

N° d'ordre :

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers
Département de Géologie**



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master académique en Sciences de la Terre.

Option : Hydro-système et ressources en eau.

Thème :

**Modélisation pluie-débit cas de bassin versant de L'oued Harrezza. Wilaya
de Ain defla Nord-Ouest Algérien**

Présenté par :

-HICHOIR Mustapha

-FETATI Zakarya

Dirigé par :

-M^{me} BELKHIR Khadidja

Soutenu le 23/06/2024 devant la commission d'examen :

Jury de soutenance :

Nom	prénom	Grade	Qualité	université
Mme. Bakhti	Amel	MCB	Président	Oran2
Mr. Bergan	Cheikh	MAB	Examineur	USTO
Mme. Belkhir	Khadidja	MAA	Encadreur	Oran2

Oran, 2024

Remerciements

Je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la santé, et son soutien durant les périodes les plus difficiles.

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à mon encadrante, Mme Belkhir Khadidja. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour avoir supervisé ce mémoire, pour ses précieux conseils, et pour son aide tout au long de mon travail.

Je remercie Mme Bakhti pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

J'exprime également toute ma gratitude à M. Bergan pour avoir accepté de faire partie de ce jury et d'examiner ce travail.

Je souhaite remercier toute l'équipe du département de géologie pour l'attention particulière portée à ce travail, ainsi que pour leur aide. Je remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE :

Introduction Générale :	1
Chapitre I : APERÇU GENERAL SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE	4
Introduction :	4
1. Cycle hydrologique :	4
2. Les modèles hydrologiques :	5
1) Définition :	5
2) Principe des modèles hydrologiques :	5
3) Pourquoi du modèle hydrologique :	6
4) Utilisation des modèles hydrologiques :	6
5) Caractéristiques intrinsèques d'un modèle hydrologique :	6
6) Classification des modèles hydrologiques :	7
7) HEC-HMS :	12
8) La fonction de transfert SCS UH (Hydrogramme unitaire du SCS) :	14
9) Le concept de base:	15
10) Développement du modèle :	15
11) Représentation du modèle de la pluie :	19
12) Pluie hypothétique basée sur la fréquence :	19
13) Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur :	20
14) Le module du débit de base :	21
15) Le module de routage :	22
16) La fonction objective :	Erreur ! Signet non défini.
17) La fonction d'optimisation automatique :	23
18) Justification du choix du modèle :	23
Conclusion :	24
Chapitre II. Description de la zone d'étude	4
Introduction :	26
1. Situation géographique	26
1.1 Présentation générale de la région hydrographique « cheliff zahrez » :	26
1.2 Situation géographique de l'oued du haut cheliff :	26
1.3 Situation géographique de sous bassin de l'oued Harrezza :	26
2. Le contexte géologique du bassin du Harrezza :	28

2.1. Le cadre géologique régional :	28
3. Hydrogéologie :	29
4. Ressources en eaux :	30
5. Géomorphologie et Morphométrie :	31
a. Paramètres géométriques	32
b. Caractéristiques de forme	33
b. Indice de pente et dénivelée :	36
6. Climatologie :	37
6.1 Les précipitations :	37
6.2 Etude de la température	39
6.3. L'humidité	40
6.3 Le régime climatique :	41
6.4 Les Précipitations extrêmes :	42
Chapitre III:	55
Mise en œuvre du modèle HEC-HMS	55
1-Introduction :	55
2-Le processus de fonctionnement :	55
3-Fonctionnalités :	55
4-Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS :	57
4.1 Curve Number CN :	58
4.2 Calcule le Temps de concentration TC :	59
5-Calibration du modèle : (Crue 20_30 septembre 1994)	63
6. validation du modèle hydrologique (Crue novembre_2007) :	67
6.1 Après validation	68
Conclusion :	70
Conclusion générale :	72

Liste Des Figure :

Chapitre 1 : APERÇU GENERAL SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Figure 1 : Le cycle hydrologique

Figure 2 : Les différentes approches de modélisation

Figure 3 : Diagramme de HEC-HMS

Figure 4 : Séparation de la pluie (P) en ruissellement (Q), pertes

Figure 5 : Facteurs de réduction des hauteurs déduits à partir des courbes HDF

Figure 6 : Averse hypothétique de type SCS

Chapitre II: Description de la zone d'étude

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

Figure 2: Cadre géologique (Perrodon 1967 - Mattauer 1958).

Figure 3: Les principales formations aquifères de la nappe du Haut Chélif (ABH,CZ 2001).

Figure 4: Carte géomorphologique de la zone d'étude.

Figure 5: Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques du bassin Oued Chélif Harrezza.

Figure 6: Variation des précipitations moyennes mensuelles du bv Harrazza(1991-2010).

Figure 7 : Variation annuelle des précipitations du bv Harrezza (1991-2010).

Figure 8 : Histogramme des précipitations saisonnières du bv Harrezza (1991, 2010).

Figure 9 : Température moyenne mensuelle de la station de Harrezza Barrage (1996-2009)

Figure 10 : Variation de l'humidité mensuelle moyenne de la station Khemis-Miliana 1975-2007

Figure 11 : Diagramme Ombrothermique de la station de Harrezza Barrage (1991/2010).

Figure 12 : localisation des stations pluviométriques de la zone d'étude

Figure 13 : Représentations des cumuls simples des stations pluviométriques

Figure 14 : Les pluies maximales journalières station Arib chleff période (1973/2010)

Figure 15 : Les pluies maximales journalières station EL ABABSSA période (1973/2010)

Figure 16 : Ajustement des pluies maximales journalières à différentes loi (station Arib chleff période (1973/2010)

Figure 17 : Ajustement des pluies maximales journalières à différentes loi (station EL Ababssa période (1973/2010)

Figure 18 : Représentation des courbes IDF et le calcul de l'intensité I (la station Arib Cheliff)

Figure 19 : Représentation des courbes IDF et le calcul de l'intensité I (la station el Ababssa)

Chapitre III : Mise en œuvre du modèle HEC-HMS

Figure 1 : Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente le Bassin versant et leurs sous bassins

Figure 2 : Curve Number (CN) du bassin versant Oued Harrezza

Figure 3 : Fenêtre de donnée de surface ; méthode de perte ; méthode de transformation

Figure 4 : Fenêtre de caractéristiques géométriques des talwegs et cours d'eau

Figure 5 : Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps

Figure 6 : Fenêtre de donnée de précipitations. Répartition temporelle

Figure 7 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- sous bassin 7.

Figure 8 : Fenêtre représente les résultats de simulation - sous bassin 7

Figure 9 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- sous bassin5

Figure 10 : Fenêtre représente les résultats de simulation - sous bassin 5

Figure11 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- l'exutoire (avant calibration)

Figure 12 : Fenêtre représente les résultats de simulation - l'exutoire (avant calibration)

Figure 13 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- l'exutoire (après calibration)

Figure 14 : Fenêtre représente -Critères de performance (critère de Nash et du coefficient de détermination) après calibration

Figure 15 : Hydrogrammes des crues des événements avant validation du modèle

Figure 16 : Fenêtre représente le volume de la crue simulée- débit de point-Critères de performance avant validation

Figure 17 : Hydrogrammes des crues des événements après validation du modèle

Figure 18 : Fenêtre représente -Critères de performance (critère de Nash et du coefficient de détermination) après validation

Liste Des Tableaux :

Chapitre 1 : APERÇUE GENERAL SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Tableau 1 : Type d'occupation de sol et son CN associé

Tableau 2 : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN

Chapitre 2 : Description de la zone d'étude

Tableau 1 : Caractères morphologiques des sous bassins versants du Harrazza

.Tableau 2 : les altitudes caractéristiques de sous bassin

Tableau 3 : la dénivelée spécifique qui sert de base à une classification proposée par l'ORSTOM

.Tableau 4: indice de pente et classes de relief des sous bassins

Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour la période de 1991-2010(ANRH, Alger

Tableau 6: Humidité relative mensuelles moyenne à la station de Khemis Miliana 1975-2007 .((ANRH

Tableau 7: moyenne mensuelle et annuelle des précipitations et températures de la station (Harrezza Barrage pour la période 1991-2010 (ONM, Alger

Tableau 8 : données d'observations disponibles pour deux stations (Aribechlef, Ababssa) et .(pour une période de trente white ans (1973_2010

Tableau 9 : Paramètres statistiques des pluies maximales journalières

(Tableau 10 : Les pluies maximales journalières station El Ababssa periode (1973/2010

(Tabeau 11 : Les pluies maximales journalières station Aribchleff periode (1973/2010

Tableau 12 : Intensités maximales de durée t(h) et période de retour (ans) (station Arib Cheliff)

Tableau 13 : Intensités maximales de durée t(h) et période de retour (ans) (station EL Ababssa)

Chapitre 3 : METHODOLOGIE ET APPLICATION DU HEC-HMS

Tableau 1 : Données de base des sous-bassins versants

Liste des abréviations :

HEC-HMS: Hydrology Modeling System

IDF: intensités_ durée _fréquence

HDF: Height-Duration-Frequency

CN: curve number

ANRH : agence nationale de ressources en eau

S.C.S : Soil Conservation Service

Abstract:

This study presents a flood estimation model for wadi Harrezza in upper Cheliff watershed, North West of Algeria. To ensure the overall consistency of simulated results, it is necessary to develop a validation process, particularly in regions where data are scarce or limited and unreliable. To this we must calibrate and validate the model over the hydrograph as measured at the output. Calibration and validation processes were carried out using different sets of data (CN, MuskingumK and Muskingum X). Evaluation on the performance of the developed flood model derived using HEC-HMS (hydrologic modelling system) yield a correlation coefficient R^2 close to 1 and the Nash–Sutcliffe efficiency. We limit ourselves to modelling flood of short duration for which the process of evapotranspiration is negligible. Several events have been tested, including one to calibrate and one to validate the model. So it can be said that using the HEC-HMS model had the highest efficiency in with the values of these parameters calibrated, based on objective functions (percent error in peaks), with R^2 value is 0.90 and the Nash-Sutcliffe efficiency value is 0.91.

Key words: calibration, flood modelling, HEC-HMS, validation, Nash-Sutcliffe

Résumé :

Cette étude présente un modèle d'estimation des crues de l'oued Harrezza dans le bassin versant du haut Cheliff, au nord-ouest de l'Algérie. Pour garantir la cohérence globale des résultats simulés, il est nécessaire de développer un processus de validation, en particulier dans les régions où les données sont rares ou limitées et peu fiables. Pour cela il faut calibrer et valider le modèle sur l'hydrogramme tel que mesuré en sortie. Les processus de calibrage et de validation ont été réalisés à l'aide de différents ensembles de données (CN, Muskingum K et Muskingum X). L'évaluation des performances du modèle d'inondation développé dérivé à l'aide de HEC-HMS (système de modélisation hydrologique) donne un coefficient de corrélation R^2 proche de 1 et l'efficacité de Nash – Sutcliffe. Nous nous limitons à modéliser des crues de courte durée pour lesquelles le processus d'évapotranspiration est négligeable. Plusieurs événements ont été testés, dont un pour calibrer et un pour valider le modèle. On peut donc dire que l'utilisation du modèle HEC-HMS a eu la plus grande efficacité avec les valeurs de ces paramètres calibrées, sur la base de fonctions objectives (pourcentage d'erreur dans les pics), avec la valeur R^2 est de 0,90 et la valeur d'efficacité de Nash-Sutcliffe est de 0,91.

Mots clés : calibrage, modélisation des inondations, HEC-HMS, validation, Nash-Sutcliffe

Introduction Générale :

Introduction Générale :

Dans un bassin versant, la transformation de la pluie en débit résulte de nombreux mécanismes complexes qui opèrent simultanément à différentes échelles spatiales et temporelles. C'est dans ce contexte que le modèle pluie-débit s'avère indispensable. En effet, un modèle construit à partir des chroniques de pluies observées peut générer des débits proches des débits réels observés. Ainsi, à partir des observations de la pluie tombée, il est possible de reproduire (ou de prédire) la réponse en débit du bassin versant.

La modélisation pluie-débit permet de décrire la transformation de ces pluies en débits dans les cours d'eau d'un bassin versant en tenant compte de la réalité du terrain. Cette transformation nous permet de maîtriser la prévision des débits pour deux objectifs distincts :

- Une bonne exploitation des aménagements hydrauliques. L'utilisation régulière de la prévision de débit permet d'optimiser la régulation des infrastructures disposant d'une certaine capacité de stockage, de procéder à des vidanges préventives lors des crues, d'éviter des déversements et d'augmenter les performances globales d'un aménagement.
- Assurer la sécurité des populations et des biens. La modélisation constitue une aide efficace à la décision lors de situations de crise.

Notre modélisation pluie-débit est appliquée à une partie du bassin versant de haute Cheliff, plus précisément à l'Oued Harezza. Ce cours d'eau est très important et a connu des événements hydrologiques extrêmes. Ces crues sont intéressantes à analyser tant sur l'aspect de leur forme que sur leur dynamique.

Le bassin versant de l'Oued Harezza est surveillé par des stations pluviométriques et hydrométriques. Le principe de la modélisation pluie-débit à l'aide du logiciel HEC-HMS permet d'obtenir des informations sur le fonctionnement du système hydrologique du bassin versant.

Notre mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre : décrit les notions de modélisation hydrologique.

Introduction Générale :

Le deuxième chapitre : présenté la zone d'étude : les caractéristiques géographiques topographiques et climatiques ainsi l'analyse des pluies journalières maximales et l'établissement des courbes IDF.

Le troisième chapitre : et dernière partie sera donc réservée à l'application du modèle hydrologique HEC-HMS au bassin versant de L'oued Harezza où on décrit l'utilisation du modèle ainsi que son application au bassin versant.

Chapitre I :

APERÇUE GENERAL SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Chapitre I : APERÇU GENERAL SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

Introduction :

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

I.1 Cycle hydrologique :

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

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

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

- Détermination des zones inondables suite à une éventuelle crue

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

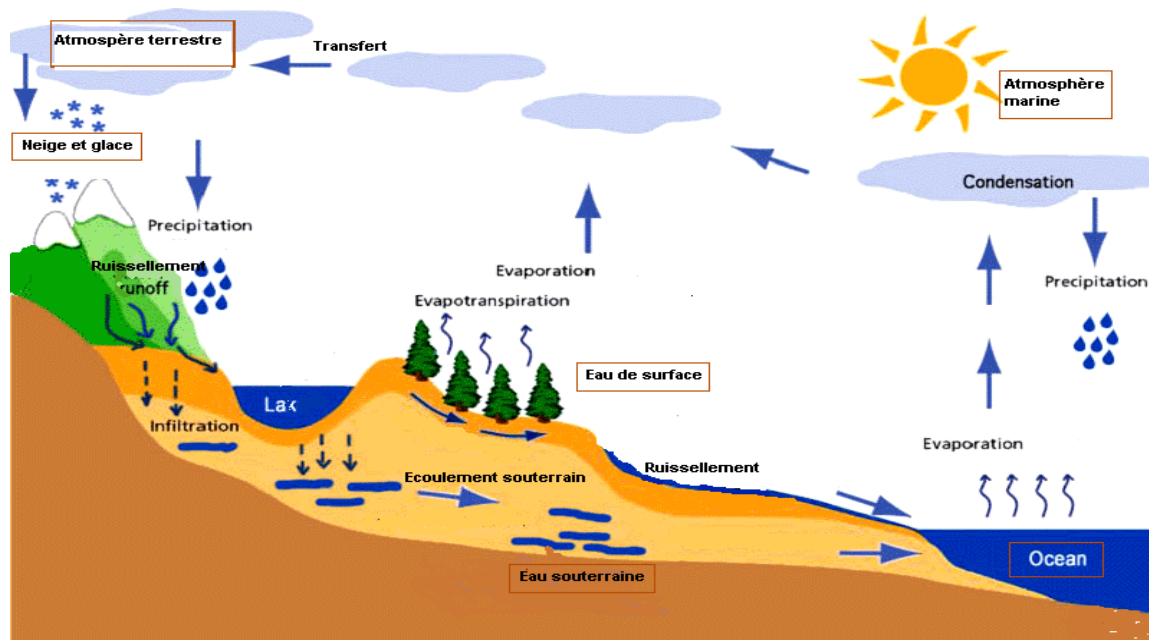


Figure 1 : Le cycle hydrologique.

I.2 Les modèles hydrologiques :

1) Définition :

Un modèle hydrologique, ou modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles dérivant du climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, séries qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique). De nombreux modèles hydrologiques ont été développés depuis la fin des années 1960. Le choix du type de modèle à utiliser dépend généralement de l'objectif de modélisation ainsi que des données d'entrées disponibles.

2) Principe des modèles hydrologiques :

Les modèles hydrologiques permettent donc de transformer des séries décrivant le climat d'un bassin versant (typiquement des séries de précipitations et de températures) en une série de débits. Cette transformation est souvent divisée en deux parties :

Une première partie souvent appelée la "production", qui consiste en la détermination de bilans d'eau à l'échelle du bassin versant. Ce bilan permet notamment de répartir la pluie brute

observée (la totalité de la pluie qui est tombée sur le bassin versant et qui est mesurée par un ou plusieurs pluviomètres) en pluie "nette" (la proportion de la pluie brute qui participe au débit du bassin versant étudié), en quantité d'eau évapotranspirée et en quantité d'eau stockée par le bassin versant.

Une deuxième partie souvent appelée le "transfert" ou "le routage", qui consiste à répartir dans le temps la quantité d'eau participant au débit du bassin versant étudié.

3) Pourquoi du modèle hydrologique :

Les modèles hydrologiques, sont nés bien avant l'avènement de l'informatique ils sont utilisés soit pour effectuer des prévisions. Soit pour dimensionner des ouvrages ou enfin pour délimiter des zones inondables. On peut distinguer trois types d'utilisation de la modélisation hydrologique à savoir :

La modélisation comme outils de recherche dans ce cas elle peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versant peuvent alors être confrontés aux mesures.

La modélisation comme outils de prévision elle servira alors à anticiper les évolutions futures du débit il s'agit de l'utilisation opérationnelles la plus courante des modèles hydrologiques.

La modélisation comme outils d'extrapolation elle permettra alors la reconstitution des débits plausibles.

4) Utilisation des modèles hydrologiques :

Un modèle hydrologique peut être utilisé dans plusieurs contextes :

Prévision de crues.

Prévision d'étiages Prédétermination de débits extrêmes,

Études d'impact anthropique sur l'hydrologie (construction d'aménagements hydrauliques (barrage par exemple), changements d'occupation du sol, etc.).

Études d'impact de changements climatiques sur l'hydrologie.

Simulation de débits pour combler des lacunes dans les données et reconstituer des séries de débits historiques.

5) Caractéristiques intrinsèques d'un modèle hydrologique :

Chaque modèle traite le problème avec un point de vue qui dépend de sa finalité. Cependant, quelques caractéristiques fondamentales concernant le découpage dans le temps et dans l'espace se retrouvent dans tous les modèles

- **Découpage dans le temps** Celui-ci est souvent fait par intervalles égaux. On différencie trois pas de temps :

- **Pas de temps de fonctionnement ou de calcul** Il correspond à celui des données d'entrée. C'est donc le plus fin et celui auquel l'on se réfère pour un modèle donné.
- **Pas de temps de calage** c'est celui utilisé pour le calcul des différents critères statistiques et pour le calage des paramètres du modèle. Il correspond généralement au pas de temps des grandeurs sorties (débits).
- **Pas de temps d'utilisation** Il peut différer des deux précédents et dépend essentiellement de l'utilisation que l'on fait du modèle.

L'utilisation de plusieurs pas de temps, mensuel, journalier et par événements, permet de mieux appréhender les phénomènes physiques. D'après Ibiza (1988), la description phénoménologique fine et complète n'est possible qu'aux petits pas de temps inférieurs à l'heure. Au pas de temps journalier, les différents écoulements rapides se sont déjà regroupés. On ne possède donc plus d'informations sur la forme de l'averse et l'on doit se baser sur une substitution par une forme moyenne d'averse pour un climat donné. Au pas de temps mensuel, la détermination des écoulements se base sur des considérations encore plus globales et les circonstances particulières de chaque événement ne sont plus apparentes. Le nombre de paramètres augmente au fur et à mesure que la description des phénomènes devient plus précise donc que le pas de temps s'affine.

6) Classification des modèles hydrologiques :

Le terme de modèle recouvre une large variété d'outils, à la philosophie et aux objectifs différents. Les approches habituellement utilisées dans la modélisation pluie-débit apparaissent en sombre dans la (figure2).

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

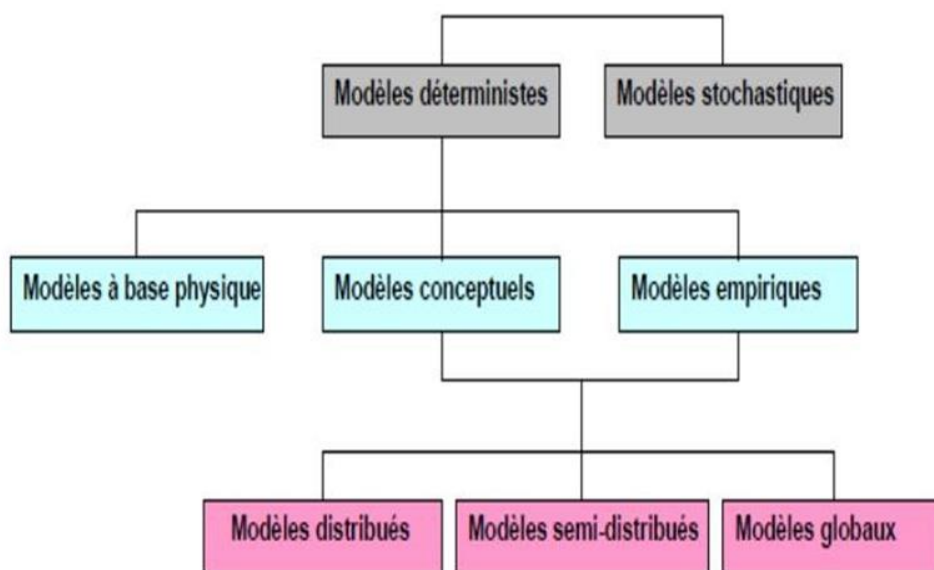


Figure 2 : Les différentes approches de modélisation.

6.1. Modèles stochastique :

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelquefois même sur les processus en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée, qu'il s'agisse de l'hydrologie ou de l'environnement. Ainsi Jensen (1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments.

6.2 Modèles déterministes :

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variables indépendantes d'entrée du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variable permettant de caractériser l'état du système modélisé, par exemple : le niveau de remplissage des différents « réservoirs » d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols...etc.) et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant).

