



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن احمد

UNIVERSITÉ ORAN 2 MOHAMED BEN AHMED

**Mémoire De Fin De Stage Pour L'obtention Du Diplôme  
De master en hydrogéologie**

*Thème*

**Modélisation pluie-débit cas de  
bassin versant de L'oued seggueur.  
Wilaya D'El Bayadh  
(Sud-Ouest Algérien)**

**Présenté par :**

- M<sup>elle</sup> AZIZI KHOULOU D
- M<sup>elle</sup> BENALLAL NABILA

**dirigé par:**

- M<sup>me</sup> BELKHIR KHADIDJA

**Jury de soutenance :**

<b>Nom</b>	<b>prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>	<b>université</b>
Mr Safa	Aissa	professeur	Président	Oran 2
Mme Bakhti	Amel	MCB	Examineur	Oran 2
Mme Belkhir	Khadidja	MAA	Encadreur	Oran 2

Promotion : Juin 2023



# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mon cher père*

*Décède, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études.*

*A Ma chère mère idéale que dieu la garde*

*Pour Nous tous*

*A Mes chers frères, Mes sœurs et*

*Mon meilleur ami Chahrazed*

*A Tous ceux que j'aime.*

*Khouloud*



# *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A Ma chère **mère**, pour son amour, ses encouragements*

*Ses sacrifices et la confiance qu'elle m'accordé*

*A mon cher **père**, qui m'a toujours poussé et motivé dans*

*Mes études, pour son soutien, et son affection*

*A Ma chère **grand-mère** que dieu la garde Pour Nous tous*

*A Mes chers **frères**: Abed El Kader, Abed El Karim*

*A Mes **sœurs** : Souhila, Wissam Chahrazad*

*A Tous Mes **Amis** et*

*A Tous **ceux que j'aime***

*Nabila*

# *Remerciement*

*A Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage, la santé, et m'a accordé son Soutien durant les périodes les plus difficiles.*

*Tout d'abord, mes sincères remerciements sont adressés à mon encadrante Mme BELKHIR.*

*Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour avoir encadré ce mémoire et pour tous ces précieux conseils, son aide lors de mon travail.*

*Je remercie Mme. BAKRITI, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance de ce mémoire.*

*J'exprime toute ma gratitude à Mr. SAFA, d'avoir accepté de faire partie de ce jury et d'examiner ce travail.*

*Je souhaiterais remercier toute l'équipe de département de géologie, pour avoir bien voulu porter une attention particulière à ce travail et d'avoir accepté de m'aider et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la Réalisation de ce travail.*

## ملخص:

في هذا العمل قمنا بتحديد الخصائص المورفولوجية والهيدرولوجية لحوض التجميع واد صقر ثم قمنا بالتمدج الهيدرولوجية لبيانات تساقط الأمطار اليومية لهذا الحوض باستخدام برنامج HEC HMS ويعتمد مبدأ عمله على إدخال بيانات التساقط الأمطار اليومية والتدفق وكذا المعطيات الفيزيائية (النفاذية المساحة. الانحدار) لفهم سيناريو تحول الأمطار إلى سيول ومعرفة الخصائص والتغيرات المتعلقة بالزمان والمكان للسيول

## Résumé :

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

## Abstract:

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

# **SOMMAIRE :**

## **Introduction Générale**

### **Chapitre 01 : Modélisation hydrologique**

#### **Introduction**

- 1-Cycle hydrologique
- 2- Les modèles hydrologiques
  - 2 .1. Définition
  2. 2. Principe des modèles hydrologiques
3. Pourquoi du modèle hydrologique
4. Utilisation des modèles hydrologiques
5. Caractéristiques intrinsèques d'un modèle hydrologique
6. Classification des modèles hydrologiques
  - 6.1. Modèles stochastique
  - 6.2 Modèles déterministes
  - 6.3 Modèles à base physique
  - 6.4 Modèles boites noirs
  - 6.5 Modèles paramétriques
  - 6.6 Modèles empiriques
  - 6.7 Modèles analytiques
  - 6.8 Modèles conceptuels
  - 6.9 Modèles globaux
  - 6.10 Modèles spatialisés
    - a. Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés
    - b. Modèles physiques spatialisés
    - c. Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés
  - 6 .11 Modèle pluie-débit
7. HEC-HMS
8. La fonction de transfert SCS UH (Hydrogramme unitaire du SCS)
9. Le concept de base
10. Développement du modèle
11. Représentation du modèle de la pluie
12. Pluie hypothétique basée sur la fréquence
13. Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur
14. Le module du débit de base
15. Le module de routage
16. La fonction objective
17. La fonction d'optimisation automatique
18. Justification du choix du modèle

## **-Conclusion**

# **Chapitre 02 : Présentation de la zone d'étude.**

## **Introduction**

### **I. Caractéristiques physiques du bassin versant**

- 1.1 Situation géographique
- 1.2 Cadre géologique
- 1.3 Types de sol
- 1.4 Climatologies
- 1.5 Etude morphométriques de bassin versant d'oued Seggueur
  1. La surface (A)
  2. Le périmètre (P)
  3. La forme (KG)
  4. Rectangle équivalent

### **II. Etude de relief**

#### **-Caractéristique Hypsométriques (Altitudes)**

1. Les Altitudes Maximales et Minimale (H max H min).
2. La courbe hypsométrique.
3. L'altitude moyenne (Hmoy)
4. L'altitude médiane
5. LA dénivelée simple (D)
6. Les indices de pentes
  1. La pente moyenne du bassin versant (Im)
  2. Indice de pente ( $I_p$ )
  3. Indice de pente Roche
  4. Indice de pente global
7. Dénivelée spécifique (Ds)

### **III. Etude Du RESEAU Hydrographique**

1. Densité de drainage
2. Rapport du confluence
3. Rapport de longueur
4. Fréquence des cours d'eau
5. Coefficient de torrencialité
6. Temps de concentration
7. Etude des températures

### **IV. Analyse de pluies maximales journalières**

- 1 Pluies maximales journalières
2. Ajustement des pluies maximales journalières
3. Ajustement de la série pluviométrique de la loi de Gumbel
4. Calcul de la pluie maximale journalière fréquentielle
5. Pluie de courte durée

**V. Etude de crue**

1. Ajustement des débits max par Gumbel
2. Ajustement de la série pluviométrique de la loi de Gumbel
3. Variation des débits en fonction des précipitations
4. Application de la méthode de corrélation linéaire
5. Estimations des débits de pointe par les formules empiriques

1. Formule de TURAZZA
2. . Formule de SOKOLOVSKY

**- Conclusion**

## **Chapitre 03 : APPLICATION DU MODEL HEC-HMS.**

**-Introduction**

- 1- Le processus de fonctionnement
  - 1-1 FONCTIONNALITES
- 2- Les données nécessaires à l'application de simulation avec HEC-HMS
- 3- Les données de bases d'entrée
  - 3.1 Occupation du sol
  - 3.2 Modélisation de la météorologie
  - 3.3 Les données de spécifications de contrôle
  - 3.4. Calibration du modèle
  - 3.5 Validation de paramètres

**-Conclusion et recommandations**

## **-CONCLUSION GENERALE.**

## **Liste Des Figures :**

### **Chapitre 01 : Recherche bibliographique.**

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

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

**Figure.6.** Avers hypothétique de type SCS

### **Chapitre 02 : présentation de la zone d'étude.**

**Figure.1.** Plan de situation de bassin versant de l'oued seggueur

**Figure.2.** Les différentes classes du sol du bassin

**Figure.3.** Carte hypsométrique du bassin de l'Oued seggueur

**Figure.4.** Courbe hypsométrique du bassin versant

**Figure.5.** Histogramme des fréquences altimétriques

**Figure.6.** Réseau hydrographique du bassin d'oued SEGGUEUR (carte MNT)

**Figure.7.** Variation moyenne mensuelle des températures

**Figure.8.** Représentation graphiques des précipitations maximales journalières  
Fréquentielles

**Figure.9.** Histogramme des observations

**Figure.10.** Ajustement a la loi de Gumbel des pluies journalières maximales

(1971-2011)

**Figure.11.** Ajustement par la loi de Gumbel max

**Figure.12.** Courbes des pluies fréquentielles

**Figure.13.** Courbe des intensités- durées- fréquences

**Figure.14.** Ajustement à la loi de Gumbel des débits journaliers maximaux (2000-2023)

**Figure.15.** Ajustement par la loi de Gumbel max

**Figure.16.** Variation des débits max journaliers en fonction des précipitations max journalières à la station du barrage de Brézina

**Figure.17.** Application de la méthode de corrélation linéaire

## **CHAPITRE 03 : APPLICATION DU MODEL HEC-HMS**

**Figure.1.** Fenêtre bassin versant Oued Seggueur et ses sous bassins

**Figure .2** Curve Number (CN) du bassin versant Oued Seggueur

**Figure.3. :** Graphique de l'écoulement superficiel en fonction de la précipitation journalière par la méthode du SCS Curve Number

**Figure.4.** Fenêtre de donnée de surface ; méthode de perte ; méthode de transformation

**Figure.5.** Fenêtres de saisie des données pour chaque tronçon(R)

**Figure.6.** Fenêtres des données météorologiques de fréquence de 1%

**Figure.7.** Fenêtre de spécifications du contrôle

**Figure.8.** Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule. Sink (l'exutoire)

**Figure.9.** Fenêtre représente le volume de la crue simulée- débit de point-Critères de performance

**Figure.10.** Graphe de l'hydrogramme de crue après validation

**Figure.11.** Hydrogramme des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 50 ans

$R^2 = 0.44$

**Figure.12.** Hydrogramme des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 20 ans

$R^2 = 0.44$

**Figure.13.** Hydrogramme des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 10 ans

$R^2 = 0.44$

**Figure.14.** Graphe des débits simulé et débits observé

## Liste Des Tableaux :

### Chapitre 01 : Recherche Bibliographique.

**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 02 : présentation de la zone d'étude.

**Tableau.1.** Répartition altimétrique du bassin versant du l'Oued SEGGUEUR

**Tableau. 2.** Classification d'ORSTOM

**Tableau.3.** Classification du relief selon Ds

**Tableau.4.** Récapitulation des paramètres morphométriques du bassin de l'oued SEGGUEUR

**Tableau.5.** Variation du rapport de confluence

**Tableau.6.** Variation du rapport de longueur RL

**Tableau.7.** Valeurs du temps de concentration d'après Turraza et GIANDOTTI & formule S.C.S

**Tableau.8.** Récapitulation des paramètres hydrographiques du bassin de l'oued SEGGUEUR

**Tableau.9.** Variation moyenne mensuelle des températures

**Tableau.10.** Caractéristique de la série de donnée avec N =52ans

**Tableau.11.** Valeurs de la pluie journalière maximale (Station de L'Oued seggueur)

**Tableau.12.** Pluies et intensités maximales de durée t(h) et période de retour (ans)

**Tableau.13.** Les paramètres statistiques des débits maximaux journaliers

**Tableau.14.** Valeurs de débit journalier maximal (Station du barrage de Brézina)

**Tableau.15.** Calcul le débit max (Qmax) par formule de Turraza

**Tableau.16.** .Calcul le débit max (Qmax) par formule de Sokolovski

### CHAPITRE 03 : APPLICATION DU MODEL HEC-HMS

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

**Tableau.2.** Les pluies courtes durées estimées au bassin du Seggueur pour différentes périodes de retour Période de retour T (ans) \_Ptc (mm)

**Tableau.3.** résultat de validation de paramètres

**Tableau.4.** Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume pour différentes périodes de retour ; à la station du barrage Brézina

**Tableau.5.** Comparaison des résultats obtenus pour les différentes fréquences

## **Introduction Générale :**

Une connaissance adéquate des processus pluie-débit est essentielle pour estimer le volume de ruissellement produit dans un bassin versant. Connaître le volume de ruissellement dans un bassin versant est important pour la planification et la gestion durables de projets liés aux ressources en eau. Les activités d'estimation des volumes de ruissellement et des pics de crue peuvent être facilement simplifiées en adoptant un concept de modélisation et en comprenant la partition des précipitations et les principaux facteurs déclenchant du ruissellement.

Dans cette étude, cette tâche est réalisée en effectuant une analyse de sensibilité à l'aide du système de modélisation hydrologique du centre d'ingénierie hydrologique (HEC-HMS). Le modèle HEC-HMS a été mis au point pour simuler le processus pluie-débit du bassin versant de l'oued Seggueur. Ceci concerne un modèle (conceptuel) déterministe, semi-distribué, événementiel / continu et mathématique qui reconnaît d'autres modèles discrets dans l'attribution de chaque composante du processus de ruissellement (évaporation, ruissellement de surface, infiltration et recharge des nappes souterraines).

La wilaya d'El Bayadh connue comme une zone pastorale avec des terrains agricoles en majeure partie. Elle participe par un taux important à l'économie local en matière d'agriculture. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à l'étude hydrologique du bassin versant de l'oued SEGGUEUR. Le barrage de Kheneg- Larouia, implanté sur l'exutoire du bassin est destiné à assurer l'irrigation des terres (la palmeraie de Brezina, la zone d'épandage de Daïet El Bagra et Daïet El Anz...) se trouvant à l'aval du barrage. L'objectif de cette étude était d'élaborer un modèle pluie-débit, évaluer le volume de ruissellement du bassin versant de l'oued Seggueur et l'évaluation du comportement du bassin versant.

Notre mémoire est organisé en trois chapitres:

**Le premier chapitre :** décrit les notions de modélisation hydrologique.

**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 et les débits journaliers maximaux.

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

Chapitre01

*Modélisation  
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.

### **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

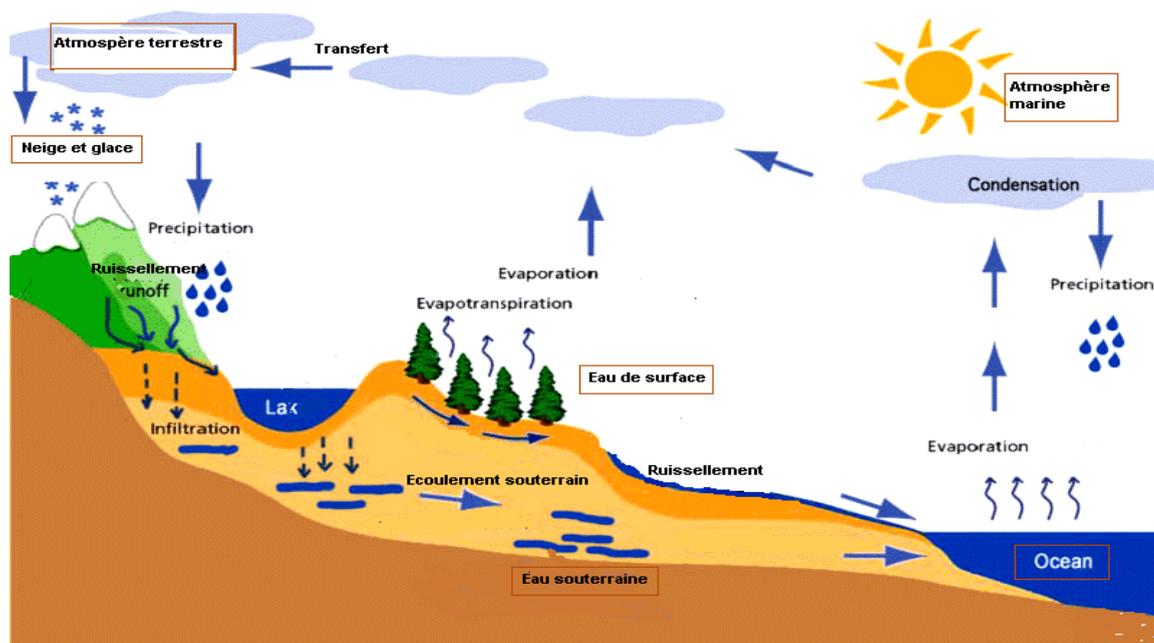


Figure 1 : Le cycle hydrologique.

## 2. Les modèles hydrologiques :

### 2.1. 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. 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 appelé 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 utilisé 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. Différentes 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 courant 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.

- Préviation 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

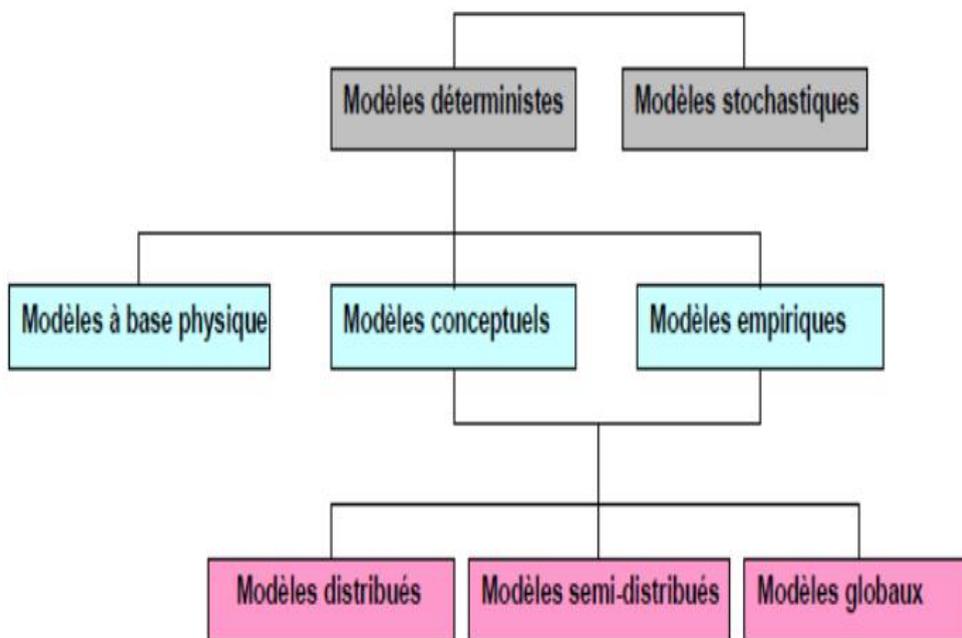
- **Découpage dans le temps** Celui-ci est souvent fait par intervalles égaux. On différencie trois pas de temps :
- **Pas de temps de fonctionnement ou de calcul** Il correspond à celui des données d'entrée. C'est donc le plus fin et celui auquel l'on se réfère pour un modèle donné.
- **Pas de temps 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 du polynôme) 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'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaire entre les variables [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. Ce type 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 très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

### **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 distribué à modèles global 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 téléchargés gratuitement sur le site internet de l'USACE pour Windows, à <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/download.html>.

