} , hm ³	A _{95%} , hm ³	A _{98%} , hm ³	A _{99%} , hm ³
ANRH	28.8	0.914	9.81	0.71	11.389	13.701	15.971	18.933	21.269
Sami	50.7	1.606	17.24	0.72	20.004	24.127	28.185	33.492	37.686
Deri I	42.2	1.339	14.36	0.58	16.742	19.589	22.314	25.784	28.463
Deri II	38.7	1.227	13.17	0.59	15.346	18.001	20.549	23.800	26.315
Mallet- Gautier	41.2	1.306	14.02	0.69	16.298	19.537	22.708	26.831	30.074
Turc	26.92	0.853	9.15	0.80	10.547	12.940	15.333	18.508	21.051
Chaumont	41.2	1.306	14.02	0.69	16.298	19.537	22.708	26.831	30.074
Padoun	27.4	0.867	9.31	0.96	10.500	13.275	16.126	20.012	23.195

Tableau (IV.2) : Les apports fréquents de bassin Amieur

Auteur	h; mm	M ; l/s/km ²	A; hm ³	Cv	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
					A _{80%} , hm ³	A _{90%} , hm ³	A _{95%} , hm ³	A _{98%} , hm ³	A _{99%} , hm ³
INRH	35.1	1.112	4.32	0.69	5.020	6.016	6.992	8.260	9.258
Sami	53.9	1.709	6.63	0.71	7.704	9.277	10.822	12.840	14.432
Deri I	49.6	1.572	6.10	0.59	7.113	8.337	9.510	11.007	12.164
DerI II	38.7	1.227	4.76	0.62	5.551	6.553	7.520	8.761	9.726
Mallet- Gautier	41.2	1.306	5.07	0.69	5.896	7.068	8.215	9.706	10.880
Turc	26.92	0.853	3.31	0.80	3.816	4.681	5.547	6.696	7.615
Chaumont	41.2	1.306	5.07	0.69	5.896	7.068	8.215	9.706	10.880
Padoun	27.4	0.867	3.37	0.96	3.799	4.803	5.834	7.239	8.391

Tableau (IV.3): Les apports fréquents d'Oued Sikkak (Global)

Auteur	h; mm	M ; l/s/km ²	A; hm ³	Cv	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
					A _{80%} , hm ³	A _{90%} , hm ³	A _{95%} , hm ³	A _{98%} , hm ³	A _{99%} , hm ³
ANRH	27.7	0.879	12.85	0.71	14.916	17.958	20.946	24.847	27.926
Sami	49.3	1.563	22.84	0.72	26.503	31.990	37.393	44.463	50.054
Deri I	40.2	1.275	18.63	0.58	21.712	25.391	28.910	33.389	36.846
DerI II	38.7	1.227	17.93	0.59	20.897	24.464	27.881	32.235	35.597
Mallet- Gautier	41.2	1.306	19.09	0.69	22.195	26.605	30.922	36.537	40.954
Turc	26.92	0.853	12.46	0.80	14.363	17.621	20.879	25.204	28.666
Chaumont	41.2	1.306	19.09	0.69	22.195	26.605	30.922	36.537	40.954
Padoun	27.4	0.867	12.67	0.96	14.299	18.078	21.960	27.251	31.587

IV.3 Etude des crues :

Les crues sont des écoulements variables dans lesquelles les débits atteignent des valeurs importantes.

L'estimation des crues révèle une grande importance pour la sécurité de l'ouvrage à implanter.

Les paramètres définissant une crue sont :

1. Le débit maximum de la crue (débit de pointe).
2. Le volume de la crue.
3. Le temps de base.

Pour la détermination du débit de pointe probable de la crue des différentes périodes de retour, différentes formules empiriques ont été sélectionnées pour le calcul, par manque d'observation.

IV.3.1 Formules empiriques pour la détermination de la crue :

IV.3.1.1 Formule de MALLET-GAUTHIER :

On a :

$$Q_{\max p\%} = 2K \log (1+A.P_{\text{moy}}) \cdot \frac{S}{\sqrt{L}} \sqrt{1+4\log T - \log S} \quad \dots\dots\dots (IV.20)$$

$Q_{\max p\%}$: Débit maximum pour une fréquence donnée (m^3/s) ;

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (m) ;

S : Superficie du bassin versant (Km^2) ;

L : Longueur du talweg principal (Km) ;

K : Constante dépendant des caractéristiques du bassin : K (1-3) ;

On prend $K = 2$

$A = 20$

T : Période de retour (an).

Tableau (IV.4): Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de MALLET-GAUTHIER) station Tlemcen

Bassin	Fréquence (%)	90	95	98	99
	Période de retour (an)	10	20	50	100
SB Sikkak	$Q_{\max}$ (m^3/s)	306.48	373.83	447.56	496.12
SB Amieur	$Q_{\max}$ (m^3/s)	167.30	198.92	234.27	257.80
Bassin oued Sikkak	$Q_{\max}$ (m^3/s)	405.86	499.68	601.66	668.55

IV.3.1.2 Formule de SOKOLOVSKY :

On a :

$$Q_{\max p\%} = \frac{0.28 \times (P_{tc} - H_0) \times \alpha\% \times F \times S}{T_m} \quad \dots\dots\dots (IV.21)$$

H_0 : pertes initiales en mm. $H_0 = 8$ mm

$\alpha\%$: coefficient de ruissellement de la crue probable pour une période donnée ;

$$\alpha p\% = \frac{\sqrt{Ptc\%} - \sqrt{Ho}}{\sqrt{Ptc\%} + \sqrt{Ho}}$$

F : Coefficient de forme de la crue ;

$$F = \frac{12}{4 + 3\gamma}$$

On prend : $\gamma = 5$ D'où : $F = 0.6316$

S : Superficie du bassin (Km²).

$T_m = T_c$

Tableau (IV-5): valeur de γ en fonction de bassin versant

Condition	γ
Surface du B.V compris entre 1 et 50 km ²	$\gamma = 2$
Pour un bassin boisé avec un sol peut perméable	$2 \leq \gamma \leq 2.5$
Pour un bassin boisé	$3 \leq \gamma \leq 4$
Pour les grands bassins	$4 \leq \gamma \leq 7$

Tableau (IV.6): Débit maximum de crue pour différents périodes de retour

(Formule de SOKOLOVSKY) Station Tlemcen

Bassin	Période de retour (ans)	10	20	50	100
	Fréquence (%)	90	95	98	99
Sikkak	Ptc (mm)	48.31	55.50	64.81	71.93
	α %	0.422	0.450	0.480	0.500
	Qp (m ³ /s)	151.65	190.61	243.38	285.18
Amieur	Ptc (mm)	43.54	50.02	58.41	64.83
	α %	0.400	0.429	0.460	0.480
	Qp (m ³ /s)	63.63	80.63	103.75	122.13
Oued Sikkak	Ptc (mm)	50.480	58.000	67.730	75.170
	α %	0.431	0.458	0.488	0.508
	Qp (m ³ /s)	193.49	242.48	308.67	361.04

IV.3.1.3 Formule de POSSENTI:

On a:

$$Q_{p\%} = \frac{\mu \times P_{j\max\%} \times S}{Lp} \dots\dots\dots (IV.22)$$

$P_{j\max\%}$: Pluie maximale journalière correspondante à la période de retour donnée ;

μ : Coefficient compris entre 700 – 800 ; On prend $\mu = 700$.

Lp : Longueur du cours d'eau principal (Km) ;

S : Superficie (km^2).

On obtient les résultats ci-après - tableau suivant:

Tableau (IV.7): Débit maximum de crue pour différents périodes de retour
(Formule de POSSENT) Station tlemcen

Bassin	Période de retour (ans)	10	20	50	100
	Fréquence (%)	90	95	98	99
Sikkak	Pjmax (mm)	68.5	78.7	91.9	102
	Qp (m^3/s)	360.60	414.30	483.78	536.95
Amieur	Pjmax (mm)	68.5	78.7	91.9	102
	Qp (m^3/s)	251.96	289.48	338.03	375.18
Oued Sikkak	Pjmax (mm)	68.5	78.7	91.9	102
	Qp (m^3/s)	491.05	564.17	658.80	731.20

IV.3.1. 4. Formule Rationnelle (TURRAZA):

On a:

$$Q_{\max\%} = \frac{C \times I_t \times S}{3.6} \dots\dots\dots (IV.23)$$

S : Superficie du bassin versant (Km^2).

C : Coefficient de ruissellement en fonction de la probabilité donnée.

I_t : Intensité des pluies pendant une durée égale au temps de concentration pour une fréquence donnée (mm/h).

Tableau(IV.8): Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de TURRAZA) Station Tlemcen

Bassin	Période de retour (ans)	100	50	20	10
	Fréquence (%)	99	98	95	90
Sikkak	C	0.500	0.480	0.450	0.422
	I _t (mm/h)	8.990	8.100	6.940	6.040
	Q _p (m ³ /s)	424.37	367.21	294.71	240.46
Amieur	C	0.480	0.460	0.429	0.400
	I _t (mm/h)	7.55	8.67	10.12	11.24
	Q _p (m ³ /s)	123.84	136.19	148.21	153.58
Oued Sikkak	C	0.508	0.488	0.458	0.431
	I _t (mm/h)	8.180	7.370	6.310	5.490
	Q _p (m ³ /s)	534.47	462.98	371.99	303.98

IV.3.1.5 Formule de GIANDOTTI :

$$Q_{max\%} = \frac{C.S(H_{moy}-H_{min})^{1/2}}{4.(S)^{1/2}+1.5L} \cdot P_{tc\%} \dots\dots\dots (IV.24)$$

Q_{max} (%): débit maximum de crue en m³/s de même fréquence que celle de la pluie de courte durée;

C : Coefficient topographique varie entre 66 et 166 ; Nous prenons C = 160

S: superficie du bassin versant (km²);

L: longueur du talweg principal (km);

H_{moy}, H_{min}: altitudes moyennes et minimales en (m) ;

P_{tc}: pluies de courte durée (mm).

