

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 سعد دحلب - البليدة -

Université Saad Dahleb - Blida -

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE DE MASTER**

**En vue de l'obtention du diplôme de MASTER**

**En : Science de l'eau et l'environnement**

**Spécialité : Hydraulique**

### ***Sujet***

**Caractérisation des crues dans le bassin versant  
de Oued El Hachem pour la gestion du barrage  
de Boukerdane en situation d'évènements  
extrêmes**

**Par :**

- M. Belmadani Djalel
- M. Harbouche Abd el Hamid

**Devant le jury composé de :**

Mme	Bouzouidja Souad	Présidente
Mme	Taibi Sabrina	Examinatrice
M.	Haddad Ali	Promoteur

## REMERCIEMENTS

*Nous tenons à tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*En second lieu, Je tiens à remercier aussi et chaleureusement ma mère nous tenons à remercier notre encadreur Mr : Haddad Ali pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon port.*

*Nos vifs remerciements aussi à tous les enseignants :  
.....: et Mr .....: , Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel.*

*Je dédie ce travail à :*  
*La mémoire de Mon père*  
*Et Ma mère*

# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES CARTES

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION

## PARTIE I : GENERALITES

CHAPITRE I : HYDROLOGIE GENERALE

CHAPITRE II : LE BASSIN VERSANT

## PARTIE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DU LOGICIEL UTILISE

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE II : DISCRIPTION DU LOGICIEL ET MODELE UTILISE

## PARTIE III : ETUDE HYDROLOGIQUE

## PARTIE IV : RESULTAT ET DISCUSSION

BIBIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE

ANNEXES

TABLE DES MATIERS

## *LISTE DES ABREVIATIONS*

- BV : Bassin Versant
- CN : Curve Number
- DEM : Digital Elevation Modeling
- Geo-HMS : Geographic Hydrologic Modeling System
- GLUE : Generalized Likewood Uncertainty Estimation
- HDF : Hauteur-Durée-Fréquence
- HEC : Hydrologic Engineering Center
- HMS : Hydrologic Modeling System
- HTC : Haute Terre Centrale
- HU : Hydrogramme Unitaire
- IA : Initial Abstraction
- JAXA : Japan Aerospace eXploration Agency
- MAP : Mean Areal Precipitation
- MNT : Modèle Numérique de Terrain
- MNA : Modèle Numérique d'Altitude
- NASA : National Aeronautics and Space Administration
- NGA : National Geospatial-intelligence Agency
- NIMA : National Imagery and Mapping Agency
- ODE : Ordinary Differential Equation
- PDF : Probability Differential Function
- pk : point kilométrique

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

RC : Recession Constant

RN : Route Nationale

SCS : Soil Conservation System

SIG : Système d'Information Géographique

SMA : Soil Moisture Accounting

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

Tc : temps de concentration

TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission

US : United States

USACE : United States Army Corps of Engineers

## *LISTE DES CARTES*

Carte 1 : Carte de situation de la zone d'étude et le bassin versant (1. Station hydrométrique de Mesdour ; 2. Station pluviométrique de Boukerdane) .....	35
Carte 2 Localisation du barrage réservoir de Boukourdane (Remini, 2016) .....	36

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 Représentation du cycle de l'eau.....	2
Figure 2 Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique.....	10
Figure 3 Modifications de la délimitation du bassin versant due à un réservoir et une route.....	11
Figure 4 Principes d'analyse du comportement hydrologique du bassin.....	12
Figure 5 Allure d'un hydrogramme de crue.....	13
Figure 6 Représentation d'un bassin avec ses lignes isochrones et diagramme surface- temps de concentration du bassin par élément de surface.....	15
Figure 7 Influence de la forme du bassin versant sur l'hydrogramme de crue.....	17
Figure 8 Exemples d'indices de compacité.....	18
Figure 9 Classification du réseau hydrographique selon le système de Strahler (1957).....	24
Figure 10 Longueurs caractéristiques d'un bassin versant.....	25
Figure 11 Calcul de la pente moyenne du cours d'eau selon Linsley (1982).....	27
Figure 12 : Digue en enrochement du barrage réservoir de Boukourdane (Photo. Remini, 2007).....	36
Figure 13 : Vue générale du lac du barrage réservoir de Boukourdane (Photo. Remini, 2011).....	37
Figure 14 : Les limites du bassin versant à l'amont du barrage de Boukourdane (schématisé à partir d'une carte de l'ANRH).....	38
Figure 15 : Variation mensuelle de la température.....	41
Figure 16 : Répartition mensuelle des précipitations.....	43
Figure 17 : L'enchaînement d'intervention des différentes composantes.....	50
Figure 18 : La notion d'hydrogramme unitaire et ses caractéristique fondamentales (internet).....	62
Figure 19 : Bassin versant de Oued El Hachem.....	67
Figure 20 : Courbe d'observation.....	79
Figure 21 : Histogramme des l'observation.....	80
Figure 22 : Ajustement à la loi de GALTON.....	84
Figure 23 : Ajustement à la loi de GUMBEL.....	86
Figure 24 : Comparaison entre les deux lois d'ajustement.....	87
Figure 25 : Courbes des pluies fréquences.....	89
Figure 26 : Courbes d'intensité maximale en fonction du temps.....	91
Figure 27 : Modèle HEC HMS du Bassin versant de Boukerdane.....	92
Figure 28 : Précipitations journalière de l'évènement du 23/04/1996.....	93
Figure 29 : Hydrogramme observé de l'évènement du 24/04/1996.....	94
Figure 30 : Valeur de CN avant Calibrage.....	95
Figure 31 : Rapport de Simulation avant calibrage.....	95
Figure 32 : Résultats de la simulation avant Calibrage.....	96
Figure 33 : Résultats de calcul de l'hydrogramme entrant dans la retenue avant calibrage.....	97
Figure 34 : Hydrogramme calculé et observé avant calibrage.....	97
Figure 35 : Valeur de CN après Calibrage.....	99
Figure 36 : Rapport de Simulation après calibrage.....	100
Figure 37 : Résultats de la simulation après Calibrage.....	100



Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

Figure 38 : Résultats de calcul de l'hydrogramme entrant dans la retenue après calibrage .....	101
Figure 39 : Hydrogrammes calculé et observé après calibrage .....	102
Figure 40 : Hydrogramme calculé pluie fréquentielle 10 %.....	103
Figure 41 : Hydrogramme calculé pluie fréquentielle 1 % .....	104
Figure 42 : Hydrogramme calculé pluie fréquentielle 0.1 % .....	104
Figure 43 : Hydrogramme calculé pluie fréquentielle 0.01 % .....	105
Figure 44 : Figure Précipitation enregistrée.....	110
Figure 45 : Débits max simulés .....	110
Figure 46 : Précipitation –débit max.....	111
Figure 47 : Débit max en fonction de la précipitation .....	112
Figure 48 : Volume en fonction de la précipitation .....	113

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques du bassin versant.....	40
Tableau 2 : Température moyenne interannuelles en °C (source ANRH) .....	41
Tableau 3 : Répartition mensuelle de la pluie annuelle .....	42
Tableau 4 : Classification des différents modèles Mathématiques .....	46
Tableau 5 : Les valeurs usuelles de l'abstraction initiale $I_a$ et du coefficient CN (D'après SAGE INGENIERIE).....	61
Tableau 6 : La surface des sous bassins .....	68
Tableau 7 : Le périmètre des sous bassin versant.....	69
Tableau 8 : Indice de Gravelius des sous bassins versants .....	70
Tableau 9 : La longueur équivalente et la longueur de rectangle équivalent.....	71
Tableau 10 : Le temps de concentration pour les différents auteurs .....	73
Tableau 11 : Temps de concentration .....	74
Tableau 12 : Vitesse moyenne de ruissellement .....	75
Tableau 13 : Récapitulatif des bassins versants .....	76
Tableau 14 : Station pluviométrique.....	77
Tableau 15 : Série des pluies journalières maximales (1990-2019) .....	77
Tableau 16 : Caractéristiques de la série de donnée .....	79
Tableau 17 : Résultats d'ajustement à la loi GALTON.....	82
Tableau 18 : Teste d'homogénéité ( teste d'adéquation du khi carré ) .....	85
Tableau 19 : Pluie courte durée $t(h)$ et période de retour (ans).....	88
Tableau 20 : L'intensité maximale de période.....	90
Tableau 21 : Tableau des pluies fréquentielles .....	103

*Intitulé :*

---

**Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.**

**Résumé :**

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons procédé à la caractérisation des crues extrêmes survenues dans le bassin versant Oued El Hachem qui se trouve dans une région semi-aride. Nous avons utilisé le logiciel de modélisation et simulation pluie-débit HEC-HMS en optant pour la méthode de Curve number CN pour calculer la perte de précipitation et la méthode de l'hydrogramme unitaire pour calculer la transformation des pluies en ruissellement direct dans les sous-bassins. Le model hydraulique de Muskingum-Cunge a été utilisé pour calculer la propagation des débits provenant des sous-bassins le long des Talwegs principaux du bassin versant jusqu'au barrage de Boukerdane. Le modèle a été calibré par rapport à un évènement survenu dans le bassin versant en tenant compte le paramètre de l'occupation et l'utilisation du sol. Le Coefficient de Nash–Sutcliffe efficience (NSE) a été utilisé pour évaluer les performances du modèle afin de simuler l'évènement observé. Le modèle calibré a été utilisé pour simuler les précipitations fréquentielles et réelles afin d'identifier le fonctionnement hydrologique du bassin versant en matière d'évènements extrêmes qui pourraient nuire à la sécurité du barrage Boukerdane.

**Mots clés :** Modèle HEC-HMS, Modélisation pluie-débit, précipitations extrêmes, barrage, bassin versant.

## *INTRODUCTION*

---

Dans un bassin versant, la transformation de la pluie en débit résulte d'un certain nombre de mécanismes complexes qui interviennent simultanément à différentes échelles spatiales et temporelles. De ce fait le modèle pluie-débit trouve sa nécessité dans la mesure où le modèle conçu à partir des chroniques de pluies observées, peut générer des débits qui soient les plus proches possibles des débits observés, c'est à dire à partir des observations de pluie tombée, on peut arriver à reproduire (ou à prédire) la réponse en débit du bassin. La modélisation pluie-débit permet de décrire la transformation de ces pluies en débits dans les cours d'eau d'un bassin versant en tenant compte de la réalité du terrain.

La transformation pluie- débit nous permet de maîtriser la prévision des débits pour deux objectifs distincts :

- La bonne exploitation des aménagements hydrauliques. En effet, l'utilisation régulière de la prévision de débit permet d'optimiser la régulation des aménagements disposant d'une certaine accumulation, de procéder à des vidanges préventives lors des crues, d'éviter des déversements et d'augmenter les performances au sens large d'un aménagement.
- Assurer la sécurité des populations et des biens. Elle est utilisée comme une aide efficace à la décision lors de situations de crise.

Notre modélisation (pluie-débit) est appliquée au bassin versant d'Oued El Hachem. Des événements hydrologiques extrêmes se sont produits à son niveau. Ces crues sont intéressantes à analyser tant sur l'aspect forme que sur l'aspect de leur dynamique. Le principe de la modélisation pluie-débit par le logiciel HEC-HMS permet d'obtenir des Informations sur le fonctionnement du système hydrologique du bassin versant.

Notre travail sera élaboré selon les étapes suivantes : présentation de la zone d'étude, un aperçu, présentation du modèle HEC-HMS , méthodologie et application du model qui nous permet de caractériser le comportement du bassin à partir de la simulation des évènements historiques depuis la mise en marche du barrage de Boukerdane .

# PARTIE I    GENERALITES

## CHAPITRE I:    HYDROLOGIE GENERALE

### **1** Définition :

L'hydrologie est la science de la terre qui s'intéresse au cycle de l'eau. Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre (Fig. 1). Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants .

### LE CYCLE HYDROLOGIQUE

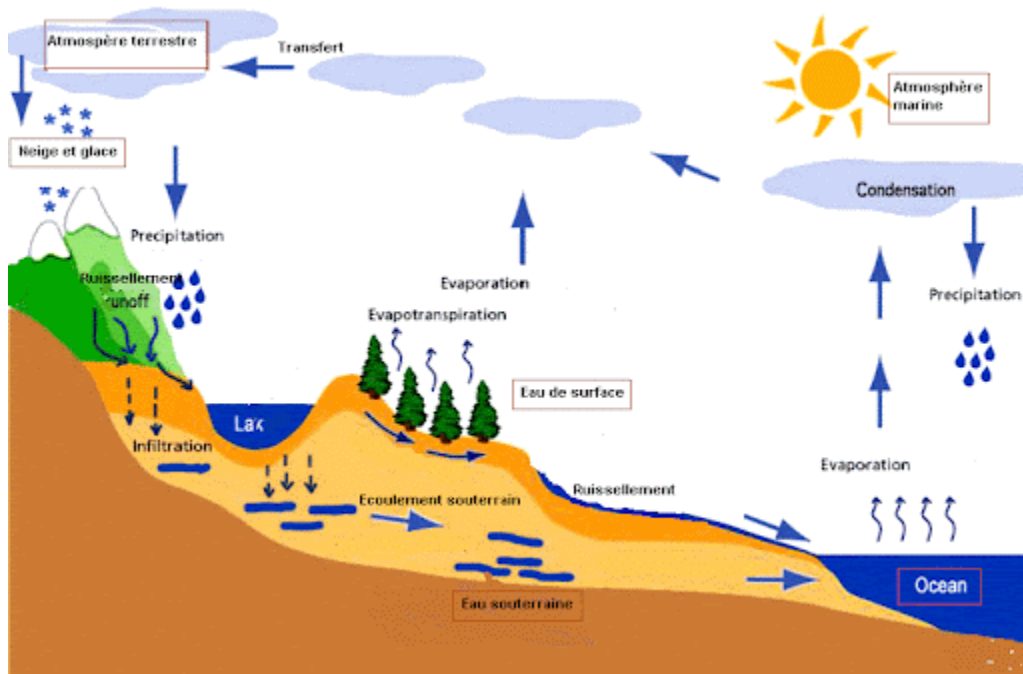


Figure 1 Représentation du cycle de l'eau

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents. Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol.

Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle.

Le cycle de l'eau est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains qui constituent les principaux chapitres de l'hydrologie. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique.

## **2 Les précipitations :**

Sont dénommées précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

La vapeur d'eau de l'atmosphère se transforme en liquide lorsqu'elle atteint la condensation par refroidissement ou augmentation de pression. Pour produire la condensation, il faut également la présence de certains noyaux microscopiques, autour desquels se forment des gouttes d'eau condensées. La source de ces noyaux peut être océanique (chlorides, en particulier NaCl produit

par l'évaporation de la mer), continentale (poussière, fumée et autres particules entraînées par des courants d'air ascendants) ou cosmiques (poussières météoriques).

Le déclenchement des précipitations est favorisé par la coalescence des gouttes d'eau.

L'accroissement de poids leur confère une force de gravité suffisante pour vaincre les courants ascendants et la turbulence de l'air, et atteindre le sol. Enfin, le parcours des gouttes d'eau ou des flocons de neige doit être assez court pour éviter l'évaporation totale de la masse. Les précipitations sont exprimées en intensité (mm/h) ou en lame d'eau précipitée (mm) (rapport de la quantité d'eau précipitée uniformément répartie sur une surface).

### **3 L'évapotranspiration**

L'évaporation se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. On parle de sublimation lors du passage direct de l'eau sous forme solide (glace) en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire. Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes.

On distingue :

#### **3.1 L'évapotranspiration réelle (ETR) :**

C'est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.

#### **3.2 L'évapotranspiration de référence (ET0) :**

Anciennement évapotranspiration potentielle, elle est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

L'évaporation est une des composantes fondamentales du cycle hydrologique et son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant. En général, des analyses spécifiques d'évaporation devront être faites pour des études de bilan et de gestion de l'eau par les plantes. Cependant, ces analyses approfondies sont moins nécessaires pour les études de projets d'aménagement où l'eau est plutôt considérée sous un aspect d'agent dynamique.

#### **4 L'interception et le stockage dans les dépressions**

La pluie peut être retenue par la végétation, puis redistribuée en une partie qui parvient au sol et une autre qui s'évapore. La partie n'atteignant jamais le sol forme l'interception. Son importance est difficile à évaluer et souvent marginale, donc souvent négligée dans la pratique. Le stockage dans les dépressions est, tout comme l'interception, souvent associé aux pertes. On définit l'eau de stockage comme l'eau retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant et après une averse.

La quantité d'eau susceptible d'être interceptée varie considérablement selon la végétation présente sur le site à étudier. L'effet respectif de l'interception et du stockage dans les dépressions est très variable et diminue au cours de l'averse. Il provoque en général un retard dans le démarrage et la réaction hydrologique qui peut être perçue à l'exutoire du bassin.

#### **5 L'infiltration et la percolation**

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de pression. La percolation représente plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique. Le taux d'infiltration est donné par la tranche ou le volume d'eau qui s'infiltrer par unité de temps (mm/h ou m<sup>3</sup>/s). La capacité d'infiltration ou l'infiltrabilité est la tranche d'eau maximale qui peut s'infiltrer par unité de temps dans le sol et dans des conditions données.

L'infiltration est nécessaire pour renouveler le stock d'eau du sol, alimenter les eaux souterraines et reconstituer les réserves aquifères. De plus, en absorbant une partie des eaux de précipitation, l'infiltration peut réduire les débits de ruissellement.



## **6 Les écoulements**

De par la diversité de ses formes, on ne peut plus aujourd'hui parler d'un seul type d'écoulement mais bien des écoulements. On peut distinguer en premier lieu les écoulements rapides des écoulements souterrains plus lents. Les écoulements qui gagnent rapidement les exutoires pour constituer les crues se subdivisent en écoulement de surface (mouvement de l'eau sur la surface du sol) et écoulement de subsurface (mouvement de l'eau dans les premiers horizons du sol). L'écoulement souterrain désigne le mouvement de l'eau dans le sol. On peut encore ajouter à cette distinction les écoulements en canaux ou rivières qui font appel à des notions plus hydrauliques qu'hydrologiques (à l'exception des méthodes de mesures comme nous le verrons ultérieurement).

Au-delà de cette distinction simpliste, on remarquera que les écoulements peuvent aussi se signaler par leur domaine d'application. L'écoulement de surface caractérise un écoulement sur une surface et s'exprime généralement par un rapport volume / surface / temps  $[L^3/L^2/T]$ . Il est ainsi souvent exprimé en millimètre par année hydrologique dans les études de bilans ou encore en litres par secondes et par hectares dans le cadre de projet d'aménagement des terres et des eaux (drainage ou irrigation). Les écoulements souterrains et en rivière font explicitement référence à la notion de débit, à savoir à un volume d'eau traversant une section par unité de temps  $[L^3/T]$ .

### ***Conclusion sur le cycle hydrologique***

Le cycle hydrologique est caractérisé par l'interdépendance de ses composantes, par sa stabilité et son équilibre dynamique. Si un processus est perturbé, tous les autres s'en ressentent. En particulier, le cycle hydrologique peut être influencé à des degrés divers par les activités humaines. En effet, l'homme agit directement sur le processus de transformation de l'eau, et cela de plusieurs façons : la construction de réservoirs, le transport de l'eau pour des besoins industriels, le captage des eaux phréatiques, l'irrigation, le drainage, la correction des cours d'eau, l'utilisation agricole des sols, l'urbanisation, les pluies provoquées, etc., sont des exemples de l'intervention humaine. La maîtrise de l'eau simplifie la réalisation des bilans hydriques à différents échelon facilitant la modélisation hydrologique au niveau continental, océanique ou atmosphérique.

## 7 Le bilan hydrique

Trop souvent confondus, le bilan hydrologique se situe à l'échelle du bassin versant et concerne une démarche hydrologique, le bilan hydrique se situe à l'échelle de la plante et participe à une démarche plutôt tournée vers agronomie. Le bilan hydrique et le bilan hydrologique visent tous les deux à établir les relations entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant une période de temps donné.