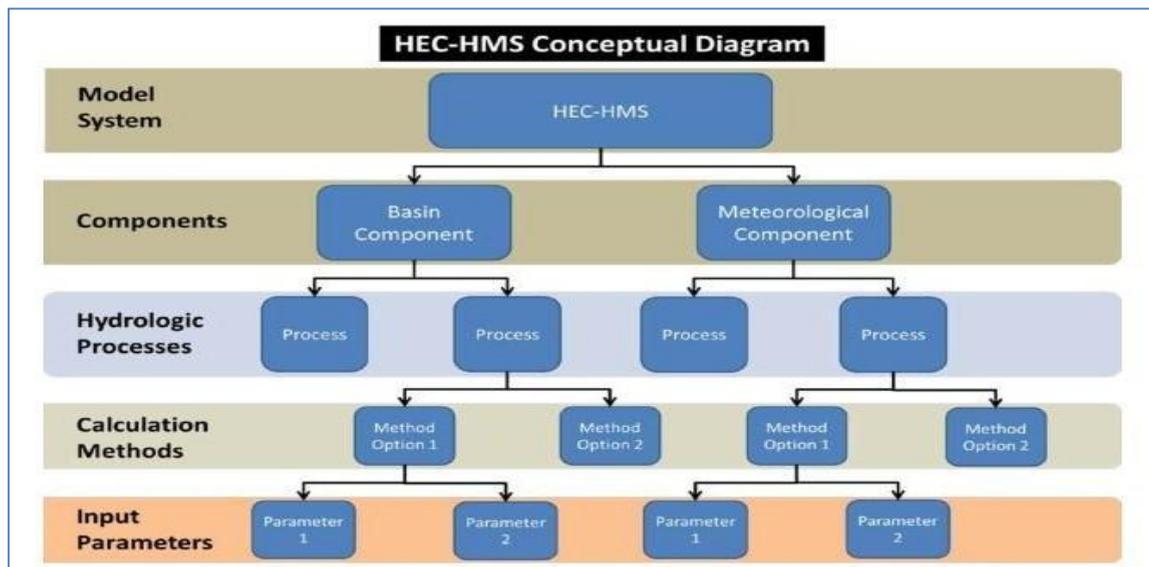


Figure.3 : Diagramme de HEC-HMS

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 :

$$\begin{cases} U_p = 2.08 \cdot \frac{A}{T_p} \\ T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6 \cdot T_c \end{cases}$$

Ou :

$\Delta t$  : est la durée de l'excès de précipitation,

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

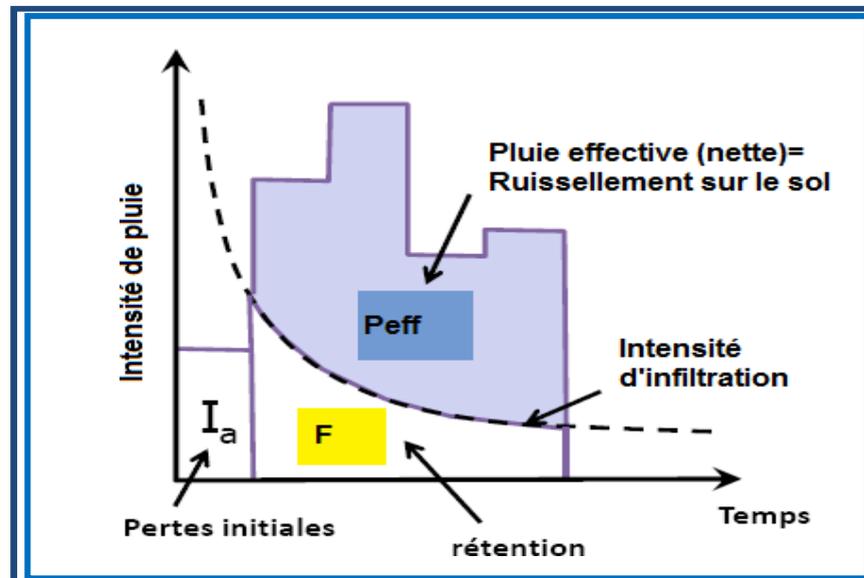
### **9. Le concept de base :**

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 km<sup>2</sup> (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 ( $P_{\text{eff}}$ ), 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 ( $I_a$ ) et les pertes par rétention (F) Méthode du NRCS

$$\frac{F}{S} = \frac{P_{eff}}{P - I_a}$$

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 :

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

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

En réarrangeant pour  $P_{eff}$  on trouve finalement

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

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 :

$$P_{eff} = \frac{(P - 0.2 S)^2}{(P + 0.8 S)}$$

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 :

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

La combinaison des équations 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 :

$$CN_{\text{composite}} = \frac{\sum A_i * CN_i}{\sum A_i}$$

Soulignons que les valeurs présentées au tableau (VI.5) sont valides pour des conditions antécédentes d'humidité moyennes (CN<sub>II</sub>).

**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 :

**Tableau2 :** 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 pour évaluer le CN pour des conditions sèches ( $CN_I$ ) ou pratiquement saturées ( $CN_{II}$ ) :

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.334 - 0.01334 CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.4036 + 0.005964 CN_{II}}$$

### **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.

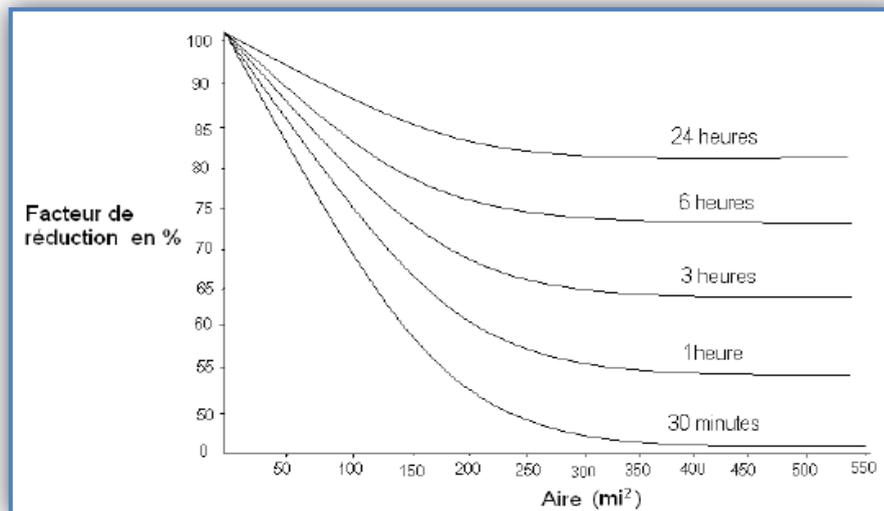
On peut créer avec le logiciel HEC-HMS des événements pluvieux hypothétiques, c'est-à-dire réaliser une simulation à partir de données qui ne sont pas issues de relevés réels. Cela peut s'avérer utile en particulier lorsqu'on veut connaître les volumes d'écoulements pour dimensionner des ouvrages d'art.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

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

### **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 I.4).



**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'hyétogramme. 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 (II.19) illustre le cas d'une pluie SCS de type I.

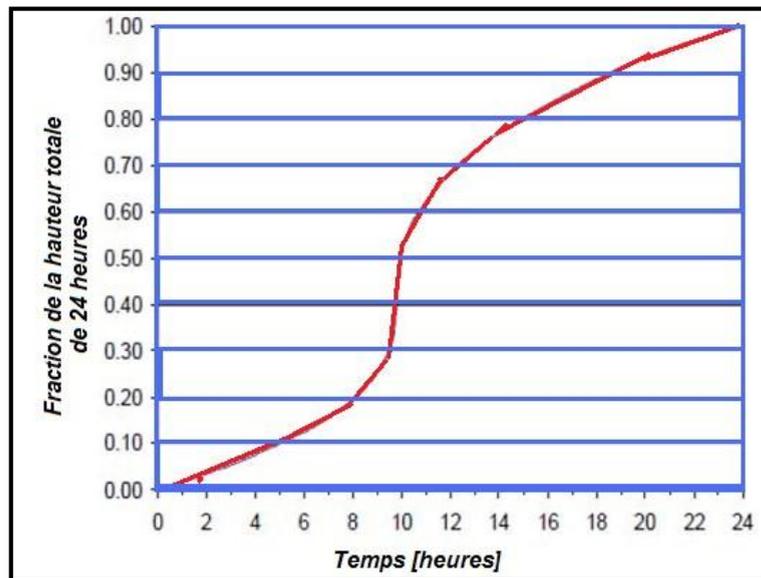


Figure 6 : Averse hypothétique de type SCS

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 spécifiés. 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.

Les données d'entrée de pluie pour une pluie de projet basée sur la fréquence sont les hauteurs de pluies pour différentes durées de pluie avec une période de retour 50 ans qui peuvent être tirés de courbes IDF. Courbes IDF sont créés sur la base de données d'un événement pluvieux de longueur de 31 ans d'une station pluviométrique et représentent les caractéristiques des pluies à long terme de la zone autour de la station pluviométrique.

#### 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 où 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».

### **16. La fonction objective :**

Elle mesure la qualité de l'ajustement de l'hydrogramme simulé à l'hydrogramme observé que ce soit en termes de débit, de volume ou du temps. Le HEC-HMS en compte 7 fonctions objectives à savoir :

- « Peak weighted RMS error » : modification de la fonction objective largement utilisée qui es l'erreur sur la racine moyenne des carrés de débit. Cette méthode donne plus de poids aux débits sen dessus de la moyenne et moins de poids aux débits en dessous.
- « Sum of squared residuals » : la somme des résidus au carré, attribue plus de poids aux larges erreurs et moins aux petits erreurs.
- « Sum of Absolute Residuals » : la somme des résidus absolus, qui ne différencie pas entre les erreurs larges et celles restreintes.
- « Percent Error in Peak Flow » : le pourcentage d'erreur sur le débit de pointe, qui se focalise sur l'ajustement des débits de pointe.
- « Percent Error in Volume » : le pourcentage d'erreur sur le volume, qui se focalise sur l'ajustement des volumes de ruissellement.
- « RMS Log Error » : utilise l'erreur sur la moyenne de la racine carrée des log des débits pour mettre en phase les débits faibles et forts.
- « Time weighted » : donne du poids aux erreurs proches de la fin de l'événement et moins aux erreurs du début.

Le choix de telle ou telle fonction est dicté par la problématique étudiée et/ou les objectifs de la modélisation. Par exemple, si on est amené à faire une délimitation des zones inondables, la fonction objective sur le volume est appréciée, si par contre l'objectif étant de déterminer le débit de projet d'un ouvrage quelconque, la fonction objective conseillée est celle jouant sur le débit de pointe. De l'autre côté si on est en présence d'une modélisation continue pour comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin, il sera préférable d'opter par exemple à la première fonction qui va s'intéresser plutôt aux grands pics de débits. Ainsi, on choisit la fonction qui nous aidera à résoudre notre problématique et atteindre nos objectifs.

**17. 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.

**18. 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 (Motevalli et al. 2012).

### **Conclusion :**

En conclusion, la modélisation hydrologique est un outil essentiel pour comprendre et prédire le comportement des systèmes hydrique, tels que les bassins versants, les rivières et les lacs. Elle permet de simuler les interactions complexes entre les processus hydrologiques, tels que les précipitations, l'évapotranspiration, l'infiltration, le ruissellement et la recharge des nappes phréatiques.

Les modèles hydrologiques peuvent être utilisés pour les nombreuses applications, telles que la gestion des ressources en eau, la prévention des inondations, l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le cycle de l'eau et la planification de la gestion des ressources en eau à long terme.

# Chapitre02

## Description de La Région d'étude

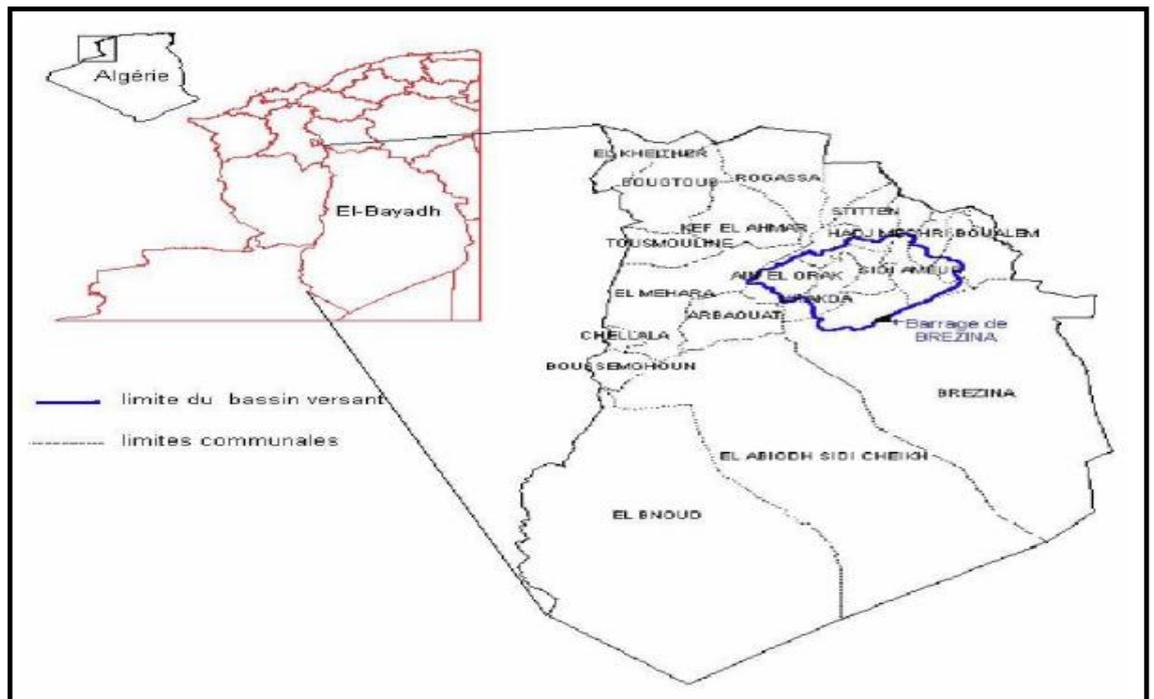
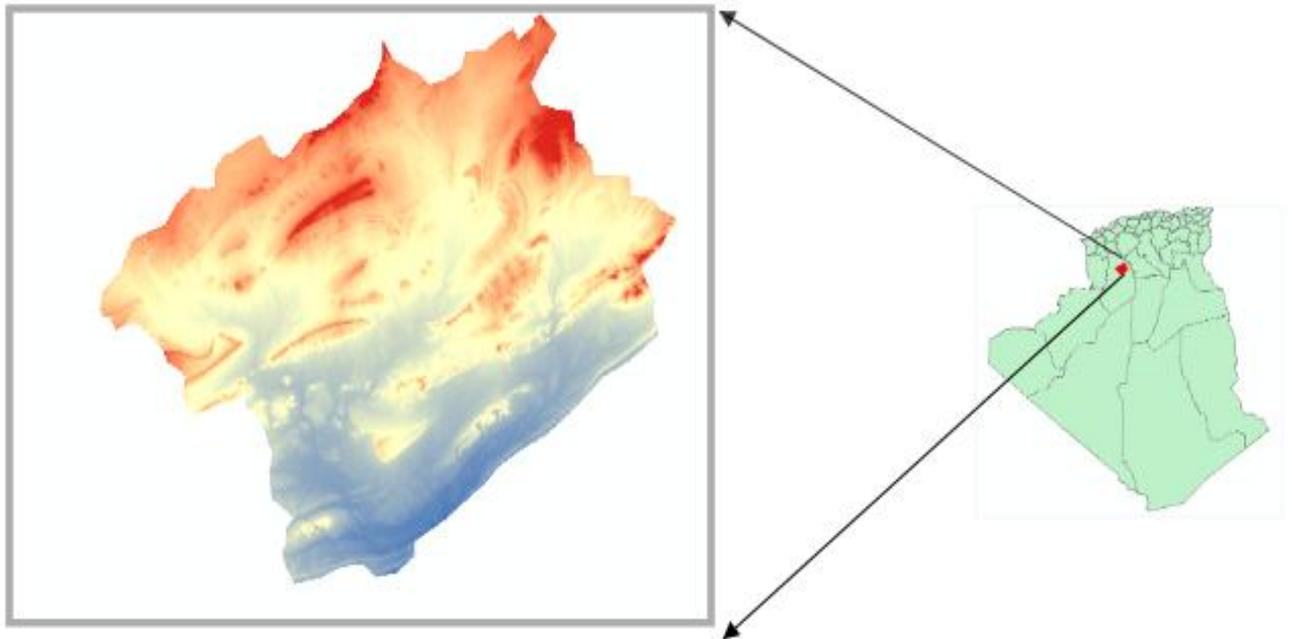
## **Introduction**

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

## **I. Caractéristiques physiques du bassin versant**

### **1.1 Situation géographique**

Le bassin versant s'étend dans la partie sud de l'atlas saharien, il est entouré par le massif de Djebel Amour et les montagnes de l'atlas saharien dont la direction SO-NE. Délimitent ainsi la région du bassin des plaines sahariennes. Le bassin versant de l'Oued SEGGUEUR se trouve au sud de la ville d'Bayadh, il draine une surface de 3680 km<sup>2</sup>, pour un périmètre de 303 km. Durant son parcours l'oued SEGGUEUR, reçoit plusieurs affluents, les plus importants sont l'oued Mellah et El Rhoul.



**Figure N°1 :** Situation géographique du bassin versant Oued Seggueur

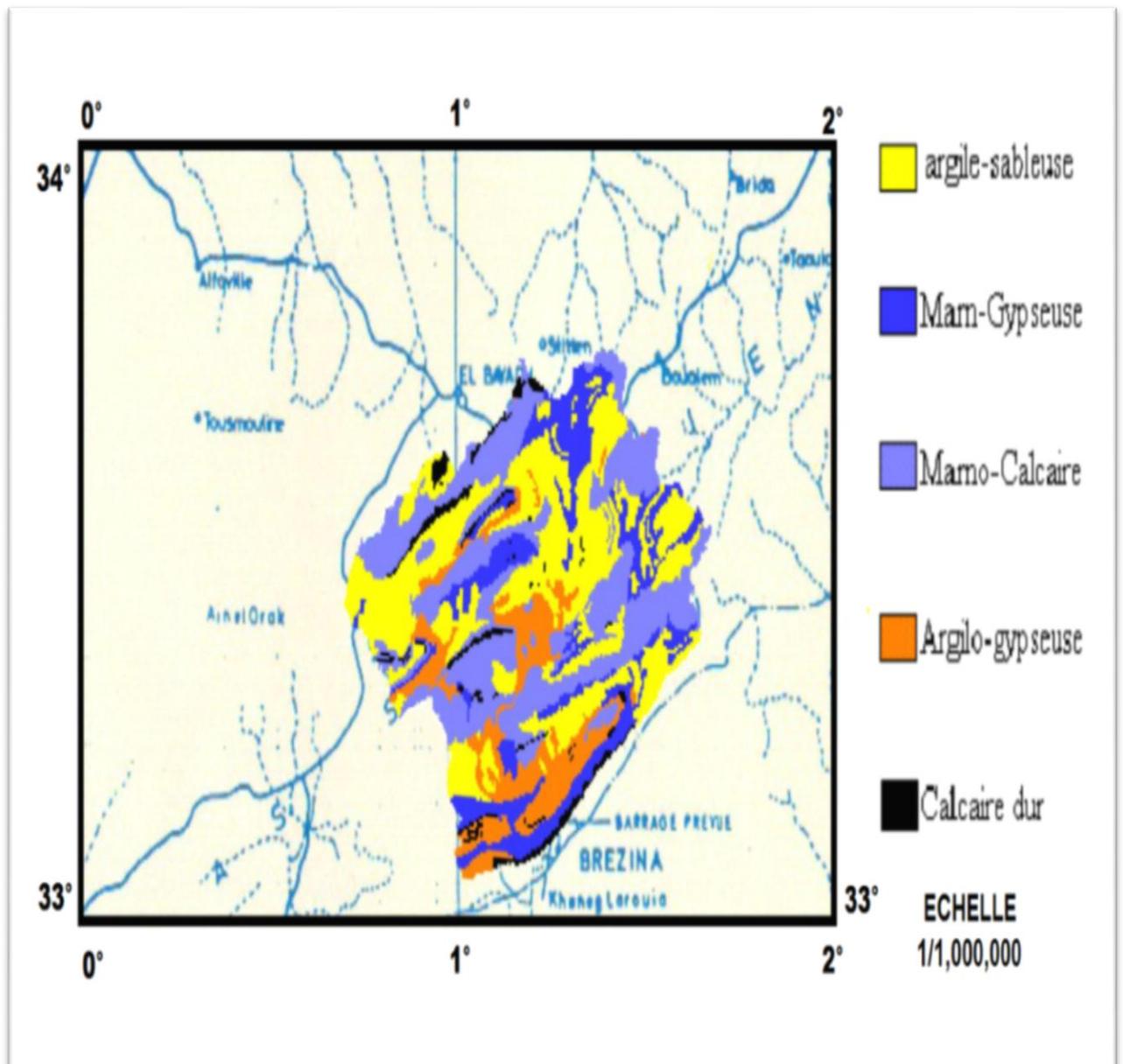


**Figure 2:** image satellitaire de la zone d'étude (Google earth\_2023)

**1.2. Cadre géologique :**

L'analyse de type de sol du bassin versant de Brézina est établie sur la base des affleurements lithologiques observés en corrélation avec l'image satellitaire mise à notre disposition. D'après la carte de type de sol (fig.2), on distingue cinq classes :

- Les calcaires durs qui affleurent en forme de sillons orientés d'Ouest en Est (au Sud du barrage).
- Les formations marneuses gypseuses noyées dans le massif calcaire.
- Le remplissage sédimentaire couvrant les autres formations superficielles, de nature argilo-gypseuse (au centre du bassin).
- Les sols marno-calcaires aux environs de la région d'El Ghassoul.
- Il s'agit, d'un sol à dominance calcaire, avec des intercalations de marne, d'argile et de gypse. Sur le reste de la superficie du terrain de parcours, les sables couvrent les autres formations où elles possèdent un coefficient de ruissellement plus ou moins faible.