6.3 Modèles à base physique :

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. Certains modèles comme le SHE tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

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

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

6.4 Modèles boîtes noirs :

(« Black Box » ou « Data-Driven » en anglais) - On ne cherche pas à identifier ou à comprendre les mécanismes - On ajuste des fonctions de transfert entre variables d'entrée et variable de sortie.

- ❖ Avantages - réseau de mesures minimal (longues séries temporelles, mais en peu de points) - nombre d'outils disponibles (régression, réseaux de neurones, Fourier, ondelettes, théorie du chaos) - modèles très rapides (important pour le temps réel !)
- ❖ Inconvénients - productivité parfois douteuse (Ex. Fourier pour la prévision des débits) - les paramètres de la fonction de transfert n'ont généralement pas de signification physique - si la physique change, il faut tout recommencer de zéro Que font intervenir l'intelligence artificielle on peut citer le réseau de neurones Les algorithmes génétiques, le datamining, neuroflou, logique flou, ARIMA, SARIMA

... etc.

6.5 Modèles paramétriques :

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

6.6 Modèles empiriques :

Le type de fonctions reliant les variables est fixé à priori (fonctions polynomiales, fonctions

sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre dupolynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées.

6.7 Modèles analytiques :

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exempletype est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaire entre les variables [Benhamidcha E.2019].

6.8 Modèles conceptuels :

Les modèles conceptuels considèrent en générale le bassin versant, après quelques simplifications du cycle de l'eau, comme un ensemble de réservoirs interconnectés. Cetype de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement.

6.9 Modèles globaux :

Dans un modèle global le bassin est considéré comme une entité unique. Des relations empiriques (issues de l'expérience) relient les entrées et les sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix trèsattractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

6.10 Modèles spatialisés :

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à des différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties où les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives) Nous pouvons classer les modèles spatialisés en trois grands types :

- a. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés.
- b. Modèles physiques spatialisés.
- c. Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés.

a. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés

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

Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous-bassins) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont en aval. Ainsi, on a la possibilité de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et la propagation des débits à l'intérieur du bassin. C'est le cas du modèle CEQUEAU [Morin] et du modèle HEC-HMS.

b. Modèles physiques spatialisés :

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

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

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

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

A partir d'un découpage de l'espace en mailles de taille adaptée au problème à traiter, ils simulent les diverses composantes du cycle de l'eau sur chaque maille (ruissellement, infiltration, évapotranspiration) et convolent les transferts de maille à maille, jusqu'au réseau hydrographique constitué. Ces modèles sont complexes à mettre en œuvre et exigent d'importantes quantités de données. Ils sont bien adaptés à la simulation de la diversité d'un bassin. Cependant, ces modèles ne peuvent traiter les grands bassins en raison de leur grande hétérogénéité morphologique et météorologique. Parmi ces modèles on peut citer le modèle SHE.

c. Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés :

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

- A base physique, fondée sur les processus réels mais simplifiés

- Semi-spatialisée, fondée sur une discrétisation en unités relativement homogènes, qui permettent de tenir compte de la variabilité spatiale de la structure du bassin versant. La méthode de discrétisation spatiale varie d'un modèle à l'autre : mailles carrées, sous bassins versants, éléments de versant, plans versant et canal, unités Hydrologiques ou aires contributives (modèle TOPMODEL).

6.11 Modèle pluie-débit :

Il existe un grand nombre de modèles pluie-débit, qui vont ainsi simuler un débit à l'exutoire d'un bassin versant, en utilisant la précipitation et l'Evapotranspiration potentielle (ETP) comme données d'entrées. Plusieurs auteurs ont classé les modèles en trois catégories (Beven, 2001 ; Singh and Frevert, 2006 ; Orellana et al. 2008) :

- Les modèles conceptuels considèrent le bassin versant, comme un ensemble de réservoirs interconnectés.
- Les modèles empiriques de type boîte noire, cherchent à reproduire la dynamique des variables de sortie sans tenter de décrire les processus élémentaires.
- Les modèles distribués à base physique cherchent à décrire l'ensemble des processus élémentaires en tout point du bassin versant.

La notion de modèles physiques est à opposer à celle de modèles conceptuels, ainsi que l'on oppose modèles distribués à modèles globaux au niveau de la description spatiale du Bassin versant.

Il n'y a pas de conflit entre ces différents modèles qui ont été développés à des fins différentes : les modèles physiques et distribués pour une étude plus fine des processus hydrologiques, et les modèles conceptuels pour une détermination des paramètres moyens sur le bassin étudié et des débits à l'exutoire uniquement.

7) HEC-HMS :

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

Le modèle hydrologique déterministe et conceptuel HEC-HMS (*Hydrologique Mödling System*) a pendant longtemps été un modèle essentiellement appliqué à la simulation d'un événement donné. Les versions récentes permettent de simuler en continu sur une longue période grâce à l'intégration de modules de calculs des différents processus

d'évapotranspiration, d'humidité du sol et d'accumulation/fonte de neige.

HEC-HMS est un modèle distribué qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs sous- bassins, qui sont considérés comme ayant chacune des caractéristiques homogènes. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins versants non urbanisés. Le HEC-HMS permet également de simuler et d'incorporer des réservoirs et des dérivations.

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

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

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

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

Les modules de modèles développés sous HEC-HMS permettent la prise en charge des quatre processus hydrologiques essentiels :

1. Modèles pour le calcul des précipitations
2. du volume de ruissellement
3. du ruissellement direct et des écoulements souterrains.

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

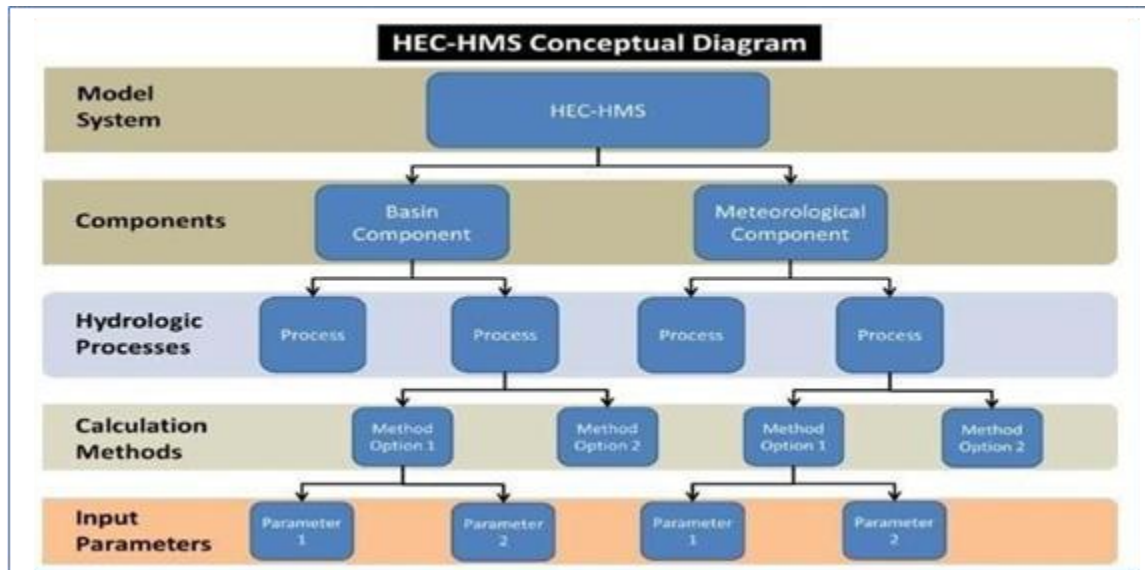


Figure 3 : Diagramme de HEC-HMS

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

8) La fonction de transfert SCS UH (Hydrogramme unitaire du SCS) :

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

$$\begin{cases} U_p = 2.08 \cdot \frac{A}{T_p} \\ T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6 \cdot T_c \end{cases} \quad (\text{Eq 01})$$

Ou :

Δt : est la durée de l'excès de précipitation,

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

9) Le concept de base:

Le SCS-CN est une méthode conceptuelle développée dans les années 1950 qui repose sur une caractérisation empirique de la relation pluie-débit. Les seules données nécessaires sont le type de sol et l'occupation du sol. Cette méthode est intégrée dans de nombreux modèles hydrologiques et d'érosion tels que SWAT, HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, 2011), AFFDEF, AGNPS (Agence de contrôle des pollutions du Minnesota, 1987) ou encore CNS. La méthode est applicable sur des bassins versants allant de 0.25 ha à 100 km² (SCS, 1972).

Ce modèle simple, qu'on nomme parfois modèle avec indice de ruissellement (Curve-Number model), a été développé au cours des années 1950 par le NRCS (Natural Resources Conservation Service), autrefois appelé SCS (Soil Conservation Service). La popularité de ce modèle est attribuable essentiellement à sa simplicité, au manque de solutions alternatives et surtout à la base de données qui existe pour la sélection des paramètres en fonction des types de sols. Bien qu'à l'origine cette méthode ait été développée pour calculer des débits pour de petits bassins agricoles et pour évaluer les impacts de différentes pratiques agricoles sur le ruissellement, elle a été subséquemment élargie et appliquée à l'analyse des bassins urbains.

10) Développement du modèle :

Le modèle du SCS s'appuie sur le concept que la précipitation totale tombant sur un bassin peut être séparée en trois composantes (voir figure II.16) : la pluie effective (Peff), la rétention qui se produit dans le bassin (F) et les pertes initiales (Ia). La relation entre la précipitation (P) et les trois composantes est assumée comme étant la suivante :

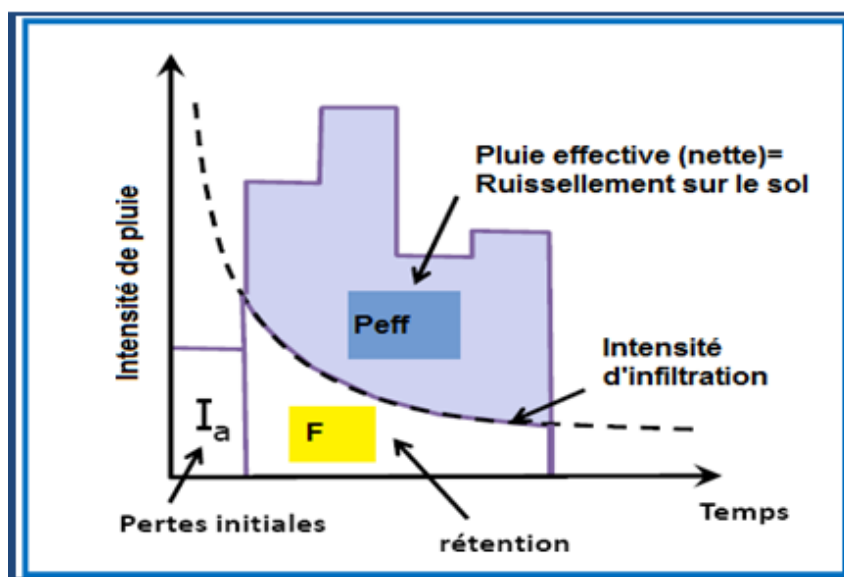


Figure 4 : Séparation de la pluie (P) en ruissellement (Q), pertes

Initiales (Ia) et les pertes par rétention (F) Méthode du NRCS

$$\frac{F}{S} = \frac{P_{eff}}{P - I_a} \quad (Eq02)$$

On appelle infiltration F la partie de la lame des précipitations P qui est absorbée par le sol et dirigée vers les couches inférieures. On appelle rétention initiale I_a (Initial abstraction) la partie des précipitations retenue dans les dépressions et absorbée par évapotranspiration. On appelle ruissellement P_{eff} cette partie d'une averse qui coule à la surface du sol pendant et immédiatement après cette averse. S représente la rétention potentielle maximale. Autrement dit, le rapport entre infiltration réelle et infiltration potentielle égale le rapport entre le ruissellement réel et le ruissellement potentiel. La rétention se produisant réellement se définit avec la relation suivante :

$$F = (P - I_a) - P_{eff} \quad (Eq03)$$

$$\frac{(P - I_a) - P_{eff}}{S} = \frac{P_{eff}}{P - I_a} \quad (Eq04)$$

En réarrangeant pour P_{eff} on trouve finalement

$$P_{eff} = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (Eq05)$$

Soulignons que tous ces paramètres sont exprimés en unités identiques (en millimètres pour le système SI ou en pouces pour le système impérial). Cette équation contient une quantité connue (P) et deux inconnues (I_a et S). On pose ensuite, en se basant sur les résultats de simulations, que la perte initiale $I_a=0,2S$. Ceci donne donc en transposant dans l'équation on obtient:

$$P_{eff} = \frac{(P - 0.2 S)^2}{(P - 0.2 S) + S} \quad (Eq06)$$

Pour chaque pas de temps, la pluie nette est la différence de la valeur de P_{eff} au début et à la fin du pas de temps.

Cette relation est l'équation de base permettant de calculer le ruissellement Q à partir de la précipitation P . Pour pouvoir évaluer la seule inconnue, S , on a développé le concept d'un indice de ruissellement CN (run off Curve Number). L'indice CN est relié au stockage S par la relation suivante:

$$h_{eff} = \frac{\left(h - \frac{1270}{CN_{II}} + 12.7\right)^2}{h + \frac{24130}{CN_{II}} - 241.3} \quad (Eq07)$$

La combinaison des équations (Eq 05 et Eq06) donne naissance à une équation permettant de calculer la hauteur de la pluie effective:

Le CN est donc simplement une transformation non-linéaire de S qui est un paramètre de stockage; il est déterminé en considérant essentiellement les types de sol en présence dans le bassin et le couvert végétal. Il est important de noter toutefois que les quantités de ruissellement pour des durées autres que 24 h. Elle est par ailleurs moins la méthode du NRCS a été développée à l'origine comme un indice de ruissellement pour des précipitations de 24 h et qu'elle doit être utilisée avec précaution pour analyse appropriée pour l'analyse de petites précipitations et il est reconnu qu'elle devient moins précise pour des quantités de pluie inférieures à 10mm.

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

Pour un bassin versant composé de plusieurs classes d'occupation du sol et de type de sols, un CN composite doit être calculé par la formule :

$$CN_{composite} = \frac{\sum A_i * CN_i}{\sum A_i} \quad (Eq08)$$

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

Tableau 1 : Type d'occupation de sol et son CN associé

Occupation de sol	Classe des sols			
	A	B	C	D
Bâtis	77	85	90	92
Chaussées	98	98	98	98
Trottoirs	98	98	98	98
Espace vert	67	78	85	89

Terres agricoles	67	78	85	89
Forêt	36	60	73	79

Alors que pour intégrer l'influence de l'humidité antécédente, on fait appel à la hauteur de pluie tombée pendant les cinq derniers jours précédant l'événement de crue (NRCS). Ensuite, on définit soit un CN normal, sec ou humide, tout en respectant le tableau ci-après:

Tableau 2 : La relation pluie antérieure et type de CN pour la méthode NRCS CN

Types de CN	Hauteur de pluie (mm) sur les 5 jours antérieurs		
	Base annuelle	Base saisonnière	
		Période de végétation	Période hivernale
CN(I) : Conditions sèches	$H < 12.5$	$H < 35$	$H < 12.5$
CN(II) : Conditions normales	$12.5 < H < 37.5$	$35 < H < 53$	$12.5 < H < 27.5$
CN(II) : Conditions humides	$H > 37.5$	$H > 53$	$H > 27.5$

En général, la perte initiale (I_a) tient compte de l'interception, du stockage dans les dépressions et de l'infiltration pendant la première partie de l'averse, avant que le ruissellement ne commence. En pratique, il n'y a pas d'écoulement superficiel jusqu'à ce que la pluie cumulée P , dépasse la perte initiale (I_a). Après le commencement du ruissellement l'infiltration réduit la rétention potentielle de la quantité d'eau infiltrée pendant l'événement.

Si l'infiltration cumulée tend vers S , l'infiltration tend vers zéro, et l'intensité de la pluie et le taux de la pluie excédentaire sont à peu près égaux. On a cherché par la suite une expression numérique des relations entre les CN pour les différentes classes d'humidité du sol. Une fois le CN connu pour ces conditions moyennes, on peut utiliser les équations (Eq.9 et Eq.10) pour évaluer le CN pour des conditions sèches (CNI) ou pratiquement saturées (CNII) :

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.334 - 0.01334 CN_{II}} \quad (Eq09)$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.4036 + 0.005964 CN_{II}} \quad (Eq10)$$

11) Représentation du modèle de la pluie :

Les données de précipitation existent sous plusieurs formes. Le modèle HEC-HMS prend en compte cette variété de présentation des données de précipitations. Pour cela, il propose sept types d'événements pluvieux, la plupart sont spécifiques aux réseaux américains de mesure des précipitations.

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

12) Pluie hypothétique basée sur la fréquence :

L'objectif de cette méthode est de définir un événement pour lequel la hauteur et la durée des précipitations sont déterminées pour une probabilité de dépassement donnée. Pour définir cet événement avec HEC-HMS l'utilisateur doit spécifier la hauteur de précipitation en chaque pas de temps pour une probabilité de dépassement choisi. Les hauteurs des précipitations peuvent être déduites à partir des courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence). HEC-HMS applique un coefficient de correction de surface aux hauteurs données par les courbes HDF. Généralement, la distribution de l'intensité des précipitations est non uniforme sur le bassin versant, la hauteur moyenne sur la surface du bassin est inférieure à la hauteur donnée par les courbes HDF. Pour remédier à ce problème, l'U.S. Weather Bureau, a défini des facteurs qui permettent d'ajuster les hauteurs données par les courbes HDF à la hauteur moyenne. Ces facteurs, exprimés en pourcentage, sont fonction de la surface du bassin et de la durée de la pluie (figure 5).

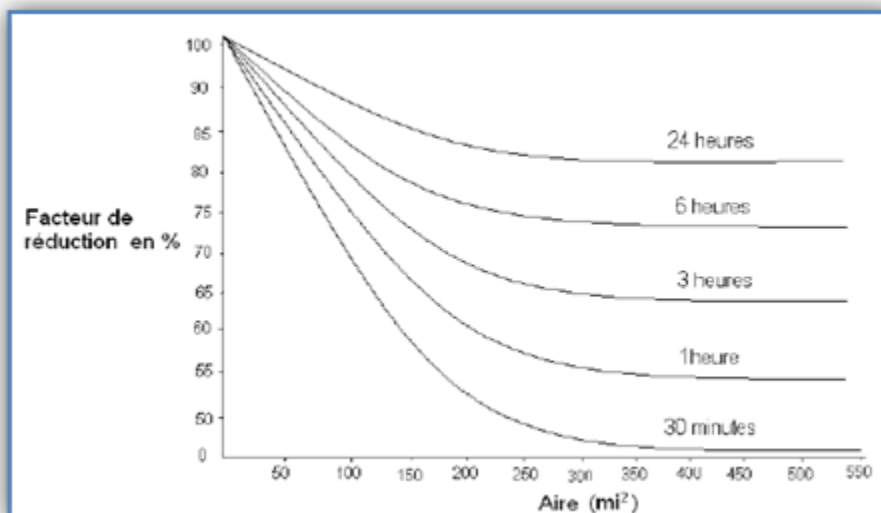


Figure 5 : Facteurs de réduction des hauteurs déduits à partir des courbes HDF

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

13) Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur :

Cette option donne à l'utilisateur la possibilité de définir la hauteur et la distribution de la pluie hypothétique. On peut aussi donner la quantité totale d'eau tombée sur le bassin versant et la fraction de cette quantité à chaque instant. Parmi les pluies hypothétiques les plus utilisées dans les simulations, figurent les pluies SCS. La figure (6) illustre le cas d'une pluie SCS de type I.

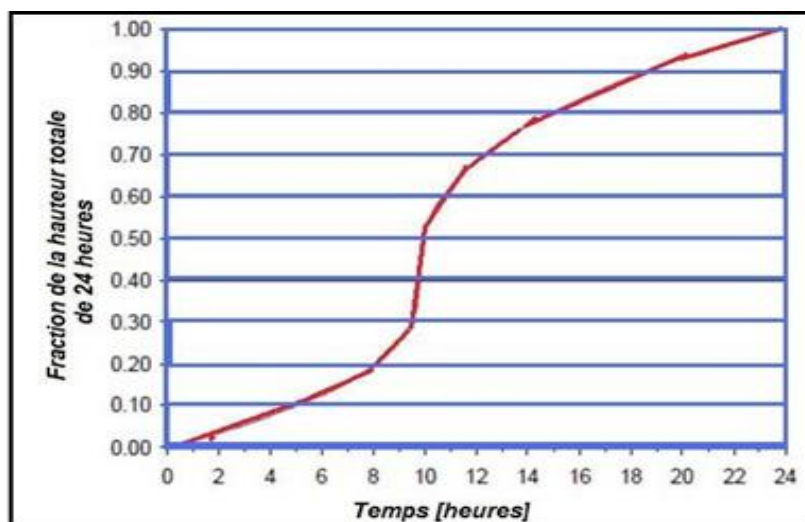


Figure 6 : Averse hypothétique de type SCS

Lorsque les méthodes de distribution d'intensité pour différentes durées de précipitations sont introuvables pour la zone d'étude, la méthode de la pluie hypothétique basée sur la fréquence inclus dans HEC-HMS a été utilisée pour créer les pluies de projet avec des périodes de retour spécifiées. Cette méthode est basée sur la méthode bloc alternatif. Par la présente, les pluies de projet sont générées sur la base de courbes IDF d'une manière que les quantités de précipitations pour n'importe quel intervalle de temps de la pluie, centrée autour de l'intensité du pic, ont une période de retour cohérente.

14) Le module du débit de base :

Celui-ci est l'un des deux modules complémentaires du modèle, à défaut duquel le HEC- HMS peut tourner, mais sa présence améliore la compréhension des mécanismes qui contrôlent le ruissellement dans le bassin sujet d'étude. Le débit de base est la contribution du réservoir souterrain dans l'écoulement, sa connaissance est importante pour modéliser la récession de l'hydrogramme avant et après la pointe de débit et pour mieux estimer le volume de crue. Trois formalismes sont proposés par le modèle :

- « Constant Monthey » : Constante mensuelle. il considère l'écoulement souterrain comme fixe pendant des durées d'un mois. Ce débit de base mensuel est donc ajouté au ruissellement direct issu des précipitations nettes. Cette méthode est très simple, mais non adaptée au contexte semi- aride où la variation des conditions de saturation des bassins versants se fait en moins d'un mois.

- « Linear Réservoir » : Réservoir linéaire. Il simule le stocke souterrain à un réservoir, ainsi il est toujours associé à la fonction de production type SMA.
- « Récession » : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est utilisée pour les bassins sou les volumes de crues ont influencés par les événements pluvieux.