On peut schématiser le phénomène continu du cycle de l'eau en trois phases :

- les précipitations,
- le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain,
- l'évaporation.

Il est intéressant de noter que dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état. Il s'ensuit que l'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut se faire à l'aide d'une équation appelée "hydrologique" qui est le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps. Le temporel introduit la notion de l'année hydrologique. En principe, cette période d'une année est choisie en fonction des conditions climatiques. Ainsi en fonction de la situation météorologique des régions, l'année hydrologique peut débuter à des dates différentes de celle du calendrier ordinaire. Au niveau de l'espace, il est d'usage de travailler à l'échelle d'un bassin versant (entité structurale définie en détails dans le prochain paragraphe).

L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donnés :

$$P + S = R + E + (S + \Delta S) \quad (1)$$

Avec :

P : précipitations [mm]

S : ressources (accumulation) de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol) [mm]

R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm]

E : évapotranspiration [mm]

S + ΔS : ressources accumulées à la fin de la période [mm]

On exprime généralement les termes du bilan hydrique en hauteur d'eau (mm par exemple), on parle alors de lame d'eau (précipitée, écoulée, évaporée, stockée, etc.). Cette équation exprime simplement que la différence entre le débit d'eau entrant et le débit d'eau sortant d'un volume donné (par exemple un bassin versant) au cours d'une période déterminée est égale à la variation du volume d'eau emmagasinée au cours de ladite période. Elle peut s'écrire encore sous la forme simplifiée suivante :

$$E = I - O - \Delta S \quad (2)$$

Avec :

E : évaporation [mm] ou [m<sup>3</sup>],

I : volume entrant [mm] ou [m<sup>3</sup>],

O : volume sortant [mm] ou [m<sup>3</sup>],

ΔS : variation de stockage [mm] ou [m<sup>3</sup>].

### *Conclusion sur le bilan hydrique*

Si la compréhension du cycle hydrologique et du bilan hydrique est conceptuellement aisée, l'application de la méthode du bilan hydrique est limitée par la difficulté de quantifier les variables. Effectivement, les processus hydrologiques sont difficiles à observer directement sur le terrain et donc à mesurer. Notons que les erreurs de mesure éventuelles des termes qu'on retrouve dans l'équation hydrologique simplifiée se répercutent directement sur les valeurs calculées de l'évaporation. Devant ces imprécisions, on suggère l'emploi de cette méthode dans le cas d'un avant-projet par exemple, pour vérifier l'état du système et surtout la validité (la fiabilité) des mesures qui le décrit.

## **CHAPITRE II : LE BASSIN VERSANT**

### **1 Définition du bassin versant**

Un bassin versant est une aire délimitée par des lignes de partage des eaux, à l'intérieur de laquelle toutes les eaux tombées alimentent un même exutoire : cours d'eau, lac, mer, océan, etc. Une ligne de partage des eaux se confond très souvent avec une ligne de crête.

Chaque bassin versant se subdivise en un certain nombre de bassins élémentaires (parfois appelés « sous bassin versant ») correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal.

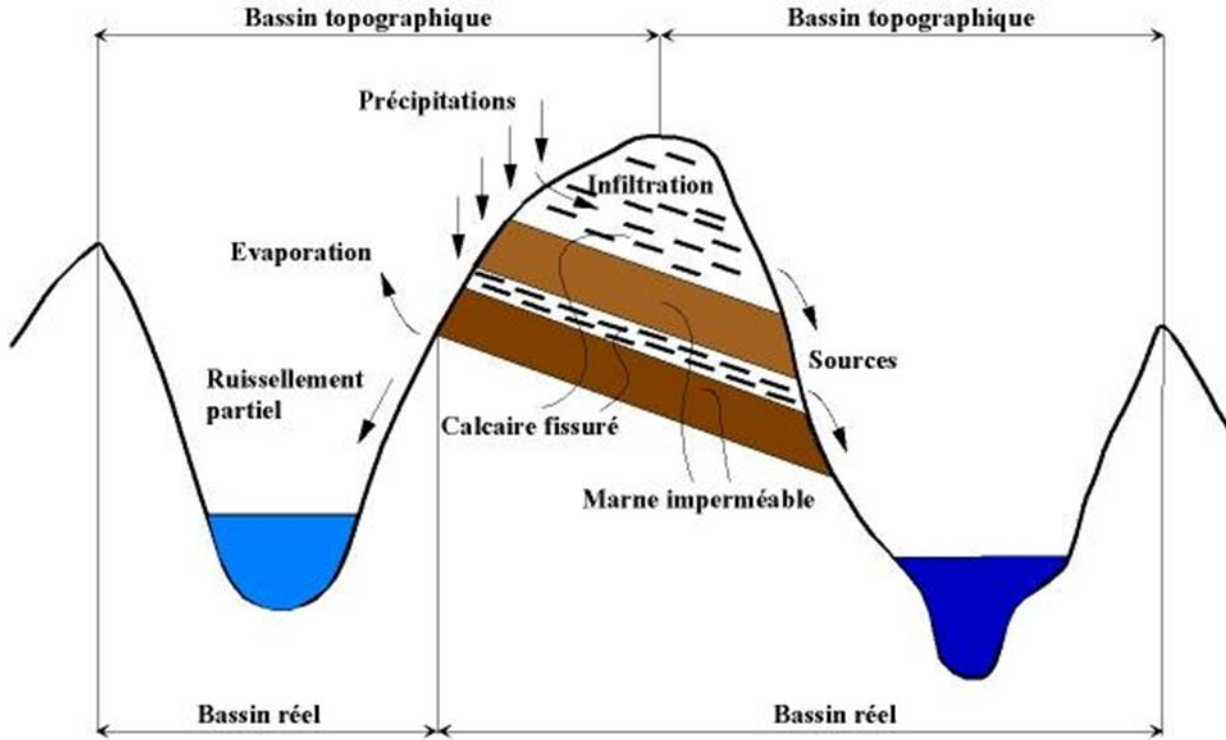
Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

Plus précisément, le bassin versant qui peut être considéré comme un " système " est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, est donc défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est entièrement caractérisé par son exutoire, à partir duquel nous pouvons tracer le point de départ et le point d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite.

Généralement, la ligne de partage des eaux correspond à la ligne de crête. On parle alors de bassin versant topographique.

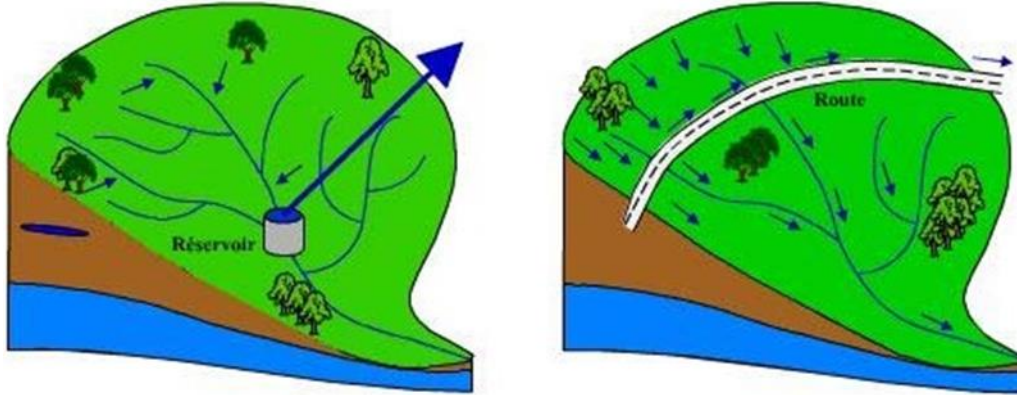
Toutefois, la délimitation topographique nécessaire à la détermination en surface du bassin versant naturel n'est pas suffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines (voir Fig. 2). Le bassin versant est alors différent du bassin versant délimité strictement par la topographie. Il est appelé dans ce cas bassin versant réel.



**Figure 2 Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique**

D'après Roche - Hydrologie de surface, Ed. Gauthier-Villars, Paris 1963.

Cette différence entre bassins réel et topographique est tout particulièrement importante en région karstique. Lorsque l'on s'intéresse au ruissellement, la délimitation du bassin versant doit aussi tenir compte des barrières artificielles (routes, chemins de fer, etc.). En effet, l'hydrologie du bassin versant, et notamment la surface drainée, peuvent être modifiées par la présence d'apports latéraux artificiels (réseaux d'eaux usées ou potables, drainages, routes, pompes ou dérivations artificielles modifiant le bilan hydrologique).



**Figure 3 Modifications de la délimitation du bassin versant due à un réservoir et une route**

Il convient donc également de définir, en plus des délimitations topographiques, les limites souterraines de ce système. De plus, il est aussi nécessaire de tenir compte des effets anthropiques relatifs aux eaux du système.

## **2 Comportement hydrologique**

L'analyse du comportement hydrologique d'un bassin versant (système hydrologique) s'effectue le plus souvent par le biais de l'étude de la réaction hydrologique du bassin face à une sollicitation (la précipitation). Cette réaction est mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système. L'hydrogramme est l'évolution du débit de cours d'eau au niveau d'une section de contrôle en fonction du temps. La réaction du bassin versant peut également être représentée par un limnigramme qui n'est autre que la représentation de la hauteur d'eau mesurée en fonction du temps.

La réaction hydrologique d'un bassin versant à une sollicitation particulière (Fig. 4) est caractérisée par l'allure de l'hydrogramme.

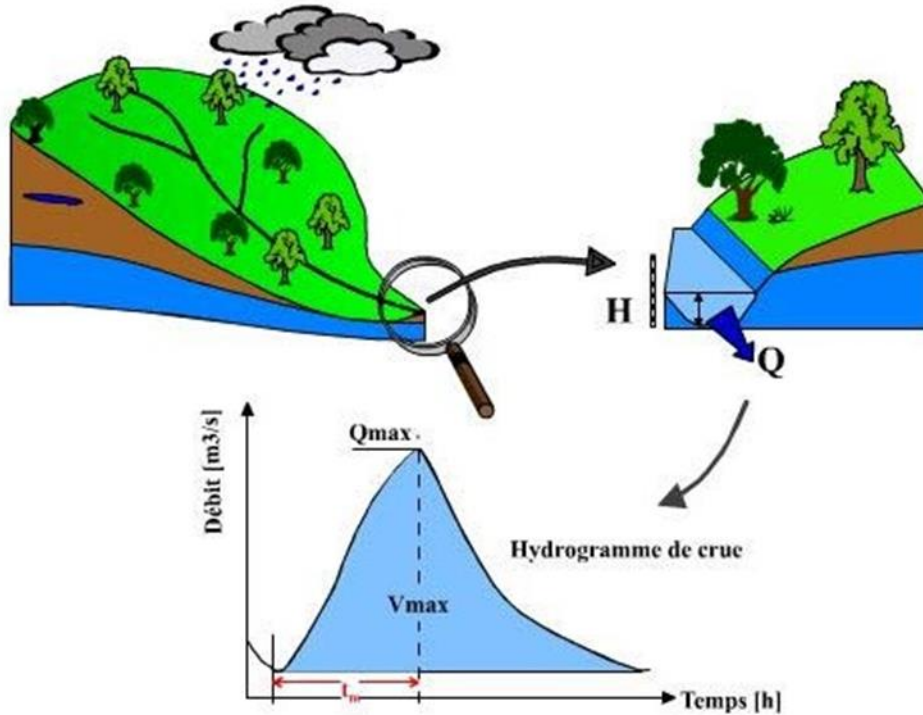


Figure 4 Principes d'analyse du comportement hydrologique du bassin

L'allure d'un hydrogramme détermine le régime hydrologique d'un cours d'eau. Au cours d'un évènement pluvieux, l'allure de l'hydrogramme appelée hydrogramme de crue est fonction des caractéristiques de la pluie. Le hyétoqramme est la courbe représentant l'intensité de la pluie en fonction du temps. C'est à partir de cette courbe que se construit l'hydrogramme. L'allure de l'hydrogramme de crue (fig 5) est typiquement sous forme de courbe en cloche c'est-à-dire deux courbes sigmoïdes plus ou moins symétriques.

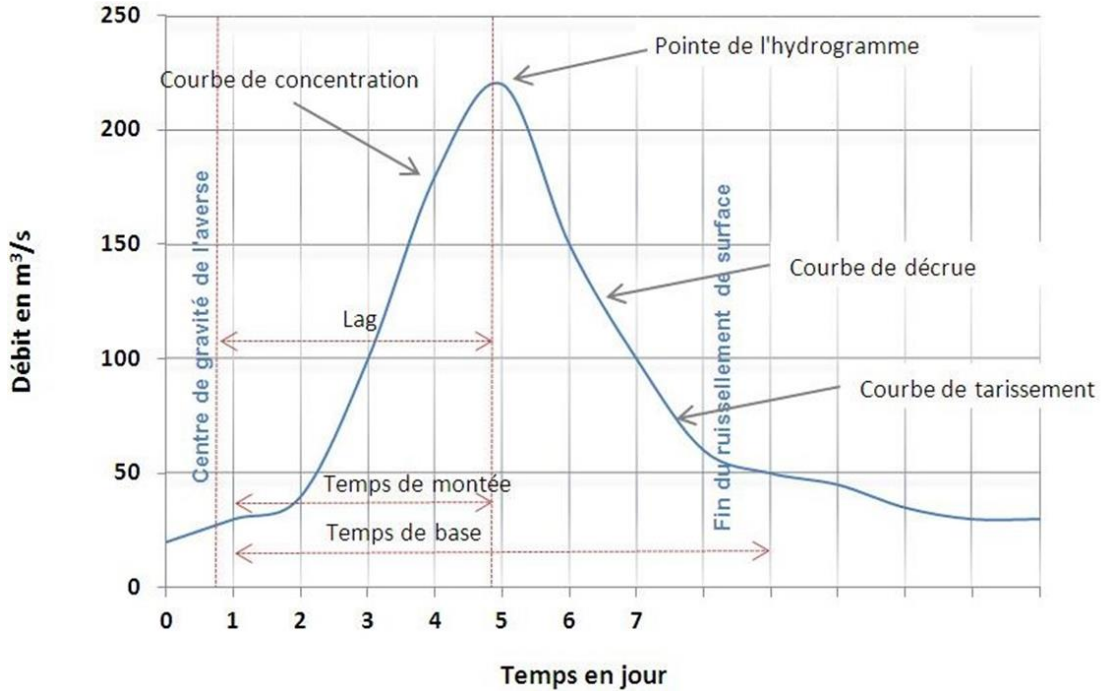


Figure 5 Allure d'un hydrogramme de crue

- > La pointe de l'hydrogramme ou débit de pointe ou pic de débit est la valeur maximale du débit de crue.
- > Le temps de base est le temps entre les deux points d'inflexion qui définit le temps pendant lequel il y a ruissellement.
- > La courbe de concentration ou courbe de crue est la partie croissante de l'hydrogramme entre le premier point d'inflexion et le débit de pointe.
- > Le temps de montée est le temps correspondant à la courbe de crue.
- > La courbe de décrue est la partie décroissante de l'hydrogramme entre le débit de pic et la fin du ruissellement déterminée par le second point d'inflexion.
- > Le temps de lag est le délai entre le centre de gravité de l'évènement pluvieux et le temps d'apparition du débit maximum. Ce temps détermine en hydrologie de surface le temps de réponse de l'unité hydrologique c'est-à-dire le bassin versant à un évènement pluvieux.



## 2.1 Le temps de concentration

Le temps de concentration  $t_c$  des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

Il est composé de trois termes différents :

$t_h$  : Temps d'humectation. Temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.

$t_r$  : Temps de ruissellement ou d'écoulement. Temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).

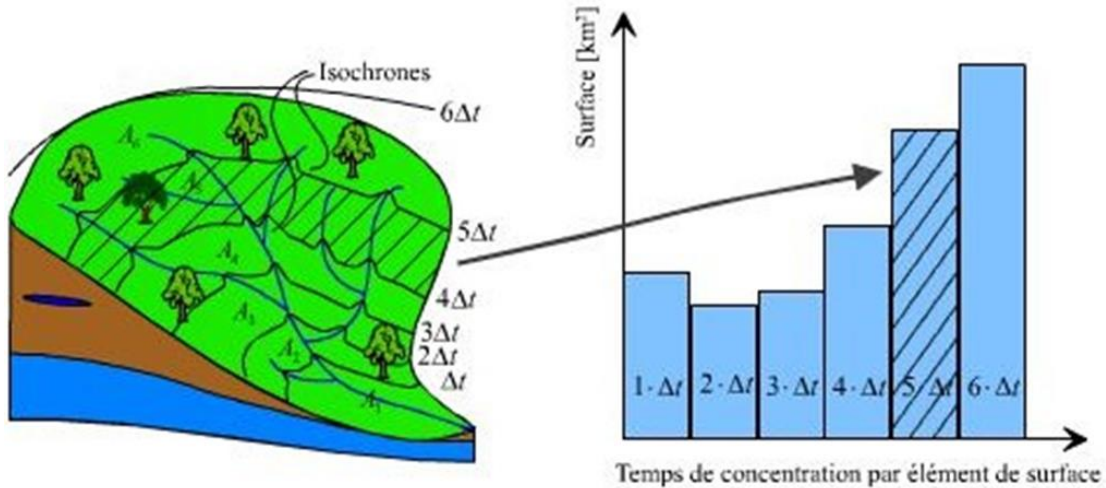
$t_a$  : Temps d'acheminement. Temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration  $t_c$  est donc égal au maximum de la somme de ces trois termes, soit :

$$t_c = \max(\sum(t_h + t_r + t_a)) \quad (3)$$

## 2.2 Les courbes isochrones

Les courbes isochrones représentent les courbes d'égal temps de concentration des eaux sur le bassin versant. Ainsi, l'isochrone la plus éloignée de l'exutoire représente le temps mis pour que toute la surface du bassin versant contribue à l'écoulement à l'exutoire après une averse uniforme (Fig. 6). Le tracé du réseau des isochrones permet donc de comprendre en partie le comportement hydrologique d'un bassin versant et l'importance relative de chacun de ses sous-bassins.



**Figure 6 Représentation d'un bassin avec ses lignes isochrones et diagramme surface-temps de concentration du bassin par élément de surface**

On remarquera la forme des isochrones au voisinage des éléments constitutifs du réseau hydrographique. Ces courbes permettent de déterminer, en faisant certaines hypothèses, l'héogramme de crue résultant d'une pluie tombée sur le bassin.

### **3 Caractéristiques physiques et leurs influences sur l'écoulement des eaux**

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Le temps de concentration  $t_c$  qui, on l'a vu, caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques : en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son élévation, sa pente et son orientation. A ces facteurs s'ajoutent encore le type de sol, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces facteurs, d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir de cartes adéquates ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques notamment le modèle numérique de terrain MNT.