**Figure3** : Les différentes classes du sol du bassin (Chanbi 2016)

### 1.3 Types de sol

Les sols de la région de Brézina se composent de trois zones :

- Les terres agricoles représentent 0,08% de la superficie du bassin est constituées essentiellement par la palmeraie de Brézina (divers vergers) et la zone d'épandage de Daïet El Bagra et Daïet El Anz (essentiellement céréales et fourrages).
- Les parcours présahariens (Hmada).
- La zone dunaire (erg) à l'extrême sud. (chanbi.2016)

#### **1. 4 Climatologies**

Possède un climat tempéré subtropical humide sans saison sèche et a été chaud (Cfa) selon la classification de Köppen-Geiger. Sur l'année, la température moyenne à oued seggueur est de 15.3°C et les précipitations sont en moyenne de 287.2mm.

#### **1.5 Etude morphométriques de bassin versant d'oued Seggueur :**

##### **1.La surface (A) :**

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

$A = 3680 \text{ Km}.$

##### **2. Le périmètre(P) :**

Une fois le bassin versant est délimité sur carte topographique, son périmètre peut être mesuré par un curvimètre ou par des techniques de digitalisation (logiciel Arc Gis ...). Le périmètre du bassin versant d'oued Seggueur est égal à : 303 km.

##### **3.- la forme (KG)**

La nature de la forme d'un bassin, influence énormément l'écoulement et détermine l'allure de son hydrogramme. Un bassin très allongé ne réagit pas de la même manière qu'un autre bassin de forme très ramassés ayant évidemment les mêmes caractéristiques Roche (1963).

Généralement, la forme d'un bassin versant est relative à l'indice de compacité de Gravélius. Ce dernier est déterminé en comparant le périmètre (P) du bassin à celui d'un cercle possédant la même superficie (A).

Sur le plan morphologique, l'indice de compacité  $K_G$  est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire, est supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface

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

$K_G$  : est l'indice de compacité de Gravélius

A : surface du bassin versant [ $\text{Km}^2$ ] = 3680  $\text{Km}^2$

P : périmètre du bassin [ $\text{Km}$ ]=303 km

Pour le cas du bassin versant de l'oued Seggueur, la valeur du coefficient de compacité  $K_G = 1,4$  indique que le bassin est de forme plutôt allongée. Caractère que nous pensons lié aux conditions structurales du bassin.

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant.

Lorsque  $K_G = 1$ , Le BV est de forme circulaire.

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

Lorsque  $K_G$  se rapproche de 1 : le bassin est de forme compacte ou arrondi.

Lorsque  $K_G$  est supérieur à 1 : le bassin est de forme allongée.

#### **4. Rectangle équivalent**

Le rectangle équivalent est un modèle mis au point par M. Roche pour comparer les bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

On suppose que sur un bassin donné, l'écoulement est approximativement le même que sur un rectangle de même superficie, ayant un même coefficient de Gravélius, une même répartition hypsométrique à conditions climatiques similaires, une même distribution des sols, de la végétation et même densité de drainage. C'est une transformation purement géométrique dans laquelle les droites parallèles aux largeurs du rectangle et l'exutoire sont le petit côté ou largeur du rectangle.

Soit  $L$  et  $I$  la longueur et la largeur du rectangle, et  $P$  et  $A$  le périmètre et l'aire du bassin versant.

$$\text{On a: } L = \frac{Kc}{1,12} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right) \sqrt{S}$$

Longueur de rectangle équivalent  $L = 123,3$  m

$$I = \frac{P}{2} - L$$

$$I = \frac{61,5}{2} - 26.15$$

La largeur de rectangle équivalent  $l = 28,2$  m.

## **II.1 Etude de relief**

### **- Caractéristiques Hypsométriques (Altitudes) :**

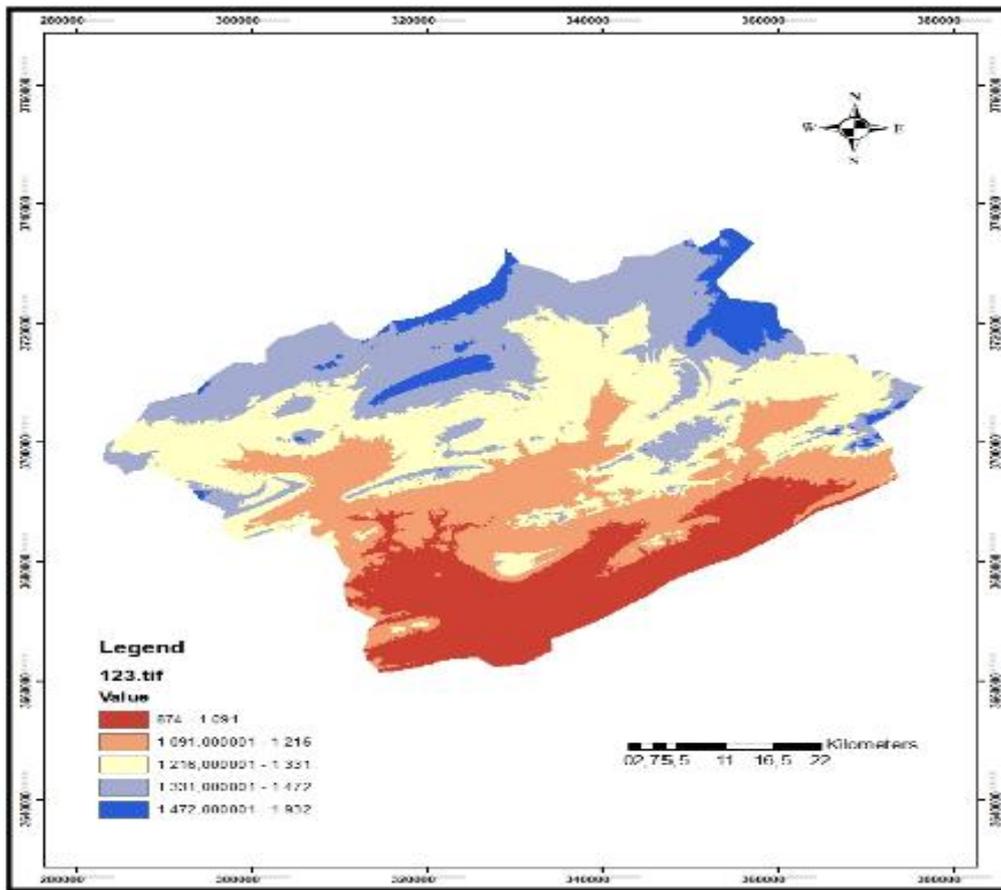
#### **1. Les altitudes maximale et minimale (Hmax et Hmin) :**

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

Les altitudes ainsi que la forme du relief influent considérablement sur les différents paramètres hydroclimatiques d'une région donnée. Elles déterminent en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. Partant de la répartition par tranches d'altitudes du bassin, nous avons établi la courbe hypsométrique.

#### **2. La courbe hypsométrique**

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

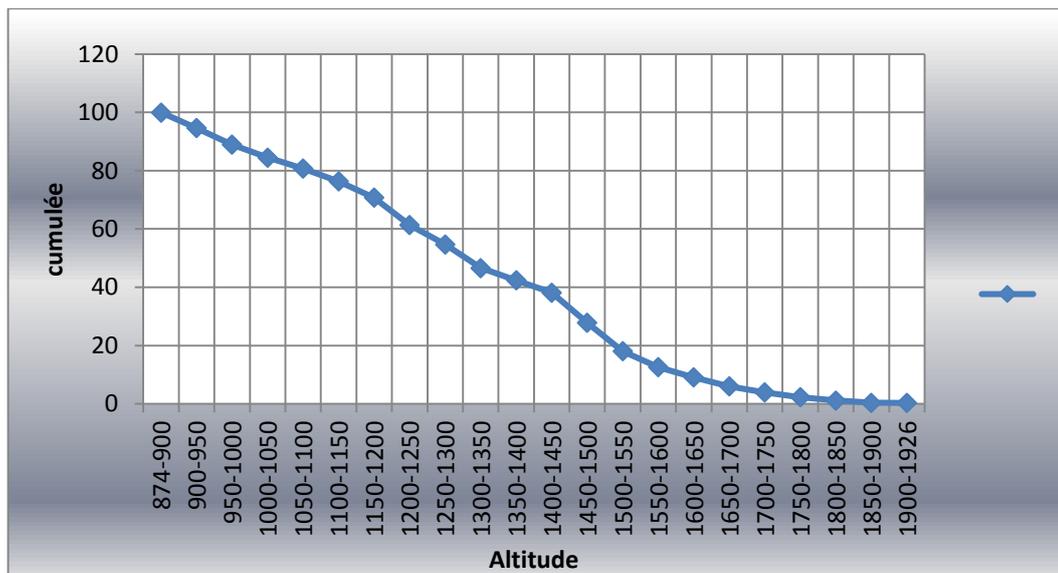


**Figure4 :** Carte Hypsométrique du bassin versant de l'Oued Seggueur( belkhir.kh .2023)

**Tableau 1 :** répartition altimétrique du bassin versant du l'Oued SEGGUEUR.

ALTITUDE(m)	Superficie	%superficie	%cumulée
<b>874-900</b>	13,88	0,38	99,93
<b>900-950</b>	195,24	5,31	94,62
<b>950-1000</b>	209,08	5,68	88,94
<b>1000-1050</b>	163,39	4,44	84,5
<b>1050-1100</b>	139,71	3,8	80,71
<b>1100-1150</b>	159,72	4,34	76,37
<b>1150-1200</b>	206,33	5,61	70,76
<b>1200-1250</b>	346,65	9,42	61,34
<b>1250-1300</b>	243,42	6,61	54,73

<b>1300-1350</b>	298,79	8,12	46,61
<b>1350-1400</b>	156,16	4,24	42,36
<b>1400-1450</b>	153,53	4,17	38,19
<b>1450-1500</b>	381,9	10,38	27,81
<b>1500-1550</b>	359,27	9,76	18,05
<b>1550-1600</b>	200,64	5,45	12,6
<b>1600-1650</b>	130,2	3,54	9,06
<b>1650-1700</b>	111,36	3,03	6,03
<b>1700-1750</b>	77,75	2,11	3,92
<b>1750-1800</b>	60,12	1,63	2,29
<b>1800-1850</b>	43,49	1,18	1,11
<b>1850-1900</b>	26,64	0,72	0,38
<b>1900-1926</b>	2,74	0,07	0,31



**Figure5** : Courbe hypsométrique du bassin versant

D'après l'analyse de cette courbe on constate dans un premier temps la présence d'une pente forte au niveau des altitudes qui dépassent 1675 m, une pente moyenne entre les altitudes de 1650 m jusqu'à 1375 m, et une pente assez faible de 1350 m en arrivant autour du point d'exutoire au niveau de 900 m. La concavité vers le bas, indique

que L'oued Seggueur, présente bien l'état d'équilibre du bassin, offrant un potentiel érosif moyen à faible

A partir de cette courbe, les altitudes suivantes ont été déterminées :

- L'altitude maximum de 1926 m correspondant au sommet du bassin versant.
- L'altitude minimale (exutoire) de 874 m

### 3. L'altitude moyenne(Hmoy) :

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

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A}$$

Avec :

$A_i$  : aire comprise entre deux courbes de niveau (Km<sup>2</sup>)  $H_i$  : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

A : superficie totale du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

**Hmoy** du bassin versant de oued seggueur égal à 1245 m .

### 4. L'altitude médiane :

Correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

L'altitude médiane dans le bassin d'OUEDSEGGUEUR est égale à 53m

### 5. LA dénivelée simple (D) :

On définit la "dénivelée D" comme étant la différence de côte entre H5 % et H95 % :

Celles -ci sont lues sur la courbe hypsométrique.

$$D = H5\% - H95\%$$

➤  $H_5=1750$  m

➤  $H_{95}=975$  m

$$D= 775$$

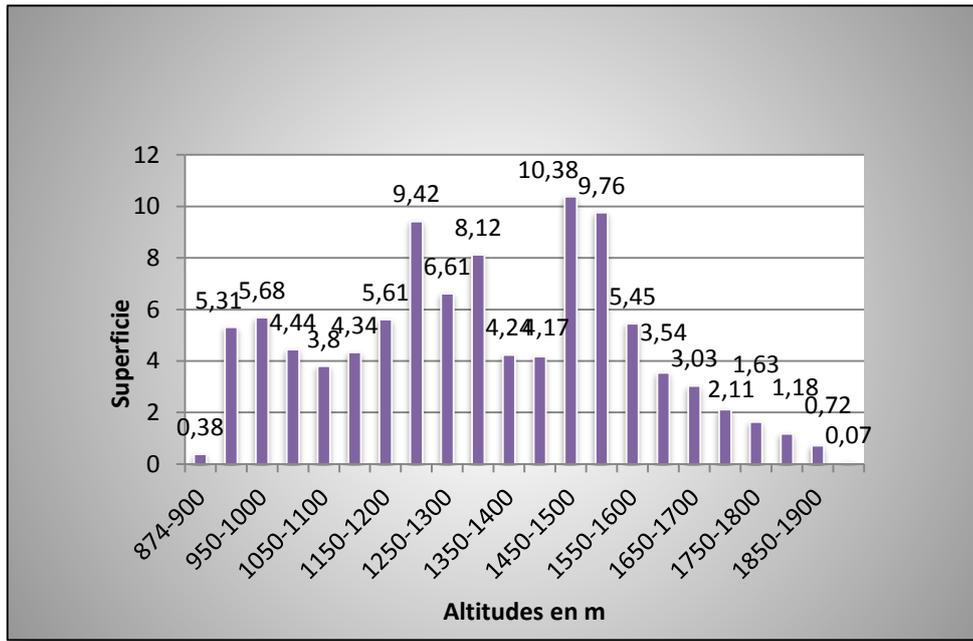


Figure 6 : Histogramme des fréquences altimétriques.

**6. Les indices de pentes :**

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

**1. La pente moyenne du bassin versant (Im)**

Paramètre important pour la détermination du temps de parcours de ruissellement, c'est à dire le temps de concentration, la pente moyenne du bassin versant a été déterminée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{D.L}{A}$$

Avec :

L : longueur totale de courbes de niveau (m)

D : entre deux courbes de niveau (m)

A : équidistance surface du bassin versant (m<sup>2</sup>)

Ainsi :  $i_m = 5\%$

**2. Indice de pente (Ip)**

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

$$i_p = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^n \left( x_i \times \sqrt{\frac{d}{x_i}} \right)$$

Où :

$i_p$  : Indice de pente [%],

Lrec : Longueur du rectangle [m],

$x_i$  : Distance qui sépare deux courbes sur le rectangle [m] (la largeur du rectangle étant constante,

cette distance est égale au facteur de pondération),

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

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

Ainsi,  $i_p = 8\%$

### **3. Indice de pente Roche**

L'indice de pente est les sommes de racines carrées des pentes moyennes de chacun des éléments pondérés par surface intéressées.

Si  $B_i$  représente la fraction de la surface du bassin comprise entre  $A_i$  et  $A_{i-1}$ ,  $A_i$  étant la distance qui sépare 2 courbes de niveau, on aura :

$$I = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^{12} \sqrt{B_i * [A_i - A_{i-1}]}$$

$$I=6,36\%$$

### **4. Indice de pente global**

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global  $I_g$  donné par la relation :

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

Avec

$I_g$ : indice global

$L$  : longueur de rectangle équivalent

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale.

$H_5$  et  $H_{95}$  sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin. La dénivelée  $D$  est donc égale à  $H_5 - H_{95}$ . Par la projection sur la courbe on obtient

$$H_{95} = 975 \text{ m et } H_5 = 1750 \text{ m}$$

$$D = 1750 - 975 = 775 \text{ m}$$

$$I_g = 775/123300 \quad I_g = 0,63\% \quad I_g = 0,63 \text{ m/km}$$

**Tableau 2 : Classification d'ORSTOM**

Type de relief	Indice de pente globale
<b>Relief très faible</b>	$I_g < 0.002 \text{ m/km}$
<b>Relief faible</b>	$0.002 < I_g < 0.005$
<b>Relief assez faible</b>	$0.005 < I_g < 0.01$
<b>Relief modéré</b>	$0.01 < I_g < 0.02$
<b>Relief assez fort</b>	$0.02 < I_g < 0.05$
<b>Relief fort</b>	$0.05 < I_g < 0.5$
<b>Relief très fort</b>	$0.5 \text{ m/km} < I_g$

D'après la classification d'ORSTOM, on peut dire que le bassin versant de l'Oued Seggueur présente un relief très fort.

### **7. Dénivelée spécifique(Ds) :**

$I_g$  est corrigé de l'effet de surface par utilisation de la dénivelée spécifique :

$$D_s = I_g \cdot A^{1/2}$$

$I_g$ : Indice de pente global (m/Km).

$A$  : aire du bassin (km<sup>2</sup>).

$$D_s = 38,22 \text{ m}$$

La dénivelée spécifique apparaît donc comme une correction de la dénivelée simple par application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin.

**Tableau 3** : Classification du relief selon  $D_s$ .

Type de relief	Dénivelée spécifique
Relief très faible	$D_s < 10$ m
Relief faible	$10 \text{ m} < D_s < 25$ m
Relief assez faible	$25 \text{ m} < D_s < 50$ m
m Relief modéré	$50 \text{ m} < D_s < 100$ m
Relief assez fort	$100 \text{ m} < D_s < 250$ m
Relief fort	$250 \text{ m} < D_s < 500$ m
Relief très fort	$D_s > 500$ m

La valeur de la  $D_s$  de bassin SEGGUEUR nous permet de le ranger dans la classe d'assez faible

**Tableau 4 :** Récapitulation des paramètres morphométriques du bassin de l'oued  
 SEGGUEUR.

Caractéristiques	Paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
<b>Morphologie du Bassin versant</b>	Surface	A	Km <sup>2</sup>	3680
	Périmètre	P	Km	303
	Coefficient de Gravelius	K <sub>G</sub>	-	1,4
	Longueur du rectangle équivalent	L	Km	123,3
	Largeur du rectangle équivalent	l	km	28,8
<b>Relief</b>	Altitude maximale	H <sub>max</sub>	m	1926
	Altitude moyenne	H <sub>moy</sub>	m	1245
	Altitude minimale	H <sub>min</sub>	m	874
	Pente globale	I <sub>p</sub>	m/km	0,62
	Pente de M. Roche	I <sub>g</sub>	%	6,36
	Dénivelée spécifique	D <sub>s</sub>	m	38,22

### II.3 ETUDE DU RESEAU HYDRORAPHIQUE :

Divers paramètres sont utilisés pour définir le réseau hydrographique parmi, les plus important nous citons, la densité de drainage ( $D_d$ ), le rapport de confluence ( $R_c$ ), le rapport des longueurs ( $R_l$ ), la fréquence des cours d'eau ( $F_s$ ) et le temps de concentration ( $T_c$ ).