15) Le module de routage :

C'est le deuxième des deux modules complémentaires, il permet de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces formalismes utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement pour la simulation (USACE, 1994).

- « Lag »;
- « Muskingum »;
- « Modified Puls »;
- « Kinematic-wave »;
- « Muskingum Cunge».

15.1 Modèle de Muskingum :

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

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2} \right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} \right) \quad \text{Eq11}$$

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

$$S_t = T_p O_t + T_p X (I_t - O_t) = T_p (X I_t + (1 - X) O_t) \quad \text{Eq12}$$

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.

16) La fonction d'optimisation automatique :

Elle sert à rechercher, sans intervention de l'utilisateur, le jeu de paramètres optimal donnant à la fonction objective sa valeur la meilleure possible. Pour exécuter cette tâche, le HEC-HMS propose 2 méthodes :

- « Univariate Gradient » : le gradient univarié, ajuste un seul paramètre à la fois en gardant les autres constants.
- « Nelder et Mead » : utilise une approche qui consiste à optimiser tous les paramètres simultanément.

En conclusion, on peut dire que la diversité des formalismes dont dispose HEC- HMS, le positionne en tête des modèles les plus robustes dans la simulation des ruissellements au sein du bassin, les plus complets dans l'intégration des différentes composantes d'écoulement et les moins exigeants de point de vue données d'entrée. En outre, sa diversité en matière de combinaisons modulaires possibles, laisse à son utilisateur la Capacité de l'adapter à ses données, ses objectifs, ses besoins mais surtout à son expérience.

17) Justification du choix du modèle :

Le choix du modèle a été dicté par plusieurs contraintes de moyens et facteurs de privilège qui font de ce modèle un bon choix. Parmi ceux les plus importants :

- Les données exigées par le modèle sont plus ou moins simples, accessibles et disponibles, donc, le modèle peut donc tourner sans soucis.
- Possibilité d'intégrer les majeurs facteurs affectant la transformation pluie-débit (morphométrie du bassin versant, occupation du sol, types de sols et humidité antérieure), et donc les résultats seront plus réalistes.

Le SCS-CN a été validée sur plusieurs bassins versants dans le monde, et ses résultats sont fiables et similaires aux modèles complexes (Benhamidcha E.2019).

Conclusion :

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

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

Chapitre II :

Description de la zone d'étude

Chapitre II. Description de la zone d'étude

Introduction :

Dans ce chapitre Nous parlerons des éléments qui composent notre zone d'étude, pour cela, nous essayerons tout d'abord de mieux positionner la zone d'étude dans un contexte géographique puis nous allons établir une étude du cadre physico-géographique, La Géomorphologie générale, Le contexte géologique et les conditions climatiques du bassin du Harezza.

1. Situation géographique

1.1 Présentation générale de la région hydrographique « cheliff zahrez » :

La région hydrographique cheliff-zahrez s'étend sur une superficie de 54000km², elle regroupe trois bassins hydrographiques :

- le côtier Dahra (3201km²)
- le bassin endoréique du zahrez (8989km²))
- et le bassin de Chéiff (437500kmm²) (ANBT, 2008)

Les bassins versants du Chéiff sont classiquement subdivisés en trois grands ensembles :

- Les bassins versant de bas Chéiff
- Les bassins versants du moyen Chéiff
- Les bassins versants du haut Chéiff auxquels appartient la région étudiée.

1.2 Situation géographique de l'oued du haut cheliff :

Le bassin versant du haut Chéiff occupe une superficie totale de 4745km², il est situé entre 35°,70 et 36°30 de latitude Nord, 2 et 3°,25 de longitude Est. Au point de vue administratif, le bassin du haut Chéiff s'étend sur la quasi-totalité de la superficie de la wilaya de Ain Defla (ANBT, 2008).

1.3 Situation géographique de sous bassin de l'oued Harrezza :

Le bassin versant de l'oued Harezza (01-17) fait partie du bassin de l'oued Cheliff (figure1). Il se situe à 120 Km à l'Ouest d'Alger, entre 2° et 2°40' de longitude Est et entre 36° et 36°40' de l'altitude Nord. D'une altitude moyenne de 500 mètres, il draine une superficie de

754 Km² L'oued Harezza parcourt une. Distance de 40,5 Km suivant une orientation Nord-Ouest. Au sud du bassin, le relief atteint une altitude de 765 mètres, tandis que le point le plus bas est à l'exutoire avec une altitude de 313 mètres. Le bassin versant est drainé par l'oued Harezza et ses affluents. Du côté Est, l'oued Dar Emial prend sa source dans le relief de Beni Zougzoug et vient se jeter dans l'oued Harezza.

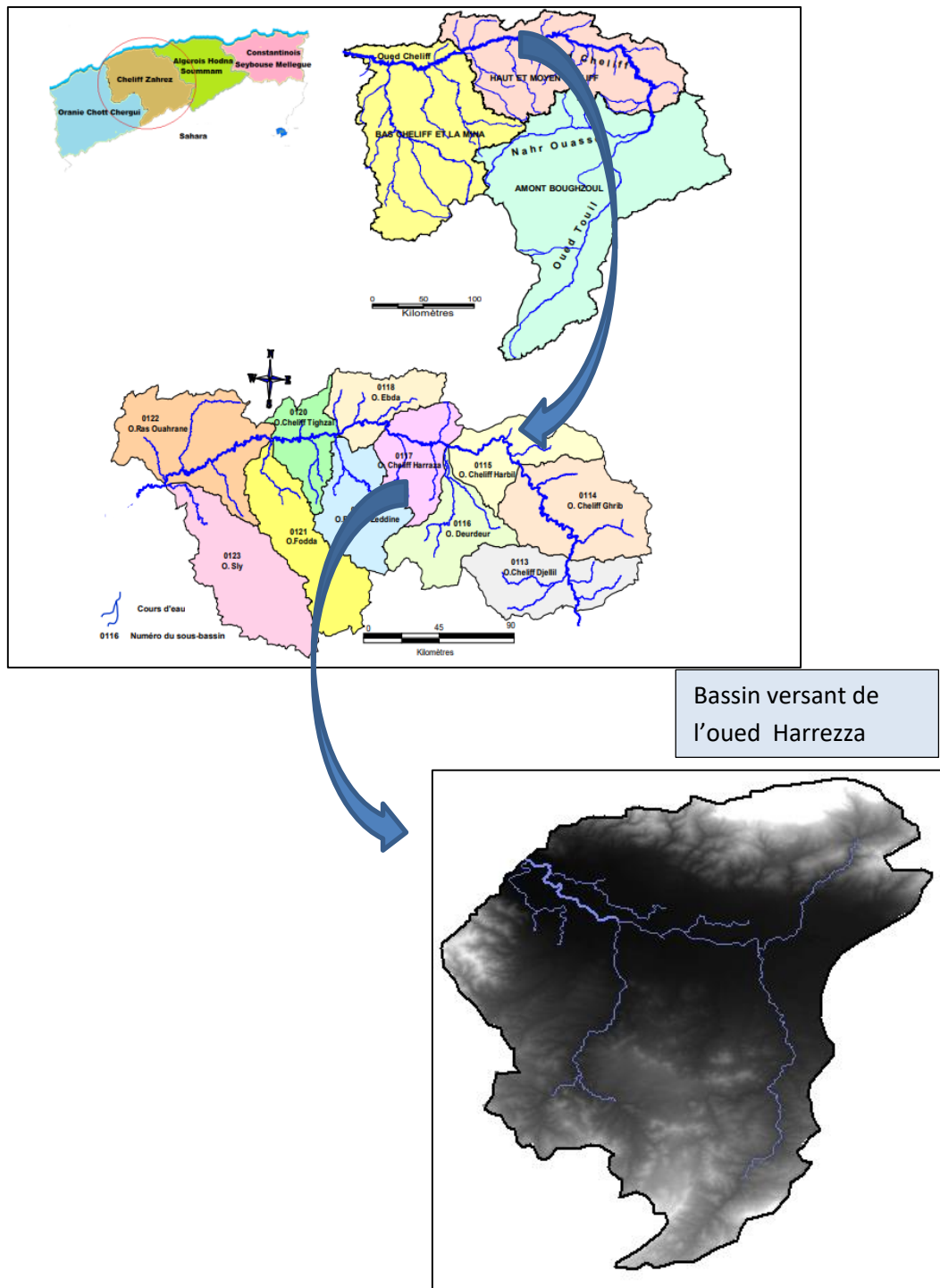


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

2. Le contexte géologique du bassin du Harrezza :

2.1. Le cadre géologique régional :

Le Haut Cheliff, situé au Nord de l'Ouarsenis, est allongé grossièrement d'Est en Ouest sur plus de 60 Km de long et une moyenne de 25 Km de large. Notre zone d'étude située dans le Haut Cheliff (plaine de Khemis-Miliana) correspond à une dépression subsidiant constituée essentiellement par des alluvions primaires et jurassiques de Zaccar et du Doui oriental.

Géologiquement la région étudiée est divisé en :

- ✓ Calcaires jurassiques
- ✓ Les aquifères du miocène
- ✓ Les aquifères du Pliocène
- ✓ Les aquifères alluvionnaires du Quaternaire

Le bassin versant de Harezza est situé dans la zone géologique comprise entre le massif schisteux de Boumaad et les premiers contreforts de l'Ouarsenis.

Cette zone comprend les massifs montagneux des Zaccars, la partie orientale du Doui, la plaine de Cheliff et les collines occidentales des Beni-Menacer.

Les reliefs, d'une altitude supérieure à 1.500 mètres, sont formés de calcaire, de schistes métamorphisés et de roches éruptives profondément entaillées par les ravins abrupts. Ils sont couverts de chênes verts et de quelques boisements et pins localisés. Les marnes offrent de plus larges collines qui constituent, avec la plaine du Cheliff, les régions cultivées. Dans la vallée, on trouve des limons argileux ainsi que des marnes et de l'argile.

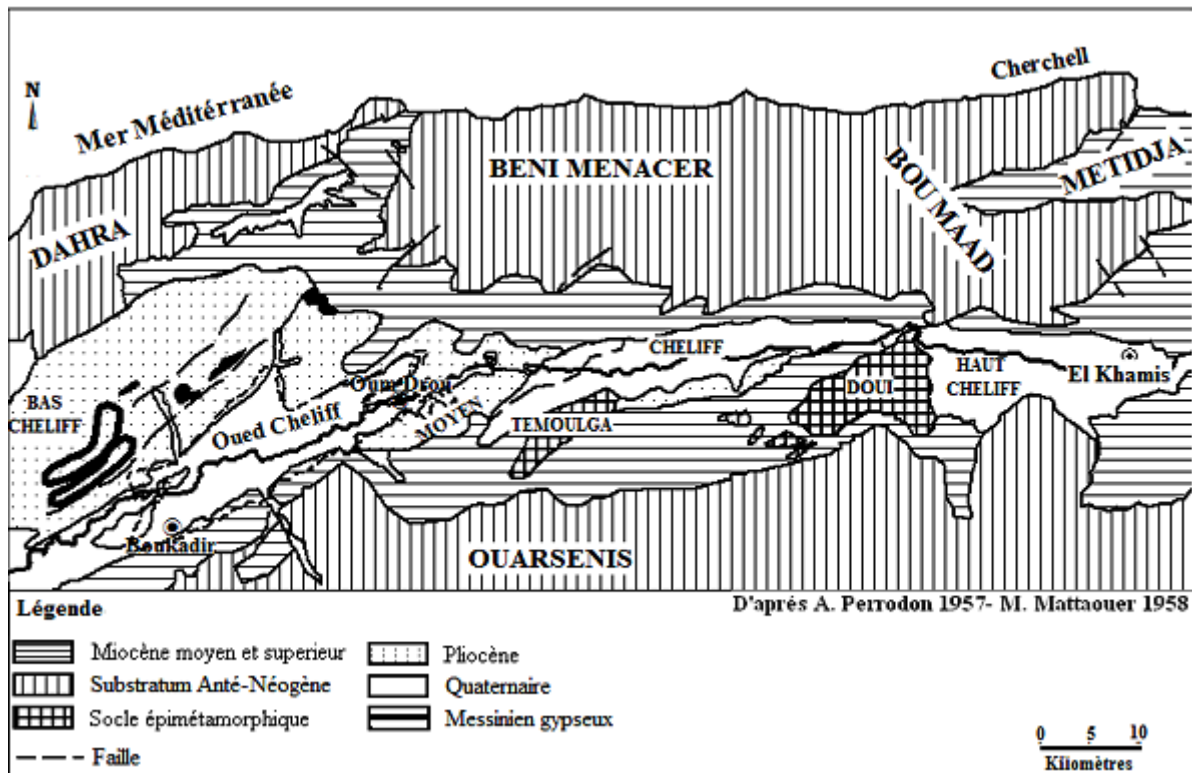


Figure 2: Cadre géologique (Perrodon 1967 - Mattauer 1958).

3. Hydrogéologie :

La plaine du Haut Chélif a fait l'objet de plusieurs études hydrogéologiques et des essais de pompage ont été effectués dans de nombreux forages.

L'examen de la série stratigraphique (Fig.08) et de ses caractéristiques lithologiques et structurales a permis de distinguer : une nappe phréatique représentée par les alluvions du Quaternaire, l'aquifère du Miocène et l'aquifère des calcaires de Djebel Zaccar ; les aquifères qui intéressent la plaine étudiée sont représentés par les alluvions Quaternaires et les grés Mio-Pliocènes.

Cet ensemble renferme une nappe très exploitée dans la plaine. Son substratum imperméable est représenté par les marnes et les argiles du Miocène.

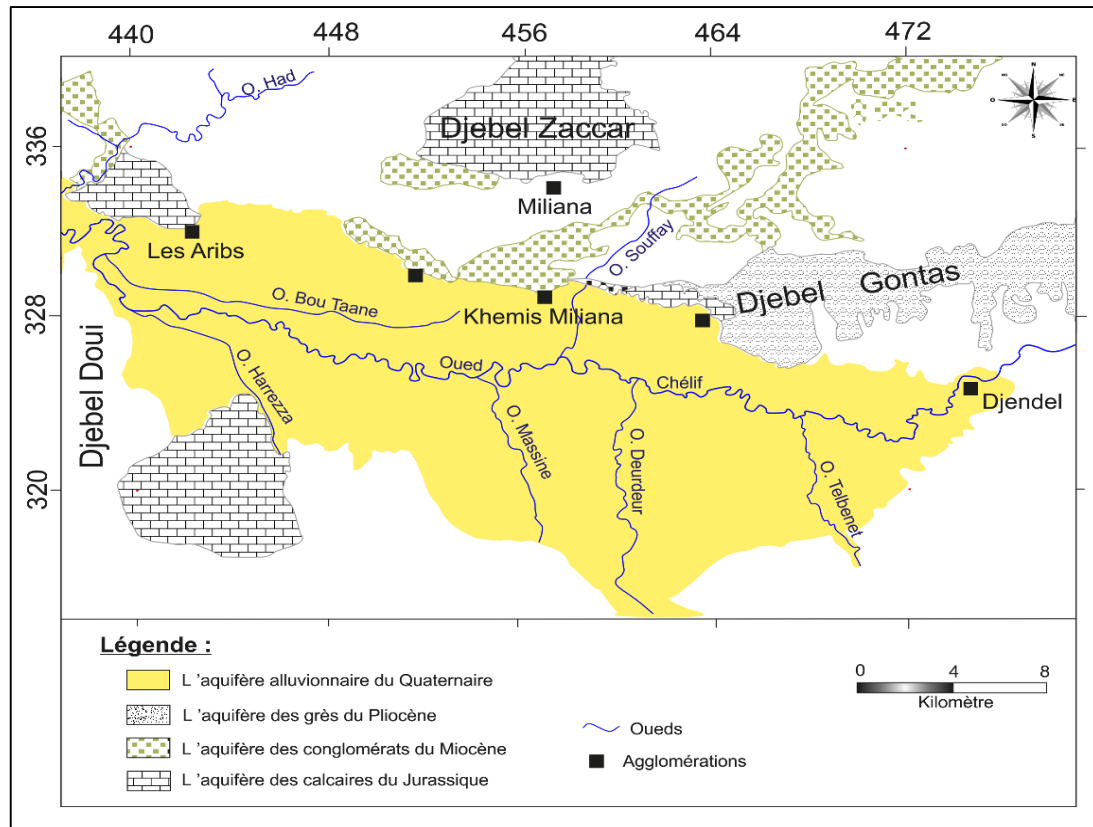


Figure 3: Les principales formations aquifères de la nappe du Haut Chélif (ABH,CZ 2001).

✓ Le couvert végétal

La couverture végétale est assez importante, elle est estimée à 45 % de l'ensemble du bassin. La végétation se trouve au Nord et au Sud de la plaine. La plaine de haut Chélif est à vocation essentiellement agricole, les arbres fruitiers en rive droite de l'oued Chélif et céréaliculture en rive gauche. Une irrigation intensive est nécessaire pendant 6 mois de l'année (Mars à Août).

On note que le bassin manque d'un couvert végétal forestier dense, seuls subsistent les forêts au sud du bassin, mais souvent dégradées. Cette absence d'une couverture végétale arbustive dense, favorise le phénomène de l'érosion et provoque des dégâts tels que, les pertes des terres cultivables et l'envasement des ouvrages hydrauliques existants au niveau de ce bassin. (Achour.1997)

4. Ressources en eaux :

Les ressources en eaux superficielles sont constituées principalement des eaux de surface du bassin versant d'oued Harezza. Les principales ressources qui convergent vers ce bassin versant sont :

- Oued Harezza :

Est également un oued du sud (Ouarsenis). Il est caractérisé par un débit élevé du fait de l'importance de sa surface d'impluvium. Dans sa partie aval, il s'écoule dans la plaine où il présente un inféro-flux en relation avec la nappe alluviale et rejoint, plus en aval, l'oued Cheliff.

- Oued Deurdeur :

Qui prend sa source dans les amonts d'Ouarsenis au sud du secteur d'étude. Il traverse la plaine sur plusieurs Km avant de confluer avec l'oued Cheliff.

- Barrage de Harezza :

Le barrage est implanté sur l'oued Harezza à environ 14 Km de la ville d'Ain Defla. Il Est destiné à satisfaire partiellement les besoins en eau d'irrigation de la Haute plaine de la Rive gauche du Cheliff, par stockage des eaux de l'oued Harezza et les eaux pompées à partir De l'oued Deurdeur par la station de Khemis.

Les caractéristiques du barrage de Harezza sont présentées comme suit :

- ✓ Apport moyen interannuel du bassin versant : 30,8 Hm³
- ✓ La capacité initiale du barrage : 70 Hm³
- ✓ La capacité estimée (2003) du barrage : 69,20 Hm³
- ✓ Volume régularisé : 23,00 Hm³/an
- ✓ Apport réel au barrage : 3,52 Hm³/an (période 1997 – 2003)
- ✓ Taux d'envasement : 1%

Destination : il est destiné à renforcer l'irrigation du périmètre du Haut Cheliff avec un volume affecté annuellement de l'ordre de 23 Hms

5. Géomorphologie et Morphométrie :

La connaissance des caractéristiques topographiques et morphologiques, telles que : la forme, le relief, la disposition du réseau hydrographique, la nature du sol et le couvert végétal

est très importante pour l'analyse du comportement hydrologique (l'écoulement, l'infiltration ... etc.) d'un bassin versant.

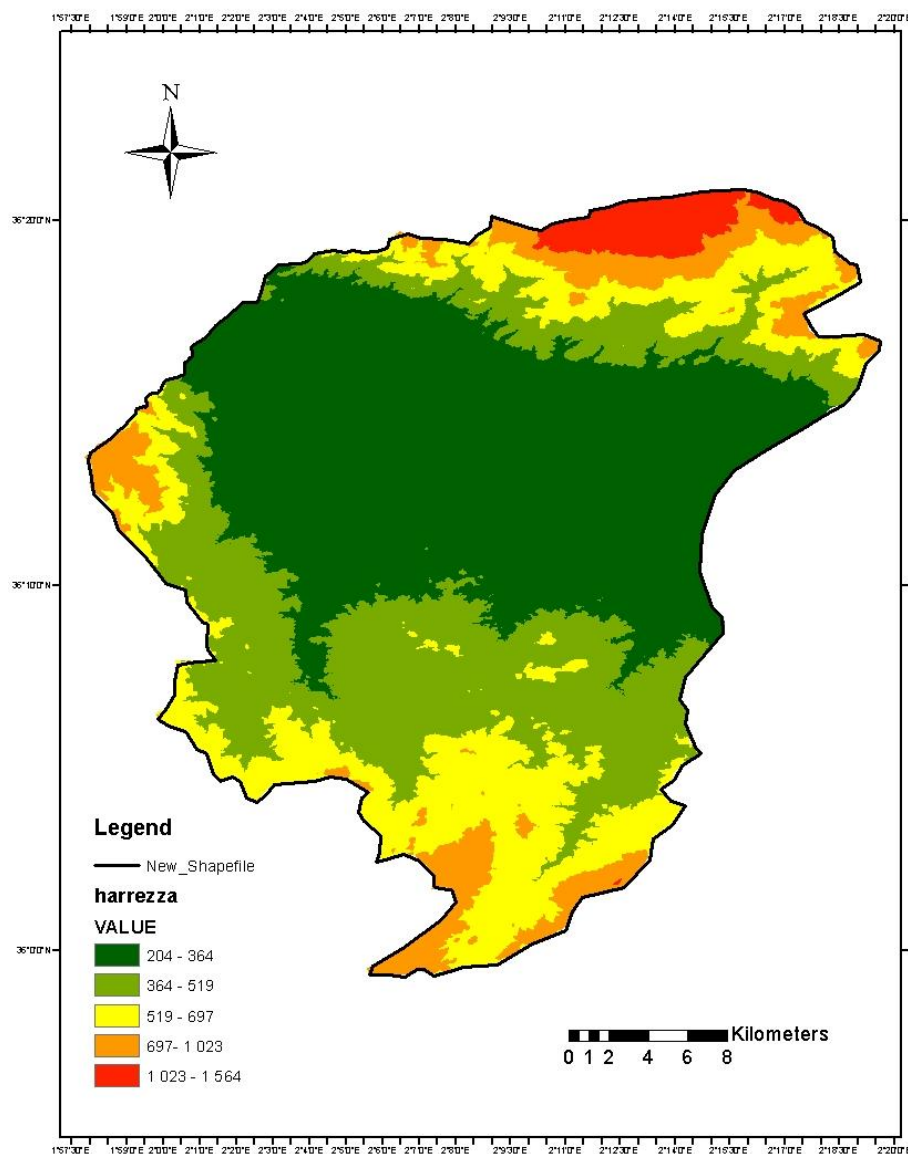


Figure 4: Carte géomorphologique de la zone d'étude. (Fetati et Hichour.2024)

a. Paramètres géométriques

Après avoir délimité le bassin versant, on a procédé à sa planimétrie pour définir sa superficie et son périmètre. Le bassin d'oued Harrazza est d'une superficie de 743.97 km², et d'un périmètre de 142.68 km.

b. Caractéristiques de forme

i. Indice de compacité de GRAVELIUS (K_c)

La forme du bassin versant joue un rôle très important sur l'hydrogramme résultant d'une averse à l'exutoire du bassin. En effet, un bassin allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin plus au moins ramassé, vu que les conditions physiques et le relief sont constants. K_c compare le périmètre du bassin versant à celui d'un cercle d'une même surface.