### **3.1 Les caractéristiques géométriques**

#### **3.1.1 La surface**

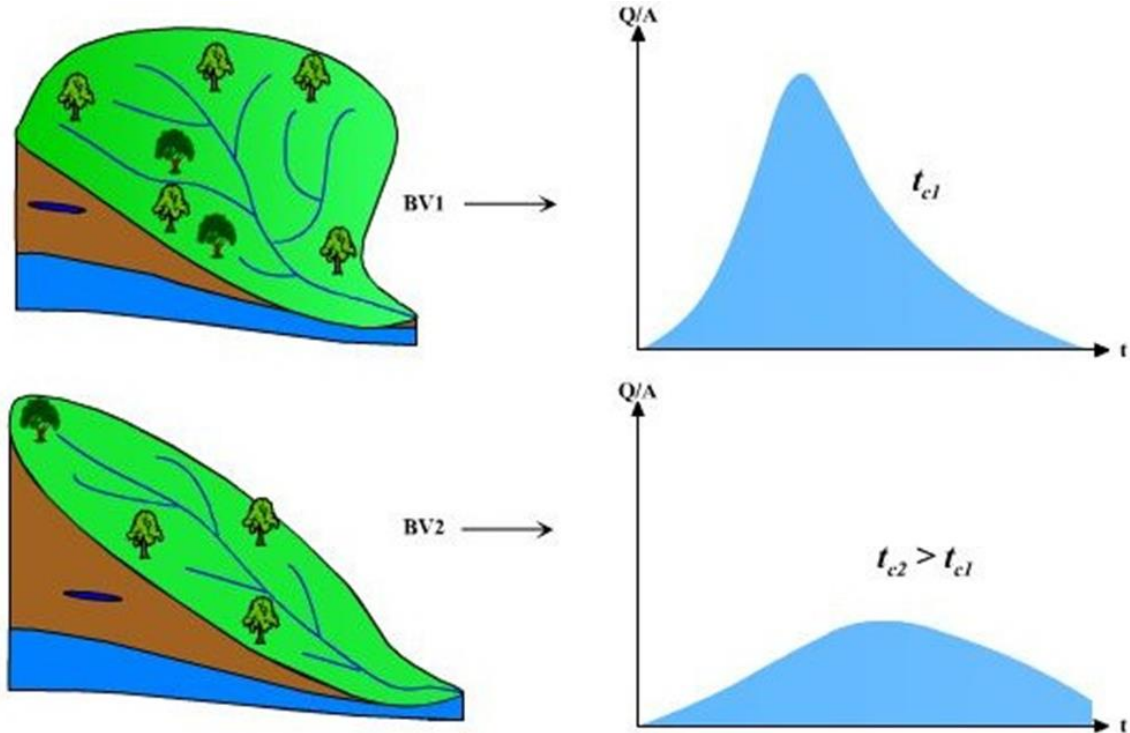
Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface.

La surface du bassin versant peut être mesurée par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre ou, mieux, par des techniques de digitalisation.

#### **3.1.2 La forme**

La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Par exemple, une forme allongée du bassin versant (BV2) favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration.

En revanche, les bassins en forme d'éventail (BV1), présentant un temps de concentration plus court ( $t_{c1}$ ), auront les plus forts débits de pointe, comme le montre la figure suivante :



**Figure 7 Influence de la forme du bassin versant sur l'hydrogramme de crue**

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

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi^2 A}} \approx 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

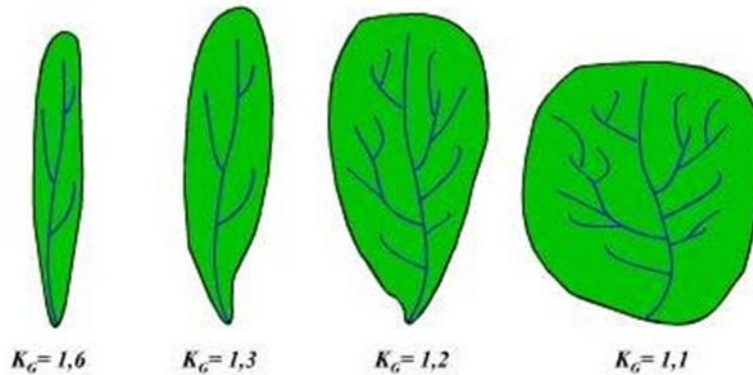
Avec :

$K_G$  : indice de compacité de Gravelius,

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

$P$  : périmètre du bassin [ $\text{km}$ ].

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée, tel qu'illustré par la figure 8.



**Figure 8 Exemples d'indices de compacité**

### 3.1.3 Le relief

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants :

#### 3.1.3.1 La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou

au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

La courbe hypsométrique demeure un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

### 3.1.3.2 Les altitudes caractéristiques

#### a. Les altitudes maximale et minimale

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

#### b. L'altitude moyenne

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

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

avec :

**H<sub>moy</sub>** : altitude moyenne du bassin [m] ;

**A<sub>i</sub>** : aire comprise entre deux courbes de niveau [km<sup>2</sup>] ;

**h<sub>i</sub>** : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

**A** : superficie totale du bassin versant [km<sup>2</sup>].

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

*c. L'altitude médiane*

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

*3.1.3.3 La pente moyenne du bassin versant*

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

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

$$i_m = \frac{D^*L_{cn}}{A} \quad (6)$$

Où :

**$i_m$**  : pente moyenne [m/km],

**$L_{cn}$**  : longueur totale de courbes de niveau [km],

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

**$A$**  : surface du bassin versant [km<sup>2</sup>].

Cette méthode de calcul donne de bons résultats dans le cas d'un relief modéré et pour des courbes de niveau simples et uniformément espacées.

Mais la formule la plus usité et la plus pratique est :

$$i_m = \frac{|Z_5 - Z_{95}|}{L_r} \quad \text{ou} \quad i_m = \frac{|Z_{\max} - Z_{\min}|}{L_r}$$

Z<sub>5</sub> : altitude pouvant être dépassée par 5% de la superficie du bassin versant

Z<sub>95</sub> : altitude pouvant être dépassée par 95% de la superficie du bassin versant

L<sub>r</sub> : longueur du rectangle équivalent

Le calcul de la pente moyenne tout comme celui de leur exposition (orientation des pentes) peut-être assez facilement automatisé en se basant sur des données numériques représentant la topographie des bassins versants (Modèle Numérique de Terrain).

### 3.2 L'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 :

$$i_p = \frac{1}{L_r} * \sum_{i=1}^n \left( x_i * \sqrt{\frac{d}{x_i}} \right) (7)$$

Où :

ip : indice de pente [%],

L<sub>r</sub> : longueur du rectangle équivalent[m],

x<sub>i</sub> : distance qui sépare deux courbes sur la 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<sub>i</sub> : pente moyenne d'un élément [%].



La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet de comparer facilement des bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité).

Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

Si L et l représentent respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, alors :

Le périmètre du rectangle équivalent vaut  $P = 2*(L+l)$  ; la surface:  $A = L * l$  ; le coefficient de compacité :

$$K_G = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

En combinant ces trois relations, on obtient :

$$L = \frac{K_G * \sqrt{A}}{1,12} * \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right) \text{ si } K_G \geq 1,12 \quad (8)$$

Le tracé des droites de niveau du rectangle équivalent découle directement de la répartition hypsométrique cumulée.

### 3.3 Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux :

- La géologie

- Le climat

- La pente du terrain

- La présence humaine

> La géologie : par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. Le réseau de drainage n'est habituellement pas le même dans une région où prédominent les roches sédimentaires, par comparaison à des roches ignées (i.e. des "roches de feu" dénommées ainsi car ces roches proviennent du refroidissement du magma). La structure de la roche, la forme, les failles, les plissements, forcent le courant à changer de direction.

> Le climat : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.

> La pente du terrain, détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

> La présence humaine : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

Afin de caractériser le réseau hydrographique, il est souvent utile de reporter son tracé en plan sur une carte à une échelle adéquate. L'utilisation de photographies analogiques ou numériques est utile à cette identification. Divers paramètres descriptifs sont utilisés pour définir le réseau hydrographique.

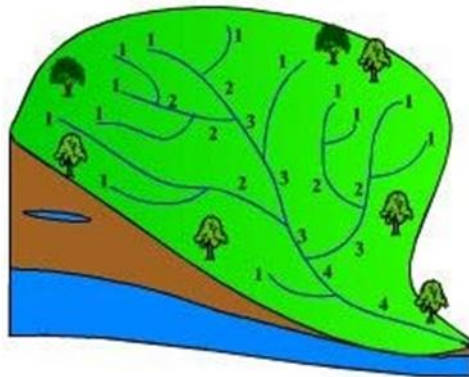
### **3.3.1 La topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau**

Par topologie, on entend l'étude des propriétés géométriques se conservant après déformations continues. Par extension, la topologie étudie les notions de voisinage et de limite. Appliquée à l'hydrologie, la topologie s'avère utile dans la description du réseau hydrographique notamment en proposant une classification de ceux-ci.

La classification est facilitée par un système de numérotation des tronçons de cours d'eau (rivière principale et affluents). L'ordre des cours d'eau est donc une classification qui reflète la ramification du cours d'eau. La codification des cours d'eau est également utilisée pour la codification des stations de mesures, permettant ainsi un traitement automatisé des données. Il existe plusieurs types de classifications des tronçons des cours d'eau, dont la classification de Strahler (1957) qui est la plus utilisée.

Cette classification permet de décrire sans ambiguïté le développement du réseau de drainage d'un bassin de l'amont vers l'aval (Fig. 9). Elle se base sur les règles suivantes :

- > Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.
- > Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordres différents prend l'ordre du plus élevé des deux.
- > Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de un.



**Figure 9 Classification du réseau hydrographique selon le système de Strahler (1957)**

Un bassin versant à l'ordre du plus élevé de ses cours d'eau, soit l'ordre du cours d'eau principal à l'exutoire. Il existe d'autres classifications de ce type comme celle de Horton (1919) qui est parfois utilisée dans le même but.

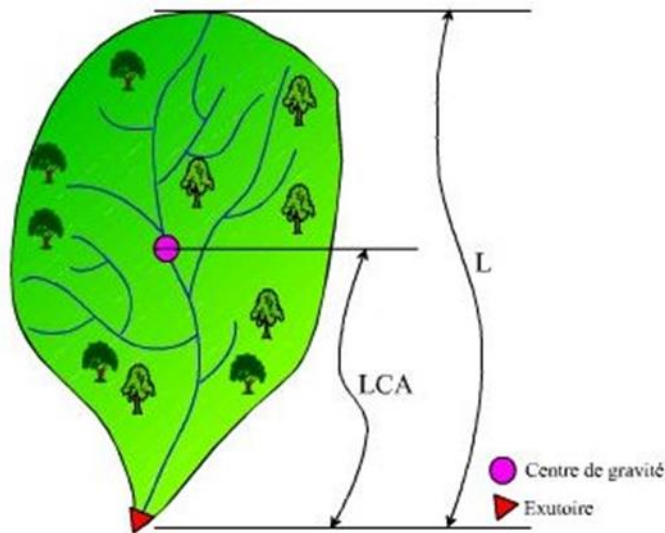
### 3.4 Les longueurs et les pentes caractéristiques du réseau

#### 3.4.1 Les longueurs caractéristiques

Un bassin versant se caractérise principalement par les deux longueurs suivantes, illustrées sur la figure 9.

La longueur d'un bassin versant (LCA) est la distance curviligne mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à un point représentant la projection du centre de gravité du bassin sur un plan (Snyder, 1938).

La longueur du cours d'eau principal (L) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.



**Figure 10 Longueurs caractéristiques d'un bassin versant**

LCA : longueur du bassin versant ; L : longueur du cours d'eau principal

3.4.1.1 Le profil longitudinal du cours d'eau

On a l'habitude de représenter graphiquement la variation altimétrique du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'émissaire. Cette représentation devient intéressante lorsque l'on reporte les cours d'eau secondaires d'un bassin versant qu'il est alors facile de comparer entre eux et au cours d'eau principal. Notons qu'il est d'usage d'utiliser un graphisme différent lorsque les affluents sont en rive gauche ou droite de la rivière dont ils sont tributaires. Le profil en long d'un cours d'eau permet de définir sa pente moyenne.

3.4.1.2 La pente moyenne d'un cours d'eau

La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal observé. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol.

Le calcul des pentes moyennes et partielles de cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L} \quad (9)$$

Où :

$P_{moy}$  : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;

$\Delta H_{max}$  : dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire) ;

$L$  : longueur du cours d'eau principal [km].

On préférera parfois utiliser d'autres méthodes plus représentatives : par exemple celle qui consiste à assimiler la pente moyenne à la pente de la droite tracée entre les points situés à 15%

et 90% de distance à partir de l'exutoire, suivant le cours d'eau principal; ou encore, comme le préconise Linsley (1982), on prendra la pente de la ligne, tracée depuis l'exutoire, dont la surface délimitée est identique à la surface sous le profil en long (Fig. 11).

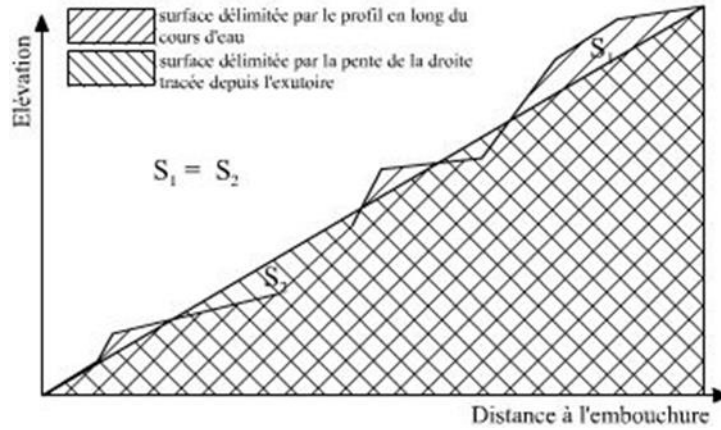


Figure 11 Calcul de la pente moyenne du cours d'eau selon Linsley (1982)

### 3.4.2 Courbe aire-distance

La courbe aire-distance met en relation la longueur moyenne des cours d'eau d'ordre u donné et l'aire tributaire moyenne des cours d'eau du même ordre u, et ceci ordre par ordre. Cette courbe permet de visualiser la répartition des superficies du bassin par rapport à l'exutoire ou par rapport au point de mesure du débit. Cette répartition affecte en effet la concentration du ruissellement et donc influence la réponse hydrologique du bassin versant.

## 3.5 Le Degré de développement du réseau

### 3.5.1 La densité de drainage

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (11)$$

Avec :

Dd : densité de drainage [km/km<sup>2</sup>] ;

Li : longueur de cours d'eau [km] ;

A : surface du bassin versant [km<sup>2</sup>].

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. Selon Schumm, 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 (section du réseau).

### 3.5.2 La densité hydrographique

La densité hydrographique représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \quad (12)$$

Où :

F : densité hydrographique [km<sup>-2</sup>] ;

N<sub>i</sub> : nombre de cours d'eau ;

A : superficie du bassin [km<sup>2</sup>].

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

$$F = a * D_d^2 \quad (13)$$

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.

#### **4 Les caractéristiques agro-pédo-géologiques**

##### **4.1 La couverture du sol**

##### **4.1.1 La couverture végétale**

L'activité végétative et le type de sol sont intimement liés et leurs actions combinées influencent singulièrement l'écoulement en surface. Le couvert végétal retient, selon sa densité, sa nature et l'importance de la précipitation, une proportion variable de l'eau atmosphérique. Cette eau d'interception est en partie soustraite à l'écoulement.

La forêt, par exemple, intercepte une partie de l'averse par sa frondaison. Elle exerce une action limitatrice importante sur le ruissellement superficiel. La forêt régularise le débit des cours d'eau et amortit les crues de faibles et moyennes amplitudes. Par contre, son action sur les débits extrêmes causés par des crues catastrophiques est réduite.

A l'inverse, le sol nu, de faible capacité de rétention favorise un ruissellement très rapide.

L'érosion de la terre va généralement de pair avec l'absence de couverture végétale.

##### **4.1.2 Les plans d'eau**

Parmi les éléments de la couverture du sol qui influencent le comportement hydrologique d'un bassin versant, on doit prendre en compte la présence de surfaces d'eaux libres telles que les lacs qui jouent un rôle important du fait de leur capacité de stockage temporaire d'un certain volume d'eau. Ce stockage temporaire a ainsi pour effet de laminier les crues c'est à dire de réduire le débit de pointe de la crue.

Un indice analogue à celui de la couverture forestière peut-être identifié pour quantifier l'importance de ces plans d'eau.



On soulignera encore que la surface du cours d'eau constitue aussi un plan d'eau et que le canal d'une rivière permet aussi de laminier une crue.

#### **4.1.3 Les surfaces urbanisées**

Les surfaces imperméables jouent un très grand rôle en hydrologie urbaine. Elles augmentent l'écoulement de surface, réduisent les infiltrations et la recharge des nappes, et diminuent le temps de concentration. On calcule souvent un taux d'imperméabilité qui est le rapport entre les surfaces imperméables et la surface totale.

#### **4.1.4 Le coefficient de ruissellement**

Pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler, un indice est très souvent utilisé en hydrologie de surface : le coefficient de ruissellement ( $C_r$ ). Son calcul et son emploi sont simples, mais notons qu'il peut conduire à commettre de grossières erreurs. Ce coefficient est défini comme suit :

$$C_r = \frac{\text{Hauteur d'eau ruisselée [mm]}}{\text{Hauteur d'eau précipitée [mm]}} \quad (18)$$

#### **4.1.5 La nature du sol**

La nature du sol intervient sur la rapidité de montée des crues et sur leur volume. En effet, le taux d'infiltration, le taux d'humidité, la capacité de rétention, les pertes initiales, le coefficient de ruissellement ( $C_r$ ) sont fonction du type de sol et de son épaisseur.

Pour étudier ce type de réactions, on peut comparer le coefficient de ruissellement sur différentes natures de sol (intérêt d'une carte pédologique détaillée dans les études de prédétermination des crues). La littérature fournit des valeurs du coefficient de ruissellement pour chaque type de sol et, très souvent, en rapport avec d'autres facteurs tels que la couverture végétale, la pente du terrain ou l'utilisation du sol.

On peut introduire, dès à présent, une caractéristique du sol importante : l'état d'humidité du sol qui est un des facteurs principaux conditionnant les temps de concentration. Cet état est cependant très difficile à mesurer car très variable dans l'espace et dans le temps. On a souvent recours à d'autres paramètres qui reflètent l'humidité du sol et qui sont plus faciles à obtenir. En hydrologie, on fait souvent appel à des indices caractérisant les conditions d'humidité antécédentes à une pluie. Il en existe de nombreux qui sont pour la plupart basés sur les précipitations tombées au cours d'une certaine période précédant un événement. Ils sont généralement notés IPA, c'est-à-dire Indices de Précipitations Antécédentes.

La forme la plus classique de cet indice repose sur le principe de décroissance logarithmique avec le temps du taux d'humidité du sol, au cours des périodes sans précipitations :

$$IPA_t = IPA_0 * K^t \quad (19)$$

Avec :

IPA<sub>0</sub> : valeur initiale de l'indice des précipitations antécédentes [mm] ;

IPA<sub>t</sub> : valeur de cet indice t jours plus tard [mm] ;

K : facteur de récession, K < 1. Il est variable d'un bassin à l'autre, ainsi que d'une saison à l'autre pour un même bassin ;

T : temps [jour].

#### 4.2 La géologie du substratum

La connaissance de la géologie d'un bassin versant s'avère importante pour cerner l'influence des caractéristiques physiographiques. La géologie du substratum influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface. Dans ce dernier cas, les caractères géologiques principaux à considérer sont la lithologie (nature de la roche mère) et la structure tectonique du substratum. L'étude géologique d'un bassin versant dans le cadre d'un projet hydrologique a surtout pour objet de déterminer la perméabilité du substratum. Celle-ci intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume et sur le soutien apporté aux débits d'étiage par les nappes souterraines. Un bassin à substratum imperméable présente une

crue plus rapide et plus violente qu'un bassin à substratum perméable, soumis à une même averse. Ce dernier retient l'eau plus aisément, et en période de sécheresse, un débit de base sera ainsi assuré plus longtemps. Néanmoins, le substratum peut absorber une certaine quantité d'eau dans les fissures et diaclases des roches naturellement imperméables ou dans les formations rocheuses altérées.

Pour ces dernières, la dissolution de certains éléments et leur migration, menant à la formation de canaux, peut créer une circulation souterraine importante. Ce phénomène se retrouve sans exception dans les régions karstiques. Dans ce cas, l'étude géologique devra être beaucoup plus détaillée de manière à localiser les nappes d'eaux souterraines, leur zone d'alimentation et leurs résurgences. Cette étude devra être réalisée par un hydrogéologue.