#### **1. Densité de drainage :**

La densité du drainage est définie comme le rapport entre le linéaire total du cours d'eau dans le bassin et la superficie de ce dernier. La densité de drainage s'exprime en  $\text{km}/\text{km}^2$ .

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé. Elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Elle est donnée par la relation suivante :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

$D_d$  : densité de drainage [ $\text{km}/\text{km}^2$ ] ;

$L_i$  : longueur de cours d'eau [km] ;

$A$  : surface du bassin versant [ $\text{km}^2$ ].

Pour notre bassin  $D_d=2319 \text{ km}/\text{km}^2$

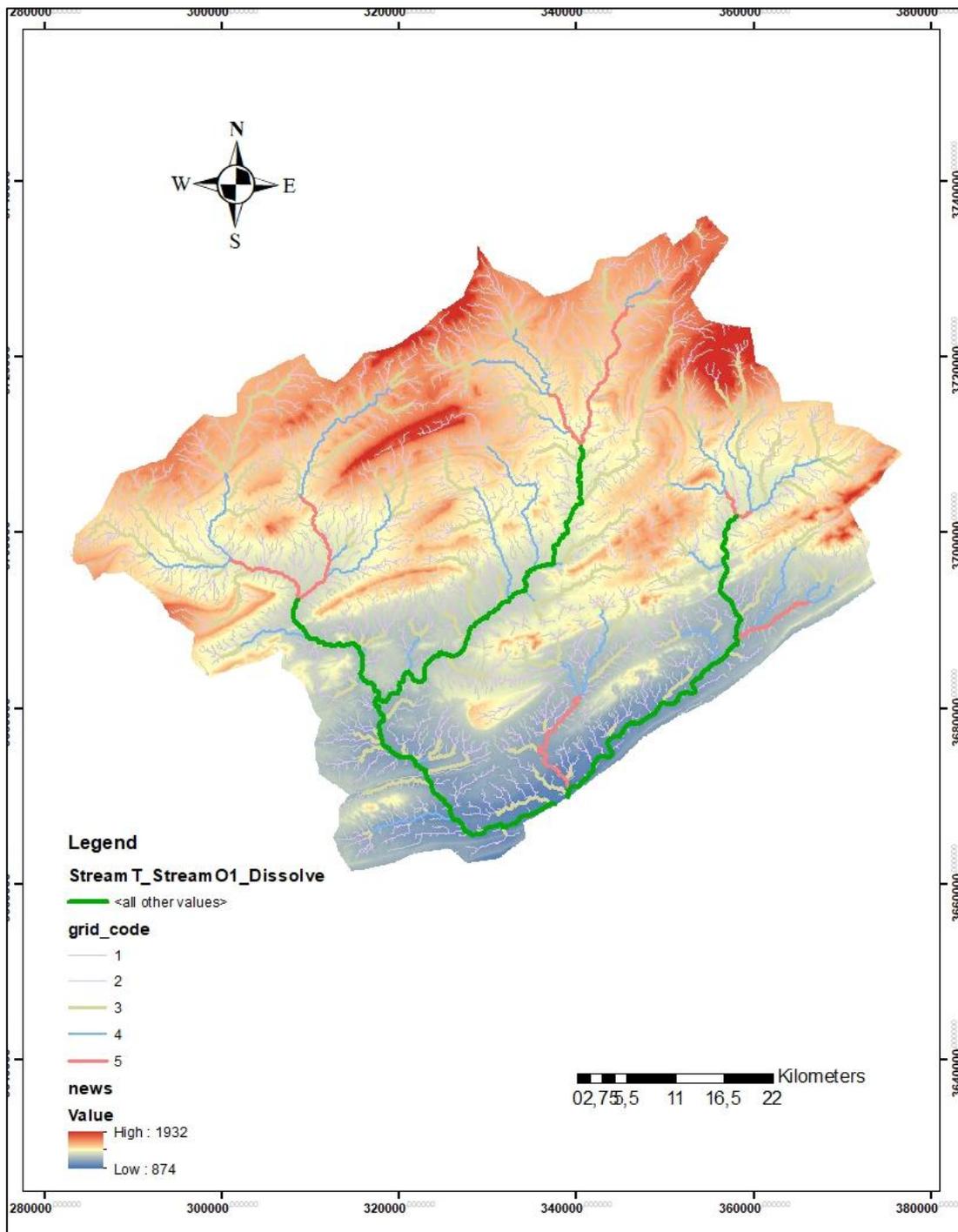


Figure 7 : Réseau hydrographique du bassin d'oued SEGGUEUR (belkhir kh 2023)

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques.

En pratique, les valeurs de densité de drainage varient entre 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration. Selon SCHUNM, la valeur inverse de la densité de drainage,  $C=1/Dd$ , s'appelle « constante de stabilité du cours d'eau ».

Physiquement, elle représente la surface du bassin nécessaire pour maintenir des conditions hydrologiques stables dans un vecteur hydrographique unitaire.

## **2.Rapport du confluence :**

Le rapport de confluence est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage. Il varie suivant l'ordre considéré.

Le rapport de confluence est égal au quotient du nombre de talwegs d'ordre  $x$  par celui des talwegs d'ordre supérieur ( $x + 1$ ).

Les réseaux hydrographiques sont toujours dendritiques, c'est-à-dire ramifiés comme les branches d'un arbre. Certains auteurs distinguent 3 principaux types de réseaux :

- **Chêne** : la ramification est bien développée avec un espacement régulier des confluences. Le rapport est inférieur à 5 (exemple Amazone) ;
- **Peuplier** : le bassin versant nettement plus long que large, présente de nombreux affluents parallèles et un rapport de confluence élevé, supérieur à 10 ;
- **Pin** : le bassin se caractérise par une concentration des confluences dans le secteur amont d'où sort un tronc qui ne reçoit plus d'affluents importants. Le rapport est faible

Lorsque le réseau est bien organisé. Les nombres des cours d'eau d'ordre successifs forment une série géométrique inverse.

Sur la base de la classification des cours d'eau, Horton (1932) et Schumm (1956) ont établi la loi :

$$R_C = N_U / N_{U+1}$$

Avec :

RC : rapport de confluence des cours d'eau ;

u : ordre d'un cours d'eau u varie entre 1 et w (w est l'ordre du cours d'eau principal, classification selon **Strehler**) ;

N<sub>u</sub> : nombre des cours d'eau d'ordre u ;

N<sub>u+1</sub> : nombre des cours d'eau d'ordre suivant.

**Tableau 5** : Variation du rapport de confluence

Nom du BV	Ordre	Nombre	R <sub>C</sub>
Oued seggueur	1	10782	
	2	1869	5,77
	3	341	5,48
	4	43	7,93
	5	7	6,14
	6	1	7

$$R_{Cm} = \frac{\sum R_C}{n}$$

$$R_{Cm} = \frac{32,32}{5} \quad R_{Cm} = 6,46$$

**4.Rapport de longueur :**

Il représente le quotient de la longueur moyenne des talwegs d'ordre X+1 à celle des talwegs d'ordre X. Dans un bassin bien organisé. Les longueurs moyennes des talwegs d'ordre successifs croissants forment une série géométrique directe. Sur la base de la classification des cours d'eau, Horton (1932) et Schumm (1956) ont établi la loi :

$$R_L = L_u / L_{u-1}$$

$R_L$  : rapport des longueurs des cours d'eau ;

$L_u$  : longueur moyenne des cours d'eau d'ordre  $u$  ;

$u$  : ordre d'un cours d'eau  $u$  varie entre 1 et  $w$  «  $w$  est l'ordre du cours d'eau principal, classification selon **Strehler** » ;

**Tableau 6** : Variation du rapport de longueur  $R_L$

Nom du BV	Ordre	Nombre	Longueur (km)	Longueur moy	$R_L$
Oued SEGGUEUR	1	10782	5151686	477,8	2,3
	2	1869	2057528	1100,87	2,19
	3	341	823524	2415,03	3,16
	4	43	328556	7640,84	2,43
	5	7	129716	18530,86	2,32
	6	1	42910	42910	2,48

### 5. Fréquence des cours d'eau :

Elle représente le rapport du nombre des cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin versant d'étude

$$F = N_1 / A$$

$F$  : fréquence des cours d'eau ;

$N_1$  : nombre des cours d'eau de l'ordre 1 ;

$A$  : surface du bassin ;

Alors :  $F = 10782 / 3680$        $F = 2,92$

Il existe une relation assez stable entre la densité de drainage  $D_d$  et la densité hydrographique  $F$ , de la forme :

$$F = a \cdot D_d^2$$

Où  $a$  est un coefficient d'ajustement.

En somme, les régions à haute densité de drainage et à haute densité hydrographique (deux facteurs allant souvent de pair) présentent en général une roche mère imperméable, un couvert végétal restreint et un relief montagneux.

L'opposé, c'est-à-dire faible densité de drainage et faible densité hydrographique, se rencontre en région à substratum très perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué.

### **6. Coefficient de torrentialité :**

C'est le rapport entre la fréquence des cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage

$$C_t = D_d * F$$

$C_t$  : Coefficient de torrentialité

$D_d$  : Densité de drainage

$F$  : Fréquence des cours d'eau d'ordre 1

pour le bassin d'oued **SEGGUEUR** est égale à 6805.

### **7. Temps de concentration :**

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.

De nombreuses formules permettent de calculer le temps de concentration sur un bassin versant.

A chacune de ces formules sont applicables un domaine de validité, que ce soit pour la taille des bassins versants étudiés ou pour les résultats obtenus. Nous avons utilisé deux formules différentes de temps de concentration qui sont les suivantes :

#### ➤ **Formule de GIANDOTTI (1937) :**

Le temps de concentration est calculé comme suit :

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec :

S : surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>) ;

L<sub>cp</sub> : longueur de cours d'eau principal (Km) ; H<sub>moy</sub> : altitude moyenne (m) ;

T<sub>c</sub> : temps de concentrations exprimé en heure      T<sub>c</sub>= 19.26 heure

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

$$T_c = \left[ \frac{0.87 L_p^3}{H} \right]^{0,385}$$

T<sub>c</sub> : Temps de concentration (h).

L<sub>p</sub> : Longueur du talweg principal (Km).

H : Différence entre les points extrêmes du talweg.

T<sub>c</sub> = 18.66 heure

**Tableau 7 :** Valeurs du temps de concentration d'après GIANDOTTI & formule S.C.S

Formule	GIANDOTTI	SCS	MOY
T <sub>c</sub> en heure	19.26	18.66	18.96

**Tableau 8 :** Récapitulation des paramètres hydrographiques du bassin de l'oued SEGGUEUR.

Caractéristiques Paramètres		Symbole	Unités	Valeurs
<b>Réseau hydrographique</b>	Densité de drainage	D <sub>d</sub>	Km/km <sup>2</sup>	2319
	Temps de concentration	T <sub>c</sub>	Heure	18.96
	Coefficient de torrentialité	C <sub>t</sub>	-	6805
	Fréquence des cours d'eau	F <sub>s</sub>	-	2,92
	Rapport des confluences	R <sub>c</sub>	-	6,46
	Rapport des longueurs	R <sub>l</sub>	-	2,48

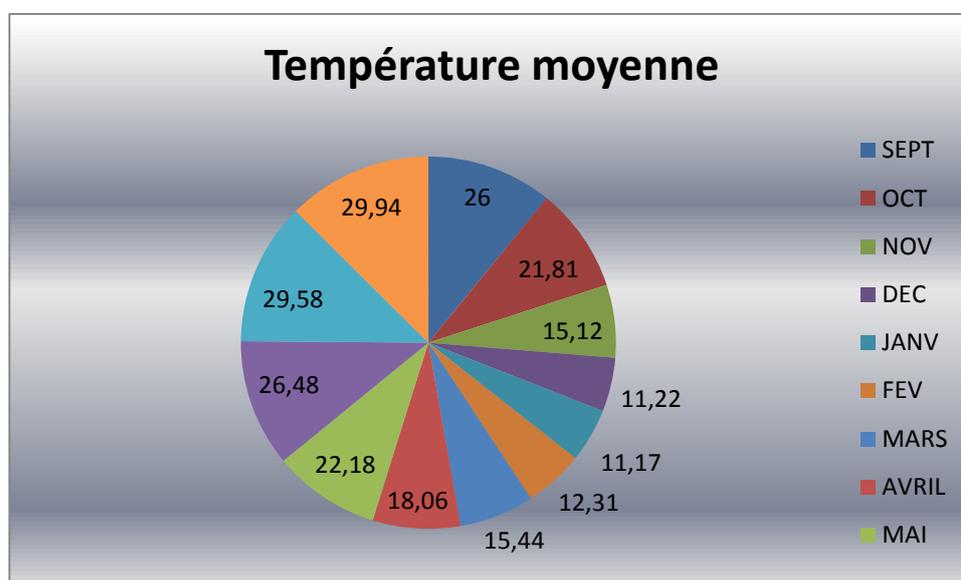
### II.3 -Etude des températures :

Les températures représentent un facteur important dans la détermination du type de climat d'une région. Ces températures sont caractérisées par des observations maximales, minimales et moyennes, reflétant ainsi les fluctuations annuelles et saisonnières des pressions atmosphériques.

D'après les valeurs des températures journalières constatées au niveau de la station météorologique de la ville de Brézina, nous avons pu remplir le tableau si dessous contenant les valeurs mensuelles de la température au niveau du bassin versant d'Oued Seggueur durant la période d'étude.

**Tableau 9 :** Variation moyenne mensuelle des températures

MOIS	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT
Température moyenne	26	21,81	15,12	11,22	11,17	12,3	15,44	18,06	22,18	26,5	29,58	29,9



**Figure 8 :** Variation moyenne mensuelle des températures.

Figure 8 Un semestre continental très froid, s'étend de Novembre à Avril, dont la température minimale avoisine les 6°C, et un semestre sec et chaud avec une moyenne des maximas de 29,5°C. On note l'occurrence du sirocco, un vent chaud et chargé de sable pendant la saison estivale qui sévit à raison de 3 à 4 jours par mois. Durant la période hivernale et sous l'influence continentale, les températures saisonnières, s'abaissent parfois en dessous de 0°C, d'où l'apparition de phénomène de gelée et de verglas. A la lumière de ces résultats, on peut dire que la zone d'étude connaît des hivers assez froids (rigoureux) et des étés assez chauds.

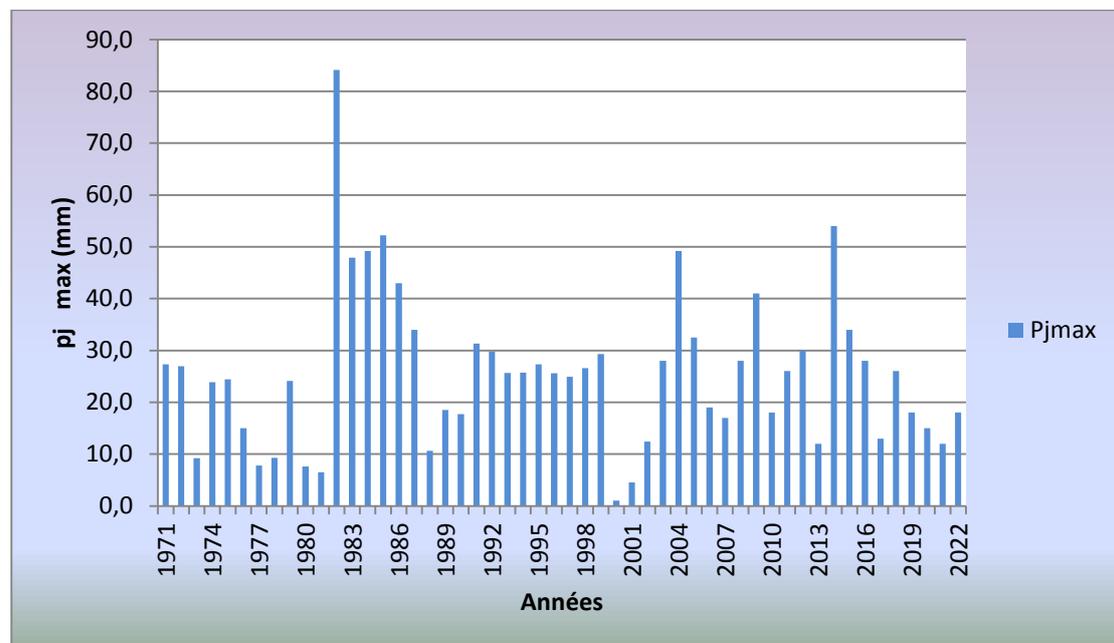
## II.4 Analyse de pluies maximales journalières :

### 1. Pluies maximales journalières

Les pluies maximales journalières de rares fréquences sont des pluies génératrices des crues d'importants débits, contre lesquels il faut protéger l'ouvrage.

### -Précipitation maximales journalières

L'étude consiste à faire un ajustement pour la série de données des précipitations maximales journalières du tableau 9 par une loi théorique afin de déterminer une intensité de pluie de durée et de période de retour donnée.



**Figure 9 :** Représentation graphiques des précipitations maximales journalières fréquentielles. (Station barrage du Brézina).

Dans notre étude on suit les étapes suivantes :

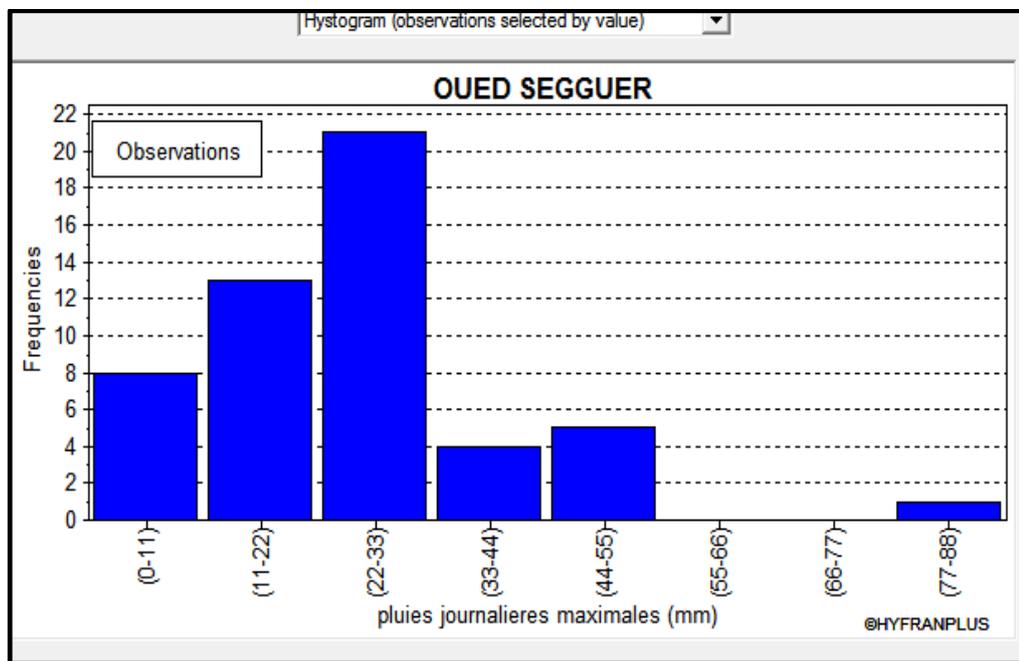
Classer la série des précipitations par ordre croissant.