Tableau (IV-9) : Débit maximum de crue pour différents périodes de retour (Formule de GIANDOTTI)

Bassin	Période de retour (ans)	10	20	50	100
	Fréquence (%)	90	95	98	99
Sikkak	Pt (mm)	48.31	55.50	64.81	71.93
	Q _p (m ³ /s)	410.94	472.10	551.30	611.86
Amieur	Pt (mm)	43.54	50.02	58.41	64.83
	Q _p (m ³ /s)	151.00	173.47	202.57	224.83
Oued Sikkak	Pt (mm)	50.48	58.00	67.73	75.17
	Q _p (m ³ /s)	509.08	584.92	683.05	758.08

Les résultats de calcul de toutes les formules pour les trois sous bassin sont représentés dans le Tableau (IV-10).

Tableau (IV-10): Récapitulatif des résultats de débit de crue

Bassin	Périodes de retour	Formule					Moyenne
		Mallet- Gauthier	Sokolovsky	Possenti	Turraza	Giandotti	
Sikkak	10	306.48	151.65	360.60	240.46	410.94	294.03
	20	373.83	190.61	414.30	294.71	472.10	349.11
	50	447.56	243.38	483.78	367.21	551.30	418.65
	100	496.12	285.18	536.95	424.37	611.86	470.90
Amieur	10	167.30	63.63	251.96	123.84	151.00	151.54
	20	198.92	80.63	289.48	136.19	173.47	175.74
	50	234.27	103.75	338.03	148.21	202.57	205.36
	100	257.80	122.13	375.18	153.58	224.83	226.70
Oued Sikkak	10	405.86	193.49	491.05	303.98	509.08	380.69
	20	499.68	242.48	564.17	371.99	584.92	452.65
	50	601.66	308.67	658.80	462.98	683.05	543.03
	100	668.55	361.04	731.20	534.47	758.08	610.67

IV.3.2. Hydrogramme de crue:

C'est une courbe représente l'évolution des débits en fonction du temps pendant la crue, elle permet d'estimer quelques caractéristiques relatives à la crue telle que, la forme, le volume, le temps de montée et temps de base ; pour le tracé de l'hydrogramme, on utilise la méthode de SOKOLOVSKY. (BENNIA Touabia, 2005)

IV.3.2.1 Construction des hydro grammes des crues (SOKOLOVSKY)

L'hydrogramme de crue est une identité de la crue, il nous donne les caractéristiques principales de la crues tel que:

- Le volume de la crue ;
- La durée de la crue ;
- Le débit maximum de la crue (débit de pointe).

Pour le tracé de l'hydrogramme de crue, on doit suivre la méthode de Sokolovsky qui divise l'hydrogramme en deux parties non symétriques, une est calculée à partir du temps de montée et l'autre à partir du temps de la décrue.

a. Pour le temps de montée:

$$Q_{\text{montée}} = Q_{\text{max}\%} \left(\frac{T}{T_m} \right)^m \dots\dots\dots (IV.25)$$

$T_m = T_c$: Temps de montée (h).

b. Pour la décrue:

$$Q_{\text{décente}} = Q_{\text{max}\%} \left(\frac{T_d - T}{T_d} \right)^n \dots\dots\dots (IV.26)$$

Avec: $T_d = \delta T_m$ (Sokolovsky)

$Q_{\text{max}} (\%)$: débit maximum de fréquence donnée;

Q_t : débit instantané au moment (t) ;

t_m, t_d : temps de montée et de décrue (h);

m, n : puissances des paraboles pour l'Algérie $m=2$ et $n=3$;

δ : Coefficient dépendant des caractéristiques du bassin versant, il est pris en général compris entre (2 ÷ 4), celui-ci est fonction du cours d'eau (longueur), de la perméabilité et du boisement du bassin. On prend $\delta=3$.

Tableau (IV-11) : Coefficient de forme de l'Hydrogramme de crue γ .

Condition	δ
petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement perméables.	2 à 2,5
petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants brisés ou perméables, moyens cours d'eau avec terrasses de lit majeur normales.	3 à 4
Grands et moyens cours d'eau avec des terrasses de débordements étendues.	4 à 7

Tableau (IV-12): Tableau récapitulatif des temps de concentration, de montée et de décrue

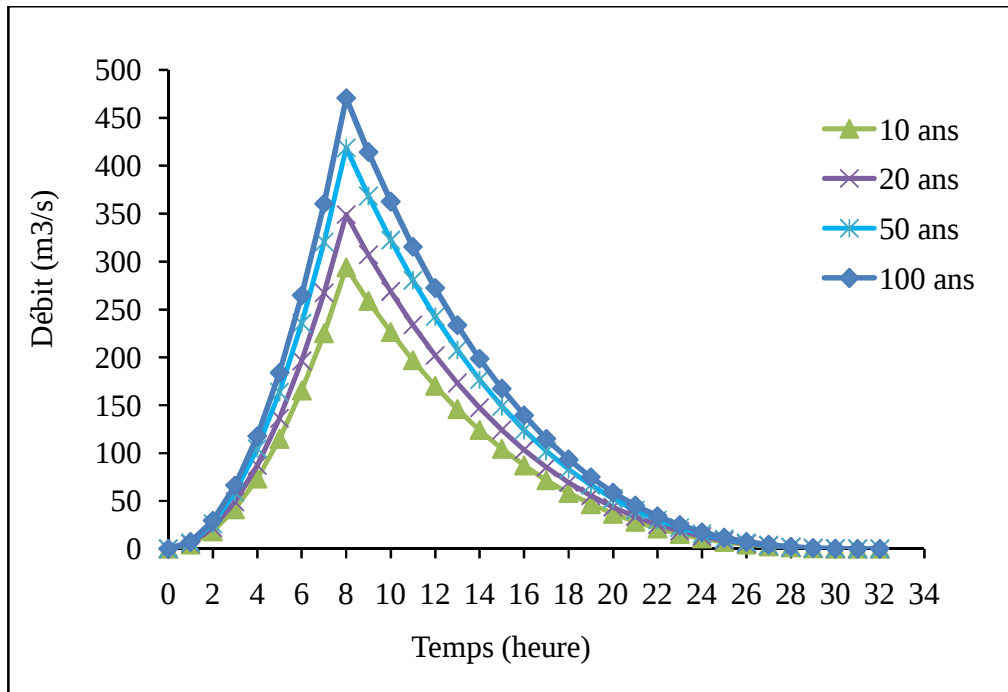
Bassin	Tc = Tm	Td
Sikkak	8	24
Amieur	5.77	17.31
Oued Sikkak	9.19	27.57

Pour construire les hydrogrammes des crues des sous bassins de l'oued Sikkak, nous avons utilisé les valeurs des débits de crues pour différentes périodes de retour, les résultats obtenus sont exposés dans les tableaux (IV-13), (IV-14), (IV-15).

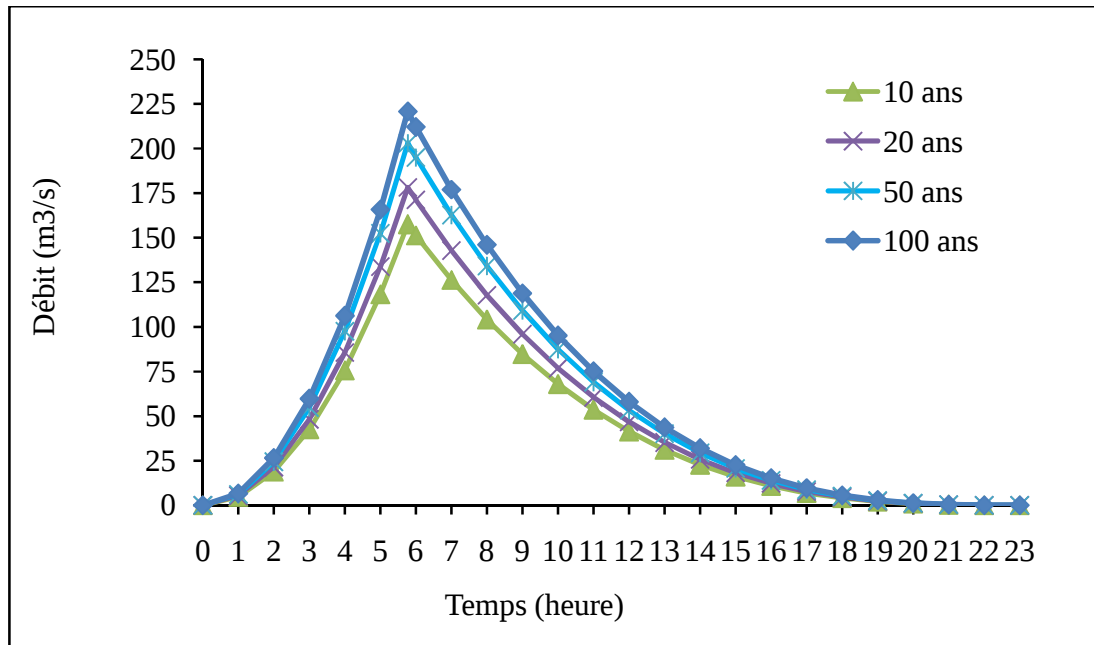
Les hydrogrammes de crues sont représentés dans les Figures (IV-1), (IV-2), (IV-3).