## **5 Informations digitales et modèles numériques**

La demande de données spatiales s'est accrue ces dernières années car l'on sait désormais qu'il est essentiel de connaître la distribution spatiale de la réponse hydrologique pour bien comprendre les processus sous-jacents de la génération de l'écoulement. De plus, la représentation et la connaissance du terrain sont essentielles pour comprendre les processus d'érosion, de sédimentation, de salinisation et de pollution via des cartes de risque.

Aujourd'hui, le développement de techniques modernes d'acquisition et de mise à disposition d'informations digitales a rendu possible la représentation à la fois de la topographie du milieu par le biais de modèles numériques d'altitude (MNA) et de terrain (MNT) ainsi que la représentation de l'occupation des sols par le biais de photographies aériennes ou de données satellitaires. Ces informations servent de plus en plus à la description des caractéristiques physiques des bassins versants et à la cartographie numérique de leur couverture.

A partir de la densité locale de courbes de niveau ou de traitement stéréoscopique d'images satellitaires, il est possible de produire une spatialisation du milieu (MNA) qui, in fine, aboutit à l'élaboration de modèles numériques de terrain (MNT). Ce MNT est une expression numérique de la topographie, sous forme matricielle ou vectorielle. Outre les altitudes (MNA), les fichiers qui le constituent sont les pentes, l'orientation et l'éclairage simulé.

Schématiquement, on distingue trois types essentiels de découpage spatial du milieu utilisés pour la génération d'un MNA. Il s'agit respectivement de :

- découpage régulier et arbitraire (généralement grille rectangulaire),
- découpage à base d'éléments irréguliers épousant les discontinuités du milieu,
- découpage topographique basé sur une approche hydrologique qui s'appuie sur la délimitation des lignes d'écoulement et des courbes de niveau.

A partir de ces trois approches, il est possible de déterminer plusieurs attributs du modèle numérique d'altitude tels que des attributs topographiques (élévation, orientation, pente, surface, courbure) qui influencent diverses grandeurs intervenant directement dans les processus d'écoulement.

## **PARTIE II   PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DU LOGICIEL UTILISE**

### **CHAPITRE I :   PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

#### **1 Introduction**

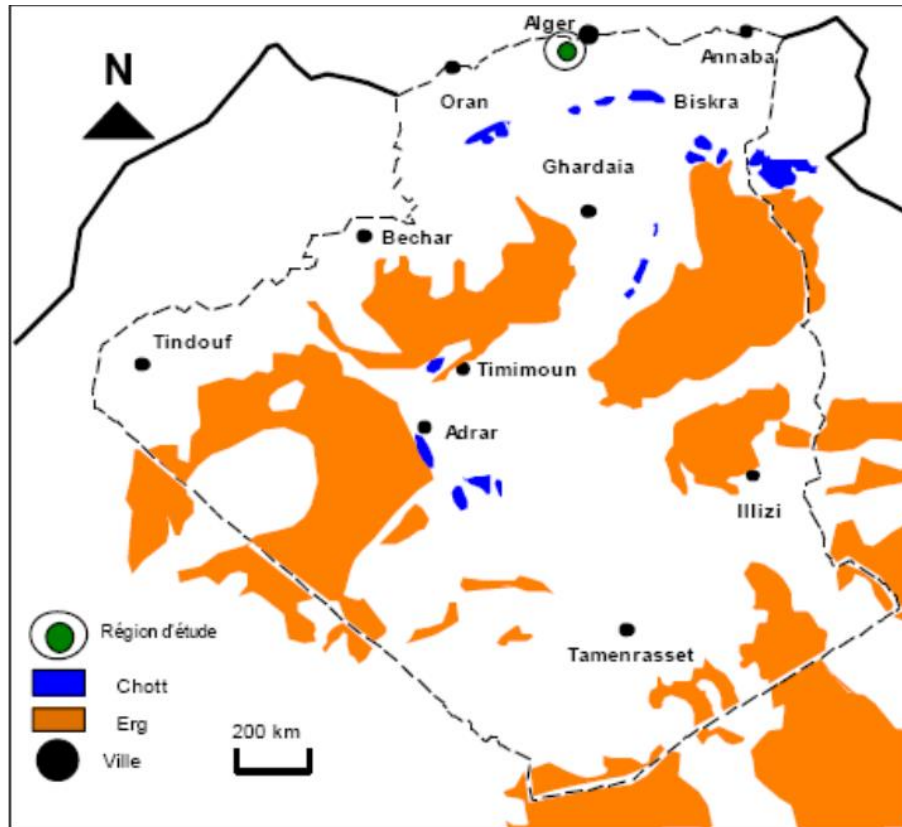
L'objectif principal de ce chapitre est d'accéder à une connaissance générale des principales caractéristiques du bassin versant de Oued El Hachem. Ce chapitre est consacré à la description géographique, réseaux hydrographiques, conditions climatiques et caractéristiques hydrauliques du bassin versant Oued El Hachem.

#### **2 Situation géographique**

Le bassin Côtier Cherchell est le sous bassin « 03 » dans le grand bassin Algérois, il est limité au Nord par la mer Méditerranée, à l'Est et au sud par le sous bassin hydrographique d'Oued Djer Bou-Roumi et le sous bassin Côtiers Tenes qui le borde à l'Ouest .

Notre bassin d'études est situé dans la wilaya de Tipaza (Tipasa) qui est issue du dernier découpage administratif. Son chef-lieu est une ville côtière située à 70 km à l'Ouest de la capitale Alger. La présence de la mer, des reliefs du Mont Chenoua et du sahel lui donne un paysage particulier d'un grand intérêt touristique. De nombreux vestiges puniques, romains, chrétiens et africains attestent la richesse de son histoire.





Carte 2 Localisation du barrage réservoir de Boukourdane (Remini, 2016)



Figure 12 : Digue en enrochement du barrage réservoir de Boukourdane (Photo. Remini, 2007)



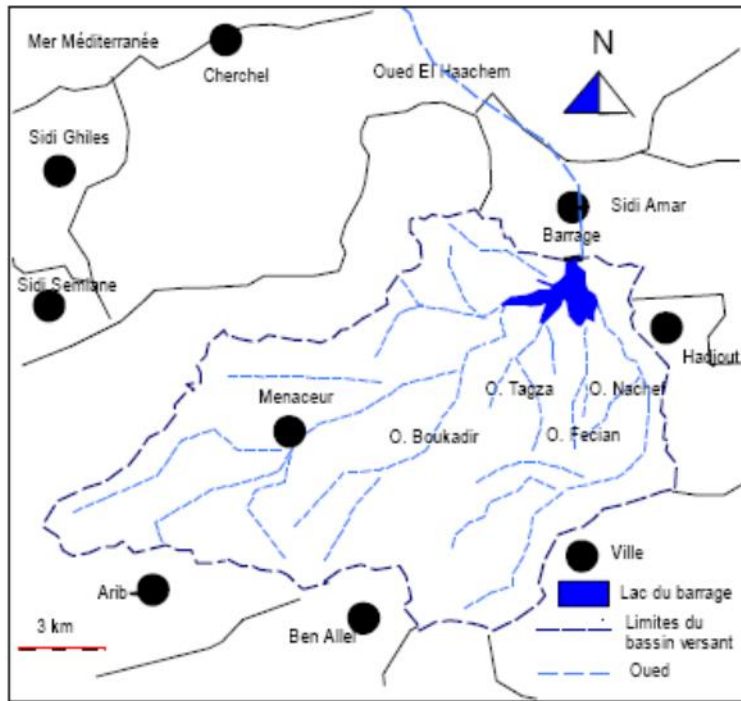
**Figure 13 : Vue générale du lac du barrage réservoir de Boukourdane (Photo. Remini, 2011)**

### **3 Le barrage**

Le barrage réservoir de Boukourdane a été réalisé à l'exutoire du bassin versant d'oued El Hachem d'une superficie de 243 km<sup>2</sup>. Il est alimenté par les oueds : Boukadir, Tegdza, Nachef et Fedjena pour former l'oued El Hachem. Selon Tadrict et al (2016), le bassin versant possède un taux d'érosion de 446 t/km<sup>2</sup>. an. Le bassin versant de Boukourdane appartient au bassin hydrographique Algérois-Soummam-Hodna et plus exactement le bassin Algérois (fig. 4 et 5). Contrairement aux autres bassins hydrographiques qui sont au nombre de 5, le taux d'envasement de l'Algérois -Soummam -Hodna enregistrent un faible taux de comblement qui avoisine la valeur de 9% de la capacité totale des barrages (fig. 6) (Remini et Hallouche, 2007). La durée de vie de ces ouvrages dépassera les 220 ans (Remini et Hallouche, 2007). Ce faible



taux de comblement est la conséquence d'une faible érosion des sols dû au boisement et à l'aménagement des bassins versants.



**Figure 14 : Les limites du bassin versant à l'amont du barrage de Boukourdane (schématisé à partir d'une carte de l'ANRH)**

#### **4 Géomorphologie et physiographie du milieu étudié**

En raison de l'importance des caractéristiques physiques du bassin versant vis-à-vis de l'hydrologie de surface, nous présentons les paramètres les plus importants.

#### **5 Coefficient de compacité**

Le contour d'un bassin versant en est sa première définition, ce contour a une certaine forme occupé une certaine superficie « A ». Cette forme va avoir une influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée. Un bassin allongé ne réagira pas de la même façon qu'un bassin de forme arrondie. La connaissance de cet indice permet de comparer le périmètre du bassin versant à celui d'un cercle ayant la même superficie.

## **6 Hydrographie**

La disposition du réseau hydrographique est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui ont affecté la région au cours des temps géologiques. Le chevelu hydrographique suit pratiquement les accidents importants qui ont affecté les formations carbonatées du Jurassique et se modifie avec l'évolution de la tectonique. Notre bassin d'étude est drainé par Oued El Hachem.

## **7 Les caractéristiques**

L'ensemble des caractéristiques physiographique et morphométriques du bassin versant sont présentés dans le tableau I.3.

L'ensemble des caractéristiques physiographique et morphométriques du bassin versant sont présentés dans le tableau I.3.

Désignation		Symbole	Unités	Valeur
Superficie		S	Km <sup>2</sup>	156
Périmètre		P	Km	58
Longueur du thalweg principal		L	Km	24
Indice de compacité		Kc	/	1.28
Coefficient d'allongement		Ca	/	3.69
Rectangle équivalent	longueur	L	Km	22.19
	largeur	L	Km	7.03
Altitude	max	Hmax	m	1417
	moyenne	Hmoy	m	420
	min	Hmin	m	78
Indice de pente de roche		Ip	%	2.88
Indice de pente globale		Ig	m/km	62.36
Indice de pente moyenne		Ipm	%	10.33
Densité de drainage		Dd	Km/Km <sup>2</sup>	4.7
Coefficient de torrentialité		Ct	/	70.9
Temps de concentration		Tc	h	6
Vitesse de ruissellement		Vr	Km/h	2.03

**Tableau 1 : Principales caractéristiques du bassin versant**

## **8 Climatologie**

La climatologie et l'étude hydrologique sont à associer. Il convient d'envisager l'intégration des paramètres, de la température, du vent, de l'humidité, du gel, etc., dans les simulations des phénomènes complexes de comportement des sols à l'infiltration, à la saturation et au ruissèlement, ainsi que l'évaluation du stock hydrique du sol, du pouvoir humidifiant et de l'évapotranspiration potentielle (Satin et al., 2006).

Notre bassin d'études est situé dans la zone Cs selon la classification des climats de Koppen (Hufty, 2001). Cette zone, définit le climat, comme étant de type méditerranéen avec un été chaud et aride, pluvieux et moins chaud le reste de l'année.

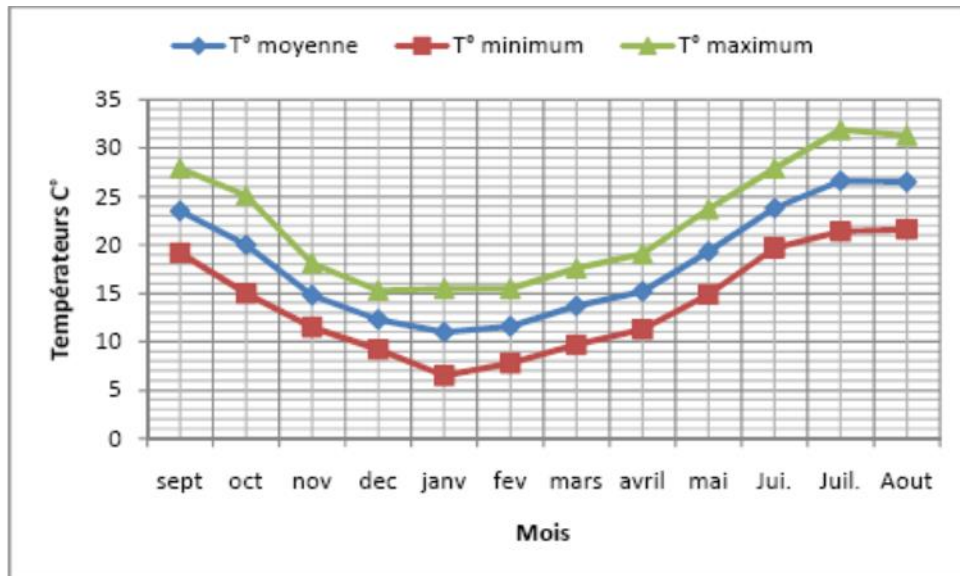
## 9 Température

La station météorologique du Barrage de Boukerdane situé sur Oued El Hachem, l'Oued principale de notre bassin d'étude (code station 020329) a une altitude de 110m a été prise comme référence. Les températures moyennes interannuelles enregistrées sur une période de 19 ans (1988-2007) sont données dans le tableau I.1

mois	sept	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	Juin.	Juil.	Aout
T moy	23.5	20	14.8	12.3	11	11.6	13.7	15.2	19.3	23.8	26.6	26.5
T min	19.2	15	11.5	9.2	6.5	7.8	9.7	11.3	14.9	19.7	21.4	21.6
T max	27.9	25.1	18.1	15.3	15.5	15.5	17.6	19.1	23.7	27.9	31.9	31.3
Amplitude	8.7	10.1	6.6	6.1	8.9	7.8	7.9	7.8	8.9	8.1	10.5	9.7

**Tableau 2 : Température moyenne interannuelles en °C (source ANRH)**

La température varie entre 33°C pour le mois le plus chaud de l'été (juillet, août), et à 5,7°C pour les mois les plus froids (décembre à février).



**Figure 15 : Variation mensuelle de la température**

## 10 Humidité relative

Concernent l'humidite relative, le mois le plus humide est le mois de janvier avec 72,8%. Alors que le mois le moins humide coïncide avec le mois de juin avec 60,2%.

### **11 Les vents**

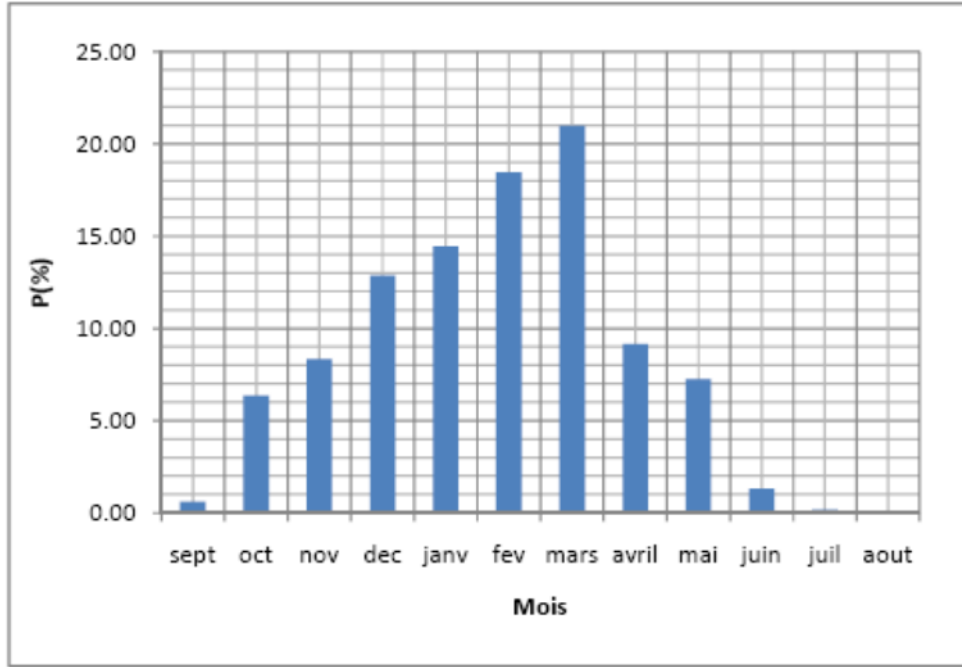
La zone est exposée aux vents marins salés. Sinon les vents dominants soufflent du Nord Est et d'Ouest ; la vitesse moyenne est de l'ordre de 2,5 à 3 m/s. les vents du Nord sont généralement froids se produisent durant la quasi-totalite de l'annee Quant aux vents du Sud « Sirocco », souvent chauds et secs qui soufflent en moyenne 13 jours par an (juillet, août).

### **12 La pluviométrie**

La pluviométrie moyenne annuelle du bassin étudié est de 533mm. Ce dernier reçoit plus de 98% de ses pluies entre septembre et mai. En automne et en hiver, le milieu reçoit une quantité égale de pluie. Néanmoins, la répartition saisonnière est assez irrégulière.

Mois	sept	oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	avril	mai	juin	juil.	Aout	annuel
p(mm)	2.1	21.97	28.76	44.41	49.83	63.68	72.4	31.55	25.04	4.56	0.6	0.17	533
p(%)	0.61	6.37	8.33	12.87	14.44	18.45	20.98	9.14	7.26	1.32	0.17	0.05	100

**Tableau 3 : Répartition mensuelle de la pluie annuelle**



**Figure 16 : Répartition mensuelle des précipitations**

### **13 Prévision hydrologique**

Avec les chroniques de pluie et les données hydrométriques dont nous disposons, nous sommes en mesure de caler un modèle pluie-débit. Les modèles ont pour avantage de simuler en continu le comportement hydrologique du bassin versant, c'est-à-dire la façon dont il transforme les pluies en débits. Ils prennent en compte le cas de crues composées et sont donc sensés fournir des résultats plus proches de la réalité que les méthodes précédentes. La simulation de longues périodes de débit entrant dans la retenue permet donc d'évaluer le comportement de la retenue et son efficacité dans des conditions très variées.

Les différents modèles utilisés en hydrologie ont pour objectif de fournir des valeurs de débit proches de la réalité. Le modèle ici présenté, PDM est un modèle global à réservoir. Le bassin versant est représenté par un ensemble de réservoirs et de liens décrivant le mouvement de l'eau par des outils mathématiques. La plupart des modèles sont adaptés au pas de temps journalier. Comme nous disposons de peu de données hydrométriques et que nous cherchons à simuler le fonctionnement de la retenue sur des évènements de durée variées de 07h à 72 heures, le modèle présenté a été adapté au pas de temps horaire.

## **CHAPITRE II : DESCRIPTION DU LOGICIEL HEC HMS ET MODELES UTILISES**

### **1 Historique :**

L'US Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (HEC) a été créé en 1964 pour institutionnaliser le savoir-faire technique, connu par la suite sous le nom d'ingénierie hydrologique. Les premiers logiciels étaient HEC-1 (hydrologie des bassins versants), HEC-2 (hydraulique fluviale), HEC-3 (analyse de réservoir pour la conservation), et HEC-4 (programme stochastique de génération de l'écoulement fluvial). Dix ans après sa création, le domaine technique de la planification d'analyse, l'application de méthodes analytiques à des activités de planification étroitement liés à l'ingénierie hydrologique, ont été ajoutés à la mission de HEC. En ce moment, le personnel permanent est passé d'environ à 30 ingénieurs et informaticiens.