- ◇ Calcule de la fréquence expérimentale.
- ◇ Calcule des caractéristiques empiriques de la série de donnée.
- ◇ Ajuster graphiquement la loi choisie.
- ◇ Calculer le quantile et son intervalle de confiance.

◇ Les caractéristiques empiriques de la série de donnée ont été obtenues par le logiciel HYFRAN et sont représentées dans le tableau.

**2. Ajustement des pluies maximales journalières :**

Les séries pluviométriques utilisées dans cette analyse, sont ceux de la station de Brézina. L'analyse porte sur les précipitations allant de 1971 à 2022, soit 52 années d'observations. Le but recherché dans cette étude est de trouver une loi d'ajustement de la distribution des pluies maximales journalières afin d'estimer les paramètres d'ajustement. Les résultats de calcul de ces paramètres sont donnés dans le tableau 11



**Figure 10 :** Histogramme des observations

**a. la moyenne :**

La valeur de la moyenne des précipitations maximales journalières se calcule suivant la formule ci-dessous en utilisant les données présentes dans le tableau :

$$P_{moy} = \frac{1}{n} \sum P_i$$

**b. La variance :**

La variance se calcule par la formule suivante en se basant sur la valeur de des précipitations maximales journalières déjà calculé :

$$v^2 = \sum \frac{1}{n} (x_i - P_{moy})^2$$

Pour notre cas  $v^2=443.98$  mm.

**c. L'écart type :**

Pour calculer l'écart-type on utilise la relation suivante basée sur la variance déjà calculée avant

$$\sigma = \sqrt{v^2}$$

**d. Coefficient de variation :**

Le coefficient de variation  $C_v$  est le rapport entre l'écart-type  $\sigma$  et la valeur de des précipitations maximales journalières :

$$C_v = \frac{\sigma}{P_{moy}}$$

**Tableau 10 :** Caractéristique de la série de donnée avec N =52ans

Caractéristiques	valeurs
Année d'observation	52
Minimum	1.00
Maximum	84.1
Moyenne	25.4
Ecart-type	15.0
Coeffi. De variation	0.59

**3. Ajustement de la série pluviométrique de la loi de Gumbel :**

La loi de GUMBEL a une fonction de répartition qui s'exprime selon la formule suivante  $Fx = e^{-e^{-y}}$

Tel que:

$$y = a(x - x_0)$$

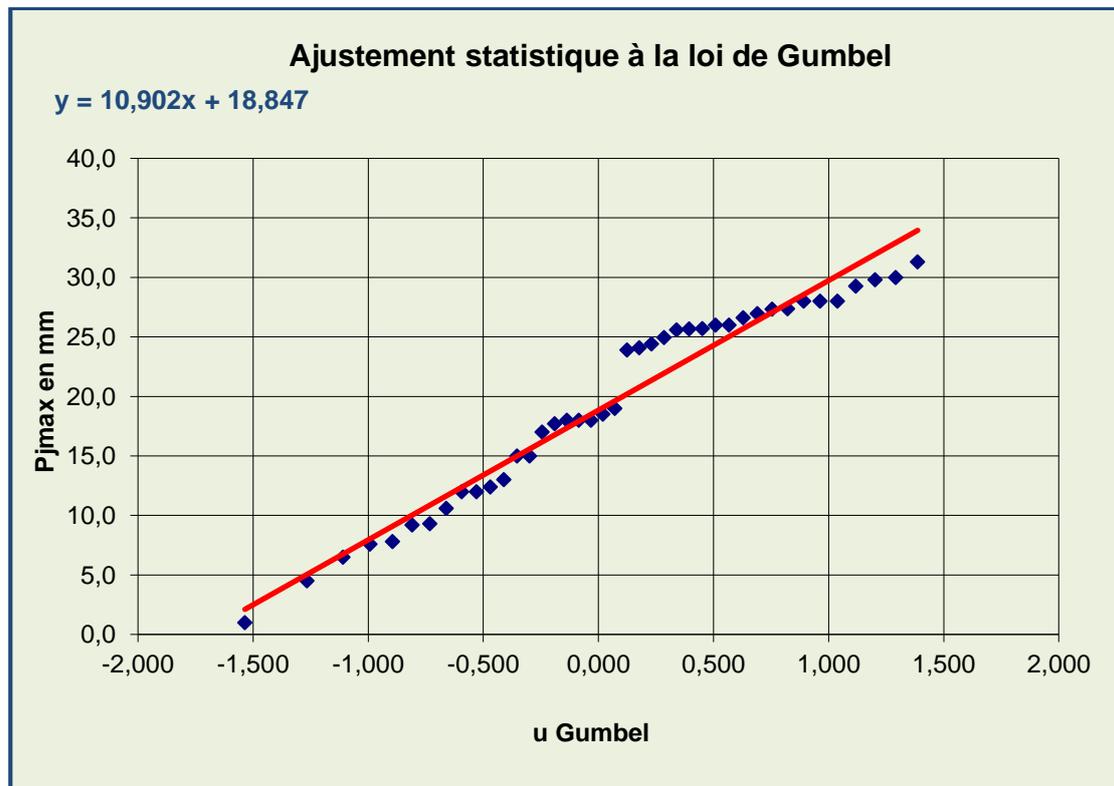
1/a : La pente de la droite de Gumbel.

- Y : Variable réduite de GUMBEL,
- x : Précipitation maximale journalière (mm).
- x0 : Ordonnée à l'origine en (mm).
- On peut écrire :  $y = - \ln (- ((x)))$

La représentation des observations sur du papier normale e leurs histogrammes sont présentés dans les figures9et10 :

**4. Calcul de la pluie maximale journalière fréquentielle :**

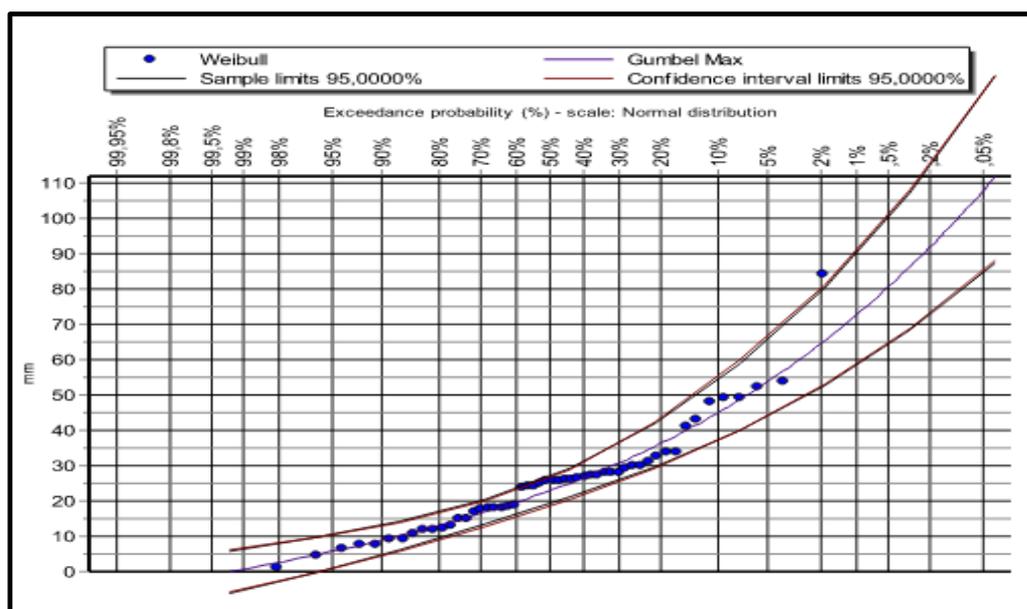
A partir de l'équation d'ajustement, on peut estimer les pluies journalières Maximales pour les périodes de retour T= 100, 50, 10, 5 et deux ans



**Figure 11 :** Ajustement à la loi de Gumbel des pluies journalières maximales (1971-2022)

**Tableau 11** : valeurs de la pluie journalière maximale (Station de L'Oued seggueur).

T	F	u	PJ max
2	0,5	0,37	23
5	0,8	1,50	35
10	0,9	2,25	43
20	0,95	2,97	51
25	0,96	3,20	54
50	0,98	3,90	61
100	0,99	4,60	69



**Figure 12** : Ajustement par la loi de Gumbel max

### 5. Pluie de courte durée

Le passage des pluies journalières maximales aux pluies de courtes durées est effectué au moyen de la formule :

$$P_{ct} = P_{maxj} \left( \frac{t}{24} \right)^e$$

Avec :

t : Durée de l'averse (h)

e : Exposant climatique, e 0.27 selon les études régionales de l'ANRH.

Les intensités maximales de période t (h) et période de retour T (ans) sont calculées par la relation :

$$I_t = \frac{P_{ct}}{t}$$

Avec :

$I_t$  : l'intensité maximale de période t (h).

$P_{ct}$  : Pluies de courte durée (mm)

Les précipitations et les intensités maximales pour différentes durées sont représentées dans le tableau 12 et les courbes des pluies fréquentielles ainsi que les courbes des intensités durée-fréquences sont présentées respectivement par les figures 11 et 12

**Tableau 12 :** Pluies et intensités maximales de durée t(h) et période de retour (ans)

période	100 ans		50 ans		25 ans		20 ans		10 ans		5 ans		2 ans	
	temps (he)	Ptc	lt	ptc	lt	ptc	lt	ptc	lt	ptc	lt	ptc	lt	ptc
0,5	15,848108	31,696216	14,010646	28,021292	12,402867	24,805734	11,7138189	23,4276378	9,8763571	19,752714	8,0388953	16,077791	5,2827026	10,565405
1	20,623806	20,623806	18,23264	18,23264	16,14037	16,14037	15,2436828	15,2436828	12,852517	12,852517	10,461351	10,461351	6,8746021	6,8746021
2	26,838622	13,419311	23,726898	11,863449	21,004139	10,50207	19,8372425	9,91862125	16,725518	8,3627591	13,613794	6,8068969	8,9462074	4,4731037
4	34,926222	8,7315556	30,876805	7,7192013	27,333565	6,8333913	25,815034	6,45375849	21,765617	5,4414042	17,7162	4,4290499	11,642074	2,9105185
6	40,744247	6,7907078	36,020276	6,0033794	31,886802	5,314467	30,1153129	5,01921881	25,391342	4,2318904	20,667372	3,4445619	13,581416	2,2635693
8	45,450955	5,6813694	40,181279	5,0226599	35,570313	4,4462891	33,5941842	4,19927303	28,324508	3,5405635	23,054832	2,881854	15,150318	1,8937898
10	49,473065	4,9473065	43,737058	4,3737058	38,718051	3,8718051	36,5670482	3,65670482	30,831041	3,0831041	25,095033	2,5095033	16,491022	1,6491022
12	53,022194	4,4185161	46,874693	3,9062244	41,49563	3,4579692	39,1903171	3,26585976	33,042816	2,753568	26,895316	2,2412763	17,674065	1,4728387
14	56,220858	4,0157756	49,702498	3,5501784	43,998933	3,1427809	41,5545475	2,96818197	35,036187	2,5025848	28,517827	2,0369876	18,740286	1,3385919
16	59,14723	3,6967019	52,28958	3,2680988	46,289137	2,893071	43,717518	2,73234488	36,859868	2,3037418	30,002218	1,8751386	19,715743	1,232234
18	61,854652	3,4363696	55,579543	3,0877524	48,407989	2,6893327	45,7186561	2,53992534	38,547102	2,1415057	31,375548	1,743086	20,618217	1,1454565
20	64,38137	3,2190685	56,916864	2,8458432	50,38542	2,519271	47,5862304	2,37931152	40,121724	2,0060862	32,657217	1,6328608	21,460457	1,0730228
22	66,755867	3,0343576	59,016056	2,682548	52,243722	2,3747146	49,3412926	2,24278603	41,601482	1,8909765	33,861671	1,5391669	22,251956	1,0114525
24	69	2,875	61	2,5416667	54	2,25	51	2,125	43	1,7916667	35	1,4583333	23	0,9583333

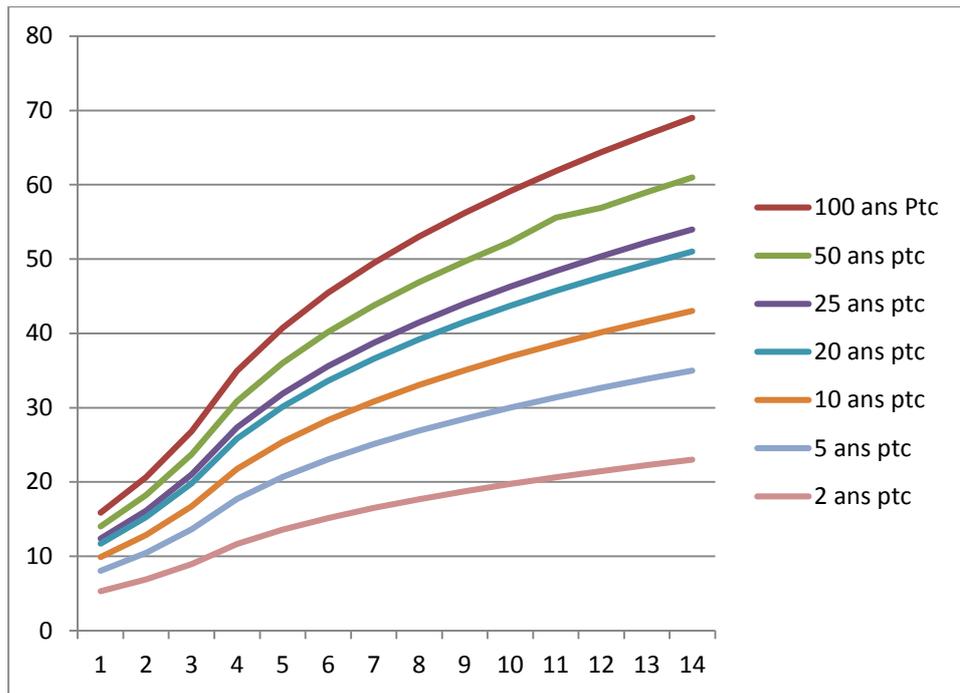


Figure 12 : Courbes des pluies fréquentielles

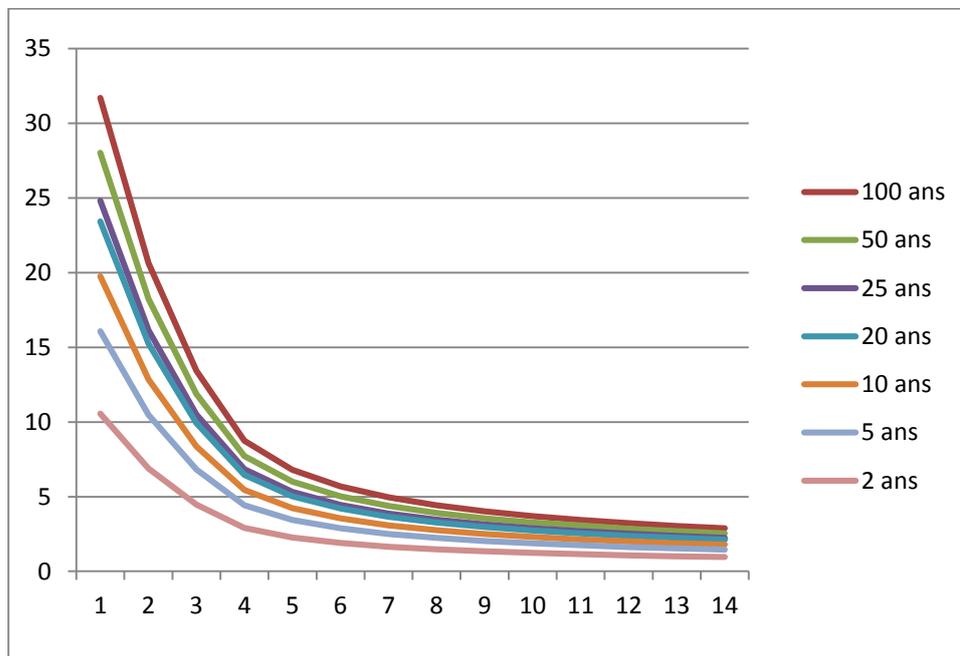


Figure 13 : Courbes des intensités- durées- fréquences

**II.5 Etude de crue :**

**II.6.1 Ajustement des débits max par Gumbel :**

La prédétermination des crues a pour but de relever les crues fréquentielles les plus importantes afin de garantir un maximum de sécurité pour les ouvrages. Ces crues peuvent être déterminées par la loi de Gumbel qui s'adapte le mieux aux écoulements et apports extrêmes. Dans le cas présent, nous possédons une série de mesures hydrométriques de 23 ans de débits maximums journaliers. Ces derniers sont ajustés à une loi statistique à l'aide du modèle Hydrognomon, afin de ressortir les débits de crue les plus probables de différentes périodes de retour.