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

K_c : Indice de compacité de GRAVELIUS ;

P : Périmètre du bassin en km ;

A : Surface du bassin en km²

$K_c = 1$ bassin circulaire.

$1 < K_c < 1.3$ bassin compact.

$K_c > 1.3$ bassin allongé.

Le coefficient K_c est supérieur à 1 et d'autant plus voisin de cette valeur que le bassin est compact. Avec $K_c = 1,64$, le bassin versant du haut Chélif correspond à un bassin peu compact et allongé.

ii. Dimension du rectangle équivalent

Le rectangle équivalent est un modèle de représentation développé par *ROCHE*. Ce modèle permet la comparaison entre les bassins du point de vue caractéristiques tel que l'écoulement ; le bassin devient similaire à un rectangle de même périmètre, les courbes de niveau deviennent parallèles à sa largeur. La longueur et la largeur du rectangle sont calculées à l'aide des relations suivantes :

A - la longueur (L):
$$L = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right)$$

B - la largeur (l):
$$l = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right)$$

Avec :

L : La longueur du sous bassin versant, en Km.

l : La largeur du sous bassin versant en Km.

A : La superficie du sous bassin versant en Km^2 .

K_c : Indice de compacité de GRAVELIUS.

Les résultats obtenus des paramètres de forme des sous bassins versants concernés sont représentés dans le tableau suivant (Tabl.08).

Tableau 1 : Caractères morphologiques des sous bassins versants du Harrazza.

Code	Nom	Périmètre (km)	Superficie (km^2)	Altitude moyenne (m)	Rectangle équivalent		K_c	Forme
					L (Km)	l (Km)		
0117	O. Chélif Harrezza	142.68	743.97	463	58.37	12.75	1.46	Allongé

. Le bassin de l'Oued Chéliff Harrezza est plus ramassé que les précédents mais présente néanmoins une forme allongée avec un indice de compacité égale à 1,46. La dimension du rectangle équivalent confirme l'allongement des trois sous bassins. ($L > 5 \cdot l$).

Dans l'ensemble, les formes des sous bassins sont plus ou moins semblables et traduisent des temps de concentration plus ou moins longs.

C. Etude du relief

Les limites du bassin du Cheliff- Harezza sont très nettes sur la partie tellienne où elles suivent rigoureusement les lignes de crête ; elles sont souvent très floues en ce qui concerne la ligne de partage des eaux le séparant du bassin du Sahara, au Sud, car la limite endoréisme exoréisme est localement imprécis. De ce fait, le calcul de la superficie de la diffère souvent d'un opérateur à un autre. [Larbi Bouamrane et NABI.2019]

iii. La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique met en relief la pente du bassin. Elle représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. La courbe hypsométriques correspondant sous-bassins est présenté par la figure

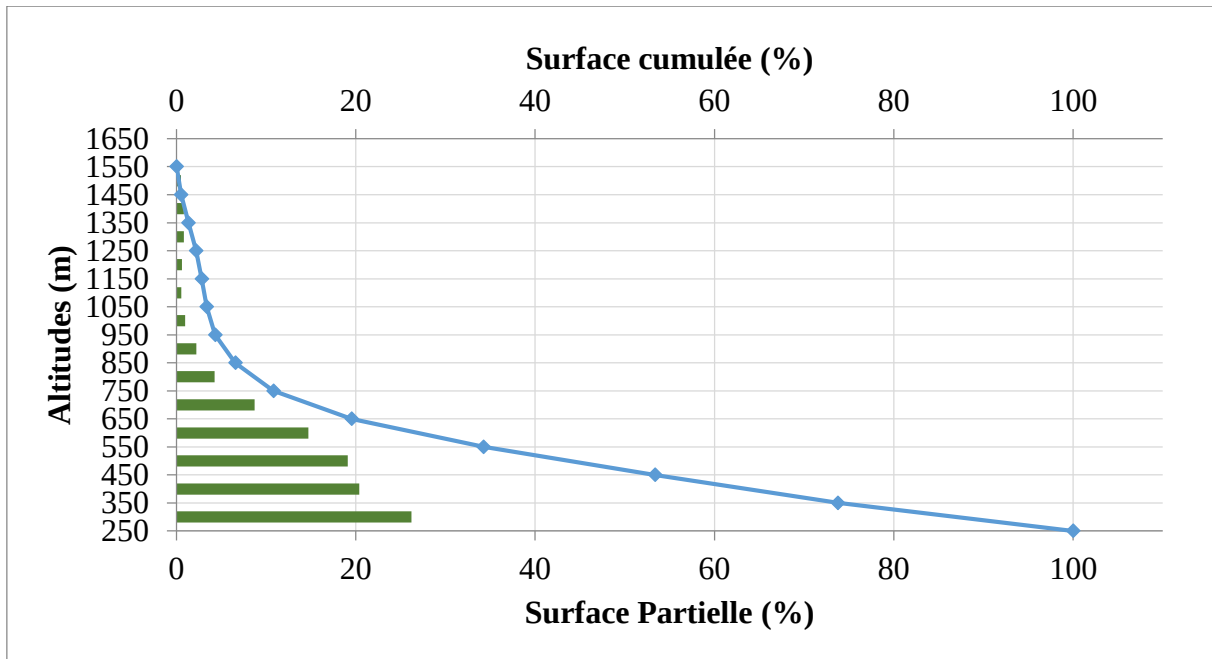


Figure 5: Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques du bassin Oued Chélif Harrezza.

D'après la courbe hypsométrique, un stade de vieillesse dans le bassin versant d'oued Harrezza indique une forte érosion.

Les principales caractéristiques altimétriques correspondent à :

1. L'altitude moyenne (H) : c'est le rapport entre la somme des surfaces élémentaires par l'altitude moyenne correspondante et la surface totale du bassin versant (A).

$$H_{moy} = \frac{\sum a_i h_i}{A}$$

a_i : Surface élémentaire entre deux courbes de niveau (Km^2)

h_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

A : Surface totale du bassin versant (Km^2)

2. L'altitude maximale (H_{max}) traduite par le point le plus haut du bassin.
3. L'altitude médiane ($H_{méd}$) correspondant à 50% de la surface cumulée.
4. L'altitude minimale (H_{min}) caractérisant le point le plus bas du bassin.

Les résultats obtenus pour les trois (03) sous bassins de l'étude sont mentionnés dans le tableau suivant.

Sous-bassins versants	H _{min} (m)	H _{max} (m)	H _{méd} (m)	H _{moy} (m)
Oued Harrezza	204	1564	470	462.92

Tableau 2 : les altitudes caractéristiques de sous bassin.

L'altitude maximale (1564m) caractérise le sous bassin de Harrezza alors que l'altitude minimale (204m). Il est à remarquer aussi que les valeurs du tableau ainsi que celles des figure 4 traduisent bien l'importance du caractère « plaine » dans les sous bassins d'Oued Chélif Harrezza et qui correspond aux vallées juxtaposant de l'oued Chélif et ses affluents.

b. Indice de pente et dénivelée :

1. Indice de pente globale (Ig)

Cet indice représente la pente moyenne de 90% de la superficie du bassin, il est obtenu à partir de la courbe hypsométrique, en prenant la dénivelée (D) entre les altitudes H_{5%}-H_{95%}.

$$Ig = \frac{D}{L}$$

Avec :

D : la dénivelée égale à H_{5%}-H_{95%} (m)

L : la longueur du rectangle équivalent (Km)

2. La dénivelée spécifique (Ds)

$$Ds = Ig\sqrt{A}$$

Pour permettre une comparaison des bassins versants entre eux du point de vue relief, on détermine la dénivelée spécifique qui sert de base à une classification proposée par l'ORSTOM.

Tableau 3 : la dénivelée spécifique qui sert de base à une classification proposée par l'ORSTOM.

Classe	dénivelée spécifique Ds	relief
R1	Ds < 10 m	relief très faible
R2	10 m < Ds < 25 m	relief faible
R3	25 m < Ds < 50 m	relief assez faible
R4	50 m < Ds < 100 m	relief modéré

R5	100 m < Ds < 250 m	relief assez fort
R6	250 m < Ds < 500 m	relief fort
R7	Ds > 500 m	relief très fort

Les résultats des calculs sont portés dans le tableau suivant :

Code du sous bassin	Nom du sous bassin	Superficie (Km ²)	Ig	Ds	Classement de relief
0117	O. Chélif Harrezza	756.698	11.14	306,44	Relief fort

Tableau 4: indice de pente et classes de relief des sous bassins.

Les valeurs de l'indice de pente globale (Ig) et la dénivelée spécifique (Ds) concernant le sous bassins Oued Chélif Harrezza, traduisent bien d'ailleurs l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief dans ces secteurs.

On constate, que le bassin se classe dans la catégorie du relief fort.

6. Climatologie :

Les plaines du Chélif, en général, ont un climat spécial, de type continental semi - aride, célèbre par sa dureté, malgré la proximité de la mer (50 km en moyenne), et qui a été cité comme une curiosité météorologique (Seltzer, 1946).

6.1 Les précipitations :

6.1.1 Les précipitations moyennes mensuelles :

Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour la période de 1991-2010(ANRH, Alger)

Mois Station	septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Moyenne annual
Harrezza Barrage	22,9	28,2	44,2	44,3	46,8	44,9	38,3	31,0	26,5	3,4	0,3	5,0	335,8

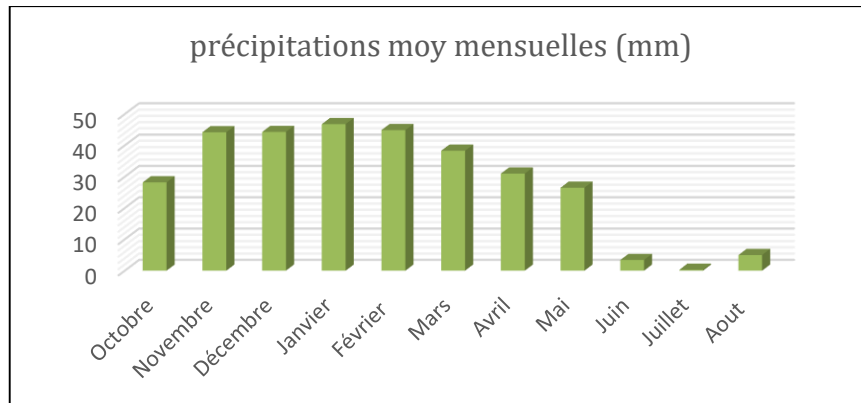


Figure 6: Variation des précipitations moyennes mensuelles du bv Harrazza(1991-2010).

Nous avons vu utile de présenté les variations mensuelles des précipitations au niveau de la station considérée, il en ressort les constatations suivantes :

- Une période pluvieuse s'étalant depuis le mois de novembre jusqu'au mois de février. Cette période correspond à la saison hivernale donc à la période humide durant laquelle les précipitations représentent les 54 % de la moyenne des précipitations annuelles.
- Une période déficitaire correspondant à la saison sèche durant laquelle les précipitations ne représentent que 3 % du total annuel.

6.1.2 Variation annuelle des précipitations pour la période 1991-2010

On enregistre la quantité la plus faible vers les années 1999 avoisinant les 200 mm par contre cette quantité à tendance d'augmenté depuis l'année 2008 on enregistre des quantités avoisinant les 500 mm.

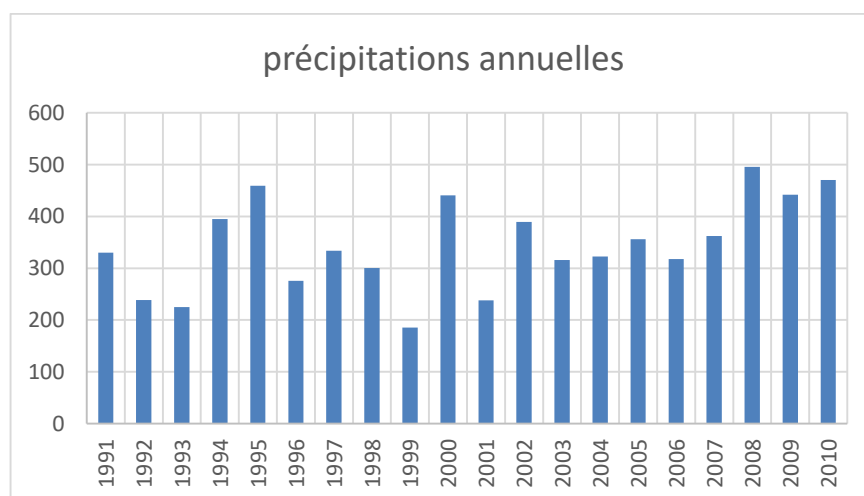


Figure 7 : Variation annuelle des précipitations du bv Harrezza (1991-2010).

. 6.1.3 Les précipitations saisonnières

Pour démontrer la variabilité saisonnière des quantités de pluies reçus pour la station nous avons calculé les moyennes des pluies présentées dans la figure suivante :

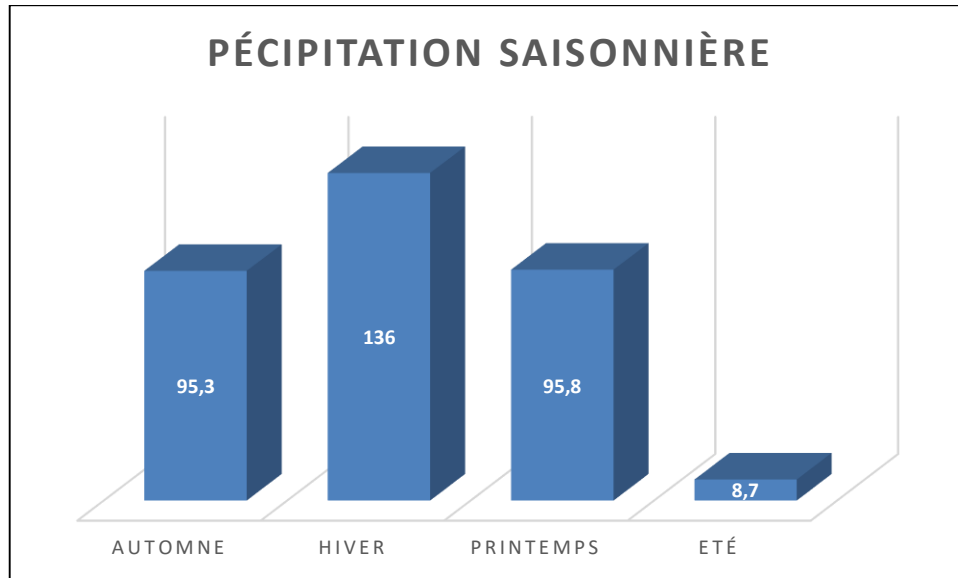


Figure 8 : Histogramme des précipitations saisonnières du bv Harrezza (1991, 2010).

Au niveau de cette station, les plus fortes précipitations sont enregistrées en hiver 136mm suivi d'une quantité moindre en automne et printemps, et la plus faible quantité est notée dans la période d'été.

6.2 Etude de la température

Les températures traduisent la prépondérance des influences continentales sur les influences maritimes. Elles varient selon l'altitude, la vitesse et la direction des vents.

Selon les données enregistrées par l'Office National de la Météorologie (ONM), on note les valeurs suivantes concernant la station de barrage Harrezza

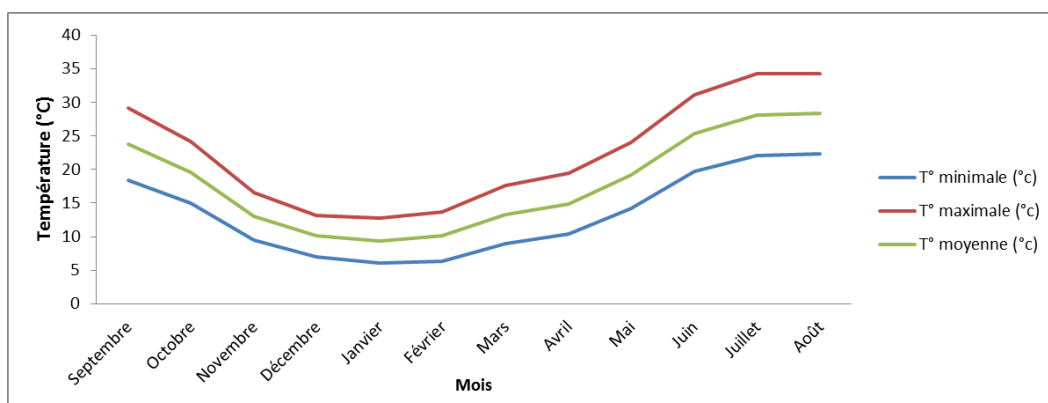


Figure 9 : Température moyenne mensuelle de la station de Harrezza Barrage (1996-2009)

La courbe de variation des températures moyennes mensuelles montre :

- Une moyenne annuelle de l'ordre de 18 °C.
- Un pôle froid qui correspond aux mois de Décembre, Janvier et Février, où la température minimale atteint les 06 °C au mois de Janvier.
- Un pôle chaud qui correspond aux mois de Juin, Juillet et Août, avec une température maximale de 34 °C au mois d'Août.

6.3. L'humidité

Dans la plaine de Khemis-Miliana, la plus grande valeur d'humidité relative de l'air est atteinte pendant la période hivernale, avec 78,85% au mois de Janvier, et la plus basse, pendant la période estivale avec 47,72% au mois de Juillet.

Le tableau suivant regroupe les données (ANRH) disponibles sur l'humidité relative de l'atmosphère enregistrées à la station de Khemis-Miliana.

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
Humidité Relative %	59,51	64,62	73,73	78,70	78,85	77,33	72,16	68,02	60,42	51,56	47,72	48,36

Tableau 6: Humidité relative mensuelles moyenne à la station de Khemis Miliana 1975-2007 (ANRH).

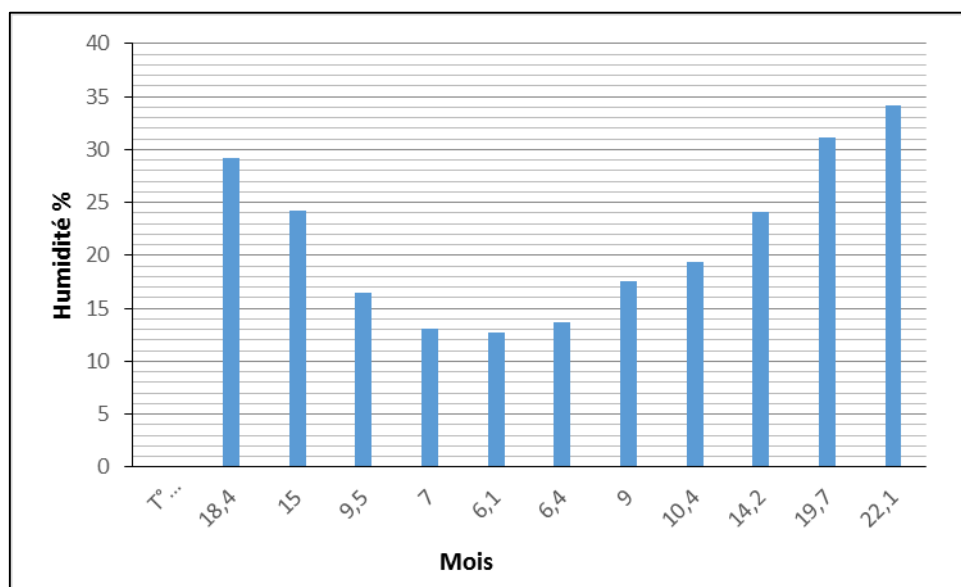


Figure 10 : Variation de l'humidité mensuelle moyenne de la station Khemis-Miliana 1975-2007

6.3 Le régime climatique :

Pour mieux connaître le régime climatique de notre région d'étude on effectue la visualisation graphique avec le *Diagramme Ombrothermique de Gaussen*.

6.3.1 Diagramme Ombrothermique de Gaussen

La méthode de **Gaussen** utilise un graphe Ombrothermique aux échelles suivantes :

- une échelle logarithmique pour les précipitations.
- Une échelle linéaire pour les températures.

		Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
Précipitation (mm)	22,9	28,2	44,2	44,3	46,8	44,9	38,3	31,0	26,5	3,4	0,3	5,0
Température (°C)	24.6	20.7	14.3	10.3	9.2	10.7	13,3	14,9	19,2	25,4	29,1	30,5

Tableau 7: moyenne mensuelle et annuelle des précipitations et températures de la station Harrezza Barrage pour la période 1991-2010 (ONM, Alger)

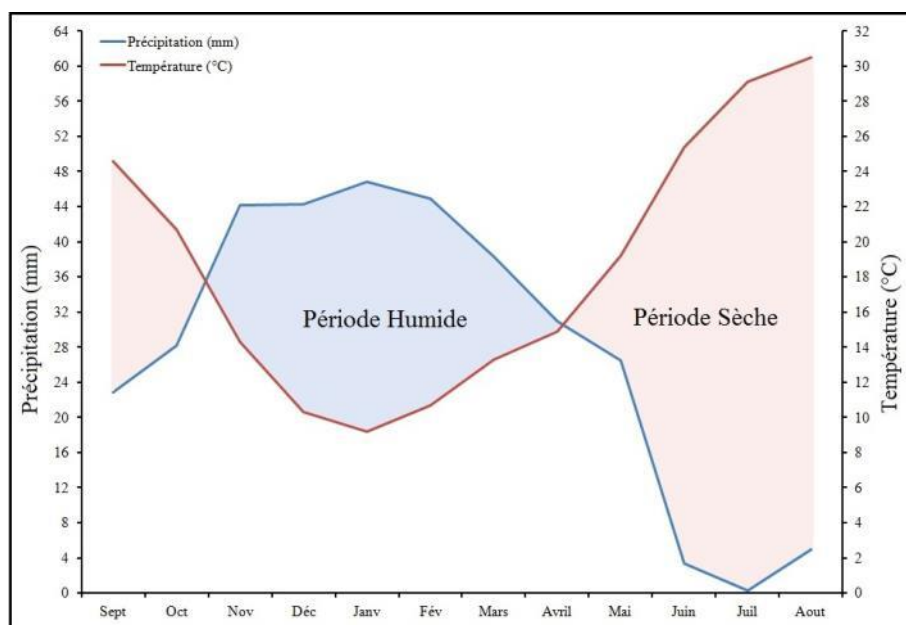


Figure 11 : Diagramme Ombrothermique de la station de Harrezza Barrage (1991/2010).