Au fil des ans, HEC a élaboré et publié un certain nombre de documents techniques portant sur les méthodes de la gamme complète de l'ingénierie hydrologique et technologies d'analyse de planification. Le format et le contenu des formations techniques ont évolué très tôt et continuent d'être l'un des piliers du programme HEC. La famille de logiciels a augmenté à plus de vingt grands programmes qui sont pris en charge par une bibliothèque de programmes utilitaires, des ajouts récents, y compris le soutien SIG. HEC est probablement mieux connu pour ces niveaux national et international de programmes de génie hydrologiques de renom.

Ainsi, ils ont conçu le HEC-HMS (Hydrolic Modeling System) pour simuler les processus de précipitation-écoulement des systèmes dendritiques de ligne de partage. Il est conçu pour être applicable dans un éventail de secteurs géographiques pour résoudre une large gamme des problèmes. Ceci inclut le grand approvisionnement en eau de bassin de fleuve et l'hydrologie d'inondation au petit écoulement urbain ou normal de ligne de partage. Des hydrogrammes produits par le programme peuvent être employés directement ou utilisés sur d'autres logiciels pour des études de disponibilité de l'eau, de drainage urbain, de prévisions d'écoulement, de futur impact d'urbanisation, de conception de réservoir, de réduction de dommages d'inondation.

## **2 Utilité :**

Dans le cadre de cette étude, on a besoin de modéliser le comportement hydrologique de la rivière. Pour ce faire, notre choix s'est porté sur l'utilisation du logiciel HEC-HMS développé par les ingénieurs de l'armée américaine (USACE).

En effet ce logiciel, très utilisé à travers le monde, présente pour nous deux avantages majeurs:

- il est en libre accès de téléchargement sur le site même du laboratoire qui l'a développé (<http://www.hec.usace.army.mil>).
  
- il couvre une large gamme de problèmes permettant de réaliser aussi bien une étude globale à partir de données réduites qu'un travail fin basé sur des relevés plus complets.

L'utilisation de ce logiciel nécessite un certain nombre de connaissances en hydrologie afin de comprendre les différents modèles qui sont utilisés.

## **3 Principe général de fonctionnement du système de modélisation hydrologique sur le HEC-HMS :**

Afin de simuler le comportement hydrologique d'un bassin versant (BV), le logiciel HEC-HMS prend en compte les différents paramètres suivants:

- les précipitations: ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'évènements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des évènements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique.
  
- les pertes (par infiltration, retenue ou évapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du BV.



- les ruissellements directs qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge.
- l'hydrologie fluviale, c'est-à-dire le comportement de l'eau lorsqu'elle se trouve dans le lit de la rivière.

Ces différents paramètres sont ensuite modélisés mathématiquement par un ensemble d'équations qui permettent d'obtenir la réponse du système hydrogéologique global à un changement de conditions hydrométéorologiques.

Les différents modèles utilisés peuvent être classés selon le tableau suivant:

<b>CLASSIFICATION DES DIFFERENTS MODELES MATHÉMATIQUES</b>	
<b>CONTINU</b> La prédiction est réalisée sur de longues durées pouvant inclure des périodes sans précipitation	<b>DISCRET</b> L'assimilation se fait pour un évènement pluvieux donné et limité dans le temps
<b>MOYENNE</b> Les variations des caractéristiques géographiques sont moyennées ou même inconnues	<b>DISTRIBUÉ</b> Les variations des caractéristiques géographiques sont connues explicitement
<b>CONCEPTUEL</b> Le modèle est basé sur la connaissance des phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui agissent sur les entrées pour obtenir les sorties	<b>EMPIRIQUE</b> Le modèle est construit sur l'observation des entrées-sorties sans chercher à comprendre le phénomène de conversion
<b>DETERMINISTE</b> Les entrées, les paramètres et les procédés sont connus et non soumis à des variations aléatoires	<b>STOCHASTIQUE</b> Le système est soumis à des variations aléatoires
<b>PARAMETRES AJUSTÉS</b> Les paramètres ne peuvent pas être mesurés, ils sont alors déterminés à partir des entrées-sorties	<b>PARAMETRES MESURES</b> Les paramètres du système sont déterminés par mesure directe

**Tableau 4 : Classification des différents modèles Mathématiques**

En outre, un modèle est constitué des éléments suivants :

- Les variables d'état qui représentent l'état hydrologique du système dans les équations;
- Les paramètres qui sont des mesures numériques des propriétés du système réel (elles peuvent avoir une signification physique ou non)
- Les conditions aux limites
- Les conditions initiales.

#### **4 Modélisation des précipitations**

Parmi les paramètres fondamentaux à prendre en compte dans la modélisation hydrologique d'un bassin versant, on retrouve bien sûr les précipitations.

On peut fournir au logiciel trois types de données concernant les précipitations:

- des relevés pluviométriques d'un évènement réel;
- des hauteurs d'eau théoriques obtenues à partir d'une étude fréquentielle;
- des données relatives à un évènement extrême (pluie de projet).

#### **5 Calcul des volumes de ruissellements**

HEC-HMS calcule les volumes d'écoulements en soustrayant aux précipitations les quantités d'eau qui sont stockées, infiltrées ou évaporées lors de leur trajet sur le bassin versant.

Par ailleurs, les surfaces d'un bassin versant sont classées en 2 catégories:

- les surfaces directement connectées et imperméables où l'écoulement est direct et se fait sans pertes.
- les surfaces perméables soumises à des pertes décrites par les différents modèles suivants :

- modèle de perte initiale et à taux constant

- modèle à déficit et à taux de perte constant

- modèle basée sur le Curve Number (CN)

- modèle de Green et Ampt

Pour tous ces modèles les pertes sont calculées pour chaque intervalle de temps et soustraites à la moyenne surfacique de précipitations pour cet intervalle.

## **6 Description du model**

Dans cette rubrique, l'accent sera mis sur le modèle HEC-HMS dont nous allons se servir pour la modélisation et la simulation pluie débit du bassin versant Kodiet Rosfa. 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.

## **7 Les caractéristiques générales du modèle :**

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse gamme HEC (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS, ...). [1]

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. Le HEC-HMS a été largement employé et validé dans plusieurs bassins versants à climats contrastés à travers le monde, il a été utilisé lors du PNPI [1] pour la prévention contre les dégâts des inondations dans les zones potentielles à cet aléa, ainsi que par les bureaux d'études, sur les bassins de moyenne et grande taille, pour leurs études hydrologiques de détermination des quantiles de débit.

### **7.1 Le processus de fonctionnement :**

Comme nous venons de le mentionner ci-dessus, 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. En général, dans le cas d'une modélisation événementielle, c'est l'enchaînement schématisé sur la figure suivante qui est suivi à la lettre pour aboutir au débit de l'exutoire :

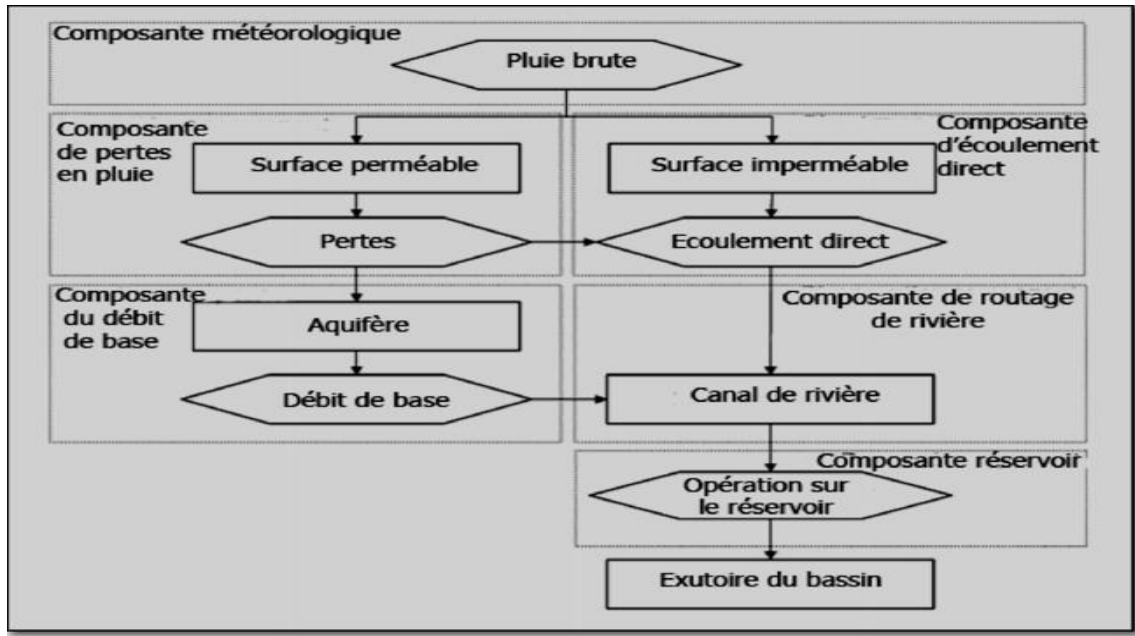


Figure 17 : L'enchaînement d'intervention des différentes composantes

## 7.2 Structure événementielle du modèle HEC-HMS :

Le module météorologique est la première composante à agir, elle vise à répartir sur la surface du bassin, de manière uniforme dans le temps et l'espace, la hauteur des précipitations brutes saisie. Ensuite, le devenir de ces précipitations diffère selon la perméabilité de la surface :

- Pour les surfaces perméables, les précipitations brutes vont subir des pertes suite à des phénomènes d'interception, d'infiltration et d'évapotranspiration, ces pertes seront calculées par la composante de perte en pluie régie par la fonction de production, les précipitations nettes qui en résultent contribuent à l'écoulement direct et à l'écoulement souterrain dans l'aquifère.

- Pour les surfaces imperméables, les précipitations sont exonérées de toute perte et rejoignent immédiatement la composante d'écoulement direct où elles se transformeront en écoulement de surface.

Après, l'écoulement de surface et l'écoulement de surface provenant de la composante du débit de base, intégreront tous les deux le canal de la rivière où se manifesteront les phénomènes d'atténuation et de translation contrôlés par la composante de routage.

Finalement, l'effet des constructions hydrauliques naturelles ou artificielles (réservoir, retenue de barrage, dépression, lac, ...) est déterminé par la composante du réservoir.

### **7.3 L'organisation du modèle :**

Pour faciliter la construction d'un modèle complet qui répond aux circonstances spécifiques de chaque étude de cas, il est strictement nécessaire que le modèle se compose d'au moins quatre modules et deux fonctions essentielles à la modélisation par HEC-HMS, deux autres modules de plus si on veut affiner nos résultats et nos analyses. Ces constituants sont classés, ci-après, par ordre de priorité de conception.

#### **7.3.1 Le module structural du bassin :**

Il 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. Dans ce qui suit, on cite ces éléments et leurs rôles dans la représentation de l'état du bassin versant :

- L'élément « Subbassin » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- L'élément « Reach » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- L'élément « Réservoir » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage,...etc. ses caractéristiques attribués permettent de définir les conditions stockage-déstockage.
- L'élément « Source » : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.

- L'élément « Jonction » : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments, comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.
- L'élément « Diversion » : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.
- L'élément « Sink » : simule l'exutoire des sous bassins versants.

### 7.3.2 Le module météorologique :

Il a comme objectif de répartir les précipitations saisies sur toute la surface étudiée.

Pour se faire, le HECHMS dispose de huit méthodes différentes, à choisir entre elles en fonction des objectifs et de la disponibilité des données, mais elles ont presque toutes la spécificité de distribuer la hauteur de pluie de manière homogène dans le temps et dans l'espace. Ces méthodes sont :

- « **Specified Hyetograph** » : hyétogramme spécifié, c'est l'utilisateur qui se charge de saisir son hyétogramme dont il dispose.
- « **Frequency Storm** » : averse de fréquence, utilisé pour développer un événement de précipitation où les hauteurs pour différentes durées dans l'averse ont une probabilité cohérente.
- « **Gages weights** » : stations pondérées, utilise un coefficient de pondération à chaque station de mesure de précipitations.
- « **Inverse distance** » : l'inverse de distance, calcule la moyenne de pluie par l'application de la méthode d'inverse carré des distances pour attribuer à chaque station un coefficient de pondération.
- « **Gridded precipitations** » : précipitations en maille, permet d'introduire les précipitations sous forme de grille de mesure.
- « **Standard Project Storm** » : averse de projet standard, répartie une hauteur de précipitations donnée sur un intervalle de temps spécifié.
- « **SCS Storm** » : averse SCS, applique à la hauteur de précipitations journalière une des distributions d'averse de projet définies par le SCS. Cette méthode sera exposée en détails dans le troisième chapitre. Le choix de telle ou telle méthode est imposé par l'objectif de la modélisation (détermination du débit de projet, étude de fonctionnement hydrologique du bassin

versant,...), la quantité (nombre de stations, période de mesure,...), la qualité (pluviomètres, pluviographes, lacune de mesure,...) des données de précipitations et le type de :

- Modélisation envisagé (distribuée, globale).
- En addition à tout ceci, le modèle possède la capacité d'intégrer l'évapotranspiration et la contribution de la fonte de neige en cas de modélisation continue.

### 7.3.3 *.Le module de la fonction de production :*

La fonction de production assure la transformation de la pluie brute en pluie nette en y retranchant toutes les pertes éventuelles causées par l'interception (obstacles, végétation, cuvettes ...) l'infiltration et l'évapotranspiration (en cas de modélisation continue).

La fonction de production du modèle HEC-HMS distinguent entre une surface perméable et imperméable. La première est considérée comme le champ d'intervention de la fonction, afin de ne pas surestimer les pluies qui participent réellement dans le ruissellement appelées pluies nettes. La deuxième quant à elle, est supposée non affectée par les pertes en pluie surtout si elle est connectée au réseau hydrographique, elle est reconnue dans le modèle par le pourcentage d'imperméable du bassin. Il existe six formalismes pour représenter cette fonction à savoir :

- « **Initial and Constant Loss** » : pertes initiales, à taux constant. Ce formalisme considère un taux maximum de pertes constant, et une perte initiale à saturer avant que le ruissellement commence.
- « **Deficit and Constant Loss** » : à déficit et à taux de perte constant. Une variante du premier formalisme avec une possibilité de régénération des pertes initiales durant une période sans pluie au cours de l'événement modélisé .
- « **Green and Ampt Loss** » : formalisme qui s'intéresse plutôt aux pertes par infiltration, cette méthode repose sur l'équation de Darcy et la conservation de masse.



- « **Soil Moisture Accounting Loss** » : formalisme très poussé qui calcule les «pertes» par évapotranspiration, infiltration et percolation profonde selon le principe de couche de stocka• «SCS Curve Number Loss » : formalisme qui relie les pertes en pluie à l'occupation du sol et le type de sol et l'humidité antécédente. Cette méthode sera détaillée davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- « **Gridded SCS Curve Number Loss** » : format maillé du formalisme précédent. La sélection de l'un de ces formalismes est une étape délicate qui va influencer sans doute les sorties du modèle. Une toute première contrainte est que le choix peut être dicté par les formalismes utilisés pour les autres modules (module météorologique, fonction de transfert, ...), la deuxième étant la nature de données disponibles (sous forme de maille, détaillées, plusieurs variables,...).

#### 7.3.4 Le module de la fonction de transfert :

Une fois la pluie participante au ruissellement calculée, c'est le rôle de la fonction de transfert qui débute. Elle permet de déterminer l'hydrogramme résultant de la pluie nette. Le modèle offre six formalismes pour y converger :

- ◆ « **User-Specified Unit Hydrograph** » : Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur. Ce formalisme consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de données complètes d'un événement pluvieux [24].
- ◆ « **Snyder Unit Hydrograph** » : Hydrogramme unitaire de Snyder.
- ◆ « **Kinematic Wave** » : onde cinétique. Reconnait les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à la pluie nette.
- ◆ « **SCS Unit Hydrograph** » : Hydrogramme unitaire de la SCS. Résultant de la combinaison des hydrogrammes de plusieurs bassins versants. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- ◆ « **Clark Unit Hydrograph** » : Hydrogramme unitaire de Clark. Prend en compte les deux phénomènes de translation et d'atténuation. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.
- ◆ « **ModClark** » : forme maillée du dernier formalisme.

L'USACE fournit quelques recommandations pour faciliter le choix du

formalisme le mieux adapté [29] :

- Disponibilité de données pour la calibration des paramètres ou l'estimation de leurs valeurs : connaissant que la source optimale des paramètres de ces formalismes est la calibration, la possibilité d'exécuter cette opération s'avère fructueux pour le hydrogramme unitaire. Cependant, si cette possibilité n'est valide, la méthode de l'onde cinétique semble être la plus appropriée mais à condition d'avoir les données mesurées et observées nécessaires.

- La validation des hypothèses du formalisme sélectionné : vérifié que les hypothèses fixées pour la méthode ne sont pas violées, sinon le risque d'aboutir à des résultats aberrants est potentiellement présent.

### 7.3.5 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. 3 formalismes sont proposés par le modèle :

- « **Constant Monthly** » : 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 Reservoir** » : Réservoir linéaire. Il simule le stocke souterrain à un réservoir, ainsi il est toujours associé à la fonction de production type SMA.

- « **Recession** » : utilise une récession exponentielle du débit de base. Elle est utilisée pour le bassin ou les volumes de crue sont influencés par les événements pluvieux [31]. Ce formalisme sera détaillé davantage dans la section de la combinaison modulaire choisie.

### 7.3.6 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 [29].

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

### 7.3.7 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 est l'erreur sur la racine moyenne des carrés de débit. Cette méthode donne plus de poids aux débits en 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.

### 7.3.8 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 uni-varié, 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. Chacune a les paramètres suivants :

- **La tolérance** : détermine la valeur de changement de la fonction objective en dessous de laquelle l'optimisation des paramètres s'arrête.

- **Maximum d'itérations** : détermine le nombre maximal de jeux de paramètres à essayer avant d'arrêter l'optimisation.

La fonction d'optimisation s'arrête une fois l'une de ces conditions est remplie :

- La valeur de la fonction objective est nulle ;
- Le nombre d'itérations est atteint et ceci quel que soit la valeur de la fonction objective ;
- La valeur de variation de la fonction objective est en inférieure à la tolérance.

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.

## **8 La structure du modèle HEC-HMS choisie :**

Dans cette section, nous allons évoquer précisément la combinaison modulaire choisie pour modéliser le bassin versant de Boukerdane, en expliquant ses concepts de base, en citant ses variables et ses paramètres et la façon dont nous allons les estimer et en listant ses avantages et ses limites, sans oublier la justification du choix à la fois du modèle et de la combinaison modulaire.

### **8.1 Modèle du ruissellement direct :**

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

### **8.2 La méthode de perte : SCS Curve Number (CN) :**

Cette fonction de production apparue en 1950 et surnommée autrefois la SCS CN est le fruit de plus de deux décennies d'analyses des relations pluies-débits sur des petits bassins.

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

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a+S)} \dots \dots \dots (1)$$

Où,

**Pe** : L'excès de précipitation ;

**P** : Total des précipitations accumulées au temps t ;

**Ia** : Les pertes initiales ;

**S** : est le potentiel maximum de rétention.

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

$$I_a = 0.2S \dots\dots\dots(2)$$

Le cumul de l'excès de precipitation est donnée par :

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \dots\dots\dots(3)$$

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

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

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

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

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

Où,

**j** : L'indice associé à la subdivision du bassin de type de sol uniforme ;

**a<sub>ij</sub>** : l'aire de la subdivision j dans le sous-bassin i ;

**A<sub>i</sub>**: l'aire du sous-bassin i.

### 8.3 Les variables :

- ✓ La carte d'occupation du sol : cette donnée sert en combinaison avec la carte des sols à

déterminer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol. Elle doit être conforme à la classification NRCS qui définit les classes d'occupation du sol en quatre grands groupes : les zones urbaines, les terres agricoles, les terres agricoles cultivées et les zones arides et semi-arides. Cette classification renferme la majorité des classes susceptibles d'être présentes sur le terrain avec une précision décisive.