La fonction de répartition de la loi Gumbel pour des fréquences au dépassement est la suivante :

$$F(X) = e^{-e^{-\frac{x-g}{b}}}$$

Où : variable réduite de Gumbel :

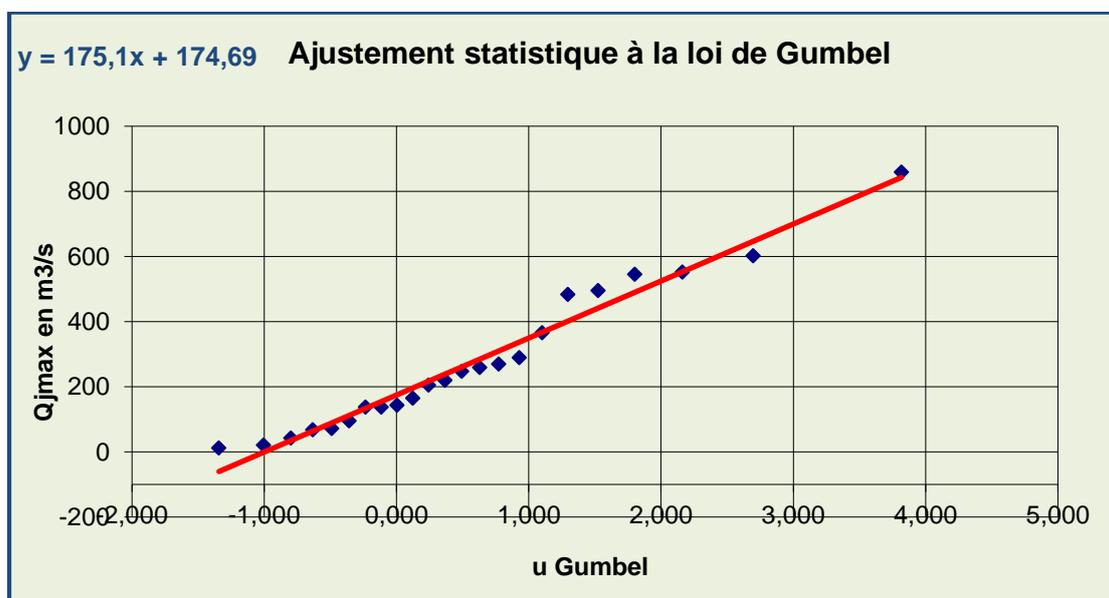
$$g = -[\ln (-\ln (F(x)))]$$

La représentation graphique des résultats d'ajustement à la loi de Gumbel des débits maximums journaliers pour la période de 1971 à 2022, a permis de calculer les paramètres d'ajustement suivant :

**Tableau 13 :** Les paramètres statistiques des débits maximums journaliers

caractéristiques	valeurs
année d'observation	23
Minimum	1
Moyenne	273,61
Ecart-type	221,43
Coeffi. De variation	0,81
Maximum	859,05

Ajustement des débits max par Gumbel :



**Figure 14 :** Ajustement à la loi de Gumbel des débits journaliers maximaux (2000-2023)

**Tableau 14 :** Valeurs de débit journalière maximale (Station du barrage de Brézina).

T	F	u	Qj max
2	0,5	0,37	239
5	0,8	1,50	437
<b>10</b>	<b>0,9</b>	<b>2,25</b>	<b>569</b>
20	0,95	2,97	695
25	0,96	3,20	735
50	0,98	3,90	858
100	0,99	4,60	980

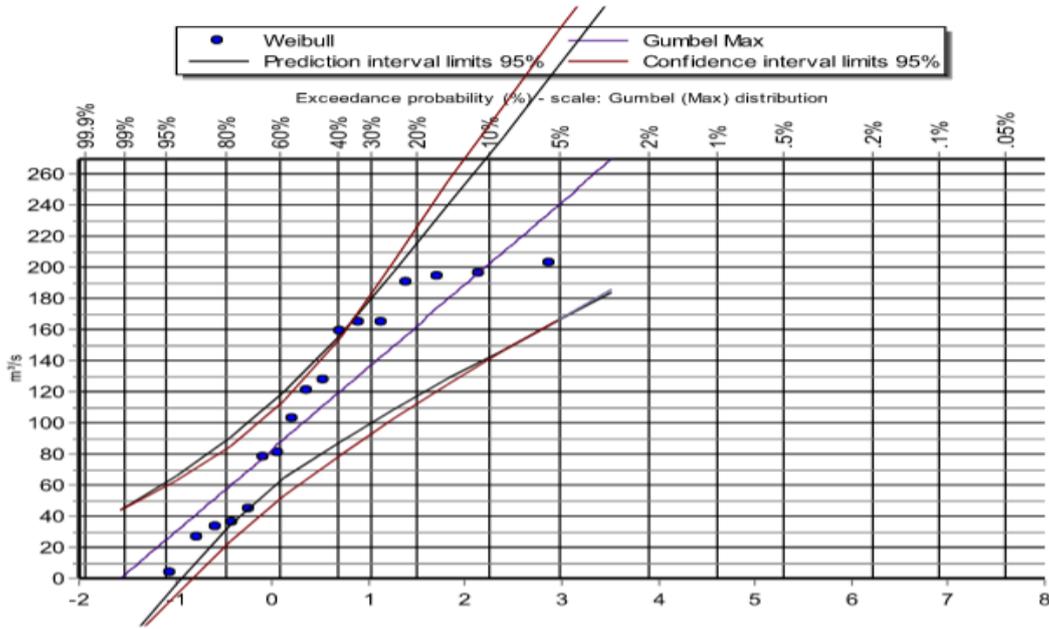


Figure 15 : Ajustement par la loi de Gumbel max

**II.6.2 Variation des débits en fonction des précipitations :**

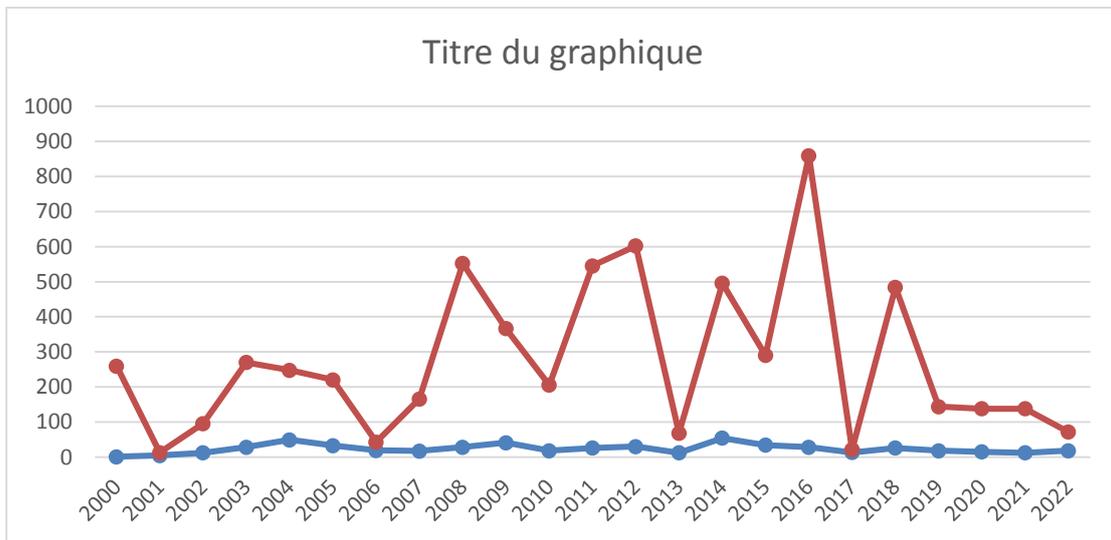


Figure 16 : Variation des débits max journaliers en fonction des précipitations max journalières à la station du barrage de Brézina

D'après cette analyse, on constate l'incohérence de la courbe des précipitations maximales journalières et des débits maximaux journaliers, que l'on peut imputer à l'imprécision des mesures dans les deux stations hydrométrique et pluviométrique .

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec	Obs. sans	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
		données	données				
Qjmax(m3/s)	23	0	23	12,460	859,050	273,613	221,435
pjmax(mm)	23	0	23	1,000	54,000	23,330	13,132

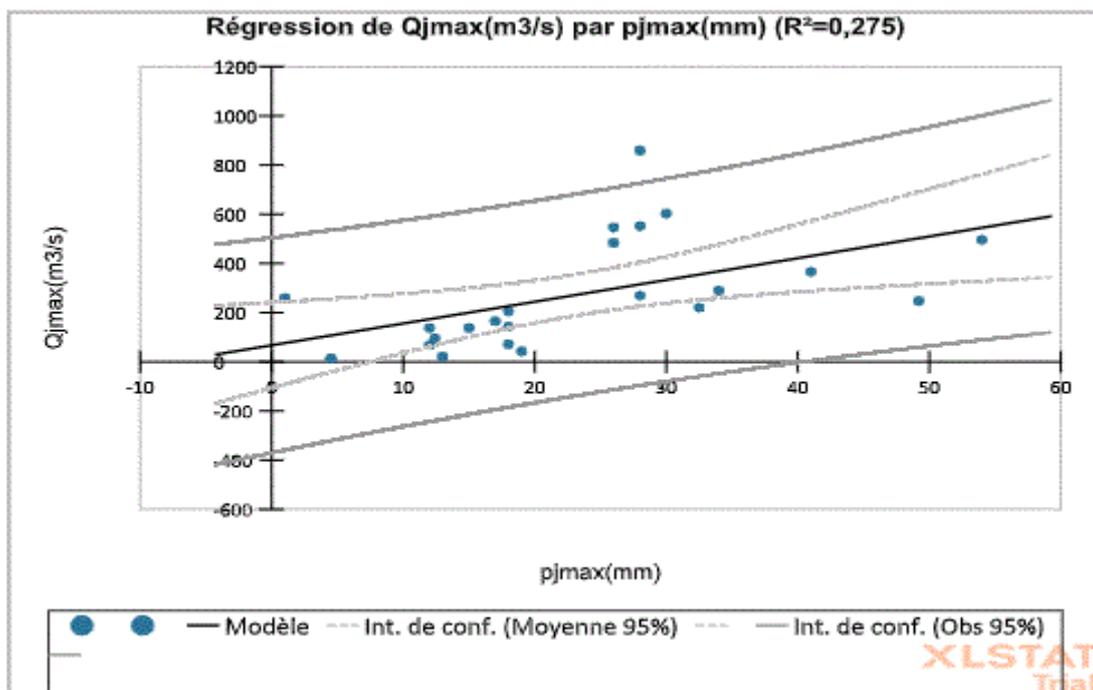


Figure 17 : Application de la méthode de corrélation linéaire

## II.1.2 - Application de la méthode de corrélation linéaire :

La régression linéaire ne montre pas de corrélation évidente entre les précipitations maximales journalières et les débits maximaux journaliers ; le coefficient de corrélation est très faible ( $R \approx 0.27$ ).

## II.5.2 Estimations des débits de pointe par les formules empiriques :

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

### 1. Formule de TURAZZA :

Cette formule utilise l'intensité moyenne maximale de précipitations déterminées sur un intervalle de référence égale au temps de concentration du bassin versant.

$$Q_{max, P\%} = (c \cdot \bar{I}_{tc} \cdot S) / 3.6$$

Avec :

$\bar{I}_{tc}$  : Intensité moyenne maximale des précipitations pendant une durée égale au temps de concentration (mm/h).

c : Coefficient de ruissellement de la crue considérée pour une probabilité p%

S : Surface du bassin versant 3680 (Km<sup>2</sup>).

**Tableau 15** : Calcul le débit max ( $Q_{max}$ ) par formule de Turraza

coefficient de ruissellement t	50%	20%	10%	2%	1%
	2ANS	5ANS	10ANS	50ANS	100ANS
c	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
Q max	785.06	1193.95	1464.64	2077.15	2347.02

### 4. Formule de SOKOLOVSKY :

$$Q_{max, p\%} = (0.28 \cdot X_{p\%, t} \cdot a_{p\%} \cdot S \cdot f) / T_c$$

Avec :

$a_{p\%}$  : Coefficient de ruissellement pour la crue probable prit du tableau

S : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>).

f : Coefficient de forme de la crue.

$T_c$  : Temps de concentration du bassin versant (h).

**Tableau 16 :** Calcul le débit max (Qmax) par formule de Sokolovski.

T	5	10	20	50	100
Q max	1004,99	1358,18	1757,31	2277,04	2773,79

On voit d'après les résultats des estimations du débit de pointe des crues de chaque fréquence et données au tableau (17) & (18), que les formules de Giandotti & Sokolovski donnent une surestimation de l'ordre de 60% sur les valeurs d'observation (au niveau de la station du barrage de Brézina, prise comme référence).

**Conclusion :**

L'établissement de ce chapitre a pour but le calcul des caractéristiques du bassin versant qui influence le cours d'eau ainsi que l'estimation du débit de crue optimal afin de pouvoir réaliser un aménagement adéquat à la situation de l'Oued Seggueur. Les résultats obtenus des calculs effectués dans ce chapitre sont comme suit :

- la série pluviométrique suit la loi de Gumbel).
- Estimations des débits de pointe par les formules empiriques

# Chapitre03

## Application du Modèle

### HEC-HMS

## **Introduction :**

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

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

### **1- Le processus de fonctionnement :**

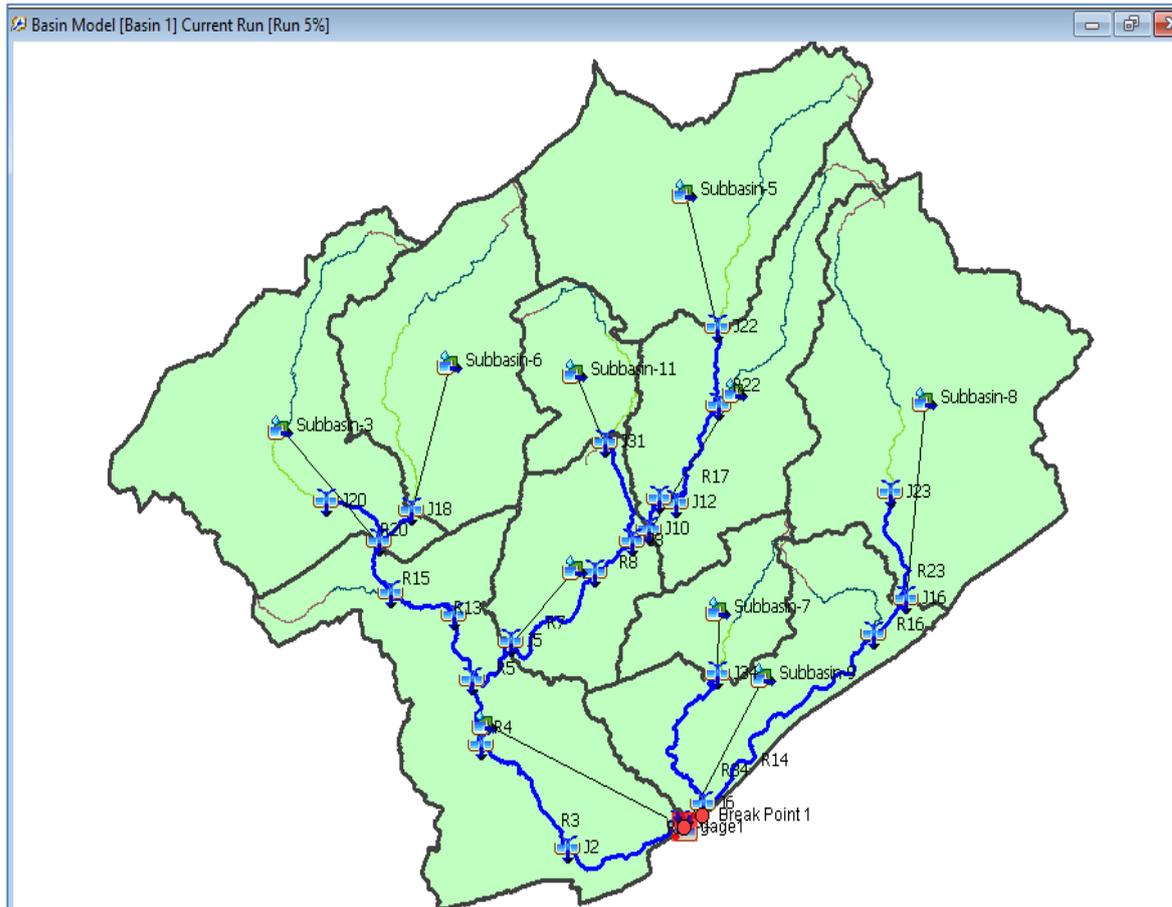
Comme nous venons de le mentionner au chapitre précédent, le HEC-HMS attribue à chaque module une étape de la transformation pluie-débit, et c'est la combinaison des résultats des modules les uns aux autres qui donne l'hydrogramme final.

#### **1-1 FONCTIONNALITES :**

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 bassin versant Oued seggueur et ses sous bassins (belkhir kh.2023)

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

Les éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant sont les suivants:

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

## **2-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

## **3 Les données de bases d'entré :**

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)	Ia=0,2*S
Subbassin-5	37,05985	0,07837	461,51	80	2,12	76,44	0,5
Subbassin-4	53,3302	0,10288	365,7	72	2,20	79,14	0,78
Subbassin-11	28,03909	0,10876	131,24	80	1,25	44,93	0,5
Subbassin-2	34,18996	0,10603	227,98	72	1,50	53,92	0,78
Subbassin-6	43,22039	0,10408	369,89	75	1,84	66,17	0,67
Subbassin-3	48,63274	0,08044	462,27	75	2,57	92,68	0,66
Subbassin-8	47,7413	0,1155	634,23	80	1,81	65,04	0,5
Subbassin-7	20,55567	0,1166	134,07	76	0,91	32,85	0,63
Subbassin-1	69,71289	0,11054	560,39	72	2,55	91,71	0,78
Subbassin-9	48,50583	0,11012	304,41	76	1,91	68,85	0,64

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

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.

### **3.1 Occupation du sol :**

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

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

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

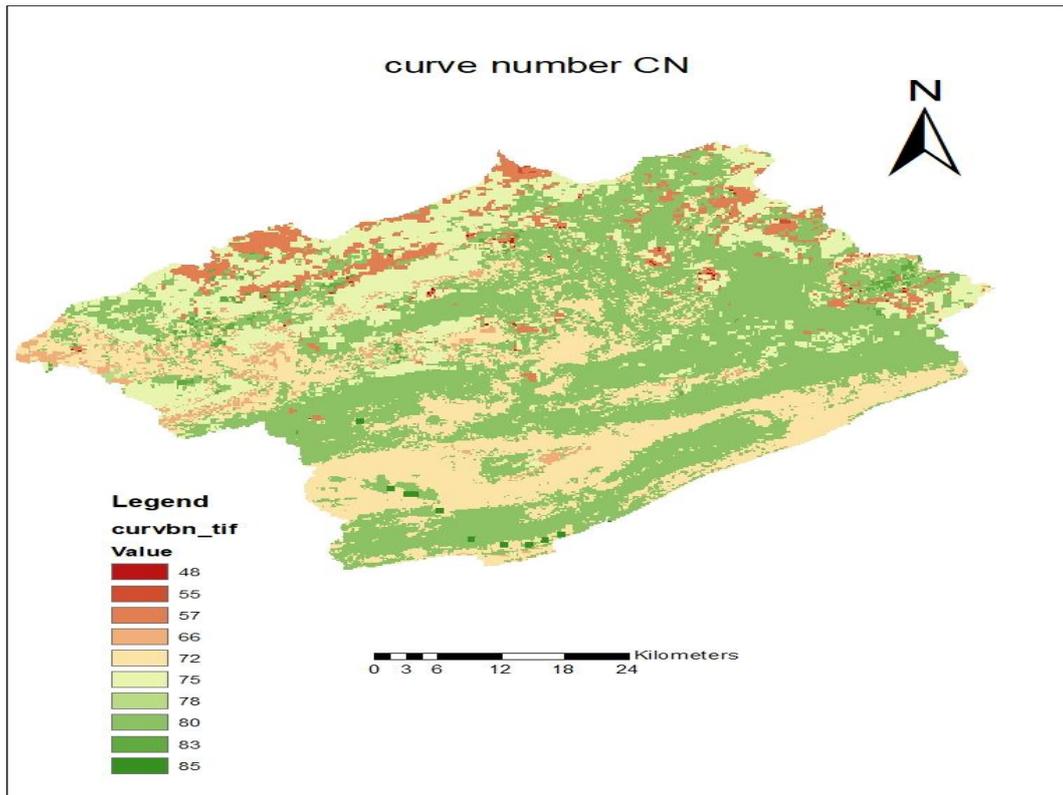


Figure 2 : Curve Number (CN) du bassin versant Oued Seggueur (belkhir kh.2023)