Tableau (IV-13): Débit de crues pour différentes périodes de retour de Sikkak

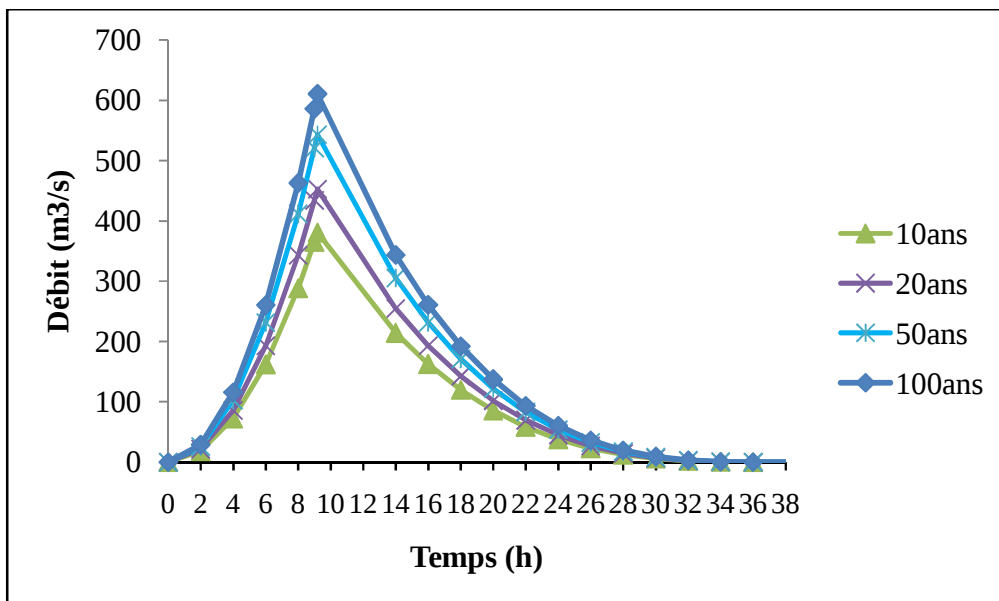
T(h) /Année	10	20	50	100
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	18.38	21.82	26.17	29.43
4	73.51	87.28	104.66	117.72
6	165.39	196.37	235.49	264.88
8	294.03	349.11	418.65	470.90
10	226.48	268.90	322.47	362.71
12	170.15	202.03	242.27	272.51
14	124.04	147.28	176.62	198.66
16	87.12	103.44	124.04	139.53
18	58.36	69.30	83.10	93.47
20	36.75	43.64	52.33	58.86
22	21.27	25.25	30.28	34.06
24	10.89	12.93	15.51	17.44
26	4.59	5.45	6.54	7.36
28	1.36	1.62	1.94	2.18
30	0.17	0.20	0.24	0.27
32	0.00	0.00	0.00	0.00

Figure IV-1: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour de Sikkak**Tableau (IV-14):** Débit de crues pour différentes périodes de retour d'Amieur

T(h) /Année	10	20	50	100
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	18.92	21.40	24.38	26.52
3	42.57	48.16	54.87	59.68
4	75.69	85.61	97.54	106.09
5	118.26	133.77	152.41	165.77
5.77	157.49	178.14	202.96	220.76
6	151.30	171.14	194.98	212.07
8	104.13	117.78	134.19	145.96
10	67.95	76.86	87.57	95.25
11	53.53	60.55	68.98	75.03
12	41.30	46.72	53.23	57.90
14	22.73	25.71	29.29	31.86
16	10.78	12.19	13.89	15.11
18	3.98	4.50	5.13	5.58
20	0.89	1.00	1.14	1.24
22	0.04	0.04	0.05	0.05
23	0.00	0.00	0.00	0.00

Figure IV-2: Hydrogramme fréquentiels des différentes périodes de retour d'Amieur**Tableau (IV-15):**Débit de crues pour différentes périodes de retour d'oued Sikkak

T(h) /Année	10	20	50	100
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	18.03	21.44	25.72	28.92
4	72.12	85.75	102.88	115.69
6	162.27	192.94	231.47	260.30
8	288.48	343.01	411.50	462.76
9	365.11	434.13	520.81	585.68
9.19	380.69	452.65	543.03	610.67
14	214.18	254.66	305.52	343.57
16	162.53	193.26	231.85	260.72
18	119.94	142.61	171.09	192.40
20	85.52	101.69	121.99	137.19
22	58.41	69.46	83.32	93.70
24	37.74	44.87	53.84	60.54
26	22.63	26.91	32.28	36.30
28	12.21	14.52	17.42	19.59
30	5.61	6.67	8.00	9.00
32	1.96	2.33	2.79	3.14
34	0.38	0.45	0.54	0.61
36	0.01	0.01	0.01	0.01

Figure IV-3: Hydrogramme fréquents des différentes périodes de retour d'oued Sikkak

IV.4. Conclusion :

L'estimation des crues révèle une grande importance pour la sécurité de l'ouvrage à implanter.

Pour la détermination du débit de pointe probable de la crue des différentes périodes de retour, différentes formules empiriques ont été sélectionnées pour le calcul, par manque d'observation.

Suite au calcul du débit des crues du bassin versant de l'oued Sikkak, on retient un débit de projet $Q_{(100)}$ de **610.67 m³/s** au niveau de l'exutoire du bassin de l'oued Sikkak, un débit de projet $Q_{(100)}$ de **226.70 m³/s** pour le sous bassin Amieur et en fin un débit $Q_{(100)}$ de **470.90 m³/s** pour le sous bassin Sikkak .

CHAPITRE V

Théorie HEC-HMS

V.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 (**Hydrologic Engineering Center, 2002**)

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.

V.2 Modélisation des précipitations : Le HEC-HMS utilise différentes méthodes

- Méthodes basées sur les coefficients de pondération
- Méthodes basées sur l'inverse du carré de la distance
- Méthodes basées sur les événements pluvieux hypothétiques

On peut créer avec le logiciel HEC-HMS des événements 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'événements 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.

V.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 modélisée 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.

V.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 ».

V.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.

V.4.2 Le modèle de pertes initiales et à taux constant :

Ce modèle considère que le potentiel du taux de pertes maximum, noté f_c , est constant, et inclut le taux de pertes initiales I_a 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, I_a n'est pas atteint, il n'y a pas de ruissellement.

On peut résumer ce fonctionnement de la manière suivante :

$$\text{si } \sum_i P_i \leq I_a \text{ alors, } P_{et} = 0$$

$$\text{si } \sum_i P_i \geq I_a \text{ et } P_t \geq f_c \text{ alors, } P_{et} = P_t - f_c \quad (\text{V -1})$$

$$\text{si } \sum_i P_i \geq I_a \text{ et } P_t \leq f_c \text{ alors, } P_{et} = 0$$

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, I_a sera proche de zéro. Si le sol est drainé, alors I_a 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 (**Hydrologic Engineering Center, 2000**)

Tableau V.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

V.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 :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (V - 2)$$

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 I_a en fonction de S :

$$I_a = 0.2S \quad CN_{moy} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i} \quad (V - 3)$$

$$\text{On obtient donc : } P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (V - 4)$$

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 :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (V - 5)$$

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 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 :

$$CN_{moy} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i} \quad (V -6)$$

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 .

V.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 (V-2) 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 (V-2), 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.

V.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 :

$$f_t = K \left[\frac{1 + (\varphi - \theta_i) S_f}{F_t} \right] \quad (V -7)$$

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 V.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 V.2).
- **Le volume du déficit hydrique ($\phi - \theta_i$) :** 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, $\phi = \theta_i$, 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 V.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

V.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 V.1 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 (**Hydrologic Engineering Center, 2006**).

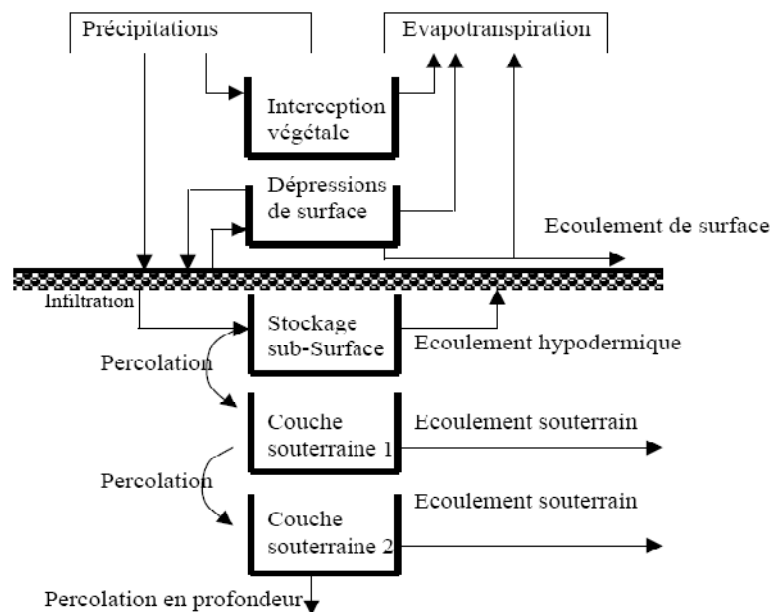


Figure V.1 : Schéma conceptuel de l'algorithme du modèle SMA.