- ✓ La carte de sols : elle aide à estimer la valeur de CN normal pour chaque composé hydrologique de sol.
  
- ✓ **Le pourcentage d'imperméable** : il désigne la portion de la surface du bassin considérée comme étanche et directement connectée au réseau de drainage. Ce pourcentage est déduit lors de l'élaboration de la carte d'occupation du sol.

#### 8.4 Les paramètres

- 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 normal, qui va être utilisée directement dans les équations citées, ou après l'avoir convertie selon la hauteur de pluie tombée pendant les cinq jours avant l'événement.

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

$$CN_{composite} = \frac{\sum AI CN_i}{\sum CN} \dots\dots\dots(7)$$

D'où :

- CN composite** : le CN utilisé pour l'ensemble du bassin par la fonction de production ;
- CN i** : le CN d'un composé hydrologique du sol (classe d'occupation du sol +classe de sol) ;
- A i** : surface de drainage du composé hydrologique du sol.

-  $I_a$  : abstraction initiale mesurée en mm, elle correspond aux pertes initiales provenant durant la première phase de l'événement pluvieux, dû aux interceptions, au stockage naturel dans les dépressions,...etc.

L'écoulement ne débute qu'une fois la pluie brute dépasse la valeur de  $I_a$ . On estime sa valeur le plus souvent par calibration, cependant il existe des tableaux qui donnent des ordres de grandeur de ce paramètre :

CN normale	$I_a$ (mm)	Nature
75	9	Bois
80	8	Broussaille
85	5	Vergers
85	8	Labour ou nu
89	3	Urbain

**Tableau 5 : Les valeurs usuelles de l'abstraction initiale  $I_a$  et du coefficient CN (D'après SAGE INGENIERIE)**

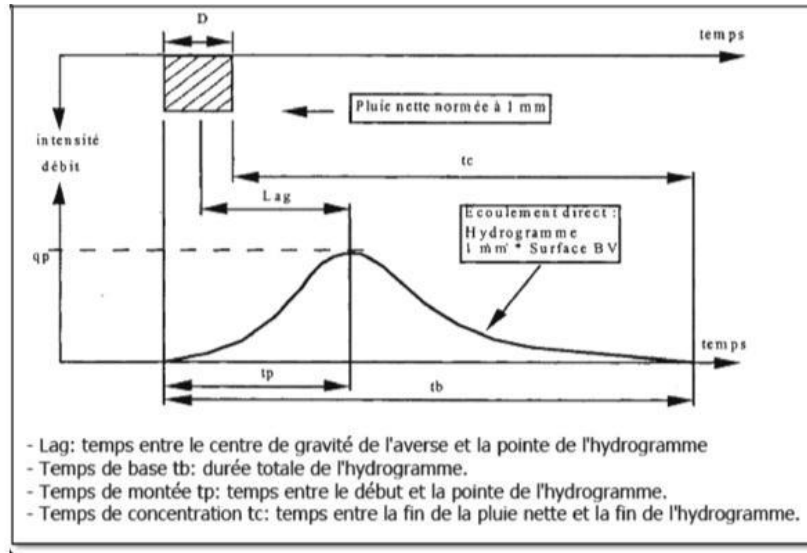
Il reste à signaler que les valeurs de ces deux paramètres peuvent être calibrées par le modèle HEC-HMS.

*La fonction de transfert : hydrogramme unitaire*

Comme définit par Sherman en 1932, l'hydrogramme unitaire est l'hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette, uniforme et constante, d'une durée de référence (D), suffisamment longue pour générer un écoulement sur l'ensemble du bassin. De cet hydrogramme unitaire on peut facilement ressortir l'hydrogramme provoquée par n'importe quelle hauteur de pluie nette, en se référant à sa règle fondamentale :

La relation pluie nette et ruissellement est linéaire. La figure ci-dessous illustre la notion de l'hydrogramme unitaire est ses paramètres clé





**Figure 18 : La notion d'hydrogramme unitaire et ses caractéristique fondamentale (internet)**

Lors de l'utilisation de l'hydrogramme unitaire comme fonction de transfert, il faut valider ses hypothèses qui lui sont associées sur le bassin versant d'étude, ou au moins de les prendre en considération lors de l'analyse des résultats. Ces hypothèses sont :

- La pluie nette est uniforme sur le bassin et constante dans le temps ;
- Les caractéristiques de l'hydrogramme unitaire sont invariantes dans le temps : la durée de l'hydrogramme de ruissellement direct (temps de base  $t_b$ ) est constante et indépendante de l'intensité de la pluie ;
- La réponse du bassin aux pluies est linéaire : pour une même durée de référence  $D$ , les ordonnées de l'hydrogramme unitaire sont proportionnelles au volume de la pluie nette ;
- L'hydrogramme unitaire reflète l'ensemble des caractéristiques physiques du bassin versant.

### 8.5 Concept de base l'hydrogramme unitaire de la NRCS :

Ce hydrogramme développé par le NRCS découle d'un grand nombre de petits bassins sur tous les États-Unis [30]. Il exprime le débit  $U_t$  comme proportionnel au débit de pointe  $U_p$ , pour

chaque temps  $t$ , fraction du temps de pointe  $TP$ .

$$U_p = c \frac{A}{T_p} \dots \dots \dots (8)$$

Avec,  $A$  : surface du bassin versant ;

$C$  : constante de conversion (2.08 pour le système international).

Le temps de pointe  $TP$  est relié à la durée de la pluie nette par la formule :

$$T_p = T_{lag} \frac{\Delta t}{2} \dots \dots \dots (9)$$

Où :  $\Delta t$  : la durée de la pluie nette (c'est le pas de temps de simulation) ;

$T_{Lag}$  : le Lag du bassin (différence entre le pic de la pluie nette et le pic de l'hydrogramme).

$$T_{Lag} = 0.6 T_c \dots \dots \dots (10)$$

Une fois le  $T_{Lag}$  calculé, le modèle calcule successivement le temps et le débit de pointe de l'hydrogramme, qui vont permettre de concevoir l'hydrogramme de simulation en reposant sur le principe de linéarité de la réponse.

Le temps de concentration de chaque soubassin est calculé par la formule de Giandotti (1934) comme suit :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - \sqrt{H_{min}}}} \dots \dots \dots (11)$$

Avec :

$T_c$  : Temps de concentration (h)

$A$  : surface du soubassin (km<sup>2</sup>)

$L$  : Longueur du cours d'eau principal (km)

$H_{med}$  : Altitude moyenne du cours d'eau principal (m)

$H_{min}$  : Altitude minimale du cours d'eau principal (m)

### 8.6 Le débit de base :

Le débit de base est l'écoulement observé dans le bassin versant avant la simulation de l'évènement hydrologique. Dans notre cas ce débit est considéré nul puisque le seul écoulement est dû aux précipitations.

### 8.7 Modèle de l'écoulement en canal :

L'écoulement en canal est régi par les équations fondamentales de Barré Saint Venant en monodimensionnel à savoir l'équation de continuité et l'équation de la conservation de la quantité (5) de mouvement (6) :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \dots \dots \dots (12)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \dots \dots \dots (13)$$

Avec :

A : surface mouillée

$q_L$  : écoulement laterale

$S_f$  : pente d'énergie

$S_0$  : pente du fond du canal

V : Vitesse

y : tirant d'eau

x : distance

t : temps.

g : accélération de la pesanteur.

Le modele de Muskingum- Cunge est basé sur la forme diffusive de l'équation de la conservation de la quantité de mouvement donnée par :

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \dots \dots \dots (14)$$

En combinant cette equation avec l'équation de continuité on aura le modèle de Muskingum- Cunge qui utilise la méthode des approximations en différences finies pour calculer le débit sortant.

$$Q_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_L \Delta x) \dots\dots\dots(15)$$

Avec :

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \dots\dots\dots(16)$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \dots\dots\dots(17)$$

$$C_3 = \frac{2(1-X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \dots\dots\dots(18)$$

$$C_4 = \frac{2\left(\frac{\Delta t}{K}\right)}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \dots\dots\dots(19)$$

$$K = \frac{\Delta x}{c} \dots\dots\dots(20)$$

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BS_0 c \Delta x} \right) \dots\dots\dots(21)$$

Où :

C1,C2, C3,C4 : Parametres

$\Delta x$ : incrément de l'espace

C : célérité de l'onde

Q : Débit

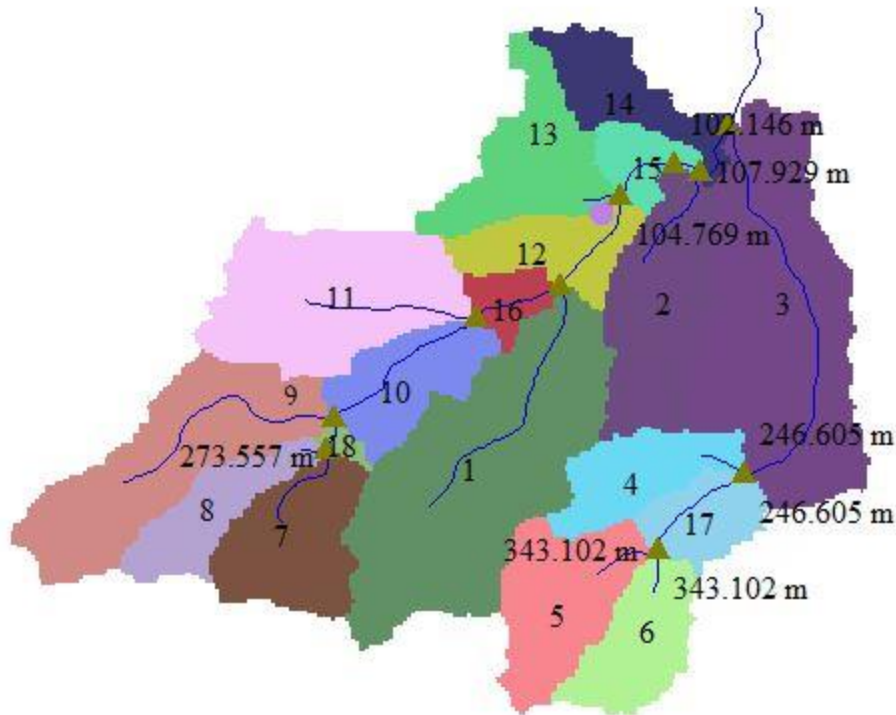
$S_0$  : pente du fond du canal

## **CHAPITRE III : ETUDE HYDROLOGIQUE**

### **1 Introduction**

L'hydrologie est une science de la terre qui étudie le cycle de l'eau ou les échanges d'eau entre l'atmosphère, la surface de la terre et le sous-sol terrestre. L'hydrologie est impliquée dans les précipitations (pluie et neige), la transpiration des plantes et l'évaporation directe de la couche terrestre de surface lorsqu'il s'agit d'échanges entre l'atmosphère et la surface de la terre. Etude de l'hydrologie de surface

Le calcul hydrologique reste la partie la plus délicate de toute étude de protection contre les inondations car c'est de sa fiabilité que dépend le modèle hydrodynamique, et donc toute surestimation ou sous-estimation lors de cette phase se répercutera sur le reste de l'enchaînement à savoir tous les aménagements projetés . L'étude vise, principalement, à estimer les débits de pointe ( $Q_p$ ), pour différentes périodes de retour, au niveau d'un bassin versant.



**Figure 19 : Bassin versant de Oued El Hachem**

## 2 Caractéristiques morphologiques du bassin versant

### 2.1 La surface :

Est la surface topographique, qui permet de contrôler l'intensité de nombreux événements hydrologiques (apports, volumes de précipitations ou d'infiltration, etc.). On estime que le bassin à l'étude couvre la zone suivante :

**Tableau 6 : La surface des sous bassins**

<i>N°DE Sous Bassin</i>	<i>SURFACE (km2)</i>
1	24,360
2	10,580
3	23,560
4	5,750
5	8.7
6	6.26
7	8.31
8	5,310
9	14,380
10	6,430
11	14,440
12	5,32
13	8,26
14	5,77
15	2.79
16	2.23
17	4.23
18	0.63

S (totale)= 157.31 Km<sup>2</sup>

**2.2 Le périmètre :**

Le périmètre est égal à la limite extérieure de banni. Chaque aversion est unique à la quantité de précipitations qu'elle reçoit. L'estime et le périmètre Tableau N°2 : tu es les périmètre de banians versant.

**Tableau 7 : Le périmètre des sous bassin vasant**

<b><i>N°SB</i></b>	<b><i>P</i></b>
1	30.880
2	20.330
3	30.570
4	15.140
5	17.270
6	14.680
7	15.900
8	16.210
9	25.240
10	15.440
11	20.800
12	15.75
13	20.03
14	18.66
15	9.79
16	8.259
17	11.472
18	5.047



$$P \text{ (totale)} = 311.468 \text{ Km}$$

### 2.3 Indice de compacité de Gravelius :

L'indice de forme  $K_G$ , appelé indice de compacité de Gravelius, est un paramètre indicateur de la forme du bassin versant, il enseigne aussi sur la vitesse de concentration des débits, la puissance des crues et l'importance de l'activité de l'érosion du sol .

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi} \cdot S} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Avec :

P : périmètre du bassin versant (km) ; S: surface du bassin versant(km<sup>2</sup>).

S: surface du bassin versant(km<sup>2</sup>).

**Tableau 8 : Indice de Gravelius des sous bassins versants**

<i>BV</i>	<i>KG</i>
1	1.751849
2	1.750059
3	1.763461
4	1.767869
5	1.639328
6	1.642322
7	1.544382
8	1.969671
9	1.863665
10	1.704904
11	1.532632
12	1.871941

13	1.951412
14	2.175113
15	1.641114
16	1.548578
17	1.561806
18	1.780414

Dans les cinq bassins versants  $K_G > 1$  donc se sont des bassins allongés .

**2.4 Rectangle équivalent :**

On suppose que l'écoulement sur un bassin versant donnée est le même que sur un rectangle de même superficie, ayant le même indice de Gravelius, la même répartition hypsométrique, la même distribution des sols et de la végétation et la même densité de drainage. Le rectangle équivalent est caractérisé par la longueur « Leq » et la largeur « l » définies respectivement par les formules suivantes :

$$L_{eq} = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1.128} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1.128} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right)$$

**Tableau 9 : La longueur équivalente et la longueur de rectangle équivalent**

<b><i>N°SB</i></b>	<b><i>L<sub>eq</sub></i></b> (Km)	<b><i>L</i></b> (Km)
1	13.53	1.79
2	8.90	1.18
3	13.42	1.75
4	6.56	0.86
5	7.40	1.17
6	6.29	0.99
7	6.64	1.25
8	7.32	0.72
9	11.27	1.27

10	6.71	0.95
11	8.66	1.66
12	7.07	0.75
13	9.09	0.91
14	8.59	0.67
15	13.53	1.79
16	8.90	1.18
17	13.42	1.75
18	6.56	0.86

## 2.5 Le temps de concentration Tc :

Le temps de concentration est utilisé pour les calculs de prédiction des débits résultant d'évènements pluvieux basés sur des statistiques dérivées des périodes de retour. En effet, il est important pour les ingénieurs et les hydrologues d'être en mesure de prédire la réponse d'un bassin versant à une pluie. Notamment pour le dimensionnement des infrastructures (conception de ponts, ponceaux, etc.) et de gestion des inondations par exemple.

Th : temps d'humectation temps d'humectations : est le temps nécessaire a l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle

Tr : temps de ruissellement :est le temps correspondant à la durée d'écoulement de l'eau à la surface

Ta : le temps d'acheminement :est le temps mis par l'eau pour se déplacer jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration est égal au maximum de :

$$Tc = [\sum (Th + Tr + Ta)]$$

Théoriquement, Tc est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement, il peut être mesuré sur le terrain ou estimer à l'aide de formules souvent empiriques établies par plusieurs auteurs.

**Tableau 10 : Le temps de concentration pour les différents auteurs**

N °SB	GIANDOTTI	CALLIFORNIA
1	2.79	0.81
2	5.24	0.72
3	4.94	1.85
4	4.24	0.77
5	2.46	0.25
6	1.87	0.14
7	1.73	0.29
8	2.36	0.10
9	2.64	0.84
10	2.82	0.79
11	3.78	0.77
12	4.05	0.71
13	5.27	0.23
14	2.72	0.61
15	1.32	0.32
16	2.72	0.54
17	2.20	0.50
18	1.14	0.16

*GIANDOTTI*

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}}$$

*CALIFORNIA*

$$T_c = \left( \frac{0.87 \cdot L^3}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \right)^{0.386}$$

*KIRPICH*

$$T_c = 0,6615 \cdot L_p^{0,77} \cdot i_{moy}^{0,385}$$

*VENTURA*

$$T_c = 1,1272 \sqrt{\frac{A}{i_{moy}}}$$

Avec :

- ✓ A : Surface du bassin versant en [Km<sup>2</sup>] ;
- ✓ L : longueur du talweg principale en [Km];
- ✓ H<sub>moy</sub>, H<sub>min</sub> : respectivement la hauteur moyenne et minimale du B.V en [m].
- ✓ L<sub>P</sub> : Longueur du cours d'eau principal (km) ;
- ✓ i<sub>moy</sub> : Pente moyenne du bassin versant.

On utilise la formule de Giandotti puisque elle tient compte de plusieurs paramètres donc elle est la plus fiable :

**Tableau 11 : Temps de concentration**

N° SB	Tc
1	2.79
2	5.24
3	4.94
4	4.24
5	2.46
6	1.87
7	1.73
8	2.36
9	2.64

10	2.82
11	3.78
12	4.05
13	5.27
14	2.72
15	1.32
16	2.72
17	2.20
18	1.14

### 2.6 Vitesse moyenne de ruissellement

Elle est donnée par la formule suivante :

$$V_R = \frac{L}{T_c}$$

**L** : Longueur de talweg principal en [Km];

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

**Tableau 12 : Vitesse moyenne de ruissellement**

N°SB	Vitesse moyenne de ruissellement
1	0.458279
2	2.097678
3	0.534516
4	1.602419
5	1.654338
6	2.008356
7	0.767865

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

8	4.130496
9	0.463972
10	0.706767
11	0.984375
12	1.62
13	6.805444
14	0.906667
15	0.598911
16	1.353234
17	0.832702
18	1.480519

**Tableau 13 : Récapitulatif des bassins versants**

N °SB	S (km <sup>2</sup> )	P (km)	L (km)
1	24.360	30.880	6.088
2	10.580	20.330	2.498
3	23.560	30.570	9.242
4	5.750	15.140	2.646
5	8.701	17.270	1.487
6	6.264	14.680	0.93111
7	8.310	15.900	2.253
8	5.310	16.210	0.57136
9	14.380	25.240	5.69
10	6.430	15.440	3.99
11	14.440	20.800	3.84
12	5.55	15.75	2.5
13	8.26	20.03	0.77438
14	5.77	18.66	3
15	2.79	9.79	2.204
16	2.23	8.259	2.01
17	4.23	11.472	2.642

18	0.63	5.047	0.77
----	------	-------	------

### 3 Analyse des données pluviométriques

**Tableau 14 : Station pluviométrique**

Code	Nom	Coordonnée			année	N	Pluie moyenne annuelle
		X	Y	Z			
020329	BOUKOURDENE BGE	X=464.3 Y=359.9 Z=110			1987-2019	33	5

#### 3.1 L'étude des Pluies maximales journalières :

**Tableau 15 : Série des pluies journalières maximales (1987-2019)**

Années	pjmax
1987	31.3
1988	58.5
1989	52.5
1990	41
1991	74.9
1992	71.1
1993	46.4
1994	61
1995	92.5
1996	49.7
1997	50.6
1998	82.7
1999	56.5
2000	57.5



Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

2001	107.9
2002	45.7
2003	45.5
2004	53.5
2005	88.2
2006	41.6
2007	49
2008	35.5
2009	53
2010	46.5
2011	83.8
2012	127.2
2013	39
2014	49
2015	69.2
2016	83
2017	79.5
2018	65.5
2019	42.5

Dans notre étude on suit les étapes suivantes :

Classer la série des précipitations par ordre croissant.