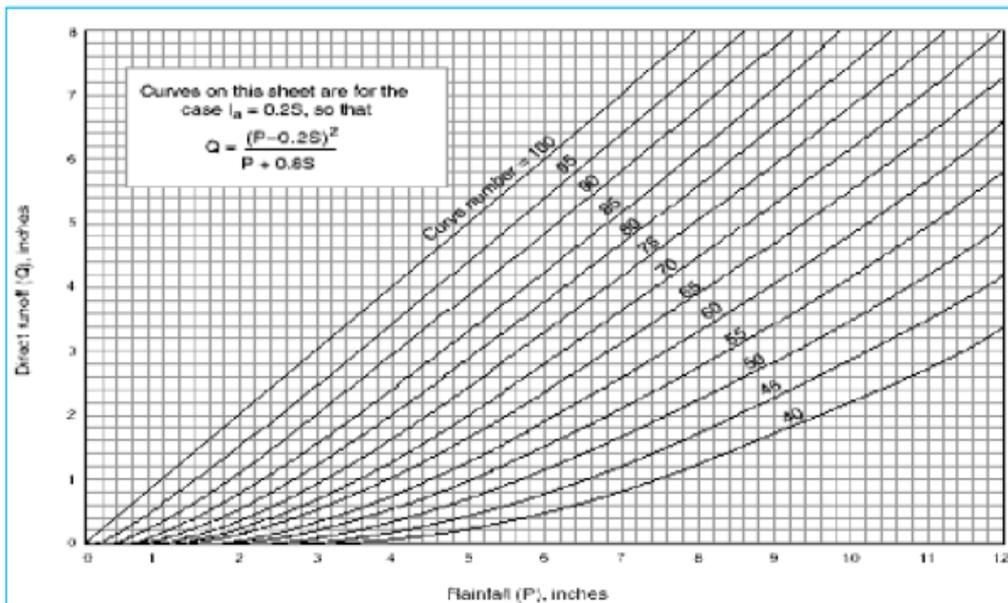
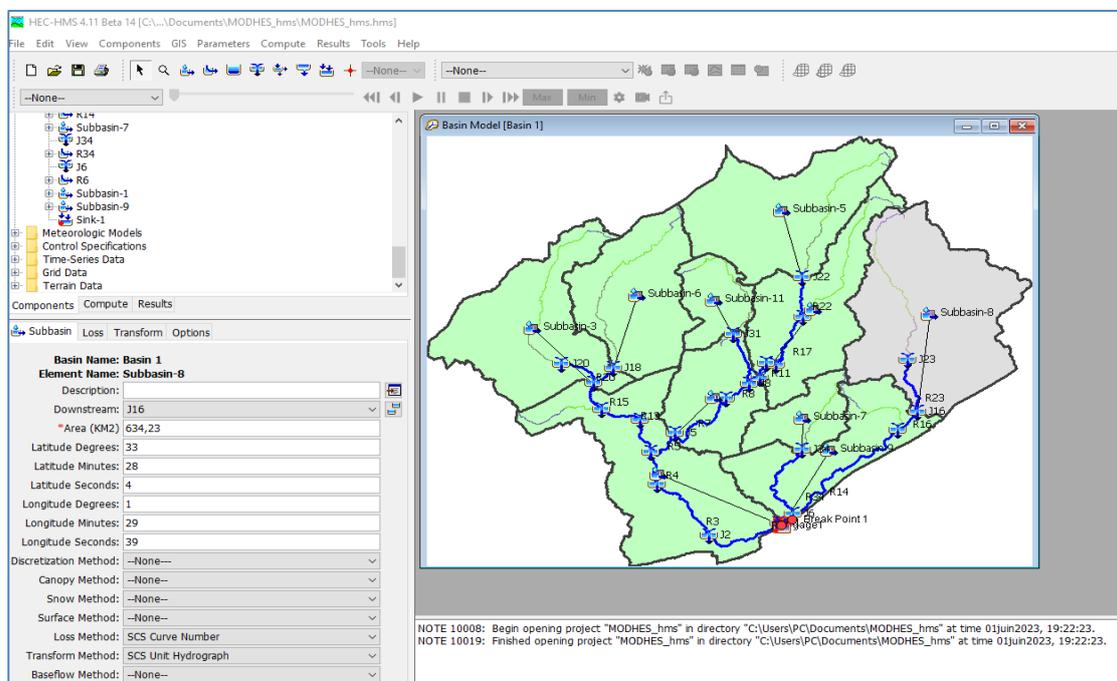


Figure 3 : Graphique de l'écoulement superficiel en fonction de la précipitation journalière par la méthode du SCS Curve Number

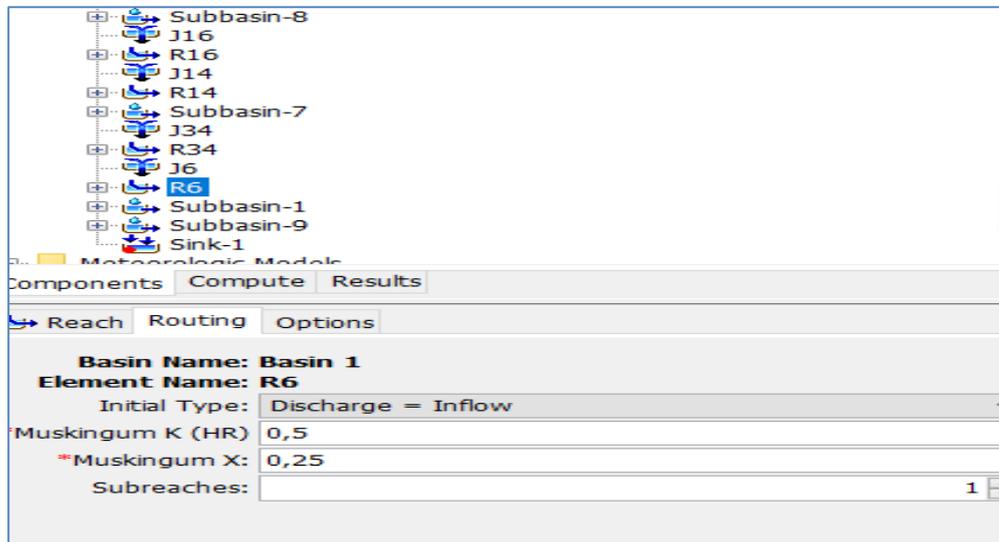
Les paramètres propres à chaque sous-bassin et au tronçon de rivière sont incorporés en cliquant sur l'icône correspondant à l'élément choisi dans l'explorateur et en précisant les paramètres des onglets **Loss**, **Transform**, **Baseflow**, **Subbasin** et **Routing** de l'Éditeur. L'élément de sous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

La partie de la précipitation qui tombe sur la surface de terre s'infiltre finalement dans le sol devenir un écoulement souterraine ou filtration profonde : cette partie représente les pertes de précipitations. Tous les processus de l'infiltration sont représentés avec une méthode d'estimation des pertes. La pluie qui ne s'infiltre pas est automatiquement transformée en un ruissellement. Tous les processus hydrologiques et hydrauliques représentant la genèse de l'écoulement concentré dans les cours d'eau sont considérés dans les modèles de transformation. On suppose dans notre cas qu'on a pas un écoulement de base ou débit d'étiage (None).



**Figure 4** : Fenêtre de donnée de surface ; méthode de perte ; méthode de transformation

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



**Figure 5 :** Fenêtres de saisie des données pour chaque tronçon(R)

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

### **3.2 Modélisation de la météorologie :**

Diverses méthodes sont proposées pour la modélisation d'un épisode pluvieux, connu ou non. Nous disposons cependant la pluie hypothétique basée sur la fréquence (Frequency storm). Pour chaque fréquence nous avons calculé les quantités de pluies correspondantes à différents pas de temps (15min, 1, 2, 3, 6, 12, 24, ...). A partir de courbes IDF. Nous avons obtenu donc une série de données des précipitations pour chaque pas de temps et de chaque fréquence, qui représente les données météorologiques utilisées dans le modèle HEC HMS :

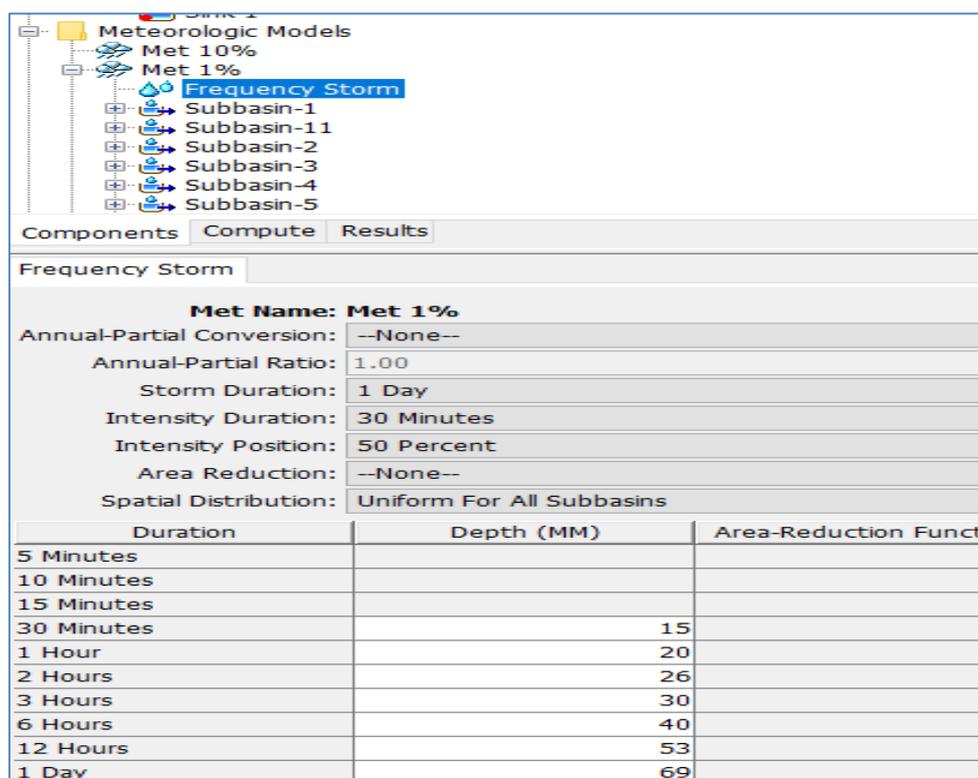
Le tableau suivant résume les valeurs estimées de la pluie courte durée pour des périodes de retour qui seront utilisées dans les simulations.

**Tableau 02 :** Les pluies courtes durées estimées au bassin du seggueur pour différentes périodes de retour Période de retour T (ans) \_Ptc (mm)

Temps (hr)	0,5	1	2	3	6	12	24
Frq 1%	15.84	20.62	26.83	31.3	40.74	53.02	69
Frq 2%	14.24	18.23	23.27	27.67	36.02	47.87	61
Frq 5%	11.71	15.24	14.83	23.14	36.56	39.19	51
Frq 10%	9.87	12.85	16.72	19.51	25.39	33.04	43

Chaque hauteur de pluie sera additionnée au jeu de paramètres optimisés définis dans le tableau.12 pour configurer un fichier de simulation distinct. Par conséquent, nous aurons à comparer quater fichiers de simulation, en plus des résultats simulés et observés pour l'événement de 29/09/2016 à 02/10/2016.

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



**Figure 6 :** Fenêtres des données météorologiques de fréquence de 1%

**Remarque :**

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

**3.3 Les données de spécifications de contrôle :**

Les spécifications de contrôle sont l'une des composantes exigées pour une exécution du logiciel, avec un modèle de bassin versant et un modèle climatique. La date initiale et le temps de calcul ainsi que la date et le temps finaux sont spécifiés dans la fenêtre (Control specification) voir figure.

L'intervalle du temps, aussi appelé pas de temps de calcul, est aussi spécifié. L'intervalle du temps ( $\Delta t$ ) détermine la précision dans les résultats de calcul. La gamme des intervalles disponibles comprenant les intervalles de 1 minute à 24 heures est donnée comme suit :

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

$T_c$  : temps de concentration.

**Figure7 :** Fenêtre de spécifications du contrôle

**3.4. Calibration du modèle : (crue de 29/09/2016 au 02/10/2016)**

Pour trouver les valeurs les proches de la réalité des paramètres du modèle, nous avons effectué une calibration en utilisant les données de (crue 29/09/2016 au 02/10/2016) station hydrométrique (barrage Brézina) 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.

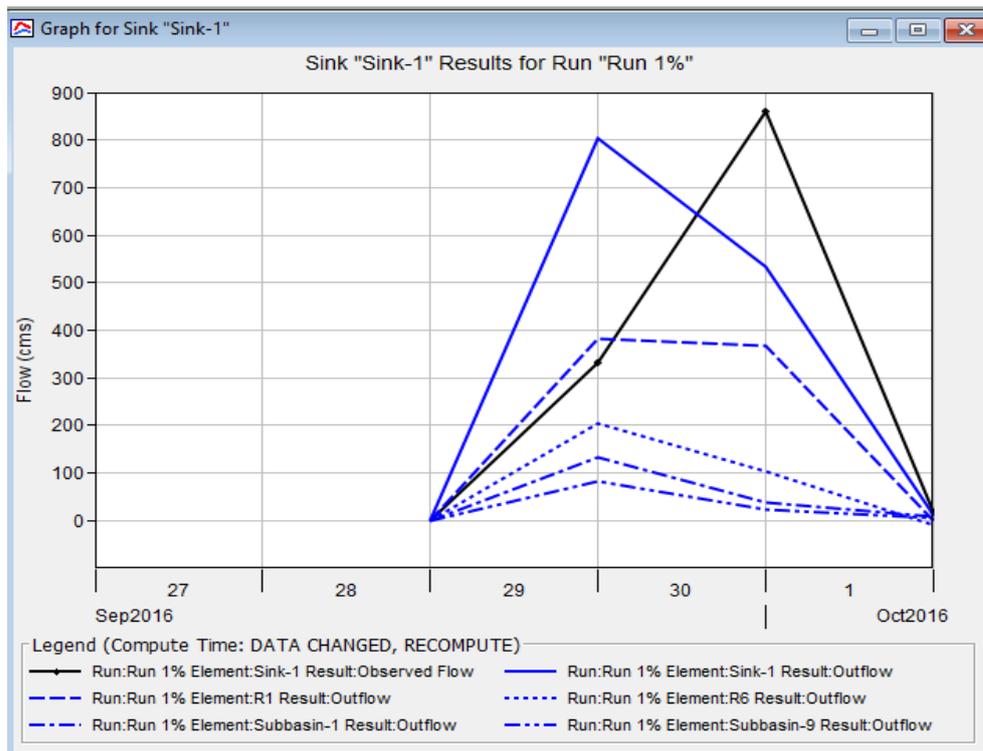
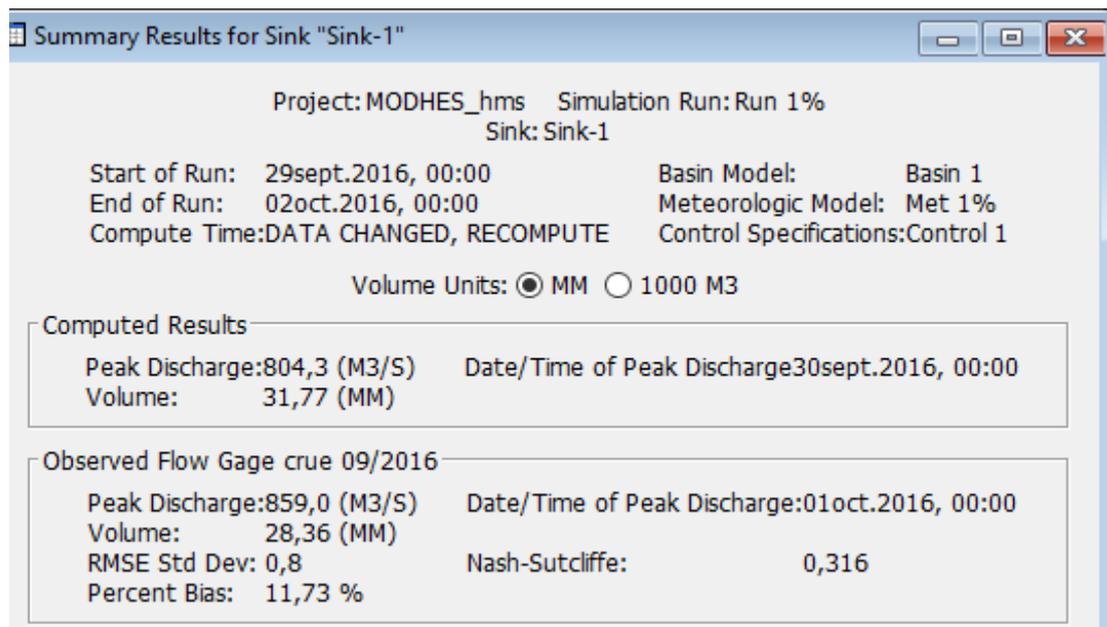


Figure 8 : Fenêtre représente le graphe de pluie et le débit simule.sink (l'exutoire)

Project: MODHES\_hms Simulation Run: Run 1%  
Sink: Sink-1

Start of Run: 29sept.2016, 00:00 Basin Model: Basin 1  
End of Run: 02oct.2016, 00:00 Meteorologic Model: Met 1%  
Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: Control 1

Date	Time	Inflow from R1 (M3/S)	Inflow from R6 (M3/S)	Inflow from Subbasin-1 (M3/S)	Inflow from Subbasin-9 (M3/S)	Total Inflow (M3/S)	Obs Flow (M3/S)
29sept.2016	00:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30sept.2016	00:00	383,0	204,7	134,3	82,3	804,3	330,9
01oct.2016	00:00	367,2	104,7	37,6	23,1	532,6	859,0
02oct.2016	00:00	-1,9	-8,5	7,4	4,5	11,9	17,4



**Figure 9 :** Fenêtre représente le volume de la crue simulée- débit de point-Critères de performance

✓ **Les critères d'évaluation :**

L'étude de la performance de ce modèle se fait à travers l'évaluation d'un certain nombre de critères.

**1 - Le critère de NASH :**

C'est un critère qui qualifie la précision des simulations. Ce critère mesure le degré d'ajustement entre les valeurs observées et celle simulée. Ce critère varie (l'infini négatif à 1) on considère que le modèle est bon si le coefficient vers 1 en étant positif. Un NASH négatif signifie que la qualité de la simulation est mauvaise

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{moyen})^2}$$

$Q_{obsi}$ : débit observé à pas de temps  $i$

$Q_{simi}$ : débit simulé à pas de temps  $i$

$Q_{moyen}$ : débit moyen

**2- PBIAS :**

Le PBIAS ou l'erreur moyenne (Gupta et al.1999 ; Dawson et al.2007), exprime de pourcentage de BIAS moyen existant entre la série de données observée et la série de données simulées. Il est compris entre  $\pm 100$ . Une valeur négative indique une sous-estimation du débit, une valeur positive

indique une surestimation du débit une valeur nulle indique une parfaite description de l'observation.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi}) * 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obsi}}$$

Selon les conditions de Moriasi (Moriasi et al.2007), le calage est supposé satisfaisant dans le cas des simulations des débits liquides si nous avons PBIAS compris entre :  $\pm 25\%$

### 3- Erreur quadratique (RMSE) :

Pour ce qui est de cette (RMSE), les faibles valeurs expriment respectivement les faibles écarts entre les simules et les observés.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi})^2}$$

Project: MODHES\_hms Simulation Run: Run 1%

Start of Run: 29sept.2016, 00:00 Basin Model: Basin 1  
 End of Run: 02oct.2016, 00:00 Meteorologic Model: Met 1%  
 Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE Control Specifications: Control 1

Show Computation Points: Computation Points Sorting: Hydrologic

Computation Point	RMSE Stdev	Nash Sutcliffe	Percent Bias	R <sup>2</sup>
Sink-1	0,8	0,316	11,73	0,44

Les valeurs des paramètres ajustés sont considérées comme satisfaisante lorsque les valeurs de NASH $\geq 0.5$  R<sup>2</sup> $\geq 0.5$  ; PBIAS= $\pm 0.25$  pour une simulation des débits liquides (Moriasi et al, 2007).