V.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 (V.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 V.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.

V.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.

V.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 hyétoigrammes de l'averse correspondante reçue par ce même bassin.

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 :

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq m} P_m U_{n-m+1} \quad (V-8)$$

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.

V.5.1.1 Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur :

Ce modèle consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de la formule V.6 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.

V.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.

V.5.2 Modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques :

V.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'hydrogramme 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 :

$$T_p = 5.5T_c \quad (V-9)$$

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 :

$$t_{pR} = t_p - \frac{t_r - t_R}{4} \quad (V-10)$$

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'évènement, Snyder a établi une relation entre le décalage temporel et le pic de l'hydrogramme unitaire.

$$\frac{U_p}{A_d} = C \frac{C_p}{t} \quad (V-11)$$

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.

V.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 :

$$U_p = 2.08 \frac{A_d}{T_p} \quad \text{et} \quad T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6T_c \quad (\text{V -12})$$

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.

V.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 :

$$t_{cell} = t_c \frac{d_{cell}}{d_{max}} \quad (\text{V-13})$$

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.

V.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 V.2). 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 :

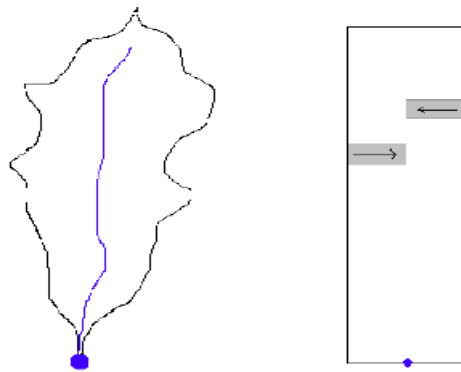


Figure V.2 : Modélisation d'un modèle de bassin pour le modèle d'onde cinématique.

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \alpha^{m-1} \frac{\partial A_T}{\partial x} = q \quad \text{avec,} \quad \alpha = 1.486 \frac{S^{0.5}}{N} \quad \text{et} \quad m = \frac{5}{3} N \quad (\text{V -14})$$

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-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 V.4 ci-dessous.

Tableau V.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.

V.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.

Equation de continuité

Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q \quad (\text{V -15})$$

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 :

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{V -16})$$

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.

V.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 :

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{V -17})$$

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

$$I_t - O_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t} \quad (\text{V-18})$$

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 :

$$\left(\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2} \right) = \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) + \left(\frac{S_{t-1}}{\Delta t} - \frac{O_{t-1}}{2} \right) \quad (V-19)$$

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.

V.6.2 Modèle de Muskingum :

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

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2} \right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} \right) \quad (V-20)$$

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

$$S_t = T_p O_t + T_p X (I_t - O_t) = T_p (X I_t + (1 - X) O_t) \quad (V-21)$$

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 :

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2T_p X}{2T_p (1 - X) + \Delta t} \right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2T_p X}{2T_p (1 - X) + \Delta t} \right) I_{t-1} + \left(\frac{2T_p (1 - X) - \Delta t}{2T_p (1 - X) + \Delta t} \right) O_{t-1} \quad (V-22)$$

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.

V.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).

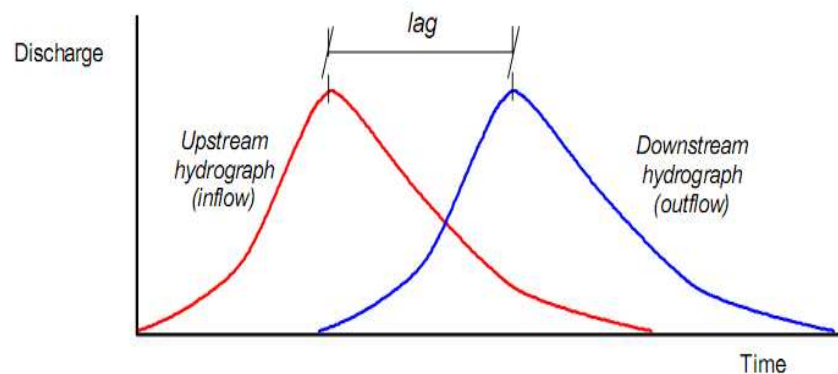


Figure V.3 : Exemple de modèle Lag.

V.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).

V.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.

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

Tableau V.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	0 mm	500mm
	Taux de perte constant	0mm/h	300mm/h
Modèle de perte SCS	Rétention initiale	0 mm	500 mm
	Curve Number (CN)	1	100
Modèle de perte de GREEN et AMPT	Déficit hydrique	0	1
	Conductivité hydraulique	0 mm/h	250mm/h
	Wetting front suction	0 mm	1000 mm
Hydrographe unitaire de CLARK	Temps de concentration	h	500 h
	Coefficient de stockage	0 h	150 h
Hydrographe unitaire de SNYDER	Décalage	0.1 h	500 h
	Cp	0.1	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	0 m ³ /s	100 000m ³ /s
	Facteur de récession	0.000011	-
	Rapport débit/pic max	0	1
Modèle de Muskingum	K	0.1 h	150h
	X	0	0.5

V.7 Conclusion :

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 semi-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 VI



Application du modèle HEC-HMS

VI.1 Introduction :

Le système de modélisation hydrologique HEC-HMS est un logiciel flexible employé pour modéliser le processus pluie-débit dans un bassin versant ou une région. (**Hydrologic Engineering Center, 2006**)

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 logiciels 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.

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, Arcgis, etc.

VI.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, un 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. (**Hydrologic Engineering Center, 2006**)

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 créés. 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 :

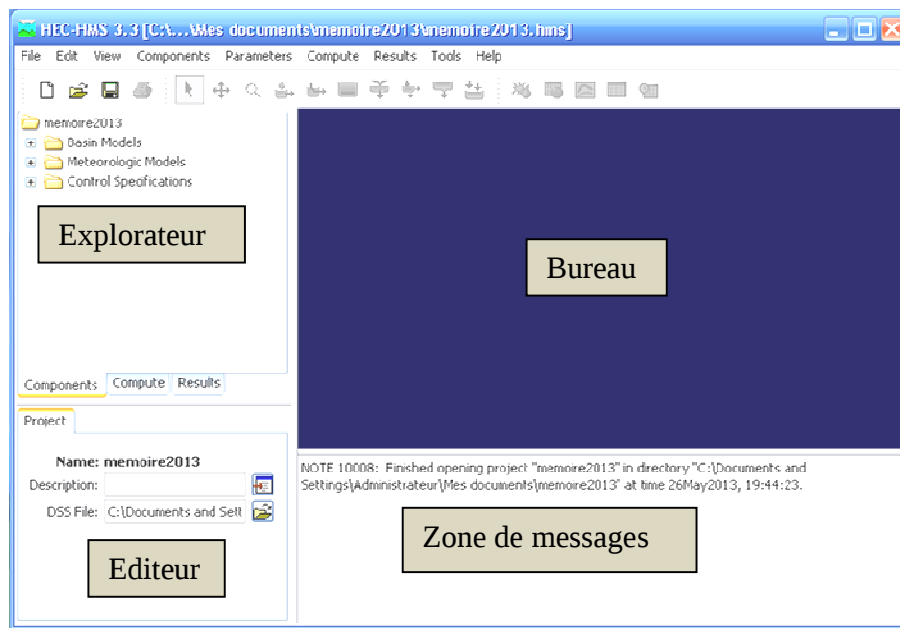


Figure VI.1 : Vue de l'écran HEC HMS.

VI.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 est découpée en trois parties : **(Hydrologic Engineering Center, 2006)**

- 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.

VI.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, 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 (VI-1).

Les éléments hydrologiques sont connectés pour former un réseau afin de simuler les processus d'écoulement, et le calcul commence à partir des éléments amont suivant une direction aval.

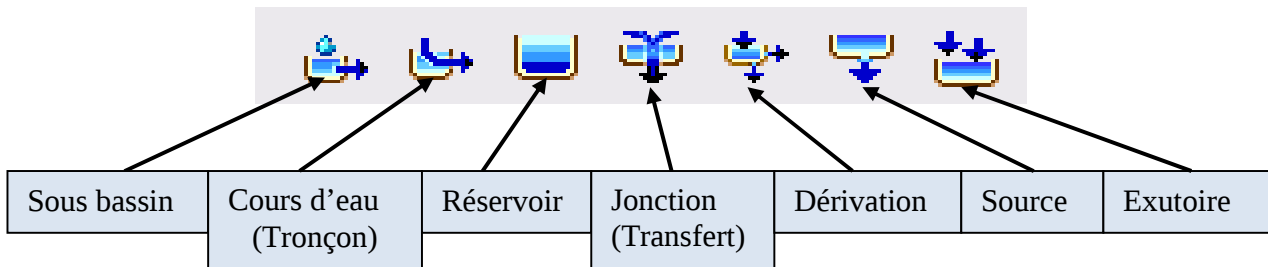


Figure VI.2 : Fenêtre du bassin.

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 sortie.

- **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 sortie.
- **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.

VI.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.