Calcul de la fréquence expérimentale.

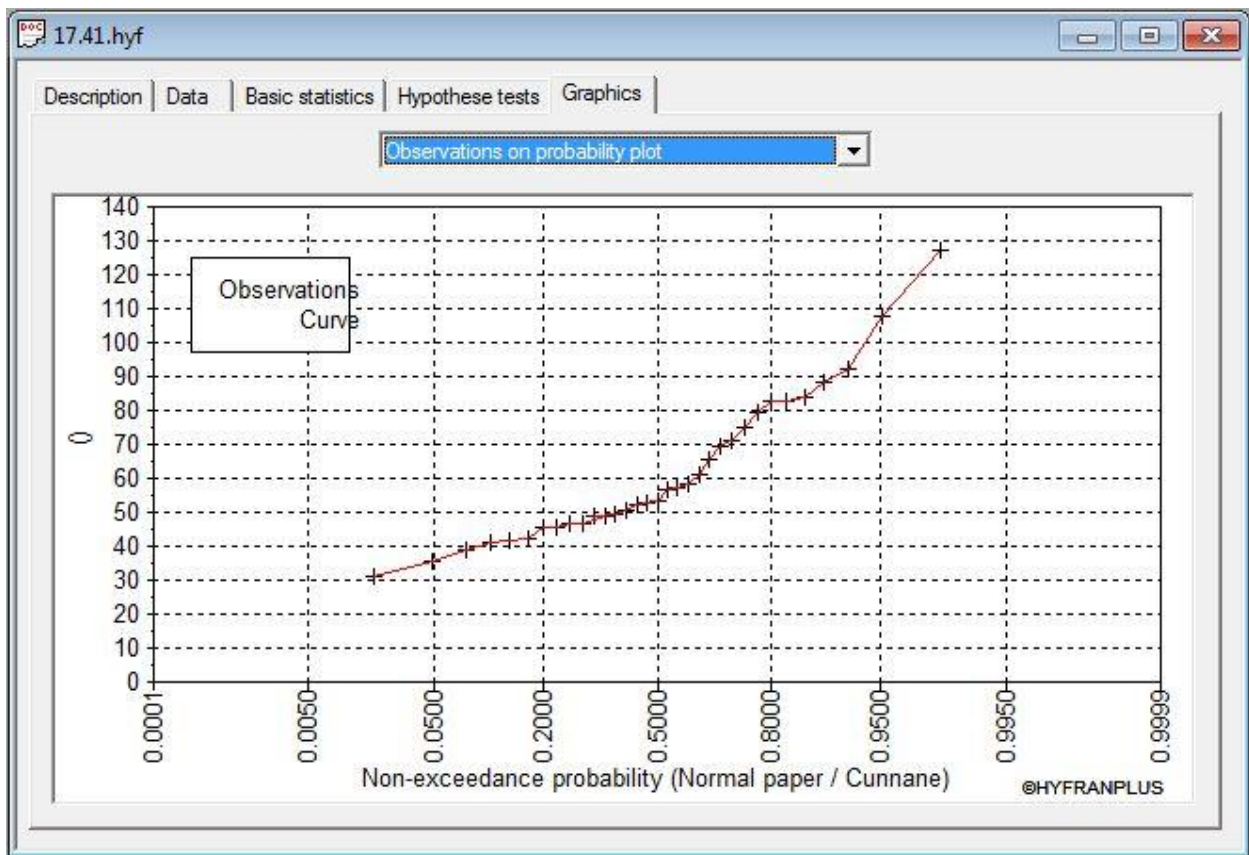
Calcul des caractéristiques empiriques de la série de données.

Ajuster graphiquement la loi choisie.

Calculer le quantile et son intervalle de confiance.

**Tableau 16 : Caractéristiques de la série de donnée**

Caractéristique	34
Année d'observation	31.3
Minimum	127
Maximum	61.6
Ecart-type	21.9
Médiane	53.5
Coefficient de variation (cv)	0.355
Coefficient de d'asymétrie (Cs)	1.17
Coefficient d'aplatissement (CK)	3.69



**Figure 20 : Courbe d'observation**

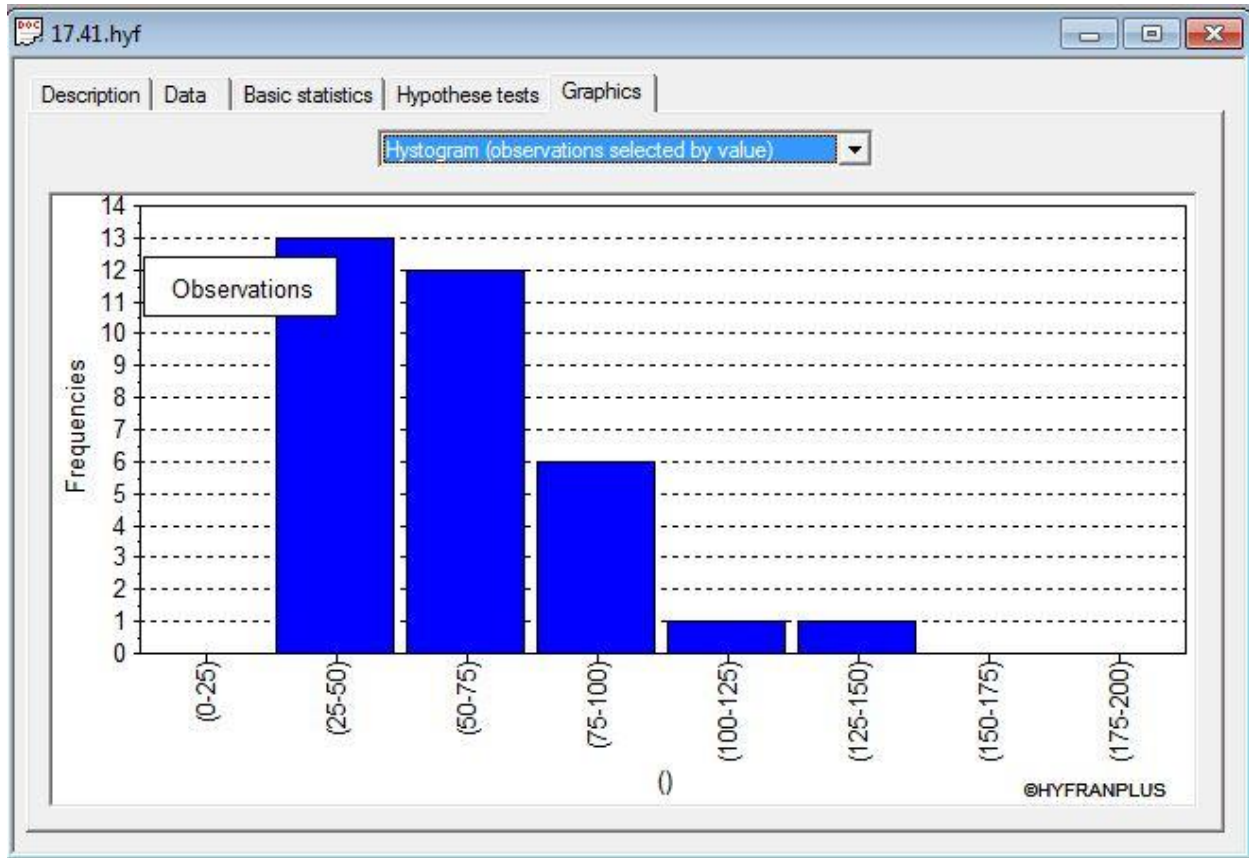


Figure 21 : Histogramme des l'observation

On remarque dans les figures 2 et 3 que les plus grandes fréquences se sont entre 25 -50 mm

### 3.2 Ajustement des pluies maximales journalières

#### 3.2.1 Choix la loi d'ajustement :

Les critères de sélection d'une législation sont d'abord liés à un ajustement graphique, puis à un test de dispersion. La loi peut être acceptée ou rejetée en fonction de l'apparition des points sur le papier de probabilité. En utilisant le programme HYFRAN, nous appliquons la loi de GALTON (loi Log normale) et la loi de GUMBEL (Double exponentielle) dans notre recherche. Les caractéristiques des échantillons, ainsi que les appréciations de l'adéquation des deux lois ainsi que l'homogénéité sont calculés directement à partir du logiciel .

##### *a. Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Galton*

Le procédé d'ajustement est établi avec une représentation sur du papier log normale. La loi de GALTON a une fonction de répartition qui s'exprime selon la fonction suivante :

$$F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} du$$

Ou :

$$u = \frac{\text{Ln } X_i - \text{Ln } \bar{X}}{\delta \text{ Ln } X} \quad (\text{variable réduite de gaussie})$$

$$\delta \text{ Ln } X$$

- $\bar{X}$ : La moyenne de l'échantillon
- $\delta_i$  : L'écart-type de l'échantillon
- L'équation de la droite de GALTON est la suivante :

$$\text{Ln } X (p\%) = \text{Ln } (\bar{X}) + \delta \cdot \text{Ln } u (p\%)$$

$$\text{Ln } X = \sum_{i=1}^n \text{Ln } \bar{X}_i / N$$

Avant de procéder à l'ajustement il faut suivre les étapes suivantes :

Classer les valeurs des précipitations par ordre croissant avec attribution d'un rang

1.2.3.4.5.....n.

Calculer pour chaque valeur de précipitation la fréquence expérimentale par la formule de HAZEN :

$$f(x) = \frac{m - 0.5}{n}$$

Avec :

m : Rang de précipitation.

n : Nombre d'observations (33).

✓ Calculer la variable réduite de GALTON donnée par la formule suivante :

$$u = \frac{\text{Ln } X_i - \text{Ln } \bar{X}}{\delta \text{ Ln } X}$$

➤ GALTON (log-Normale) (Maximum des vrais semblances) :

Nombre d'observation :  $n = 33$

❖ Paramètre :

$\mu = 4.06503$ ,  $\sigma = 0.33001$

❖ Quantile :  $q = F(X)$  (probabilité au non dépassement)

$T = 1 / (1 - q)$ .

Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de GALTON sont représentées dans le tableau suivant

**Tableau 17 : Résultats d'ajustement à la loi GALTON**

<i>Période de retour</i>	<i>Fréquence au non dépassement</i>	<i>Valeurs théoriques</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Intervalle de confiance</i>
<i>T (ans)</i>	<i>Q</i>	<i>XT (mm)</i>	$\Delta$	<i>(95%)</i>
10000.0	0.9999	199	32.6	135 - 263
2000.0	0.9995	173	25.4	123 - 222
1000.0	0.9990	162	22.6	117 - 206
200.0	0.9950	136	16.5	104 - 169
100.0	0.9900	126	14.0	98.0 - 153
50.0	0.9800	115	11.7	91.7 - 138
20.0	0.9500	100	8.92	82.8 - 118
10.0	0.9000	88.9	6.94	75.3 - 103
5.0	0.8000	76.9	5.16	66.8 - 87.0

Test d'homogénéité : Test d'adéquation du Khi carré

Hypothèses :

H0 : l'échantillon provient d'une loi -log normale .

H1 : l'échantillon ne provient pas d'une loi-log normale .

Résultats :

Résultat de la statistique :

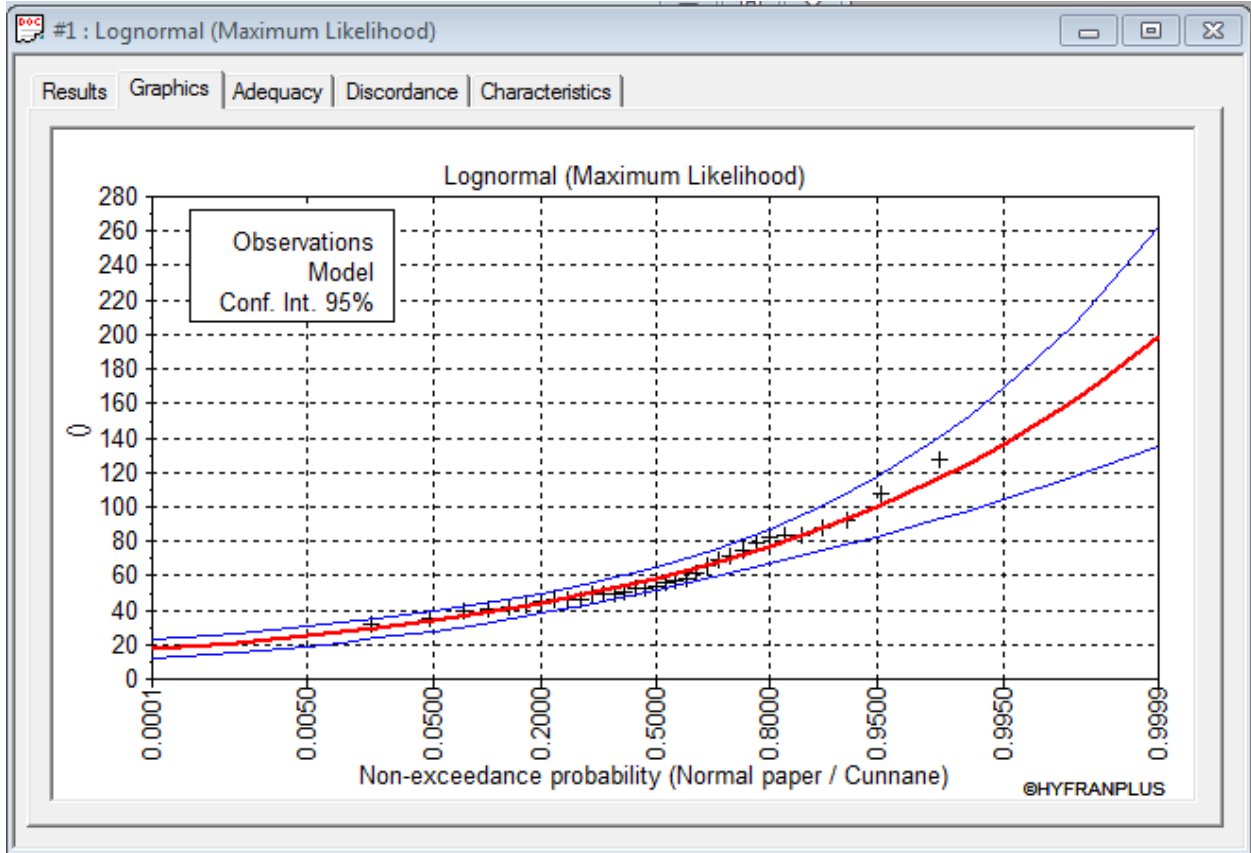
$$X^2 = 4.09$$

P-value :  $P = 0.5364$

Degrés de liberté : 5

Nombre de classes : 8

Conclusion : Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%. La figure III.5 illustre l'ajustement de la série pluviométrique à la loi de de GALTON (Log normale)



**Figure 22 : Ajustement à la loi de GALTON**

On observe de la figure n°19 que les données pluviométriques sont proches à la droite théorique de Galton.

*b. Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel*

Le procédé d'ajustement est identique à celui établi pour la loi de GALTON. Seule la représentation graphique change ou elle est faite sur du papier (Gumbel/Hazen). La loi de GUMBEL a une fonction de répartition qui s'exprime selon la formule suivante :

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

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)

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

$x_0$  : Ordonnée à l'origine en (mm).

On peut écrire:

$$y = -\ln(-\ln(F(x)))$$

\* Gumbel (Méthode des moments):

Nombre d'observations: 33

Paramètre :  $U = 51.842$ ,  $\alpha = 15.8964$

Quantiles

$Q = F(X)$  (probabilité au non-dépassement)

$$T = 1 / (1 - q)$$

Les résultats d'ajustement obtenus par la loi de GUMBEL sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau 18 : Teste d'homogénéité ( teste d'adéquation du khi carré )**

<i>Période de retour</i>	<i>Fréquence au non dépassement</i>	<i>Valeurs théoriques</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>Intervalle de confiance</i>
<i>T (ans)</i>	<i>Q</i>	<i>XT (mm)</i>	$\Delta$	<i>(95%)</i>
10000.0	0.9999	198	21.4	156 - 240
2000.0	0.9995	173	17.9	138 - 208
1000.0	0.9990	162	16.4	130 - 194
200.0	0.9950	136	12.9	111 - 161
100.0	0.9900	125	11.4	103 - 147
50.0	0.9800	114	9.89	94.5 - 133
20.0	0.9500	99.1	7.93	83.5 - 115
10.0	0.9000	87.6	6.47	74.9 - 100
5.0	0.8000	75.7	5.02	65.9 - 85.5
3.0	0.6667	66.2	3.98	58.4 - 74.0
2.0	0.5000	57.7	3.24	51.3 - 64.0

H0 : l'échantillon provient d'une loi GUMBEL

H1 : l'échantillon ne provient pas d'une loi-GUMBEL



Résultats : résultats statistique

$$X^2 = 4.09$$

$$P = 0.5364$$

Degrés de libre : 5

Nombre de classes : 8

Conclusion : Nous pouvons accepter  $H_0$  au niveau de signification de 5%. La figure III.5 illustre l'ajustement de la série pluviométrique à la loi de GUMBEL (Méthode des moments)