- Les valeurs de critères PBIA et RMSE respectent ces conditions. De ce fait nous pouvons dire que le modèle est performant sur tout l'ensemble du calage et validation et très performant pour la période de validation de l'averse 29/09/2016 au 02/10/2016.
- Pour les valeurs de critères Nash et R, les résultats obtenus sont insuffisantes ; Ceci peut s'expliquer par l'irrégularité des précipitations et surtout de l'état

du sol et des conditions géologiques (saturation et occupation) dans les zones arides et semi-arides en Algérie.

### 3. 5 tests Validation de paramètres :

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

- Le numéro de la courbe (CN) dans notre modèle d'infiltration,
- Le temps de concentration et le temps de décalage (Tlag).
- le paramètre Routing de Muskingum K
- la perte initiale Ia

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 les annexes I & II.

**Tableau 3 :** résultat de validation de paramètres

Objective Function Results for Trial "Optimization 1"

Project:MODHES\_hms Optimization Trial:Optimization 1

Start of Trial: 29sept.2016, 00:00 Basin Model: Basin 1  
End of Trial: 02oct.2016, 00:00 Meteorologic Model:Met 1%  
Compute Time:CONVERGENCE FAILED

Statistic at Basin Element "Sink-1"

Goal: Minimization  
Statistic: Percent Error In Peak Discharge  
Start of Function:29sept.2016, 00:00  
End of Function: 02oct.2016, 00:00  
Value: 16,69

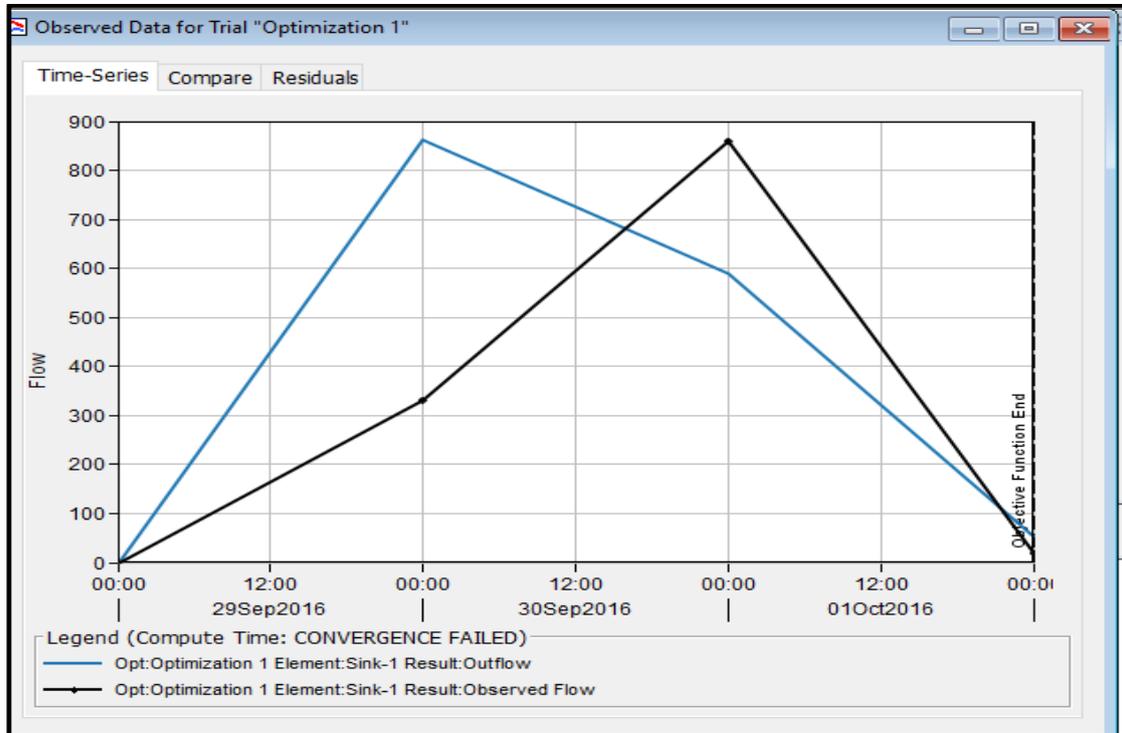
Volume Units:  MM  1000 M3

Measure	Simulated	Observed	Difference	Percent Difference
Volume (MM)	34,00	28,00	6,00	21,43
Peak Flow (M3/S)	862,0	859,0	3,0	0,3
Time of Peak	01oct.2016, 00:00	01oct.2016, 00:00		

La différence entre débit simulé et observé (Tableau III.) est estimée à 3 m<sup>3</sup>/s (0.3%), et le volume ruisselé est de – 6 mm (- 21.43%), avec une même de temps de pic.

Ce jeu de paramètre optimisé est composé de valeurs de paramètres acceptées et réalistes comme c'est le cas du temps de concentration égale à ce qu'on a calculé par

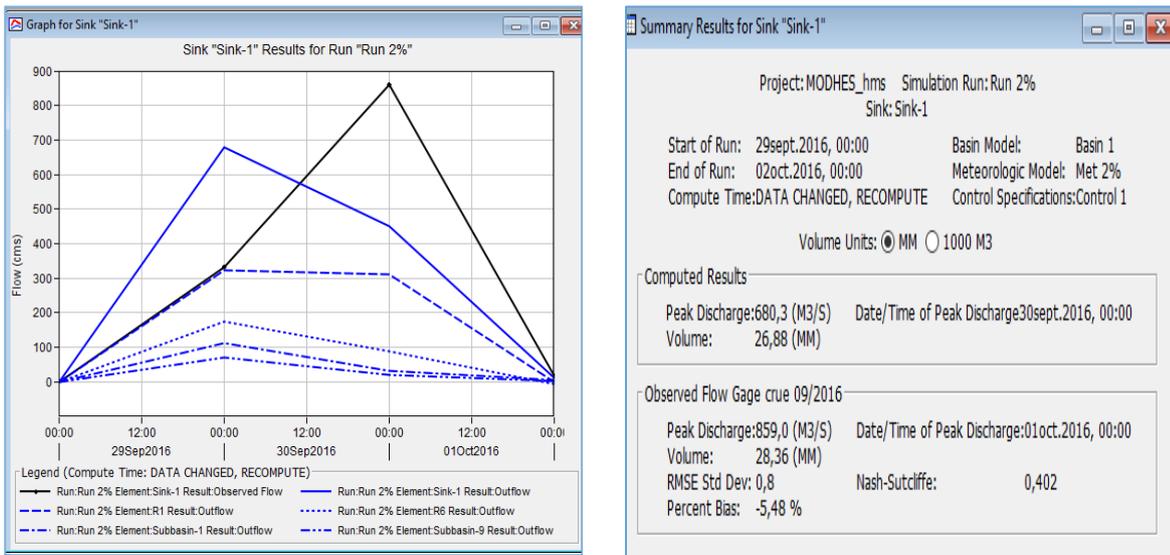
la méthode de Giandotti, et la valeur de CN très proche de celle estimée par la carte d'occupation du sol et de type de sol . Le graphe de l'hydro gramme de crue après validation est le suivant :



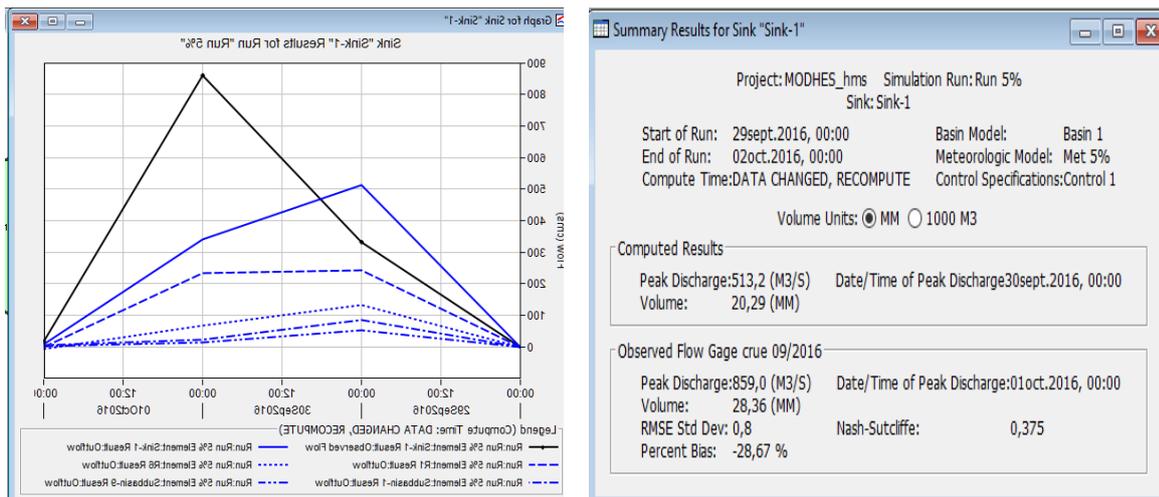
**Figure 10** : Graphe de l'hydrogramme de crue après validation

Une fois le modèle calé et validé pour fréquence 1%, 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.

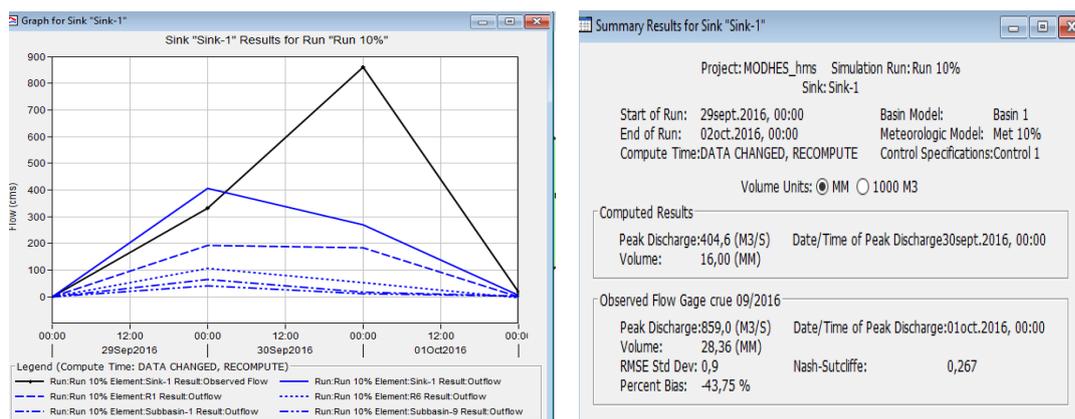
Les résultats résumés dans le tableau.03 et les graphes portés sur les figures .10 ; 11.112et .13 présentent les hydrogrammes des crues pour différentes périodes de retour.



**Figure 11 :** Hydrogramme des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 50 ans.  $R^2 = 0.44$



**Figure 12 :** Hydrogramme des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 20 ans.  $R^2 = 0.44$



**Figure 13 :** Hydrogramme des crues pour différents évènements et des périodes de retour de 10 ans.  $R^2 = 0.44$

**Tableau 04 :** Les valeurs prévues du débit de pointe et du volume pour différentes périodes de retour ; à la station du barrage Brézina :

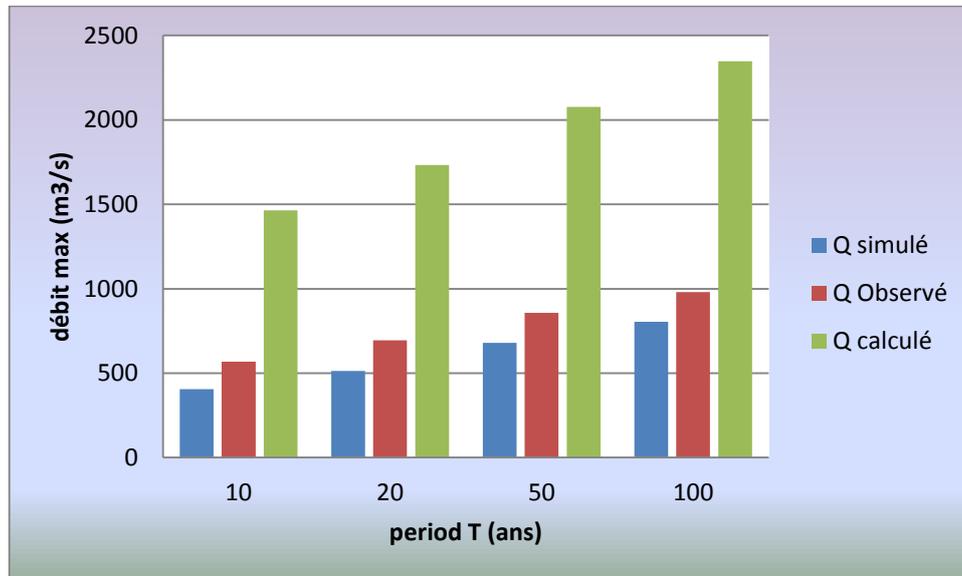
Périodes de retour ans	T=10	T=20	T=50	T=100
Qp (m <sup>3</sup> /s)	404.6	513.2	680.3	804.3
V (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	58420.8	74076.3	98158.2	116023.9

Le tableau ci-dessous confirme les proportions des débits simulés ; avec ceux estimés par les formules empiriques et avec les données observées pour différentes périodes de retour.

**Tableau 05 :** Comparaison des résultats obtenus pour les différentes fréquences

période T	10	20	50	100
Q simulé	404,6	513,2	680,3	804,3
Q observé	568,72	694,77	857,91	980,17
Q calculé	1464,64	1733,68	2077,15	2347,02

Sur le graphe suivants nous avons présentent les débits de chaque fréquence à la station du barrage Brézina dans le cas des précipitations fréquentielles simulé par le modèle HEC-HMS et les débits calculés par les formules empiriques, et en comparaison au débit observé durant la durée de simulations.



**Figure14** : Graphe des débits simulé et débits observé

**-Conclusion et recommandations :**

A partir des résultats obtenus, on constate que le modèle donne des résultats similaires à ceux observés au niveau de la station hydrométrique du barrage de Brezina Pour toutes les fréquences ; alors que le modèle donne des résultats différents de ceux estimés par les formules empiriques.

Les résultats obtenus dans cette étude, montrent d'abord que le modèle donne des résultats plus ou moins acceptables comparativement aux valeurs calculées par les formules. Pour le débit de pointe de chaque site et chaque fréquence, la simulation des paramètres du bilan hydrique a été réalisée par la méthode du SCS. Les autres méthodes intégrées dans le modèle, demandent des paramètres peu disponibles. La simulation donne un débit de pointe de fréquence 1% égal à 804.3 m<sup>3</sup> /s et un volume de ruissellement égal a 116023.9 Hm<sup>3</sup>.

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

## **CONCLUSION GENERALE :**

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

Ensuite, après la calibration du modèle, il doit être validé sur au moins l'un des événements présélectionnés. Une fois le modèle calé et validé, il pourra servir à simuler les crues de projet à partir des pluies de projet synthétiques de période de retour 10, 20, 50 et 100 ans. La simulation donne un débit de pointe de fréquence 1% égal à 804.3 m<sup>3</sup>/s et un volume de ruissellement égal à 116023.9 Hm<sup>3</sup>.

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 Seggeur, 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**

- **Ben Slimane M., Hamimed A., Seddiki A. et Mederbal K.** : Utilisation De La Télédétection Et Des SIG Pour La Modélisation Hydrologique Du Bassin Versant De Brezina, Rev. Le Journal de l'Eau et de l'Environnement.
- **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.
- **Chanbi redouane** .Etude hydrologie du bassin versant d'oued seggueur.
- **. LAOUACHERIA F., MANSOURI R. 2015.** Comparison of WBNM and HEC-HMS for runoff hydrograph prediction in a small urban catchment. Water Resources Management. Vol. 29 p. 2485–2501. DOI 10.1007/s11269015-0953-7
- **. Ibiza (D.), 1988.** Note complémentaire pour l'utilisation du modèle MODQJ (MODIBI). ORSTOM, Montpellier, multigr. 5 p
- **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.
- **. 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
- **SAOULI ABDALAH** problématique de risque inondation en milieu urbain cas de la ville d'ElBayadh2016

- **Talia A., Meddi M. (2003).** Etude des crues d'oued Seggueur (Sud-ouest algérien), Univ- Mascara
- **P. B. Bedient and W. C. Huber,** *Hydrology and flood plain analysis. Library of Congress Cataloging in Publication Data.1988.*
- **E. GAUME,** *Hydrologie : Cycle de l'eau et modélisation pluie-débit, ENPC - CERREVE, Novembre 2000.*
- **C.P. MAFTEI,** *Etudes concernant les écoulements superficiels modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant*
- **Singh V.P. and Frevert D., (2006),** Watershed models. Boca Raton, Taylor & Francis.
- **Salhi, A. (2021).** *Modélisation Pluie-Débit par l'application du modèle hydrologique HEC HMS dans le bassin versant du barrage de Beni Haroun (Doctoral dissertation, univ msila).*

ANNEXE

ANNEXE I :

Tableau 6 : l'optimisation des différents paramètres (CN & LAG TIME)

Optimized Parameter Results for Trial "Optimization 1"

Project:MODHES\_hms Optimization Trial:Optimization 1

Start of Trial: 29sept.2016, 00:00 Basin Model: Basin 1  
 End of Trial: 02oct.2016, 00:00 Meteorologic Model:Met 1%  
 Compute Time:DATA CHANGED, RECOMPUTE

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Subbasin-1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	65,04	793,95
Subbasin-2	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	53,92	40,554
Subbasin-3	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	92,68	69,687
Subbasin-4	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	79,14	59,510
Subbasin-5	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	76,44	57,481
Subbasin-6	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	66,17	49,761
Subbasin-7	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	32,85	24,716
Subbasin-8	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	65,04	48,912
Subbasin-9	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	68,85	51,776
Subbasin-10	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	44,93	33,796
Subbasin-1	SCS Curve Number - Curve Number		72	62,811
Subbasin-2	SCS Curve Number - Curve Number		72	62,811
Subbasin-3	SCS Curve Number - Curve Number		75	65,066
Subbasin-4	SCS Curve Number - Curve Number		72	62,811
Subbasin-5	SCS Curve Number - Curve Number		80	68,824
Subbasin-6	SCS Curve Number - Curve Number		75	65,066
Subbasin-7	SCS Curve Number - Curve Number		76	65,817
Subbasin-8	SCS Curve Number - Curve Number		80	68,824
Subbasin-9	SCS Curve Number - Curve Number		76	65,817
Subbasin-10	SCS Curve Number - Curve Number		80	68,824
Subbasin-1	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,78	0,58653
Subbasin-2	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,78	0,58653

ANNEX II :

Tableau 7 : l'optimisation des différents paramètres (perte initial Ia ; paramètre Muskingum k)

Optimized Parameter Results for Trial "Optimization 1"				
Project:MODHES_hms Optimization Trial:Optimization 1				
Start of Trial: 29sept.2016, 00:00		Basin Model: Basin 1		
End of Trial: 02oct.2016, 00:00		Meteorologic Model:Met 1%		
Compute Time:DATA CHANGED, RECOMPUTE				
Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Subbasin-2	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,78	0,58653
Subbasin-3	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,66	0,49633
Subbasin-4	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,78	0,58653
Subbasin-5	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,5	0,37607
Subbasin-6	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,67	0,50385
Subbasin-7	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,63	0,47378
Subbasin-8	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,5	0,37607
Subbasin-9	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,64	0,48130
Subbasin-10	SCS Curve Number - Initial Abstraction	MM	0,5	0,37607
R1	Muskingum - K	HR	0,5	0,5
R2	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R3	Muskingum - K	HR	0,017	0,0170000
R4	Muskingum - K	HR	0,017	0,0170000
R5	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R6	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R7	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R8	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R9	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R10	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R11	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R12	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004
R13	Muskingum - K	HR	0,5	0,38004