L'analyse du diagramme Ombrothermique de **Gaussen (Fig.)**, montre que la période de sécheresse de la région du Haut Chélif compte sept (7) mois pendant l'année. Elle débute au mois d'avril et se termine au mois d'Octobre.

6.4 Les Précipitations extrêmes :

L'analyse des précipitations journalières maximales et même des hauteurs de pluie horaire présente un intérêt particulier, pour les études de protection contre les crues. Pour dégager une idée générale sur l'importance des pluies extrêmes, nous nous basons sur des données d'observations disponibles pour deux stations (Aribechlef, Ababssa) et pour une période de trente white ans (1973_2010).

Code Statio n	Nom de la Station	Altitud e	Cordonnées Lambert		Période d'obs	Durée (An)
			X	Y		
01170 2	Arib Cheliff	230	439500	332550	1973- 2010	38
01171 5	El Ababssa	320	443950	318050	1973- 2010	38

Tableau 8 : données d'observations disponibles pour deux stations (Aribechlef, Ababssa) et pour une période de trente white ans (1973_2010).

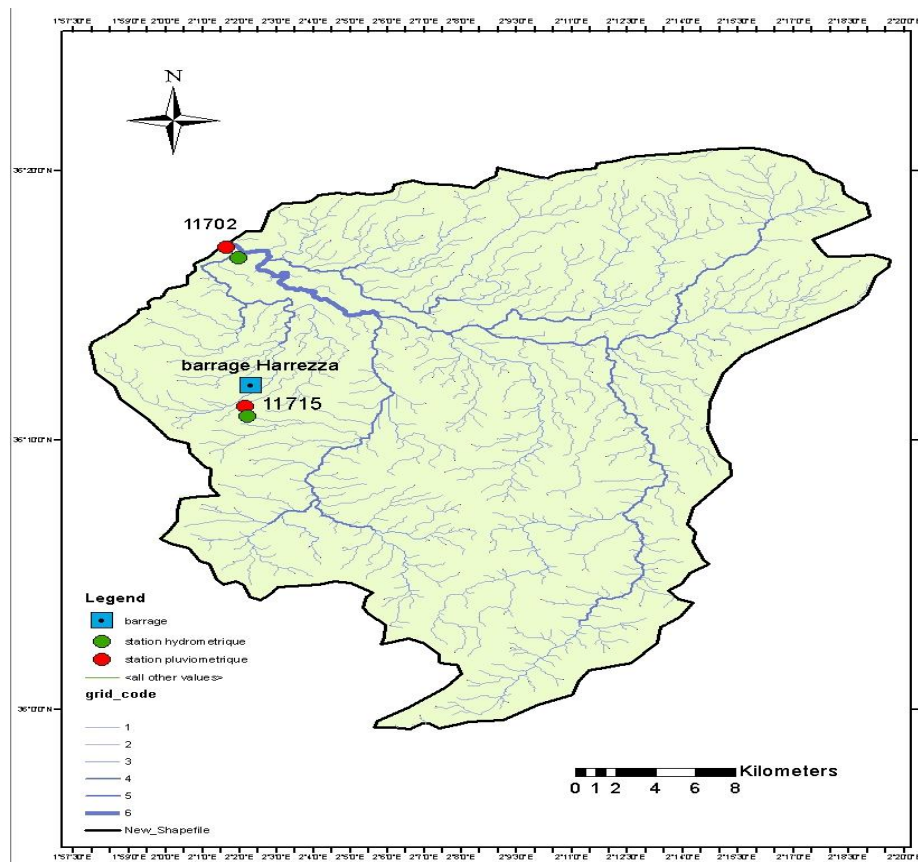


Figure 12 : localisation des stations pluviométriques de la zone d'étude (Fetati et Hichour 2024)

6.4.1. Contrôle Des Données Pluviométrique :

Le contrôle des données recueillies a été effectué en procédant à la vérification des moyennes et des cumuls par la méthode des cumuls simples.

Nous avons effectué un premier examen pour évaluer l'organisation interne des données dans une même station à travers la méthode des cumuls simples. Cette méthode nous permet de détecter si les données collectées appartiennent bien à la même population.

Nous avons reporté en abscisse le temps en années et en ordonnée le cumul des précipitations, tels que :

$$Y_k = \sum_{i=1}^k p_i$$

Les cumuls simples obtenus correspondent aux totaux annuels des précipitations de chaque chronique. Quand il y a stationnarité, les points relatifs de pluies sur le graphique devraient s'aligner (Brunet-Moret, 1971). Dans le cas contraire, les données vont s'individualiser en formant plusieurs segments indiquant la présence d'incohérences.

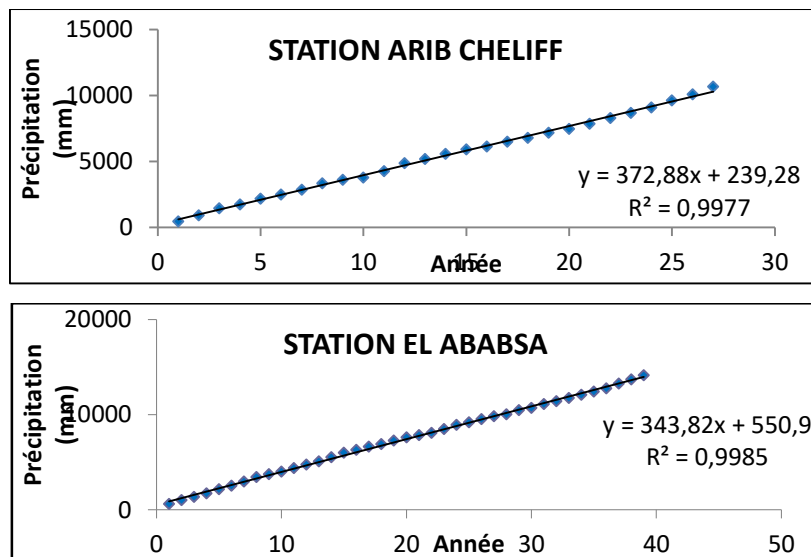


Figure 13 : Représentations des cumuls simples des stations pluviométriques

Pour le cas étudié, l'ensemble des points s'alignent bien selon une droite, les mesures se répartissent de part et d'autre de la droite). Ce résultat suggère que l'échantillon de données a été bien tiré d'une même population.

6.4.2 Paramètres statistiques des pluies maximales journalières

Le tableau, donne les différentes caractéristiques statistiques de l'échantillon pour les deux stations considérées.

Tableau 9 : Paramètres statistiques des pluies maximales journalières

Statistiques de base	Arib Cheliff	El Ababsa
Minimum	21,00	16,10
Maximum	66,3	63,7
Moyenne	38,6026	34,9974
Ecart-type	11,5700	10,1235
Coeff. de variation (Cv)	0,30	0,29
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0,39216	0,66645
Coeff. d'aplatissement (Ck)	-0,69426	0,52936

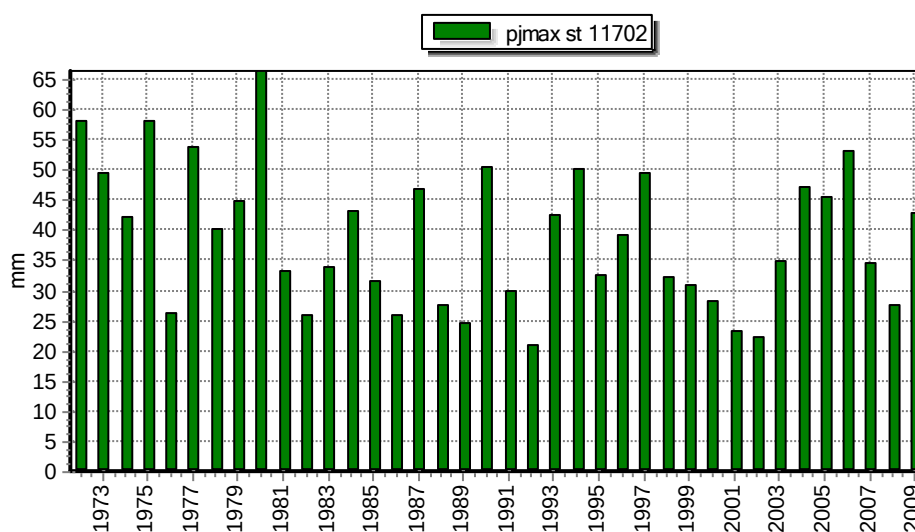


Figure 14 : Les pluies maximales journalières station Aribchleff période (1973/2010)

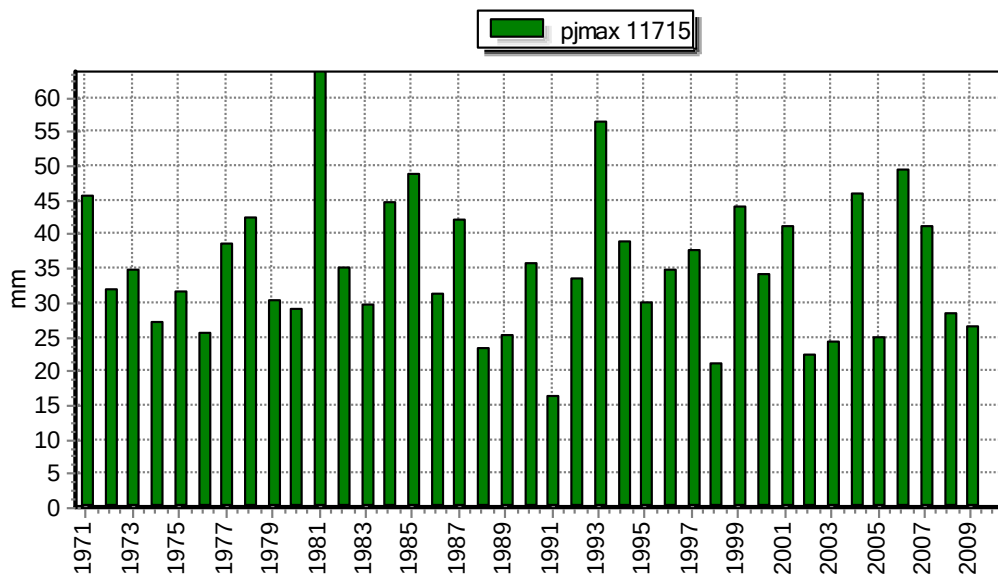


Figure 15 : Les pluies maximales journalières station EL ABABSSA période (1973/2010)

6.4.3 Ajustement des pluies maximales journalières :

Afin de faire ressortir cette irrégularité temporelle de pluie extrême, une étude fréquentielle nous permet de caractériser et d'estimer les précipitations exceptionnelles, pour les différentes durées de récurrence. Nous avons effectué l'ajustement de la série des pluies maximales journalières à la loi de Gumbel (doublement exponentielle), Galton (log normale) et Gauss (normale), Pearson III, Exponentiel à l'aide du logiciel "HYdrognomon", et nous avons tenté de faire une comparaison des graphes des droites de régression obtenues par les ajustements. Ces dernières nous ont permis de choisir la droite de Gumbel (passe bien au milieu de ces points expérimentaux), donc cette loi est applicable pour les séries d'observations des deux stations caractéristiques du bassin.

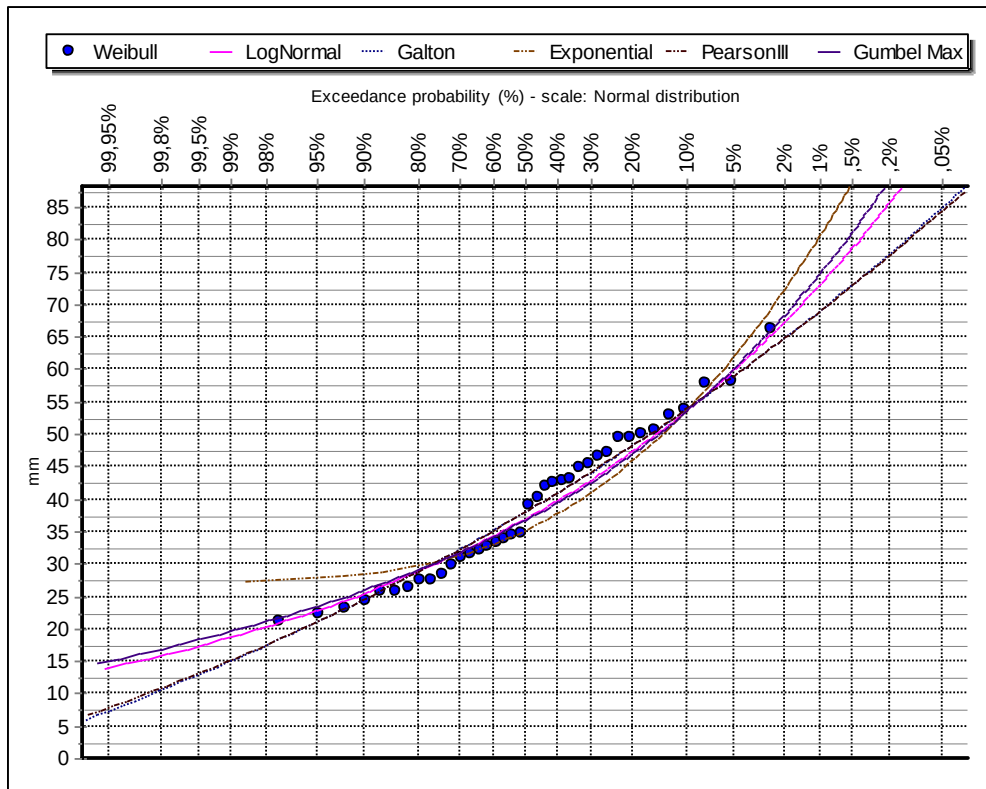


Figure 16 : Ajustement des pluies maximales journalières à différentes loi (station Aribchleff période (1973/2010))

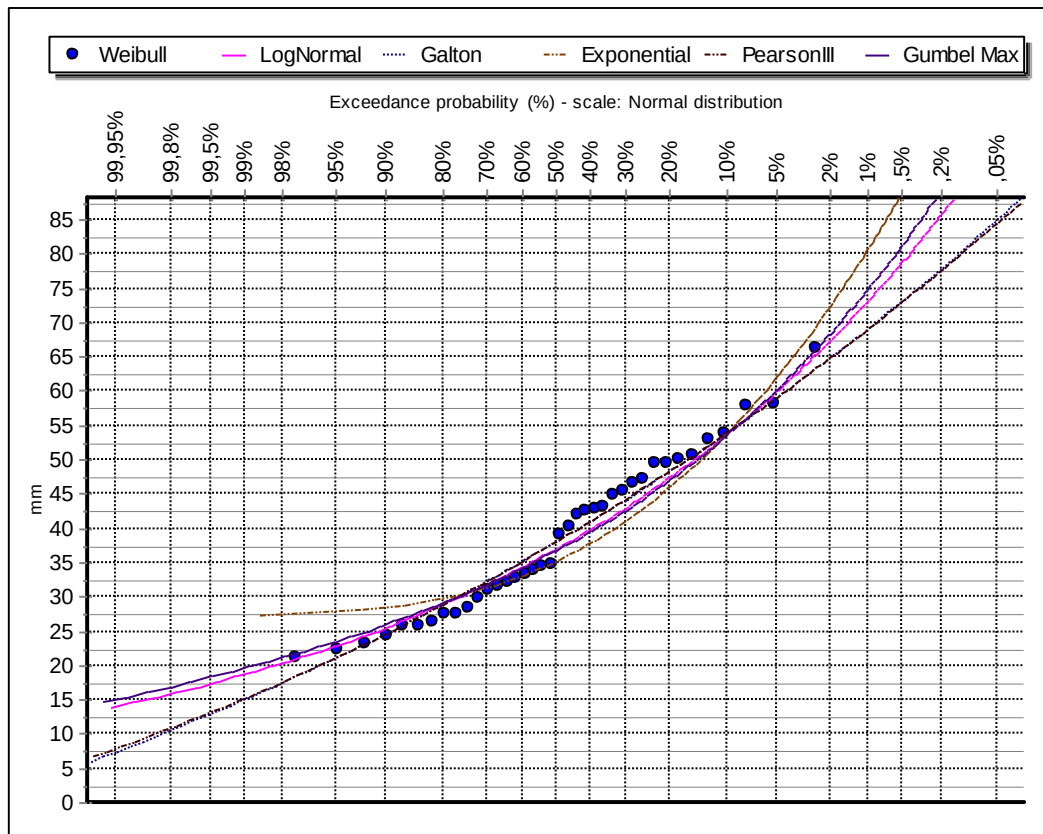


Figure 17 : Ajustement des pluies maximales journalières à différentes loi (station EL Ababssa période (1973/2010))

6.4.3.1 Ajustement statistique a la loi de Gumbel :

Le modèle statistique adopté nous a permis de décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes. Il s'agit de la loi double exponentielle dite loi de Gumbel. La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \left(-\exp\left(\frac{(x-a)}{b}\right) \right) \quad (1) \quad \text{avec la variable réduite suivante : } u = \frac{x-a}{b} \quad (2)$$

Où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel.

La distribution s'écrit alors de la manière suivante :

$$F(x) = \exp(-\exp(-u)) \quad (3) \quad \text{et } u = -\ln(-\ln(F(x))) \quad (4)$$

L'avantage d'utiliser la variable réduite est que l'expression d'un quantile est alors linéaire ($x_q = a + bu_q$).

En conséquence, dès lors que les points de la série à ajuster peuvent être reportés dans un système d'axes $x - u$, il est possible d'ajuster une droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les deux paramètres a et b de la loi. L'estimation des paramètres a et b de l'ajustement peut se faire graphiquement (ajustement à l'œil ou à l'aide d'une régression statistique), ou selon une méthode mathématique comme celle des moments

1- Station El Ababssa :

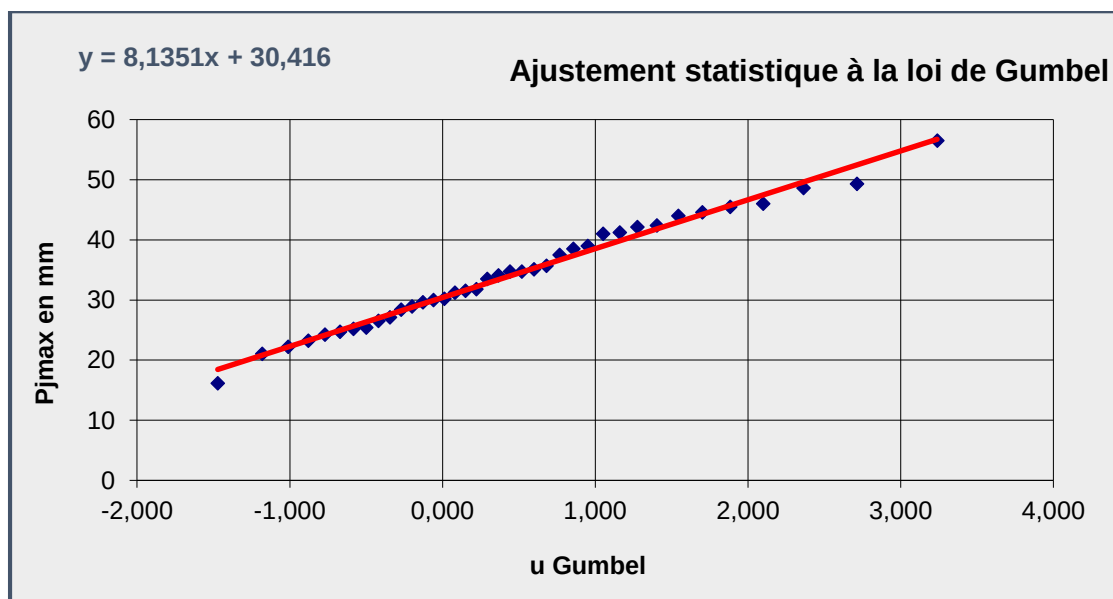


Tableau 10 : Les pluies maximales journalières station El Ababssa période (1973/2010)

T	F	u	Pjmax
2	0,5	0,37	33
5	0,8	1,50	41
10	0,9	2,25	46
20	0,95	2,97	51
25	0,96	3,20	53
50	0,98	3,90	58
100	0,99	4,60	63

2- Station Arib Cheliff :

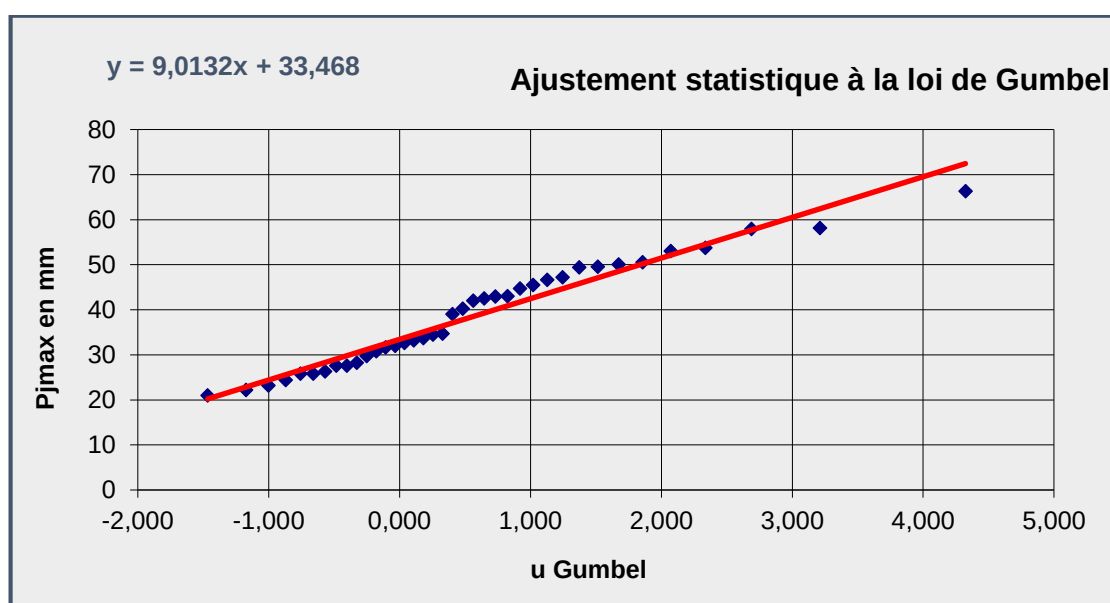


Tableau 11 : Les pluies maximales journalières station Aribchleff periode (1973/2010)

T	F	u	Pjmax
2	0,5	0,37	37
5	0,8	1,50	47
10	0,9	2,25	54
20	0,95	2,97	60
25	0,96	3,20	62
50	0,98	3,90	69
100	0,99	4,60	75

Les Courbes IDF :

Les courbes IDF sont construites dans un but bien précis. Elles permettent d'une part de synthétiser l'information pluviométrique au droit d'une station donnée et, d'autre part, de calculer succinctement des débits de projets («pluie d'entrée») utilisés en modélisation hydrologique (Musy et Higy-2004).