VI.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 :

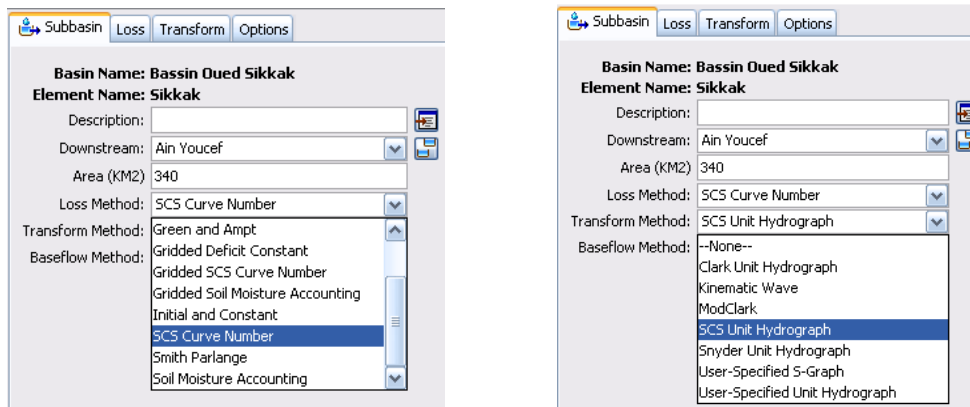


Figure VI.3 : Les différentes méthodes de production et de transfert.

Après avoir choisi les deux méthodes de production et de transfert voici les fenêtres où on introduire les données.

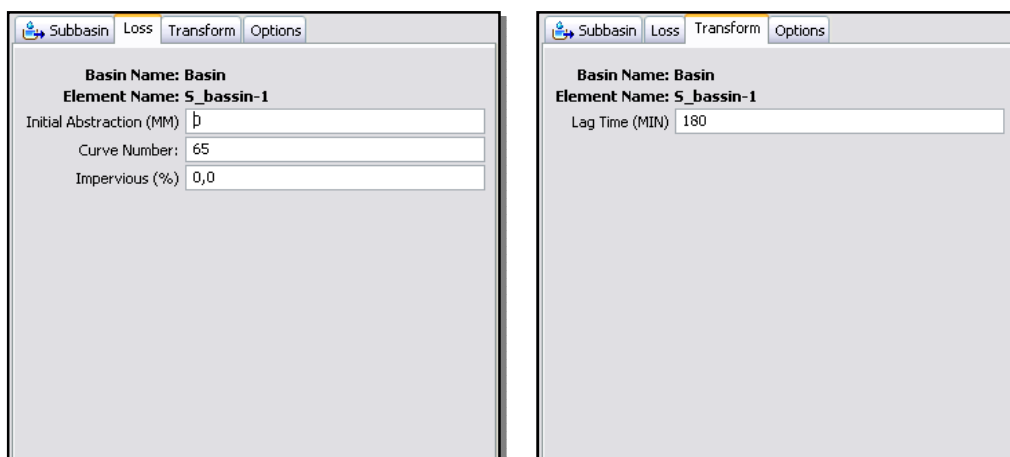


Figure VI.4 : Inclure les données dans les éditeurs des bassins versants.

VI.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 :

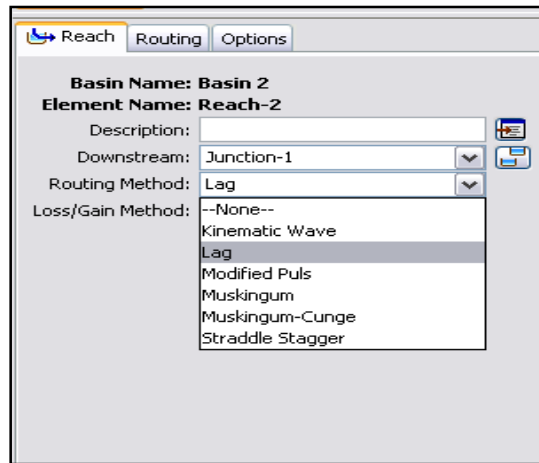


Figure VI.5 : Les méthodes des écoulements fluviaux.

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 :

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

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

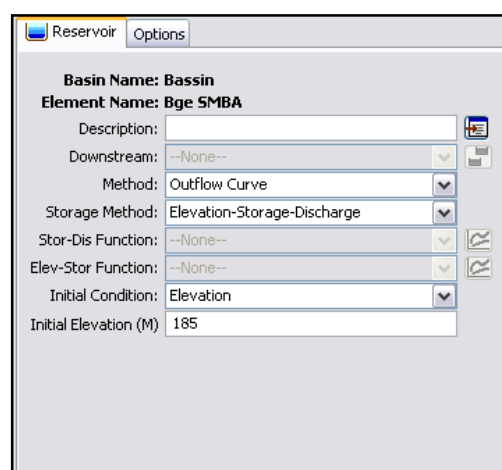


Figure VI.6 : Les données de réservoir.

VI.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 bassin 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.

VI.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.

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).

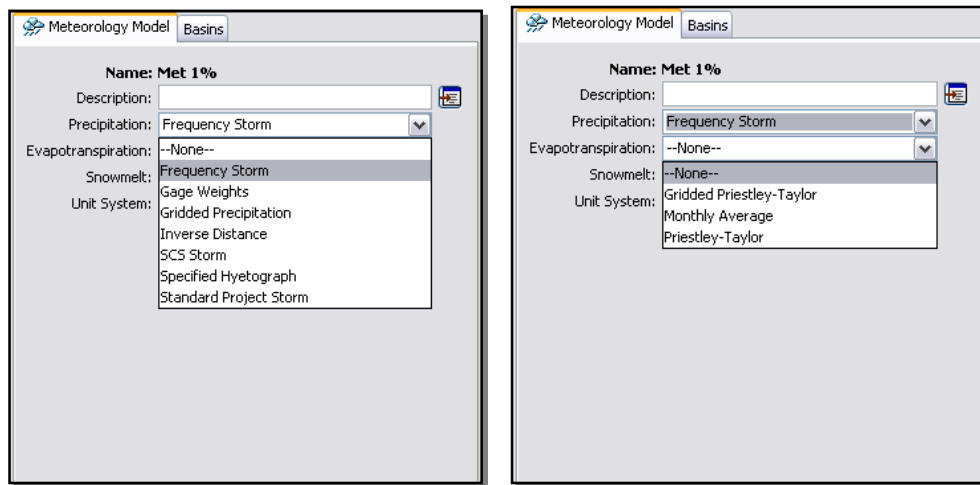


Figure VI.7 : Les modèles météorologiques (Précipitation et Evapotranspiration).

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*.

VI.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.

VI.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 Attribute*) pour obtenir le tableau d'évapotranspiration.

VI.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 VI.8 : Fenêtre de spécifications de contrôle.

VI.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: 08:30 (pour 8 heures 30 du matin).

VI.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.

VI.7 Réalisation de Simulations et Visualisation des Résultats :

VI.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 VI.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*).

VI.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.

VI.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*).

VI.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 hydrogramme observé et le logiciel HEC-HMS compare ce hydrogramme 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 où va se faire l'optimisation, la fonction mathématique qui va calculer l'écart entre les hydrographes observés et calculés,
- caler le modèle.

VI.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 icônes 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*.

VI.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.

VI.9 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.10 Modélisation du bassin versant :

La modélisation proposée a pour objectif d'estimer le débit maximal probable des bassins versants de l'Oued Sikkak ainsi que le volume à son exutoire. Ce bassin versant a une superficie d'environ 463 km² et découpé en deux (02) sous-bassins.



Figure VI.10 : Les bassins versants de l'oued Sikkak

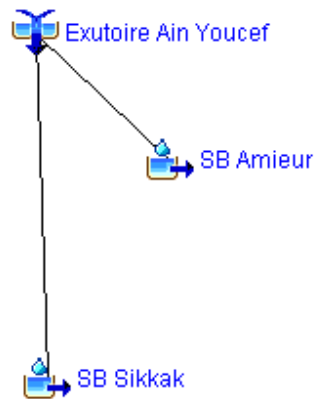


Figure VI.11 : Représentation du bassin versant de Sikkak dans le modèle HEC-HMS.

VI.10.1 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 donnée des résultats satisfaisants dans l'évaluation de l'écoulement superficiel.

VI.10.2 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 hyétoigrammes 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 en minutes.

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 considérerons 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.10.4 Les données de base d'entrées :

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

Les données de base d'entrées du bassin versant utilisées sont présentées dans le tableau suivant ; et la seule donnée invariante est la superficie de chaque sous bassins :

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

Désignations	Sous bassin 01	Sous bassin 02
Surface (km ²)	340	123
Curve number (CN)	70	70
Standard lag (min)	288	208
Initial abstraction (mm)	0	0
Imperméabilité (%)	0.0	0.0

Les paramètres propres à chaque sous-bassin 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**, et **Subbasin** 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'infiltré 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'infiltré 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 a pas un **écoulement de base** ou débit d'étiage (*None*).

Figure VI.12 : Fenêtres des données de l'élément (sous bassin)

VI.11 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, 1h, 2, 3, 6, 12, 24h).