Les courbes IDF peuvent être utilisées pour plusieurs applications. Pour l'utilisation de la méthode rationnelle, par exemple, on utilise ces courbes pour trouver une intensité de pluie correspondant à une durée et à une fréquence. Ces courbes sont aussi utilisées pour établir la fréquence d'un événement pluvieux qui a été mesuré, en prenant une intensité moyenne pour la durée de l'événement ou en considérant différentes durées à l'intérieur de la pluie observée. Finalement, les courbes IDF peuvent servir de base pour développer des pluies synthétiques pour la conception.

Différentes formules sont proposées pour représenter l'intensité critique d'une pluie en fonction de sa durée, pour une période de dépassement donnée.

La formule la plus générale avec T variable, est la suivante :

$$I = k.T^a / (t+c)^b \text{ ou encore, pour } T \text{ fixé, } I = a / t^b \text{ (formule de Montana)}$$

Avec : I = intensité en mm/h, T = la période de retour en années, t = la durée de référence en heure, et k , a , b , c sont les paramètres d'ajustement.

1.1. Représentation statistique

Lorsque l'on dispose de suffisamment de données, il est préférable de déterminer les courbes IDF à partir de ces dernières. L'analyse fréquentielle peut s'appliquer si on ne présuppose pas une loi connue (de type Montana, etc.) et si on s'intéresse à des événements rares, donc extrêmes. Les données recueillies sont alors ajustées, à un pas de temps choisi, à une loi statistique qui doit décrire relativement bien la répartition des extrêmes.

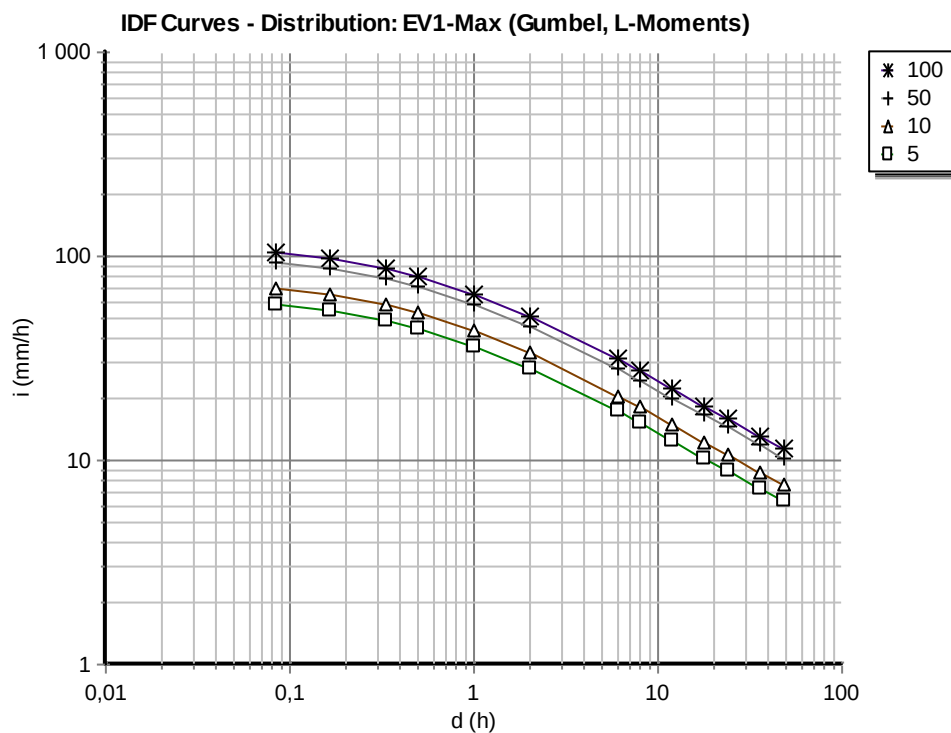
Nous avons procédé à la démarche suivante :

- a. Calculer les intensités (mm/h) en fonction de la durée de référence t et de la période de retour T ;
- b. Calculer les fréquences de non-dépassement ou des fréquences d'apparition (ou des fréquences de dépassement).

Les intensités durée fréquence a été calculée en fonction des temps de retour respectivement 2ans, 20 ans ,50 ans e-t 100 ans. Ils sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 12 : intensités maximales de durée t(h) et période de retour (ans)(station Arib Cheliff) :

temps	100 ans	50 ans	20 ans	5 ans
5 min	104,6	94,16	80,23	58,25
10 min	97,85	88,08	75,05	54,49
20min	87,52	78,78	67,13	48,74
30 min	79,89	71,92	61,28	44,49
1 h	65,23	58,72	50,04	36,33
2h	50,53	45,49	38,76	28,14
6h	31,34	28,21	24,04	17,45
8h	27,4	24,67	21,02	15,26
12h	22,6	20,34	17,33	12,58
18h	18,57	16,72	14,25	10,34
24h	16,14	14,53	12,38	8,99
36h	13,22	11,9	10,14	7,36
48h	11,47	10,33	8,8	6,39



File Edit Options Distribution
 Multiple curves Single curve Data Distribution plot

IDF curves equation:
 i: Intensity (mm/h)
 d: duration (h)

$$\frac{\lambda \psi - \lambda \ln \left(- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)}{(d + \theta)^\eta}$$

Statistical distribution function F: EV1-Max (Gumbel, L-Moments)

Statistical distribution parameters

lambda = 11,42
 psi = 2,4
 Eta = ,5
 Theta = ,5

Unified sample statistical properties

Mean value: 33,96
 Standard deviation: 14,38
 Skewness: ,95

L-Moment 1: 33,96
 L-Moment 2: 7,91
 L-Moment 3: 1,57

Figure 18 : Représentation des courbes IDF et le calcul de l'intensité I (la station Arib Cheliff)

Tableau 13 : intensités maximales de durée t(h) et période de retour (ans) (station EL Ababssa) :

temps	100 ans	50 ans	20 ans	5 ans
5 min	128,44	105,73	78,9	43,49
10 min	120,14	98,9	73,8	40,68
20min	107,46	88,46	66,01	36,39
30 min	98,1	80,75	60,26	33,22
1 h	80,1	65,93	49,2	27,12
2 h	62,04	51,07	38,11	21,01
6 h	38,48	31,67	23,63	13,03
8 h	33,65	27,7	20,67	11,39
12h	27,75	22,84	17,04	9,4
18h	22,81	18,77	14,01	7,72
24h	19,82	16,31	12,17	6,71
36h	16,24	13,37	9,97	5,5
48h	14,09	11,59	8,65	4,77

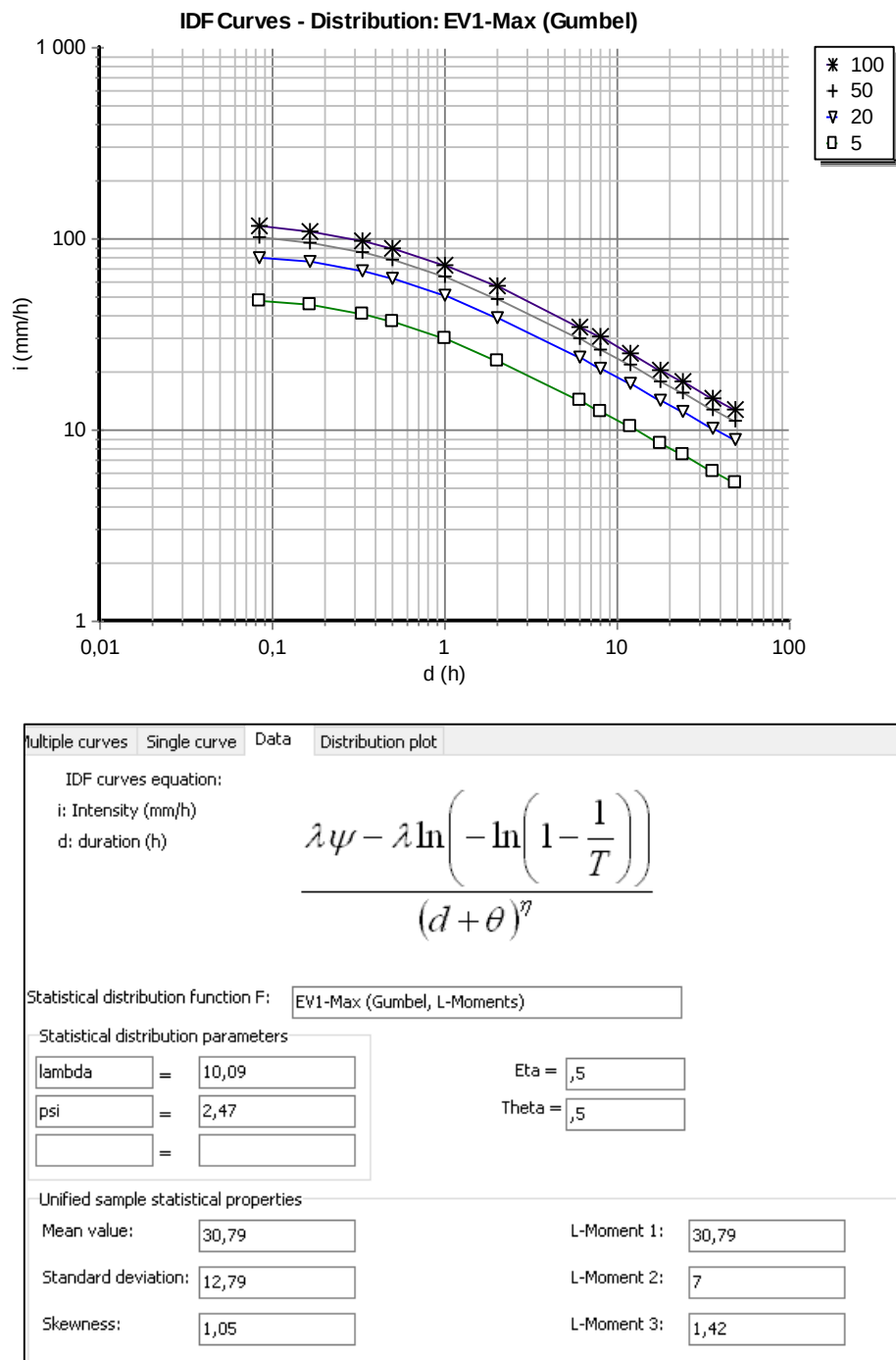


Figure 19 : Représentation des courbes IDF et le calcul de l'intensité I (la station el Ababssa)

Nous pouvons à présent et selon les données utilisées pour la construction des courbes IDF pour un temps qui va de 5min à 48 h pour les temps de retour correspondant à 5 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans.

Pour tous les temps de retour 5 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans.

L'intensité est beaucoup plus forte pour les premières minutes et tend à devenir plus faible vers les heures qui viennent.

A ce niveau, on note aussi que l'intensité de la pluie au niveau de la station El Ababssa est la plus importante par rapport à la station Arib Cheliff et ce en fonction du nombre de jours.

Chapitre III :

Mise en œuvre de modèle HEC-HMS

Chapitre III :**Mise en œuvre de modèle HEC-HMS****III -1-Introduction :**

Le modèle hydrologique déterministe et conceptuel HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) a longtemps été un modèle appliqué à la simulation d'un événement donné. Par contre, les versions récentes permettent de simuler en continu sur une longue période grâce à des modules de calculs d'évapotranspiration, d'humidité du sol et d'accumulation/fonte de neige. Toutefois, dans le cadre du cours Ressources hydriques, le modèle sera utilisé sur une base événementielle. HEC-HMS est un modèle distribué qui permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs parties, appelées sous-bassins, qui sont considérées comme ayant chacune des caractéristiques homogènes. Il est particulièrement bien adapté pour simuler le comportement hydrologique de bassins versants non urbanisés. HEC-HMS permet également de simuler et d'incorporer des réservoirs et des dérivations. [USAC.2000]

III -2-Le processus de fonctionnement :

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

3-Fonctionnalités :

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

- ✓ Démarrage d'un nouveau projet;
- ✓ Définition du modèle de bassin versant;
- ✓ Données de la ou des stations météorologiques;
- ✓ Définition du modèle de précipitation;
- ✓ Définition des paramètres de contrôle de la simulation;

- ✓ Création et exécution d'une simulation;
- ✓ Visualisation des résultats.

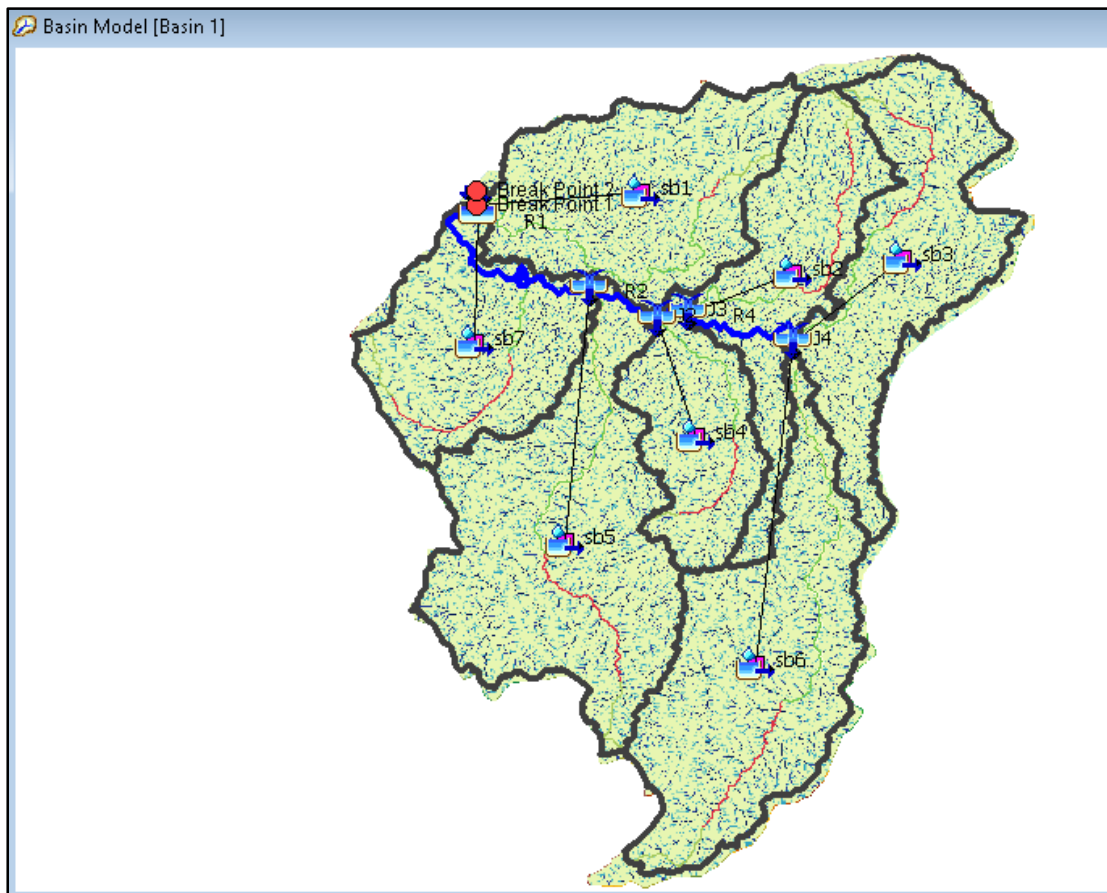


Figure 1 : Fenêtre de l'interface du HEC-HMS représente le Bassin versant et leurs sous bassins (propre étude)

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

- ✓ L'élément « **Subbassin** » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- ✓ L'élément « **Reach** » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.

- ✓ L'élément « **Réservoir** » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage...etc. ses caractéristiques attribuées permettent de définir les conditions stockage-déstockage.

Dans notre cas, cette étape sera totalement et automatiquement réalisée par les logiciels **ARC GIS&WMS** lors de la phase de caractérisation physique

4-Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS :

L'application du modèle HEC-HMS nécessite une banque de données concernant

Le bassin ou les sites étudiés, afin qu'on puisse appliquer le modèle. Parmi les données indispensables on peut citer dans notre cas :

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

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

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

sous bassin	Longueur oued (km)	Pente bassin m/m	Surface (km2)	CN	Temps concentration (h)	Lag time (min)	$I_a=0,2*S$
Sub bassin-1	28,32	0,175	106,35	75	0,81	29,18	0,67
Sub bassin-2	22,23	0,157	79,22	77	0,74	26,51	0,60
Subbasin-3	22,11	0,178	102,58	75	0,66	23,66	0,67
Subbasin-4	17,87	0,086	58,56	78	1,08	39,03	0,56
Subbasin-5	31,55	0,138	154,27	76	1,10	39,50	0,63
Subbasin-6	38,11	0,168	138,45	77	1,07	38,43	0,60
Subbasin-7	28,26	0,167	84,72	73	0,85	30,53	0,74

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{Avec } S = \frac{254400 - 254CN}{CN}$$

Dans ce modèle l'excès de précipitation est estimé en fonction des pluies cumulées les pertes sont données par la relation $I_a = 0,2.S$ S est relié au curve number.

Pe : L'excès de précipitation ; **P** : est le total des précipitations accumulées au temps t **Ia** : Les pertes initiales.

S : est le potentiel maximum de rétention.

4.1 Curve Number CN :

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

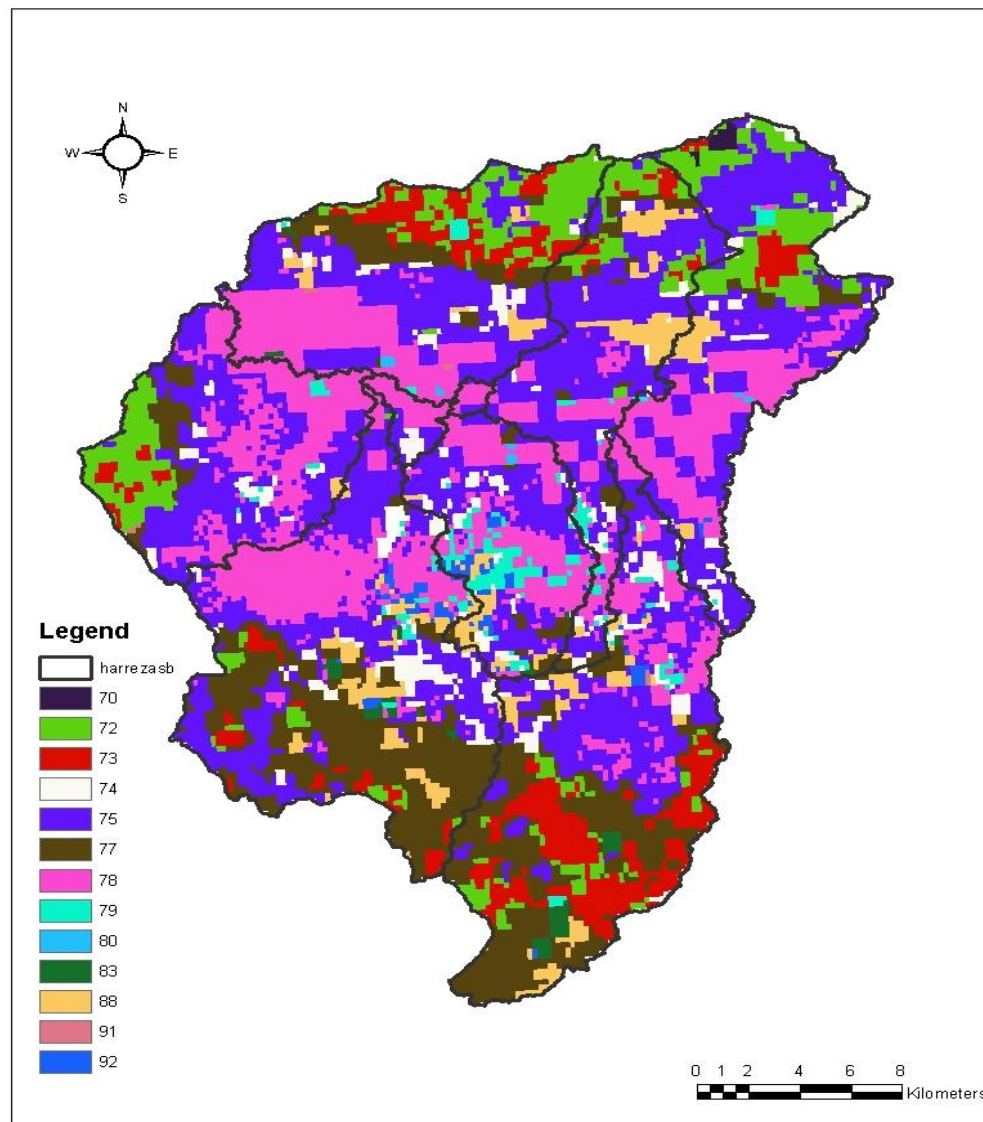


Figure 2 : Curve Number (CN) du bassin versant Oued Harrezza (Fetati et Hichour .2024)

4.2 Calcule le Temps de concentration TC :

Le temps de concentration est défini comme le temps nécessaire à une particule d'eau pour parcourir le plus long chemin hydraulique depuis la limite du bassin jusqu'à l'exutoire. Le temps de concentration du bassin de L'oued Harrezza quand doit utiliser dans notre étude est calculé par la formule S.C.S (Soil Conservation Service)

Formule de S.C.S (Soil Conservation Service)

$$Tc = \left[\frac{0.87 Lp^3}{H} \right]^{0.385}$$

Tc : Temps de concentration (h).

Lp : Longueur du talweg principal (Km).

H : Différence entre les points extrêmes du talweg.

$$Tc = 6,30 \text{ heure}$$

Lag time (min) = temps de concentration * 0,6

Les paramètres propres à chaque sous-bassin et au tronçon de rivière sont incorporés en cliquant sur l'icône correspondant à l'élément choisi dans l'explorateur et en précisant les paramètres des onglets **Loss**, **Transform**, **Baseflow**, **Subbasin** et **Routing** de l'Éditeur. L'élément de sous bassin représente un bassin complet. Les suppositions sont faites pour étudier les trois processus suivants séparément : perte (loss), transformation (transform), et écoulement de base (baseflow).

La partie de la précipitation qui tombe sur la surface de terre s'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 n'a pas un écoulement de base ou débit d'étiage (None). (figure3)

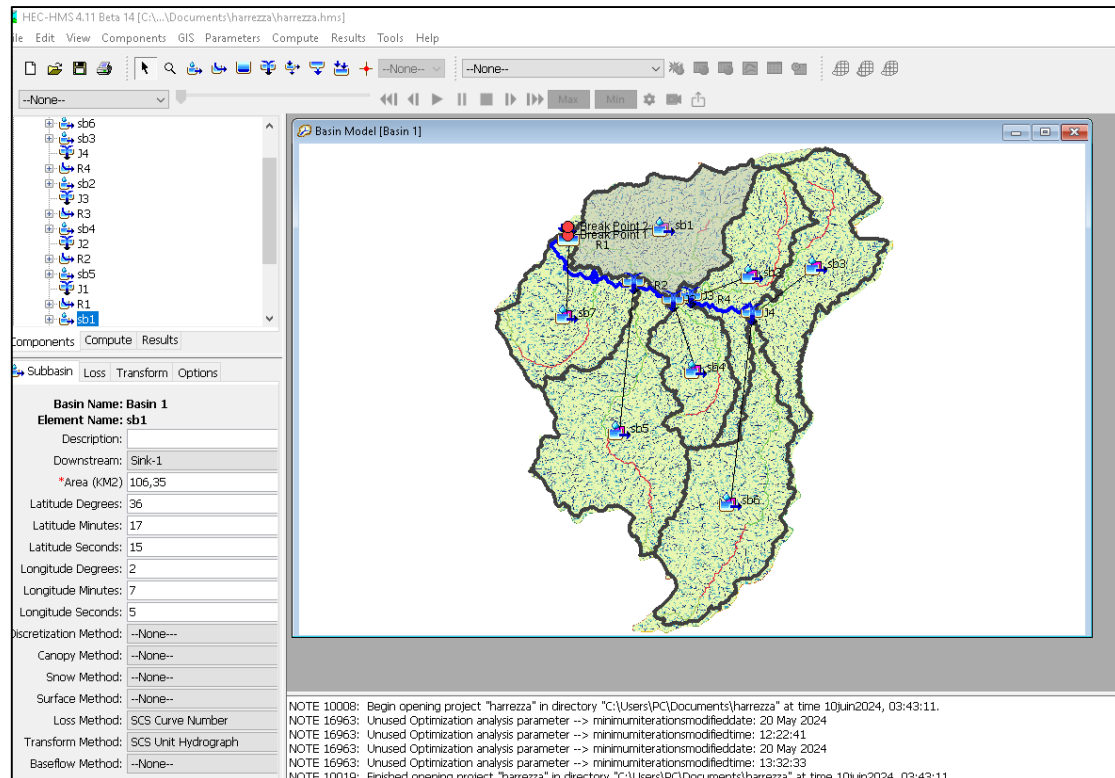


Figure 3 : Fenêtre de donnée de surface ; méthode de perte ; méthode de transformation

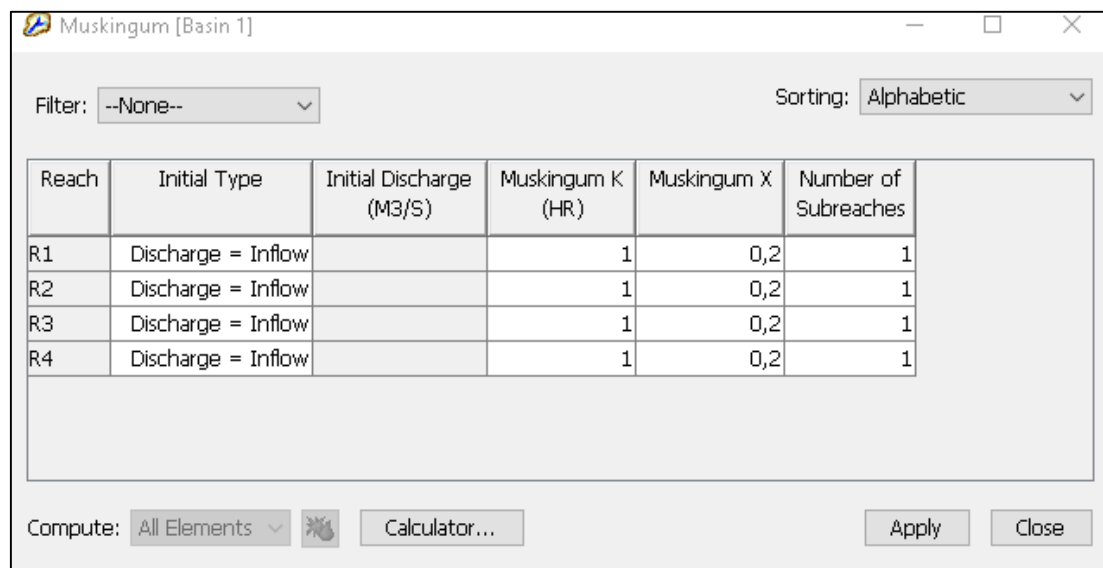


Figure 4 : Fenêtre de caractéristiques géométriques des talwegs et cours d'eau.

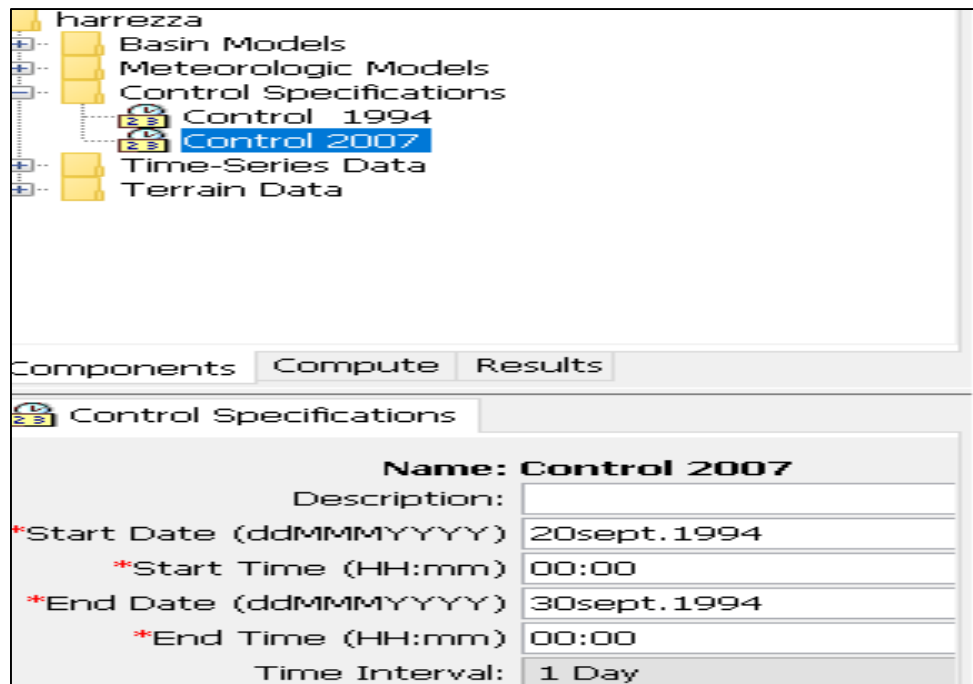


Figure 5 : Fenêtre de temps de démarrage de la crue et l'intervalle de temps

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

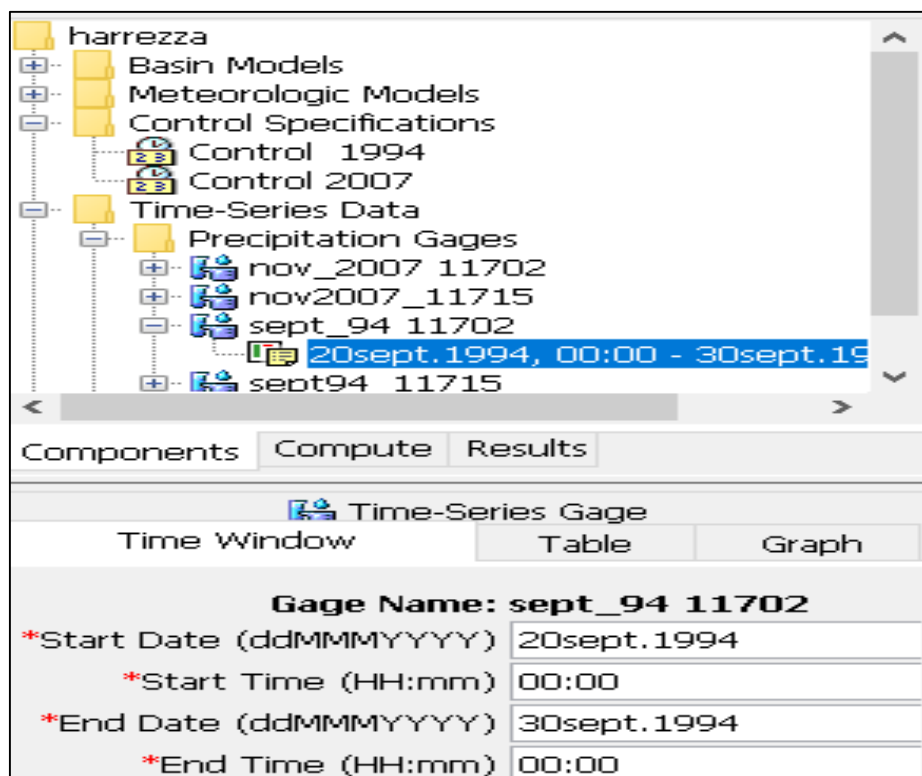


Figure 6 : Fenêtre de donnée de précipitations. Répartition temporelle

La figure représente les données de précipitation et les débits observés de deux stations 11702 situé à l'exutoire du bassin de Harrezza et la station 11715 situé au barrage de Harrezza.

5-Calibration du modèle : (Crue 20_30 septembre1994)

Pour trouver les valeurs les proches de la réalité des paramètres du modèle, nous avons effectué une calibration en utilisant les données (Crue 20_30septembre1994) et en utilisant la fonction d'optimisation automatique. Les débits de pointe et de base et le volume simulés varient tous en fonction de l'événement :

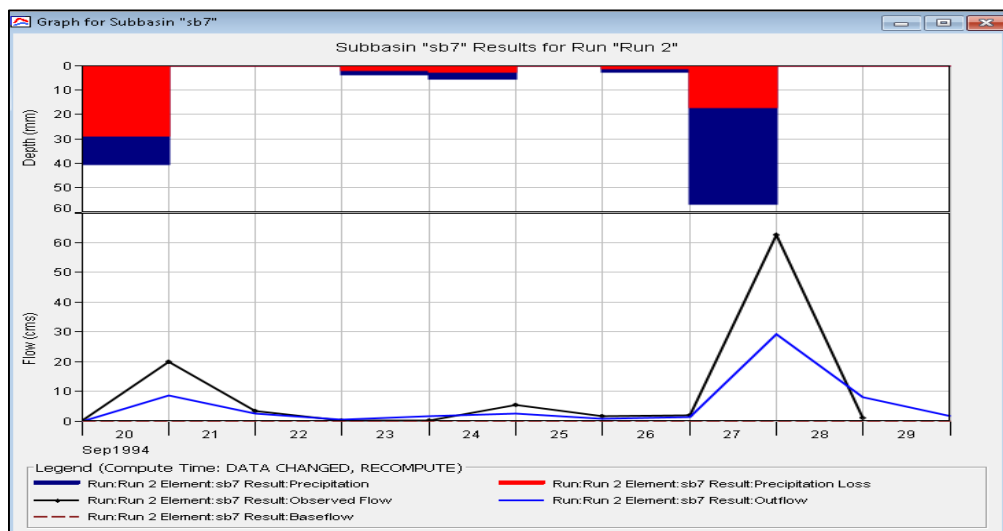


Figure 7 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- sous bassin 7.

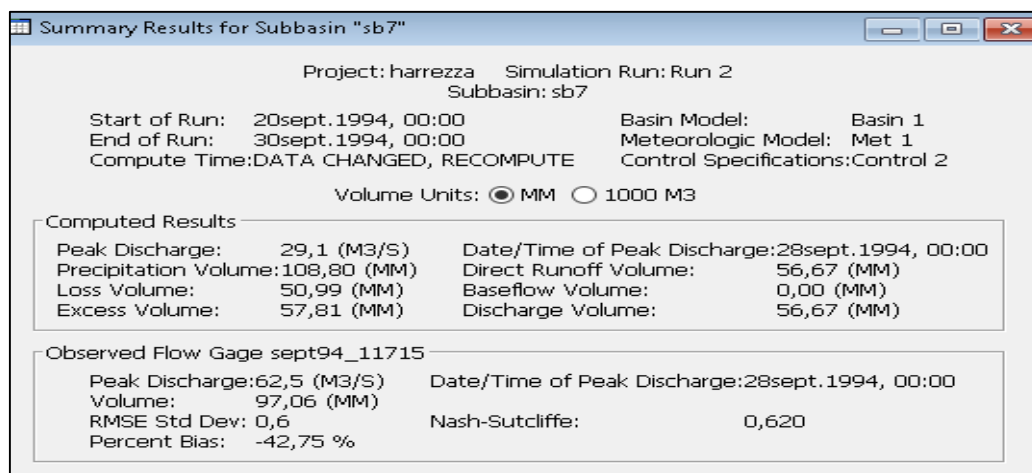


Figure 8 : Fenêtre représente les résultats de simulation - sous bassin 7

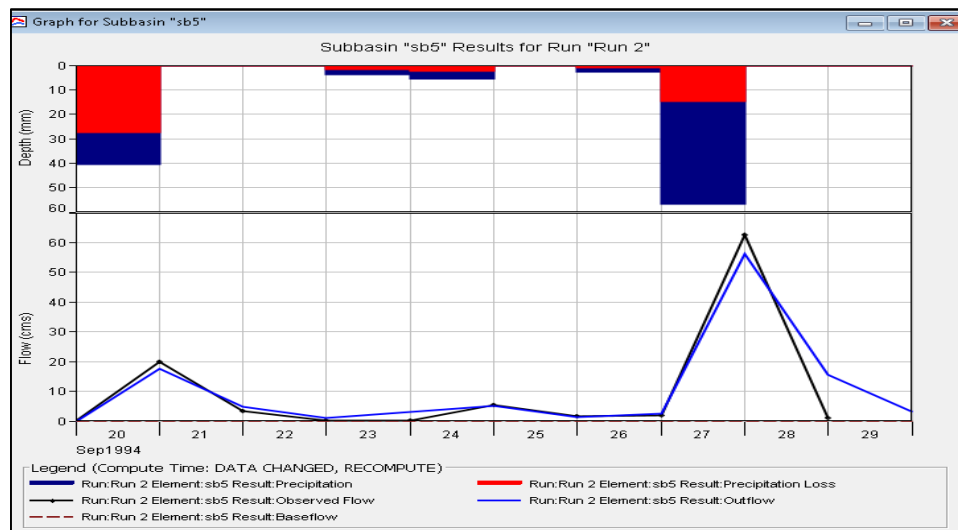


Figure 9 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simulé sous bassin 5

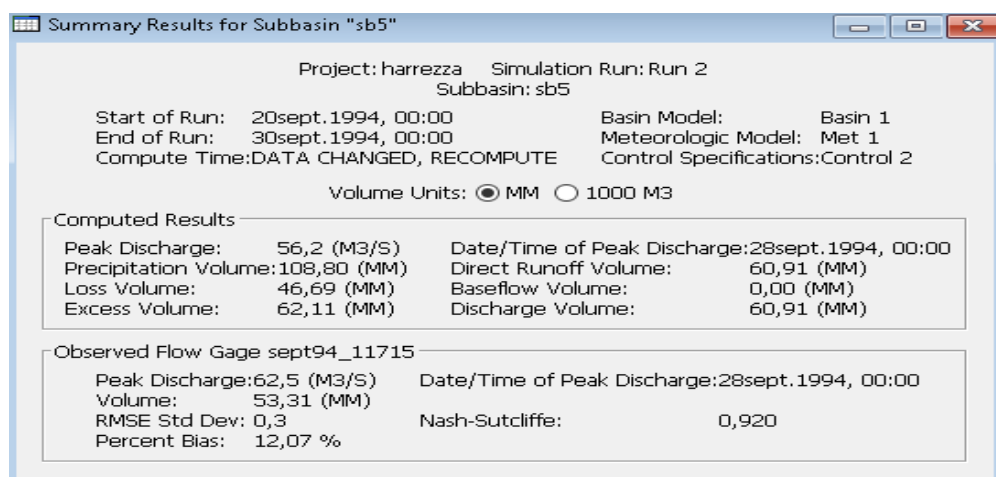


Figure 10 : Fenêtre représente les résultats de simulation - sous bassin 5

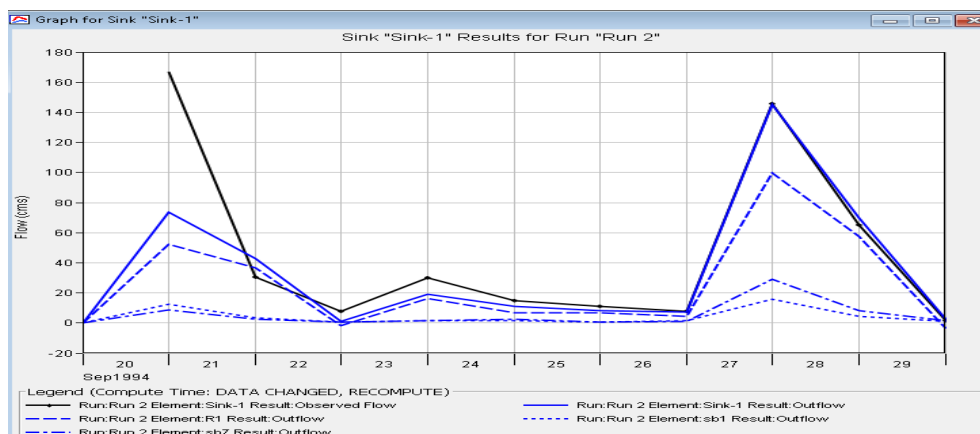


Figure11 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simulé - l'exutoire (avant calibration)

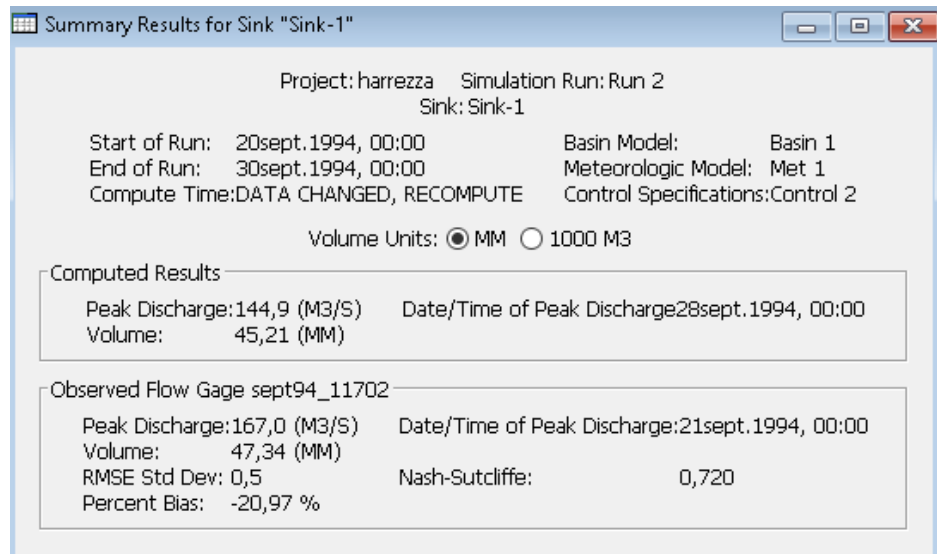


Figure 12 : Fenêtre représente les résultats de simulation - l'exutoire (avant calibration)

Les résultats du modèle hydrologique ont montré une adéquation raisonnable entre la forme de l'hydrogramme simulé et observé. Les Figures (7, 9,11) et présentent une comparaison des séries temporelles du débit des cours d'eau simulé et observé pour sous bassin5, sous bassin7 et l'exutoire du bassin versant durant les périodes de calibration du 20 au 30 septembre 1994 (nous limitons à la modélisation des crues de courte durée pour lesquelles le processus d'évapotranspiration est négligeable).

Les paramètres estimés auparavant sont à optimiser de manière à faire correspondre convenablement les hydrogrammes observés et simulés. « Le but du calage est de trouver le jeu de paramètres qui permet la reproduction la plus fidèle possible du fonctionnement du système étudié » [Kreis, 2004].