Nous avons obtenu 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.2 : Les données pluviométriques de chaque fréquence

Temps (heur)			0,25	1	2	3	6	12	24
Fréq (%)	1	Précip (mm)	23.9	37.13	46.29	52.66	65.64	81.83	102
	2		21.53	33.46	41.71	47.44	59.14	73.72	91.9
	4		18.44	28.65	35.72	40.63	50.65	63.13	78.70
	10		16.05	24.94	31.09	35.36	44.08	54.95	68.50

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 :

Precipitation	
Name: 1pc	
Probability:	1 Percent
Input Type:	Partial Duration
Output Type:	Annual Duration
Intensity Duration:	15 Minutes
Storm Duration:	1 Day
Intensity Position:	25 Percent
Storm Area (KM2)	
5 Minutes (MM)	
15 Minutes (MM)	23.900
1 Hour (MM)	37.130
2 Hours (MM)	46.290
3 Hours (MM)	52.660
6 Hours (MM)	65.640
12 Hours (MM)	81.830
1 day (MM)	102.00
2 Days (MM)	
4 Days (MM)	
7 Days (MM)	
10 Days (MM)	

Figure VI.13: 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.12 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 specification*) voir figure VI.8. L'intervalle du temps, aussi 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

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

T_c : temps de concentration.

VI.13 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 (T_c) et le temps de décalage (T_{lag}).

Pour chaque paramètre à optimiser nous pouvons entrer une valeur de départ et des valeurs limites à ne pas franchir

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.3: Les valeurs de tous les paramètres optimisés.

BASSIN VERSANT	Curve number (CN)		Standard lag (min)	
	Avant calage	Après calage	Avant calage	Après calage
SB 01	70	79.907	288	244.87
SB 02	70	70.561	208	127.90

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

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value	Objective Function Sensitivity
Amieur	Curve Number		70	79.907	-0.16
Sikkak	Curve Number		70	70.561	0.13
Amieur	SCS Lag	MIN	208	127.90	0.24
Sikkak	SCS Lag	MIN	288	244.87	-0.02

Figure VI.14 : Fenêtre des paramètres avant et après le calage

VI.14 Exploitation des résultats :

VI.14.1 Calculs effectués :

Les derniers paramètres à fixer avant de lancer les calculs sont la durée de calcul et le pas de temps. 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 où 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.

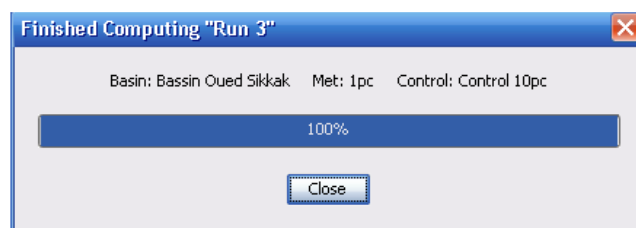


Figure VI.15 : Fenêtre de moteur de calcul

VI.14.2 Débits et volumes obtenus

La figure ci-dessous définit le volume total écoulé et le débit de pointe des pas de temps de simulation dans le cas où le barrage d'Ain Yousef est plein, particulièrement à l'exutoire du site de l'Ain Yousef où est évalué le débit de pointe de crue de fréquence 1%.

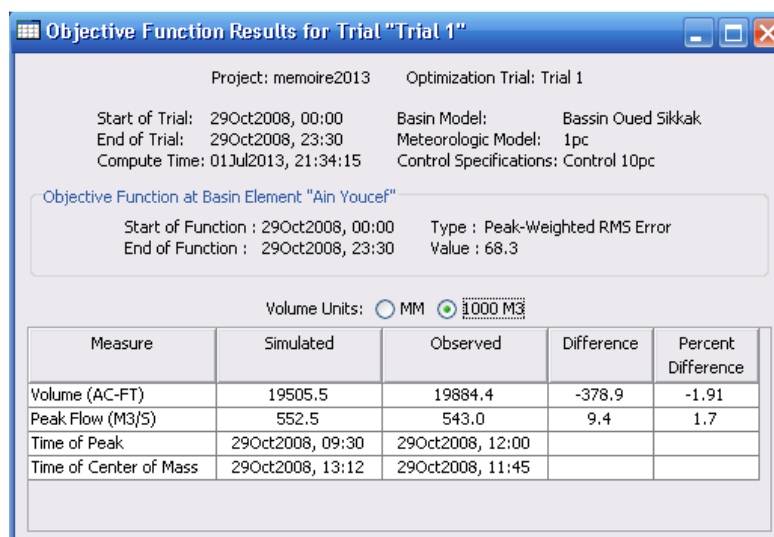


Figure VI.16 : Débits et volumes apportés par les sous bassins de fréquence 1%

Le modèle donne aussi un hydrogramme de crue, avec un hyétogramme des précipitations et les pertes.

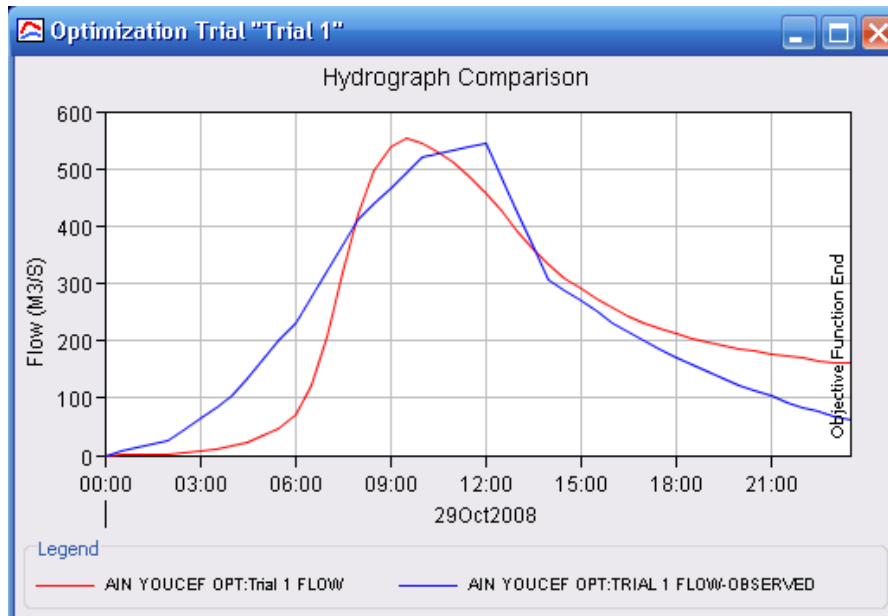


Figure VI.17 : Fenêtre de la comparaison des hydrogrammes de crue observé et simulé à l'exutoir « Ain Youcef »

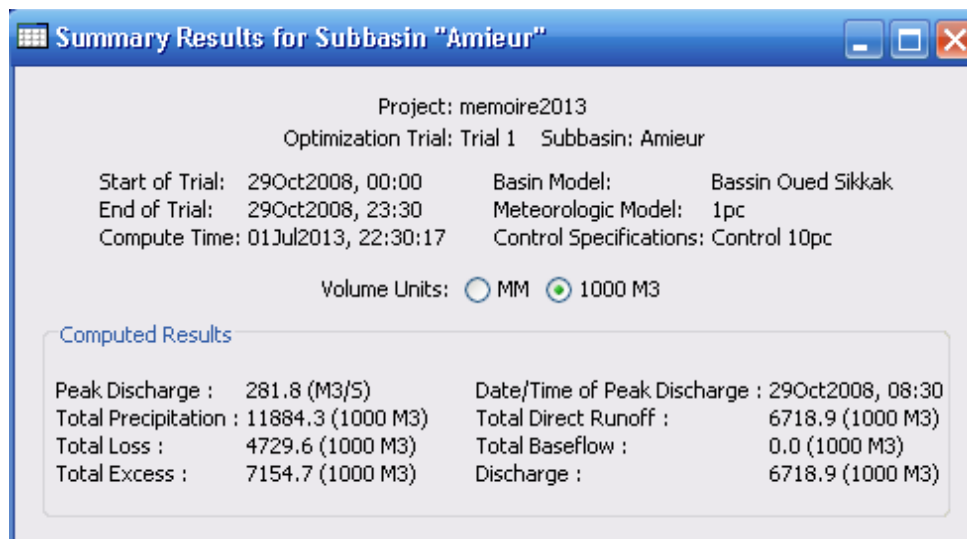


Figure VI.18 : Débits et volumes apportés par le sous bassin Amieur de fréquence 1%

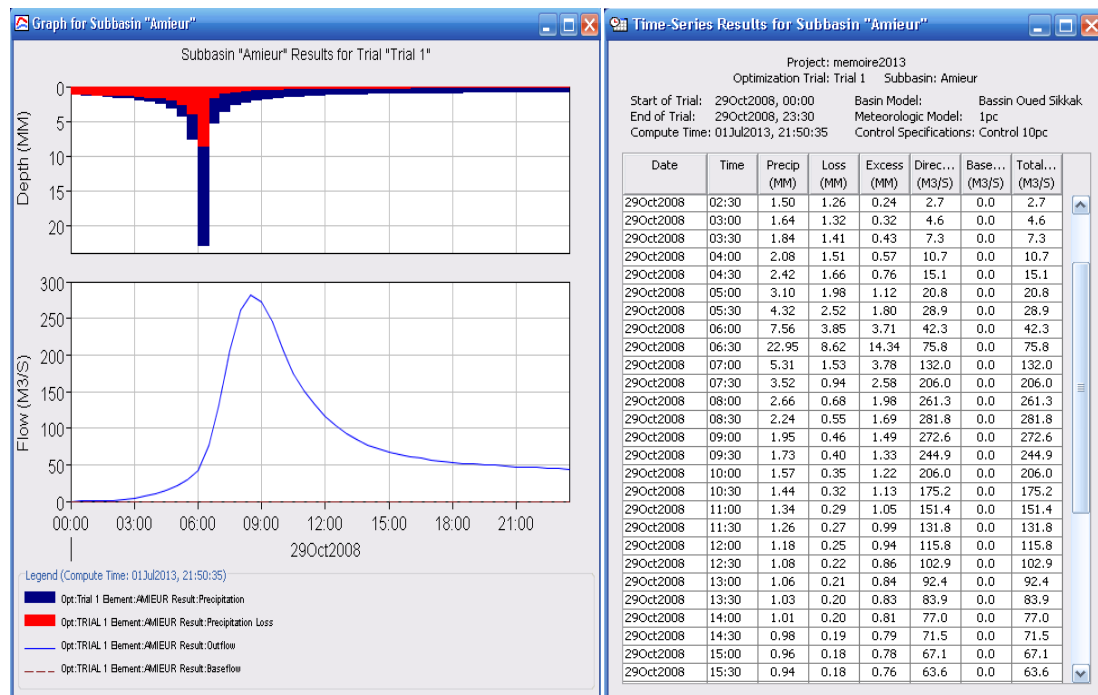


Figure VI.19 : Fenêtre du tableau de résultats et de hydrogramme de crue de sous bassin Amieur

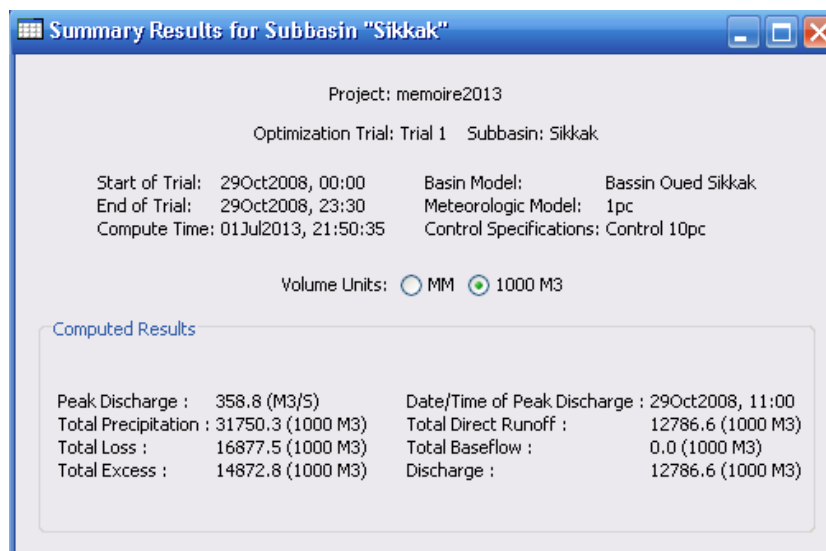


Figure VI.20 : Débits et volumes apportés par le sous bassin Sikkak de fréquence 1%

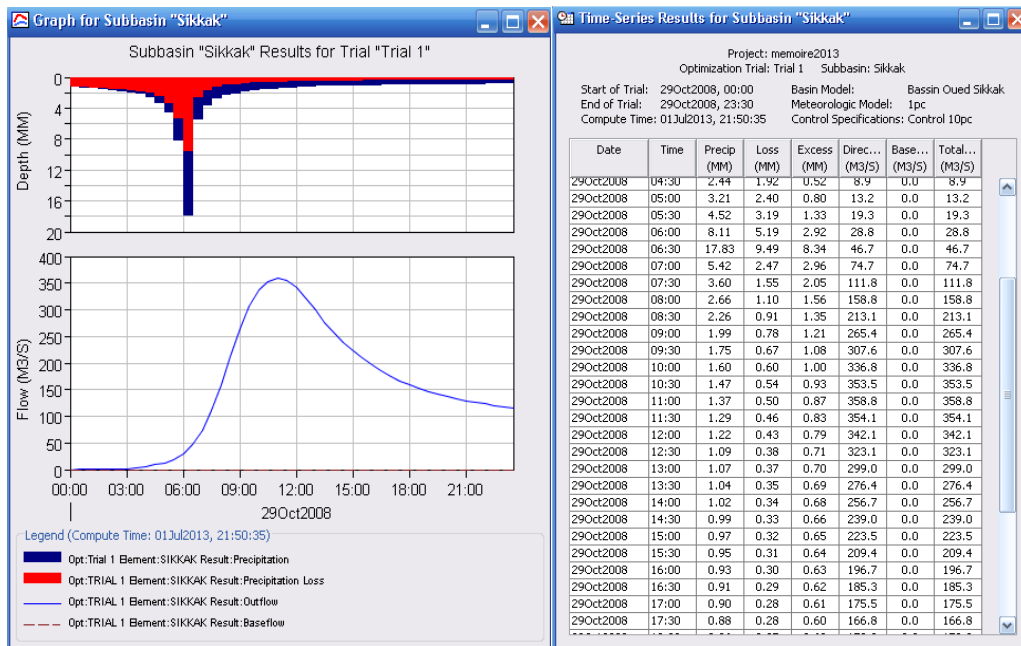


Figure VI.21: Fenêtre du tableau de résultats et de hydrogramme de crue de sous bassin Sikkak

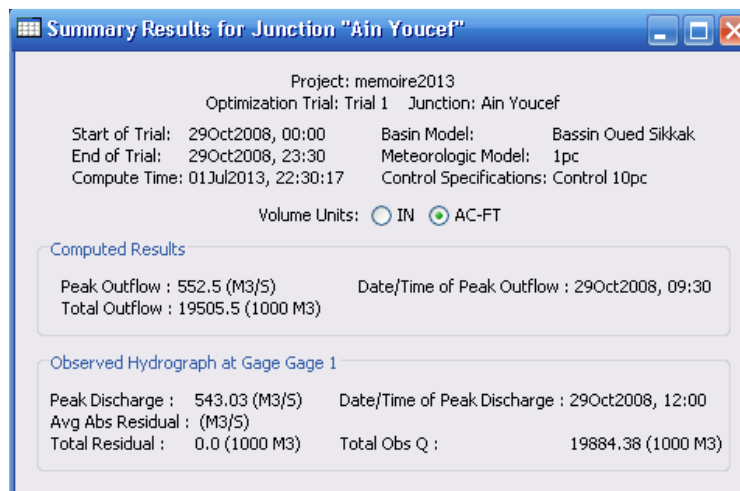


Figure VI.22 : Débits et volumes apportés par le bassin Oued Sikkak de fréquence 1%

Nous présentons maintenant les hydrogrammes obtenus par la simulation de l'événement de l'exutoire de site étudié ainsi que l'hydrogramme total observer de l'oued Sikkak.

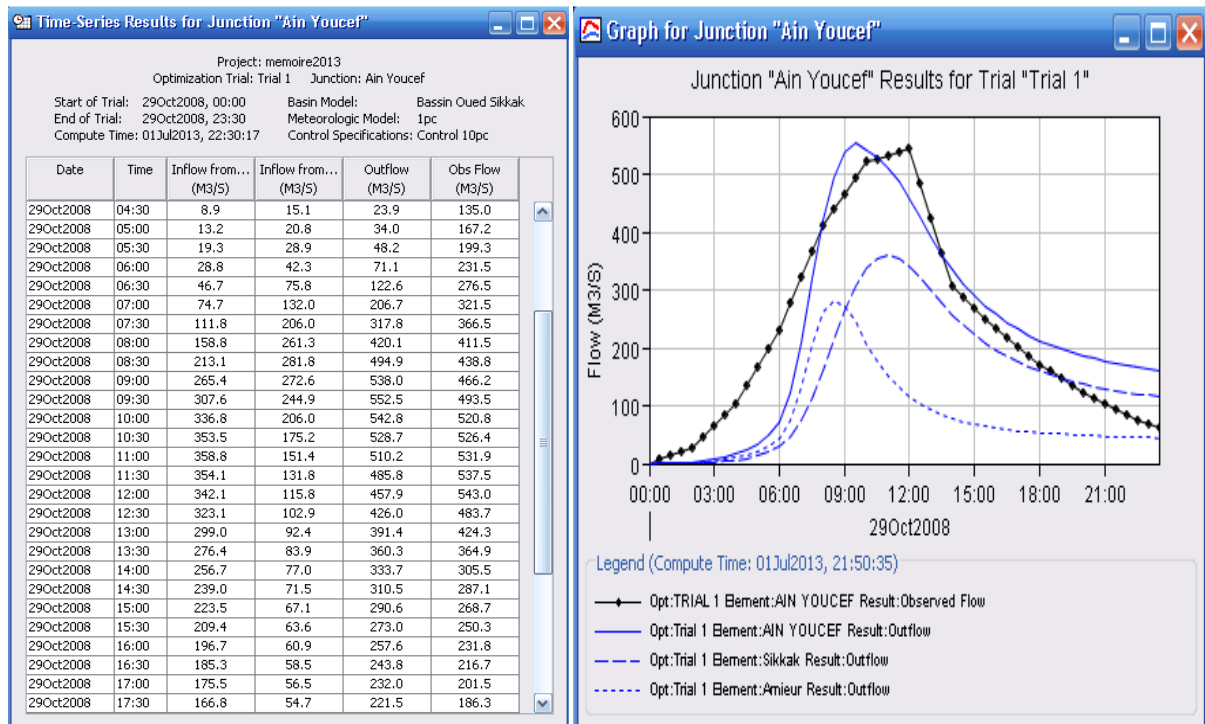


Figure VI.23 : Fenêtre du tableau de résultats et de hydrogramme de crue de bassin Sikkak exutoire Ain youcef

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

Tableau VI.4 : Comparaison des résultats obtenus de chaque site d'étude pour la fréquence de 1%, de

BASSIN VERSANT	Débit de pointe (m3/s)	
	Calculé	Simulé
SB 01	470,9	358,8
SB 02	220,76	281,8
L'exutoire	610,67	552,5

Sur les graphes suivants nous avons présentent les débits de chaque fréquence à la station de Tlemcen dans le cas des précipitations fréquentielles simulé par le modèle HEC-HMS et les débits calculé par les formules empiriques.