Un modèle calé permet de reproduire fidèlement les événements avec lesquels a été effectué le calage, mais pas nécessairement tous les événements [Kreis, 2004]

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 paramètre Routage de Muskingum K (le temps de parcours en heure)
- le paramètre Routage de Muskingum x (paramètre permettant une pondération $0 < X < 0,5$)

Pour chaque paramètre à optimiser nous pouvons entrer une valeur de départ et des valeurs limites à ne pas franchir. Nous avons aussi le choix entre quatre critères de convergences dont deux ont donné des résultats satisfaisants au niveau du volume de crue. Les valeurs des paramètres optimisés comparées avec les valeurs de départ sont regroupées dans le tableau suivant :

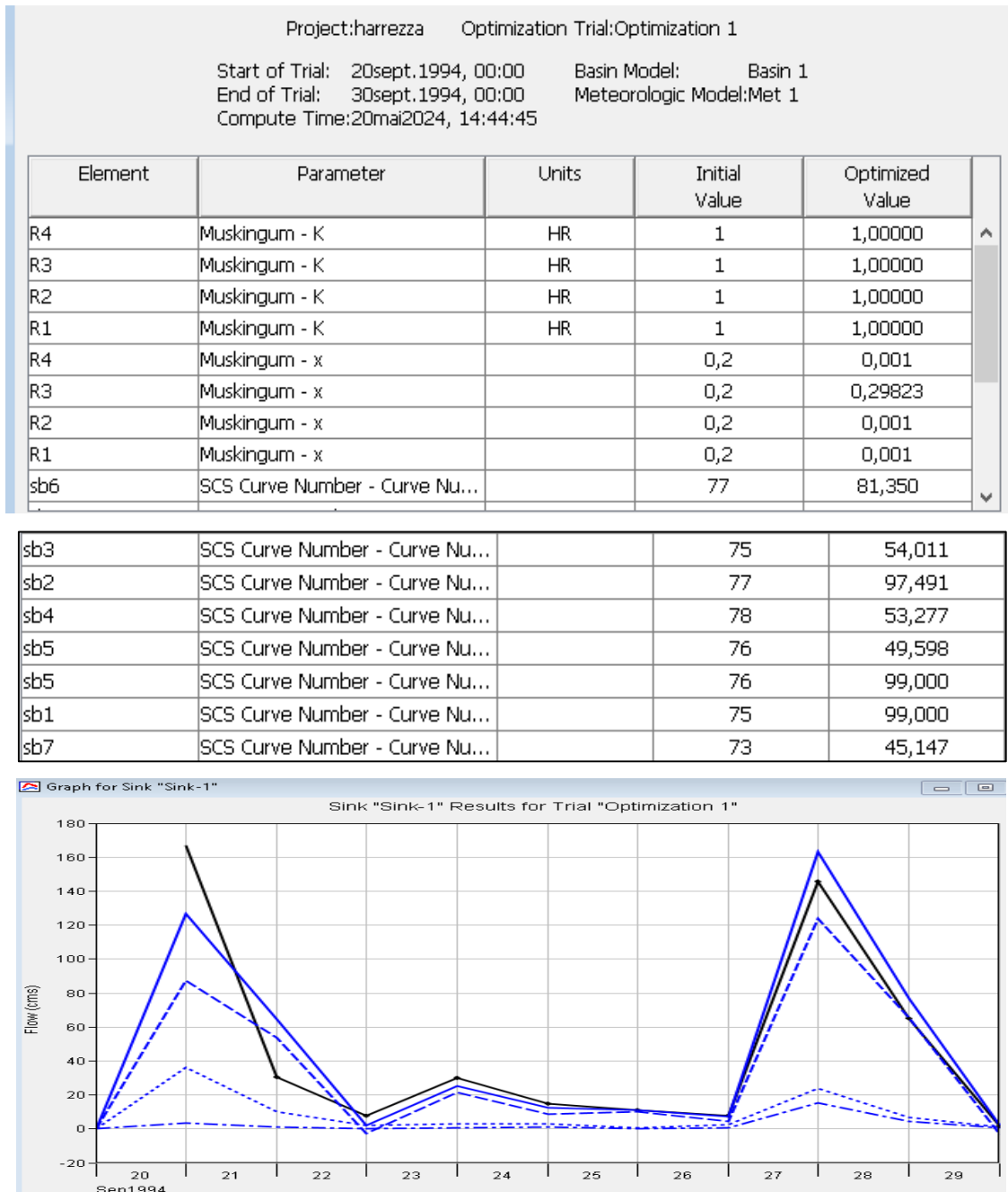


Figure 13 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule- l'exutoire (après calibration)

L'analyse de sensibilité a été réalisée en faisant varier les paramètres respectifs dans chaque essai de simulation. Les paramètres du modèle étaient variait dans la plage de $\pm 25\%$ à un intervalle de 5% dans chaque optimisation

L'analyse indique que CN était le paramètre le plus sensible. Un changement mineur dans les valeurs de ce paramètre a modifié la forme des hydrogrammes de ruissellement simulé.

Ces résultats démontrent l'impact de la Topographie du bassin, du type de sol, de l'occupation des sols et d'autres caractéristiques du bassin versant sur la modélisation par HEC_HMS.

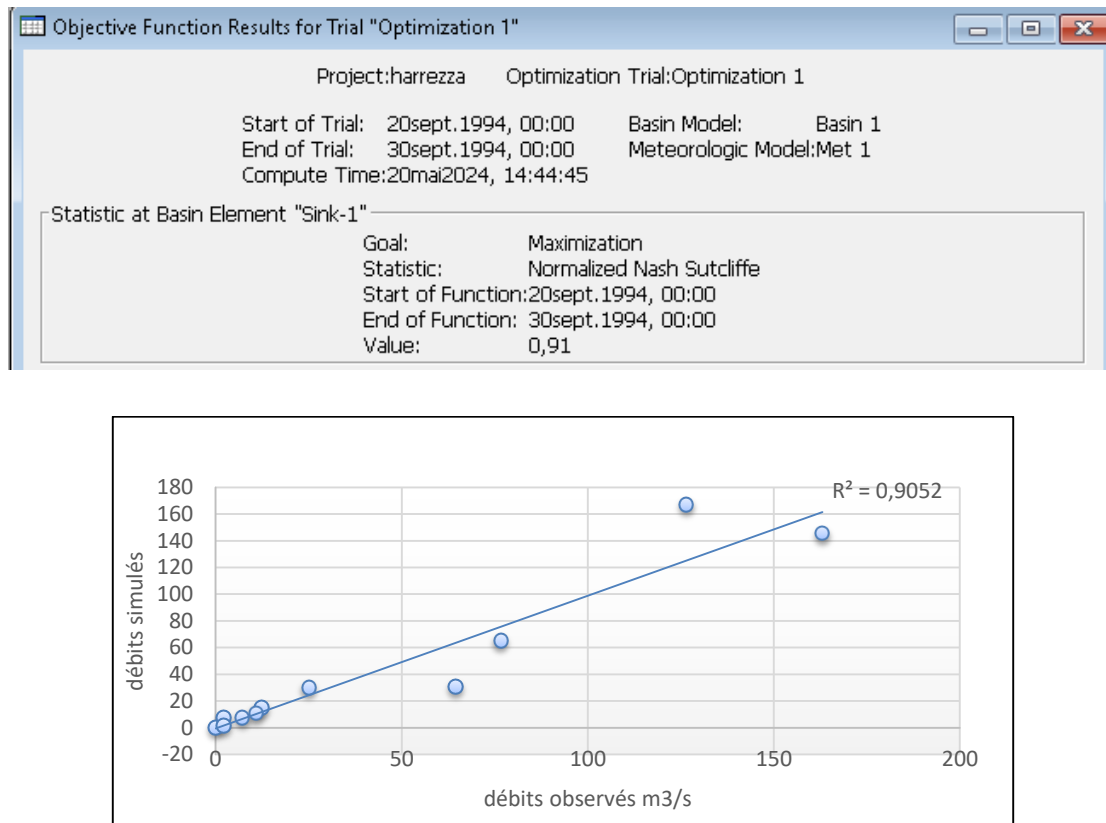


Figure 14 : Fenêtre représente -Critères de performance (critère de Nash et du coefficient de détermination) après calibration

6. validation du modèle hydrologique (Crue novembre_2007) :

La validation des paramètres issus du calage sera effectuée à l'aide des pluies et débits observés en novembre 2007. « La validation consiste à tester la performance du modèle en utilisant le jeu de paramètres obtenu par calage pour simuler un événement observé différent de ceux utilisés pour le calage » [Kreis, 2004.] Le modèle est validé, si les paramètres obtenus par calage permettent de reproduire l'événement de validation. Il peut alors être exploité pour simuler des événements variés.

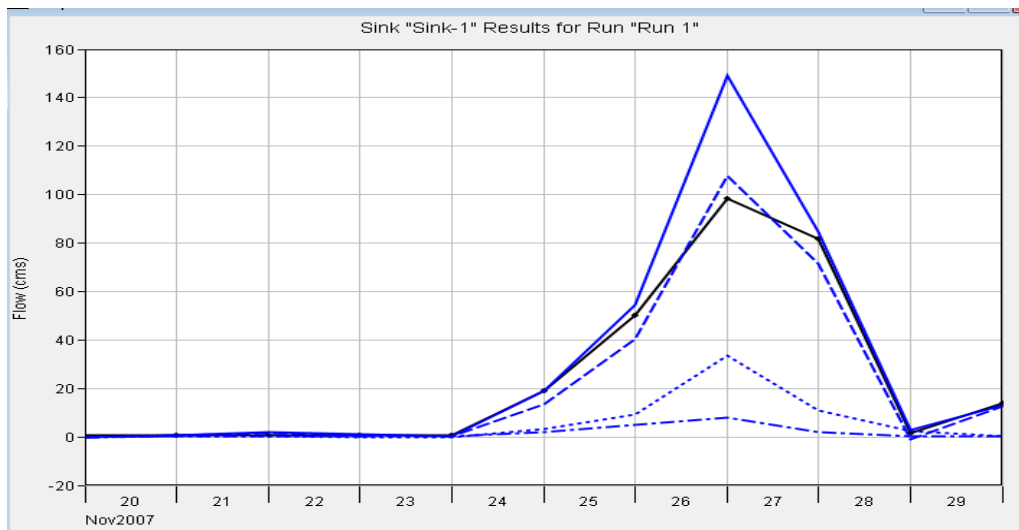


Figure 15 : Hydrographes des crues des événements avant validation du modèle

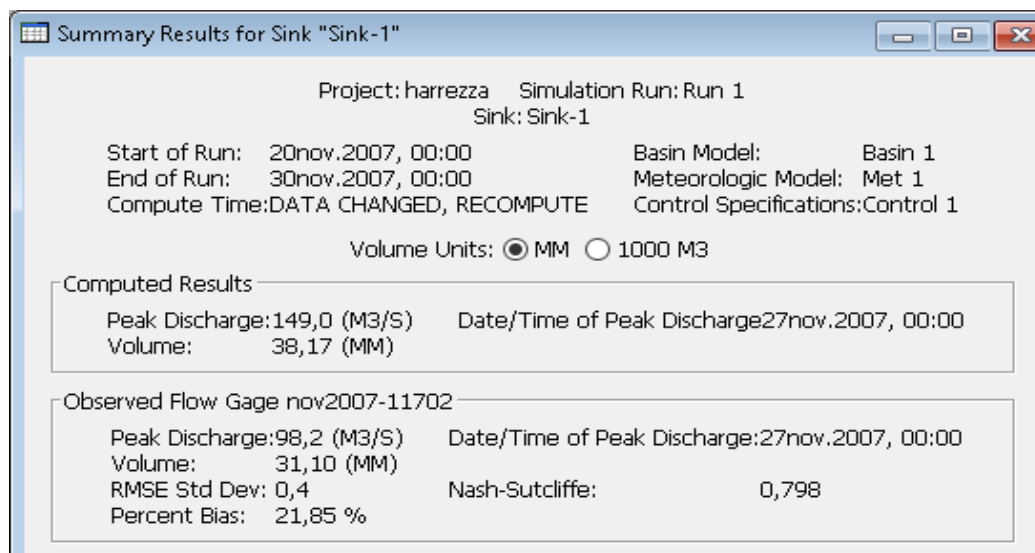


Figure 16 : Fenêtre représente le volume de la crue simulée- débit de point-Critères de performance avant validation

6.1 Après validation

Après le premier essai de validation fait par les trois méthodes et qui n'a pas donné des résultats satisfaisants en matière de la restitution des débits de pointe et de volumes, cette nouvelle calibration effectuée sur l'événement 20 a30 Novembre- 2007 est censé améliorer l'efficience du modèle.

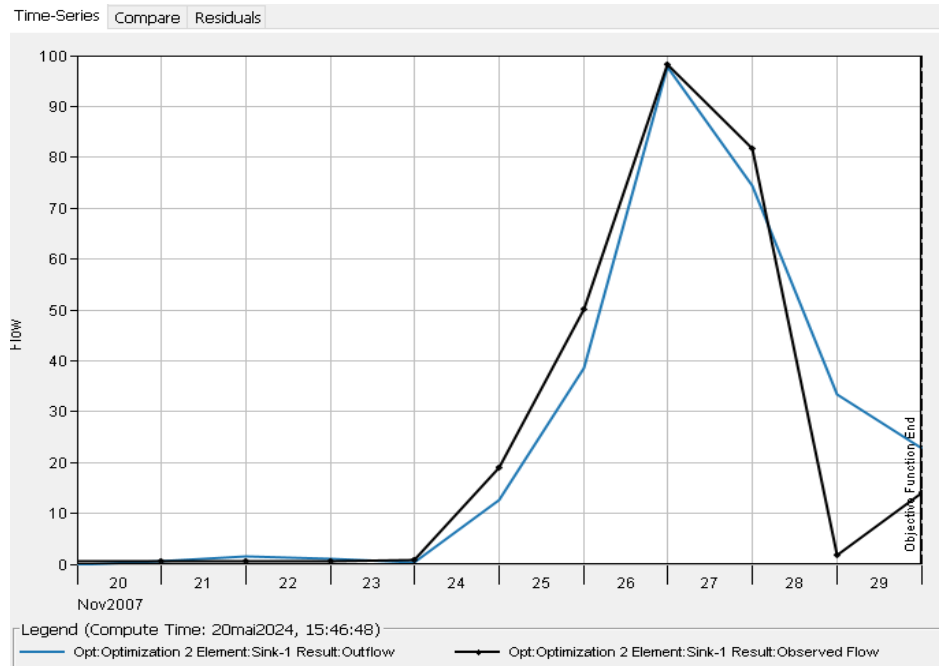


Figure 17 : Hydrographes des crues des évènements après validation du modèle

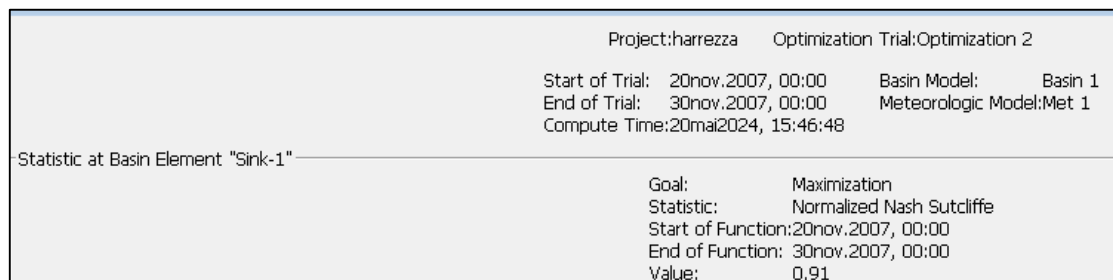
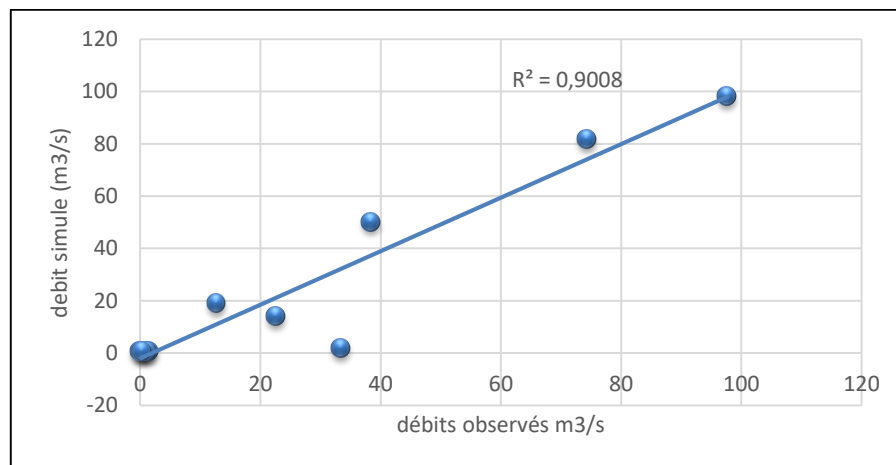


Figure 18 : Fenêtre représente -Critères de performance (critère de Nash et du coefficient de détermination) après validation

Il existe une bibliographie très riche présentant différentes formes de fonctions critères. Citons à titre d'exemple : le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) ; Le critère de Fortin (Fortin et al, 1971) ; etc....

Une étude comparative entre différentes formes de critères a été effectuée par Servat et al. (1989) a montré la prédominance du critère de Nash sur les autres formulations, c'est-à-dire, il permet d'accéder au meilleur calage. Le modèle est d'autant meilleur que NASH est proche de 100.

$$\text{NASH} = 100 \left[1 - \frac{\sum (Q_o - Q_c)^2}{\sum (Q_o - Q_m)^2} \right] \quad \text{avec} \quad Q_m \text{ moyenne des débits observés.}$$

D'après les valeurs du critère de Nash ($N_s=0,91$) et les coefficients de détermination ($R^2 = 0,90$), ainsi que la superposition des courbes des lames d'eaux écoulées calculés et simulés (figure17), le calage paraît correct juste pour le sous bassin de l'Oued Harrezza.

7. Exploitation du modèle hydrologique :

Une fois le modèle calé et validé, il pourra servir à simuler les crues de projet à partir des pluies de projet synthétiques de période de retour 10, 20, 50 et 100 ans. Ces hydrogrammes de projet seront ensuite injectés dans le modèle hydraulique.

Conclusion :

L'estimation du ruissellement est obligatoire pour soutenir les ressources en eau, mais dans cette région, les données surveillées sont limitées. La présente recherche tente d'étudier l'efficacité du modèle HEC-HMS dans le bassin du Harezza.

Une analyse de sensibilité a été réalisée en ajustant différentes valeurs de paramètres dans le modèle HEC-HMS pour le bassin versant. Après avoir exécuté les modèles à plusieurs reprises, les résultats du débit simulé ont été comparés aux valeurs surveillées à l'exutoire du bassin (station 11702) et à la station du barrage de Harrezza (station 11715) à chaque changement de paramètres. À cet égard, les paramètres Curve Number, Muskingum K et Muskingum x ont été calibrés à l'évènement de pluie et de crue septembre- 1994, et l'évènement Novembre -2007 pour valider le modèle. Les résultats des mesures ont approuvé les résultats du modèle et ont montré que la valeur de débit de pointe observé et le modèle validé est identique, avec une valeur de R^2 de 0,9008 et une efficacité de Nash-Sutcliffe de 0,91. La présente étude conclut que le modèle peut être utilisé pour le bassin du Harezza.

Conclusion générale :

Conclusion générale :

La révision des méthodes d'estimation des débits de projet utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques s'est imposée face aux dégâts causés par les événements extrêmes récents. Une réadaptation de ces méthodes au contexte et aux données hydrologiques récentes s'est avérée nécessaire. Le travail mené est présenté pour le bassin versant de L'Oued Harezza. De plus, les données pluviométriques et hydrométriques sont en permanente transformation, dans le temps, due à l'activité humaine, au changement climatique ou à l'évolution naturelle de la végétation, de la pédologie ou du réseau hydrographique du site. Néanmoins cela n'empêche l'établissement d'une étude hydrologique sur le site en se focalisant sur quelques paramètres selon l'objectif attendu. La modélisation est une méthode qui nous permet à la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, et d'aide à la décision est l'une des meilleures méthodes reconnues à la fois simple et fructueuse. Dans cette optique, la présente étude s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison modulaire appropriée du modèle HEC-HMS au bassin versant de L'Oued Harezza.

Ensuite, après la calibration du modèle, il doit être validé sur au moins l'un des événements présélectionnés. Une fois le modèle calé et validé, il pourra servir à simuler les crues de projet à partir des pluies de projet synthétiques de période de retour 5, 20, 50 et 100 ans. A long terme, on envisage pour les études postérieures de soulever des défis beaucoup plus enthousiastes comme par exemple : Après avoir validé complètement le modèle HEC-HMS sur le bassin versant de L'Oued Harezza, on peut l'utiliser pour la protection contre les inondations, en utilisant ce qu'on appelle la modélisation à temps réel qui repose sur le principe de reconstitution du débit à l'exutoire pour chaque pas de temps pour lequel la donnée pluie est mesurée, par conséquent on peut reconstituer l'hydrogramme d'une crue au fur et à mesure de l'enregistrement de la hauteur de pluie. Ce système d'alarme s'avère plus efficace que celui qui se base sur la mesure de la hauteur d'eau dans la rivière en amont du bassin versant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achour, F. (1997) Conditions hydrologiques et disponibilité en eau en région semi-aride, application de méthodologies nouvelles au bassin versant du Chélif. Thèse de doctorat. Université des sciences et technologie (Alger) pp. 1-64

- **AGENCE NATIONAL DES BARRAGES ET TRANSFERT 2008 (ANBT)**
- **AGENCE du Bassin Hydrographique Chellif-Zahrez 2010 (ABN ; CZ)**
- **BENHAMIDCHA ESMA (2019).** Modelisation Hydrologique Du Bassin Versant De L'oued Saf Saf Par Hec-Hms Mémoire de Master 2. Université Badji Mokhtar-Annaba
- **Beven, K.J. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer.** John Wiley & Sons: Chichester, UK; Wiley-Blackwell:Hoboken, NJ, USA, 2012.
- **Brunet –Moret y .1971 :** Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masse
- **. LAOUACHERIA F., MANSOURI R. 2015.** Comparison of WBNM and HEC-HMS for runoff hydrograph prediction in a small urban catchment. Water Ressources Management. Vol. 29 p. 2485–2501. DOI 10.1007/s11269015-0953-7
- **LARBI BOUAMRANE. F ; NABI .O;** Impact du Changement Climatique sur l'Évolution des Eaux Souterraine dans la plaine alluviale du Haut Chélif ; UNIVERSITE DJILALI BOUNAAMA– KHEMIS-MILIANA : Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de Master ; 2018/2019.
- **. Ibiza (D.), 1988.** Note complémentaire pour l'utilisation du modèle MODQJ (MODIBI). ORSTOM, Montpellier, multigr. 5 p
- **Kreis Nicolas.2004 ;** Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d' inondation : application a la vallée de la Thur (Haut-Rhin)
- **Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L.n Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007).** « Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations ». Transactions of the ASABE, Volume 50, n°3, p. 885-900.
- **Musy, André et Higy, Christophe, 2004.** *Hydrologie, une science de la nature.* Coll. Gérer l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 314 p
- **. Orellana B., Pechlivanidis I.G., McIntyre N., Wheeler H.S. and Wagener T., (2008),** A toolbox for the identification of parsimonious semi-distributed rainfall-runoff models: Application to the Upper Lee catchment, in iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software, 1, 670-677, 7-10 July, Barcelona, Spain
- **Seltzer, P. (1946) ;** Le climat de l'Algérie. Inst. Météo. Et de Phys. Du globe. Univ. Alger, 219 p
- **Singh, V.P. and Frevert, D.K. (2006);** Watershed Models. Taylor & Francis, Boca Raton.

- **USACE (1994):** Flood-Runoff Analysis Engineering Manuel. N° 110-2-1417, Washington
- **USACE (2000):** Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual version 3.5. HydrologicEngineering Center. 138 p
- **US Army Corps of Engineers (2011):** Sustainable Solutions to America's Water Resources Needs. Department of the Army, Corps of Engineers, Civil Works Strategic Plan 2011-2015. (May 2011)