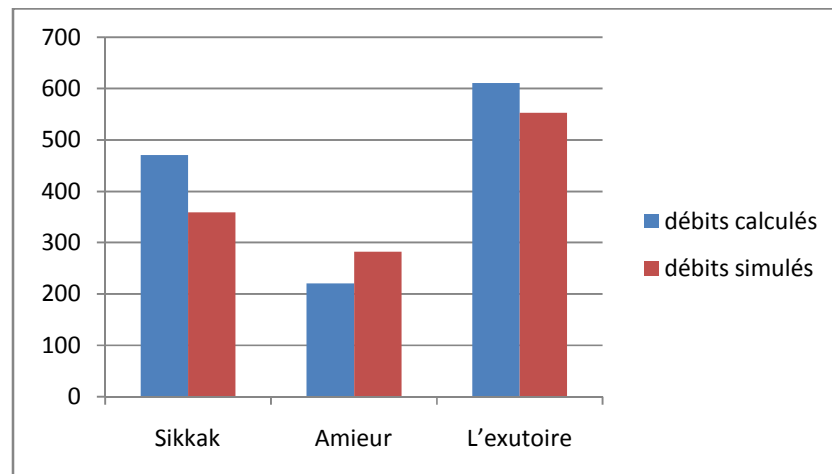


Figure VI.24 : Débits calculés et simulés à chaque sous bassin a fréquence d'étude 1%

VI.15 Conclusion et recommandations

A partir des résultats obtenus, on remarque que le modèle HEC HMS donne des résultats comparables avec ceux obtenus par les formules empiriques pour la fréquence de 1%.

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 dans le modèle, demandent des paramètres qui ne sont pas toutes disponibles.

La simulation donne un débit de pointe de fréquence 1% égal à **552,5 m³/s** relativement assez comparable au résultat correspondant obtenu par les formules empiriques **610,67 m³/s** au niveau de la station d'Ain youcef.

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 intégrées.

CONCLUSION GENERALE



CONCLUSION GENERALE

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès 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 ouvrages hydrauliques, de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique du bassin versant étudié.

L'outil de modélisation hydrologique 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 la méthode de SCS (Soil Conservation Service) puisqu'elle est simple à appliquer et qui n'exige pas beaucoup de paramètres comme les autres méthodes incluent sur ce modèle.

Notre travail est basé sur l'évaluation des débits des crues estimés par le modèle HEC-HMS et compare ses résultats avec les hydrogrammes observés 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.

A partir des résultats obtenus, on remarque que le modèle HEC HMS donne des résultats comparables avec ceux obtenus par les formules empiriques pour la fréquence de 1%.

La simulation donne un débit de pointe de fréquence 1% égal à 552,5 m³/s relativement assez comparable au résultat correspondant obtenu par les formules empiriques 610,67 m³/s au niveau de la station d'Ain Youcef.

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 bassins versant qui ne comporte aucune station hydrométrique, (aux bassins versant non jaugés).

BIBLIOGRAPHIE



Bibliographie

BENEDDINE Iakhdar, 2012, "*Modélisation du fonctionnement hydrologique et des processus d'érosion et de transport des sédiments dans le bassin de la Tafna*", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf.

BENINA Touabia, 2005, "*Manuel Pratique d'hydraulique*", Institut de l'ENSH Blida.

BOUANANI Abderrazak, 2004, "*Hydrologie, Transport solide et Modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie)*", thèse de doctorat d'Etat, université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.

CHAUMONT M. "*Principes et méthodes en hydroclimatologie*", Université d'Alger

Hydrologic Engineering Center, 2000, "*Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Technical Reference Manual*"

Hydrologic Engineering Center, 2002, "*Hydrologic Modelling System HEC-HMS, Applications Guide*".

Hydrologic Engineering Center, 2006, "*Hydrologic Modelling System HEC-HMS, User's Manual*",

Hydrologic Engineering Center, 2010, Version 3.5, "*Hydrologic Modeling system HEC-HMS, Application Guides*".

Hydrologic Engineering Center, 2010, Version 3.5, "*Hydrologic Modeling system HEC-HMS, User's Manual*"

LIAMAS José, 1993, "*Hydrologie générale: principes et applications*", 2ème édition, édition Gaëtan Morin, Québec Canada.

MESSAK Abdelkader, 2011, "*Modélisation Pluie-Débit des bassins versants de l'oued Mina Application du modèle hydrologique Hec-Hms*", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf.

MOKADMI Saleh, 2012, "*Etude hydrologique et modélisation du transport solide en suspension dans le sous bassin versant de l'oued Mekerra*", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf.

MUZY André avec la participation de **HIGY Christophe, 1998**, « *Hydrologie Appliqué* ». Office Federal de l'éducation et de la science/Suisse, Edition H.G.A, Bucarest.

SARI Ahmed Abdelwahed, « *L'hydraulique de surface, cours et exercices* », Université de Bebbouze. Alger.

Séminaire-retenu Collinaire, 2009; « *Hydrologie des Retenues Collinaires* », Corne d'or. TIPAZA.

SOUKATCHOFF Merriem, « *Eléments d'hydrologie et hydrogéologie* », Ecole des mines de NANCY.

Agence Nationale des Ressources Hydriques, « *annuaire hydrologique 1971-1972* », 1973, Algérie.

ADJIM Hayat, juillet 2003 ; « *Evaluation des ressources hydriques superficielles du bassin versant de la Tafna* », mémoire de Magister, université de Tlemcen.

HAMLET AEK, 2005 ; « *CONTRIBUTION A LA GESTION DES RESSOURCES HYDRIQUES DES BASSINS VERSANTS (BASSIN DE LA TAFNA) PAR L'APPLICATION DU MODELE «SWAT»* », mémoire de Magister, université d'ORAN.

ANNEXES



ANNEXE 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.

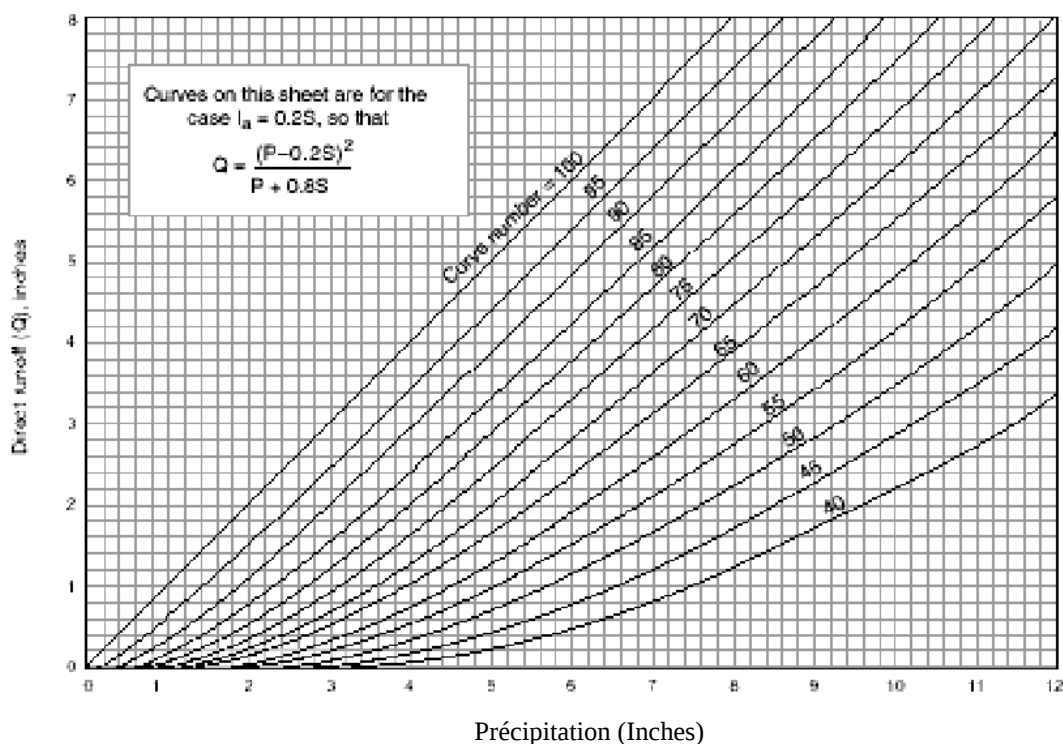


Figure N° AI-1: Graphique de l'écoulement superficiel en fonction de la précipitation journalière par la méthode du SCS Curve Number.

Tableau N° AI-1: les valeurs du CN

Utilisation de la Terre			Groupe hydrologique du sol			
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