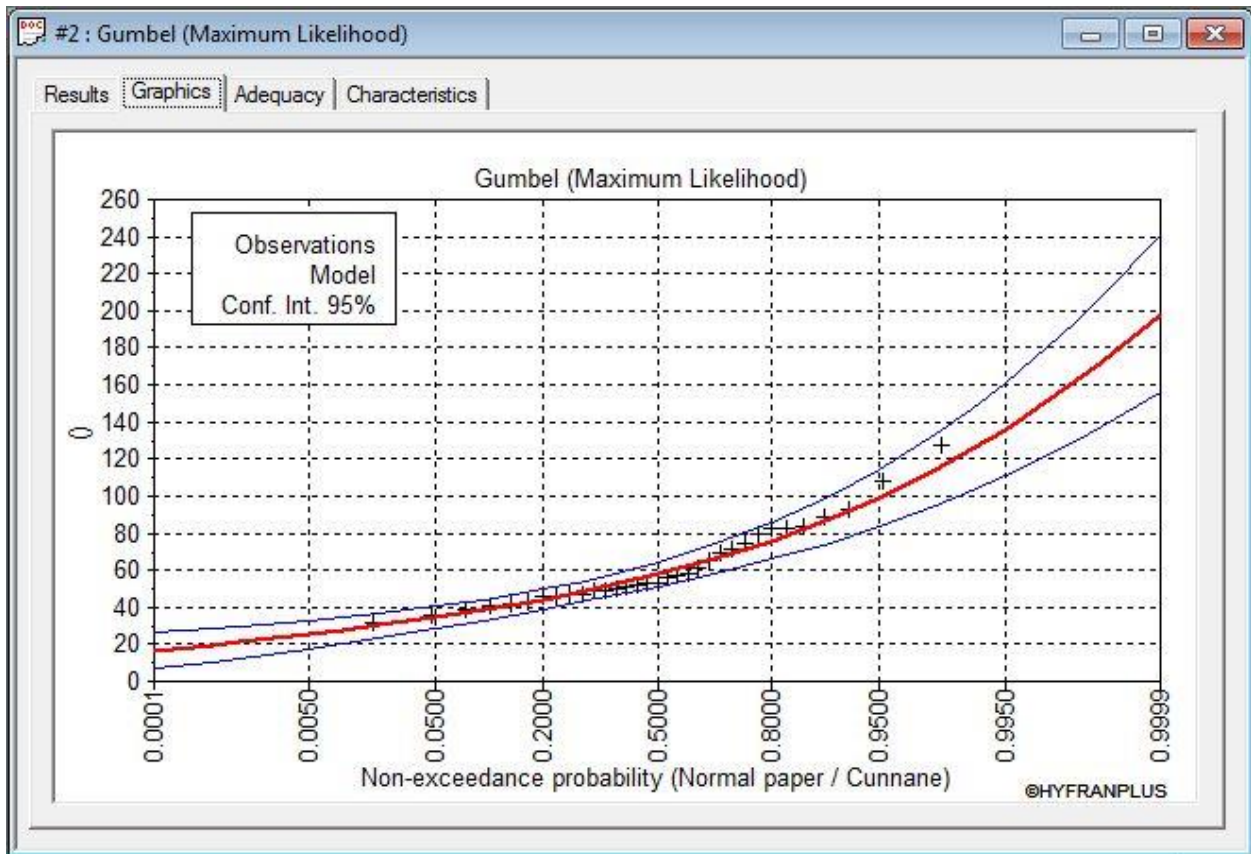
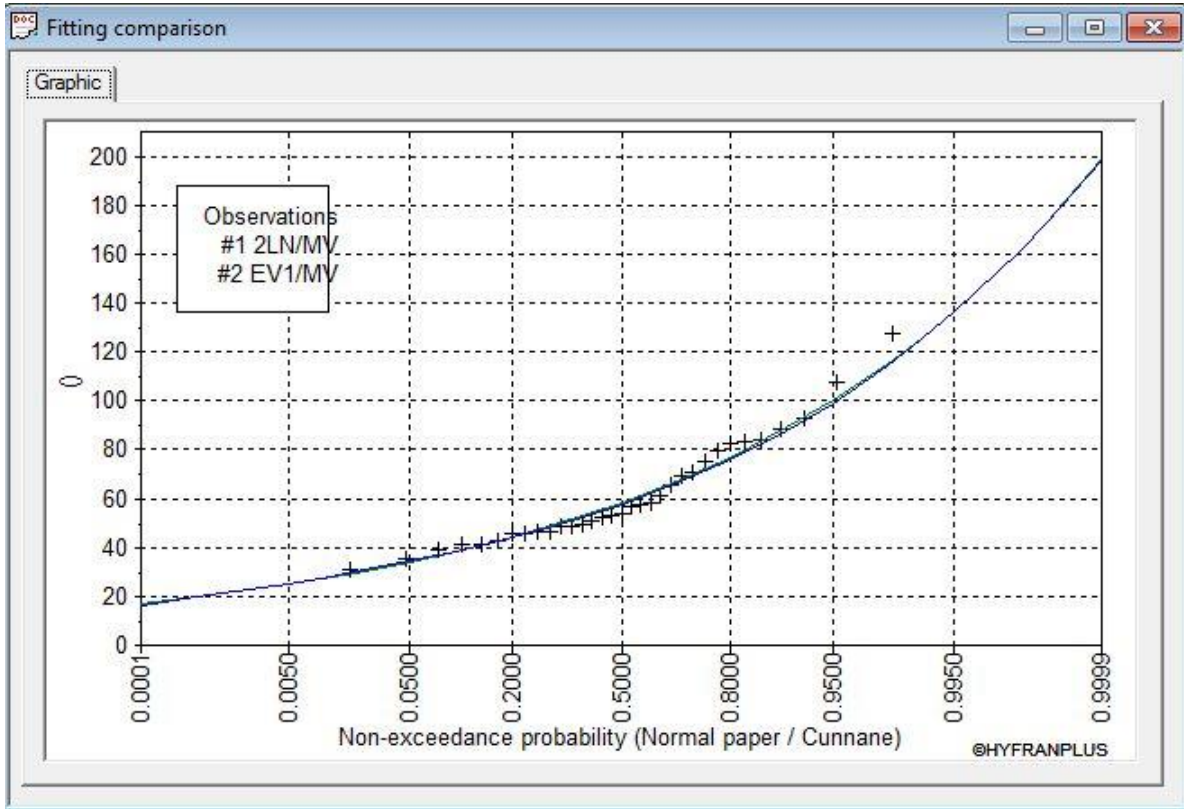


Figure 23 : Ajustement à la loi de GUMBEL

*C. Comparaison entre les deux lois d'ajustement :*

La figure n°24 Montre la comparaison entre les deux lois d'ajustement (Loi de Gumbel et loi de Galton).



**Figure 24 : Comparaison entre les deux lois d'ajustement**

En se référant aux graphes obtenues, par ces deux lois, celui de GUMBEL et GALTON, nous avons remarqué que l'ajustement de la loi de GALTON est le meilleur; du moment que la position des données expérimentales sont plus proches de la droite théorique. Alors on opte pour la loi de GALTON (Log normale).

**4 Pluie de courte durée**

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

$$P_{ct} = P_{max} j (t/24)^e$$

Avec :

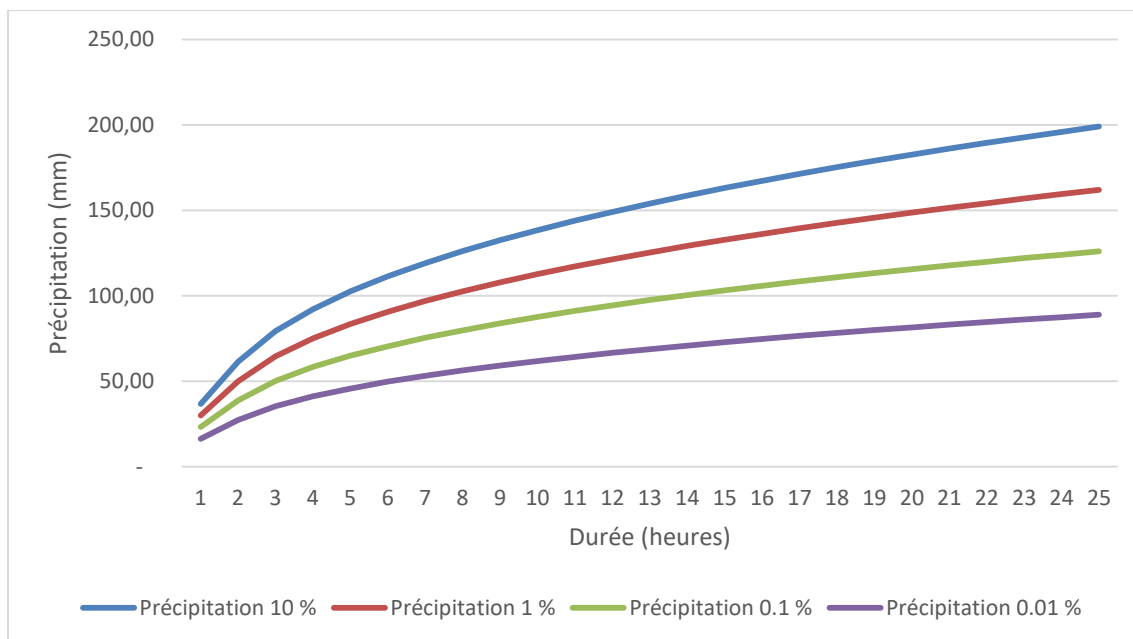
- t : Durée de l'averse (h)
- e : Exposant climatique, e = 0.37 selon les études régionales de l'ANRH.

Les précipitations pour différentes durées sont représentées dans le tableau III.14 et les courbes des pluies fréquentielles sont présentées par la figure

**Tableau 19 : Pluie courte durée t(h) et période de routeur (ans)**

T (h)	PTC(mm)			
	10000	1000	100	10
0.25	36.76	29.93	23.28	16.42
1	61.40	49.98	38.88	27.43
2	79.35	64.60	50.24	35.45
3	92.20	75.05	58.38	41.19
4	102.55	83.48	64.93	45.81
5	111.38	90.67	70.52	49.76
6	119.15	97.00	75.44	53.23
7	126.14	102.69	79.87	56.35
8	132.53	107.89	83.91	59.21
9	138.43	112.70	87.65	61.84
10	143.94	117.18	91.14	64.30
11	149.10	121.38	94.41	66.61
12	153.98	125.35	97.50	68.79
13	158.61	129.12	100.43	70.86
14	163.02	132.71	103.22	72.83
15	167.24	136.14	105.89	74.71
16	171.28	139.43	108.45	76.52
17	175.16	142.59	110.91	78.25
18	178.91	145.64	113.28	79.92
19	182.52	148.59	115.57	81.54
20	186.02	151.43	117.78	83.10

21	189.41	154.19	119.93	84.61
22	192.70	156.87	122.01	86.08
23	195.89	159.47	124.03	87.51
24	199.00	162.00	126.00	88.90



**Figure 25 : Courbes des pluies fréquences**

#### 4.1.1 Les intensités maximales

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

$$I_t = P_{ct} / t$$

Avec :

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

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

**Tableau 20 : L'intensité maximale de période**

T (heures)	I (mm/h)			
	10000	1000	100	10
0.25	147.05	119.71	93.11	65.69
1	61.40	49.98	38.88	27.43
2	39.68	32.30	25.12	17.72
3	30.73	25.02	19.46	13.73
4	25.64	20.87	16.23	11.45
5	22.28	18.13	14.10	9.95
6	19.86	16.17	12.57	8.87
7	18.02	14.67	11.41	8.05
8	16.57	13.49	10.49	7.40
9	15.38	12.52	9.74	6.87
10	14.39	11.72	9.11	6.43
11	13.55	11.03	8.58	6.06
12	12.83	10.45	8.12	5.73
13	12.20	9.93	7.73	5.45
14	11.64	9.48	7.37	5.20
15	11.15	9.08	7.06	4.98
16	10.70	8.71	6.78	4.78
17	10.30	8.39	6.52	4.60
18	9.94	8.09	6.29	4.44
19	9.61	7.82	6.08	4.29
20	9.30	7.57	5.89	4.16
21	9.02	7.34	5.71	4.03
22	8.76	7.13	5.55	3.91
23	8.52	6.93	5.39	3.80
24	8.29	6.75	5.25	3.70

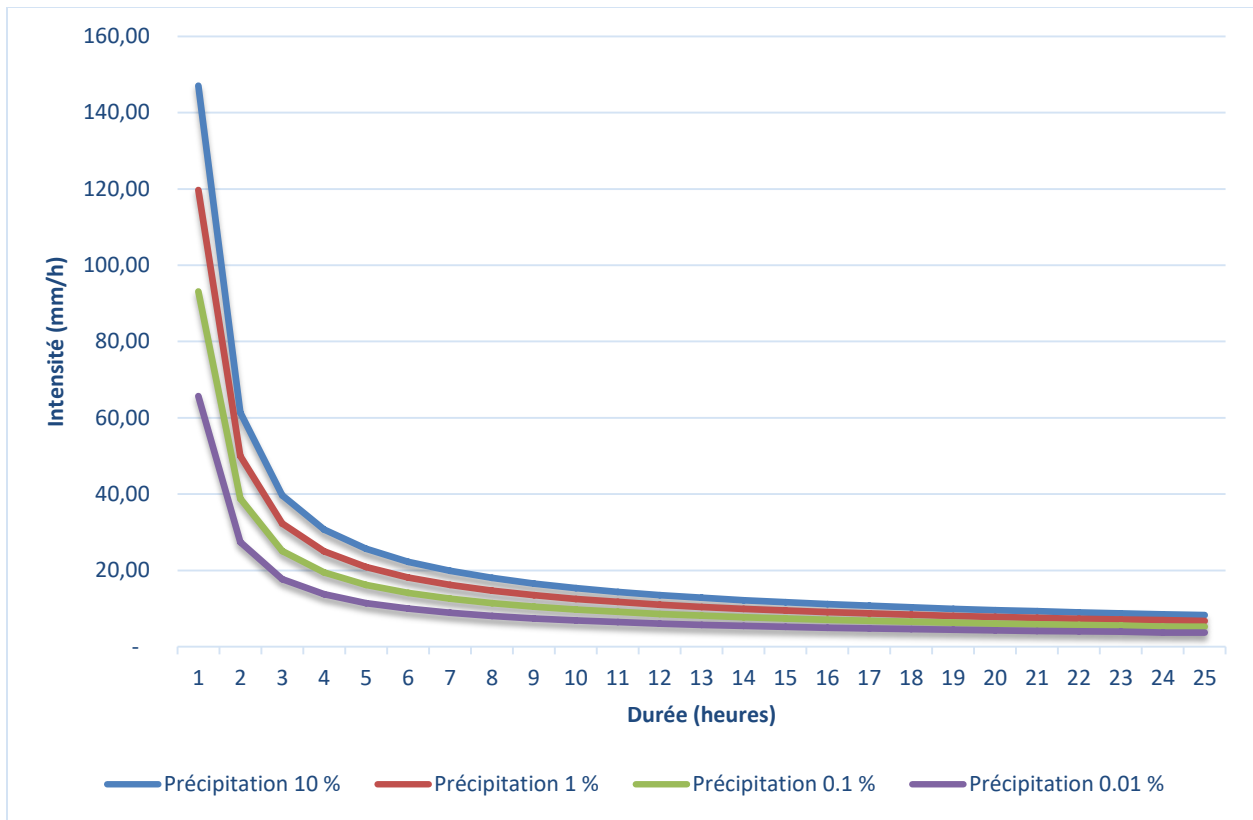


Figure 26 : Courbes d'intensité maximale en fonction du temps

## PARTIE III RESULTAT ET DISCUSSION

### 1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de la simulation du bassin versant de koudiet rosfa par HEC-HMS du comportement hydraulique vis-à-vis des précipitations fréquentielles. Les résultats se divisent en deux parties :

- Les résultats de la simulation hydrologique du bassin versant
- Les résultats de la simulation de la propagation de la crue

La simulation hydrologique du bassin versant a pour objectif d'estimer le débit de pointe probable du bassin versant de Oued El Hachem, le volume a son exutoire. Ce bassin versant a une superficie d'environ 440 km<sup>2</sup>. La figure V.1 représente le modèle HEC HMS du bassin d'étude qui est Composé de 18 sous bassins.

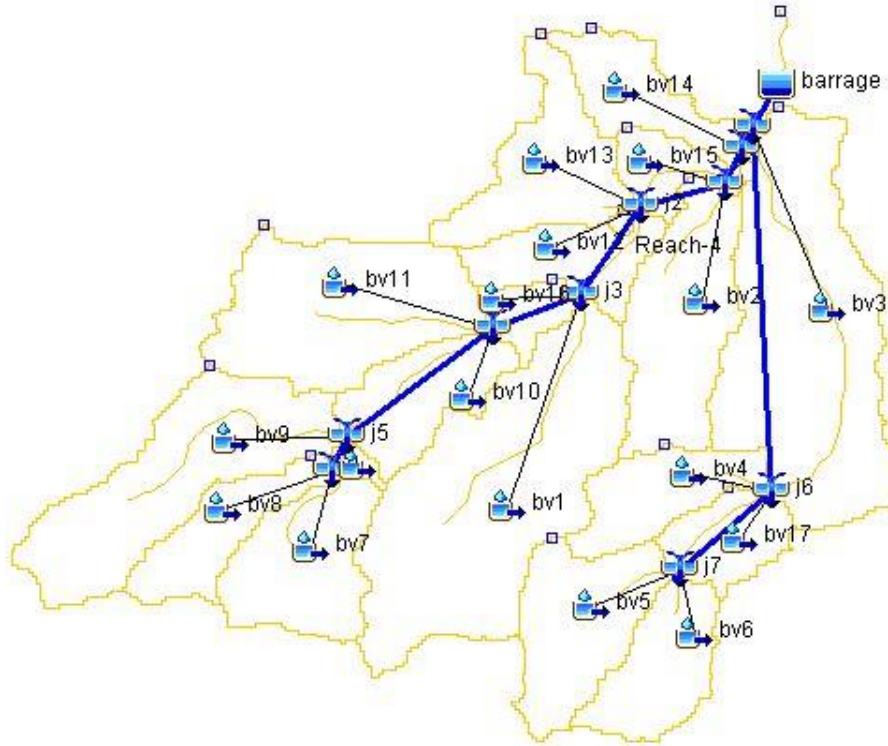


Figure 27 : Modèle HEC HMS du Bassin versant de Boukerdane

## 2 Choix de l'évènement de calibration

Dans le cadre de l'application du modèle HEC-HMS sur le bassin versant de Bouekrdane, nous avons utilisé les données de l'exploitation du barrage depuis la mise en service (1987-2019) . En effet nous avons choisi la crue du 23 Avril 1996 qui a duré 7 jours avec un cumul de précipitation de 194.5 mm. Le débit max moyen de cette crue fut estimé à  $42.604\text{m}^3/\text{s}$  avec un temps de montée de 2 jours. Cette crue a généré un apport record dans le barrage de Boukerdane  $10.5\text{Hm}^3$ .

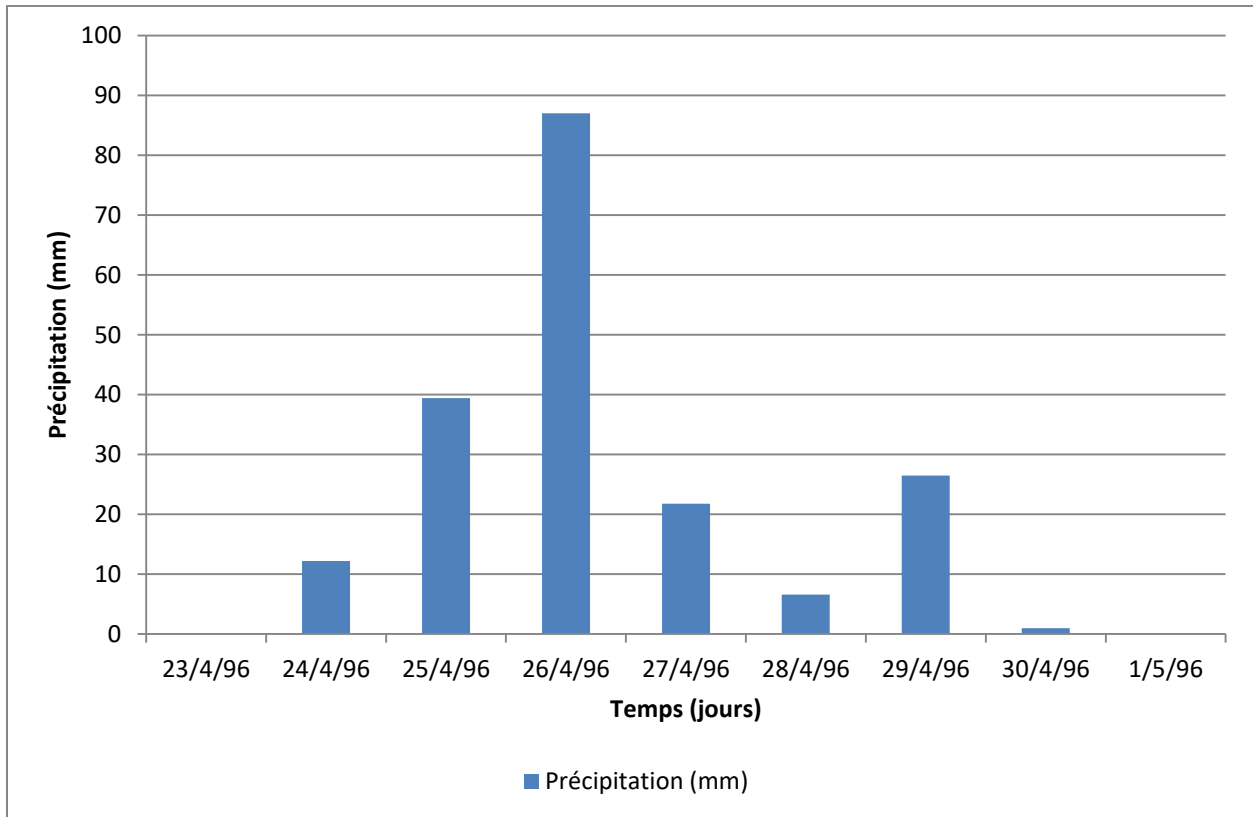


Figure 28 : Précipitations journalière de l'évènement du 23/04/1996



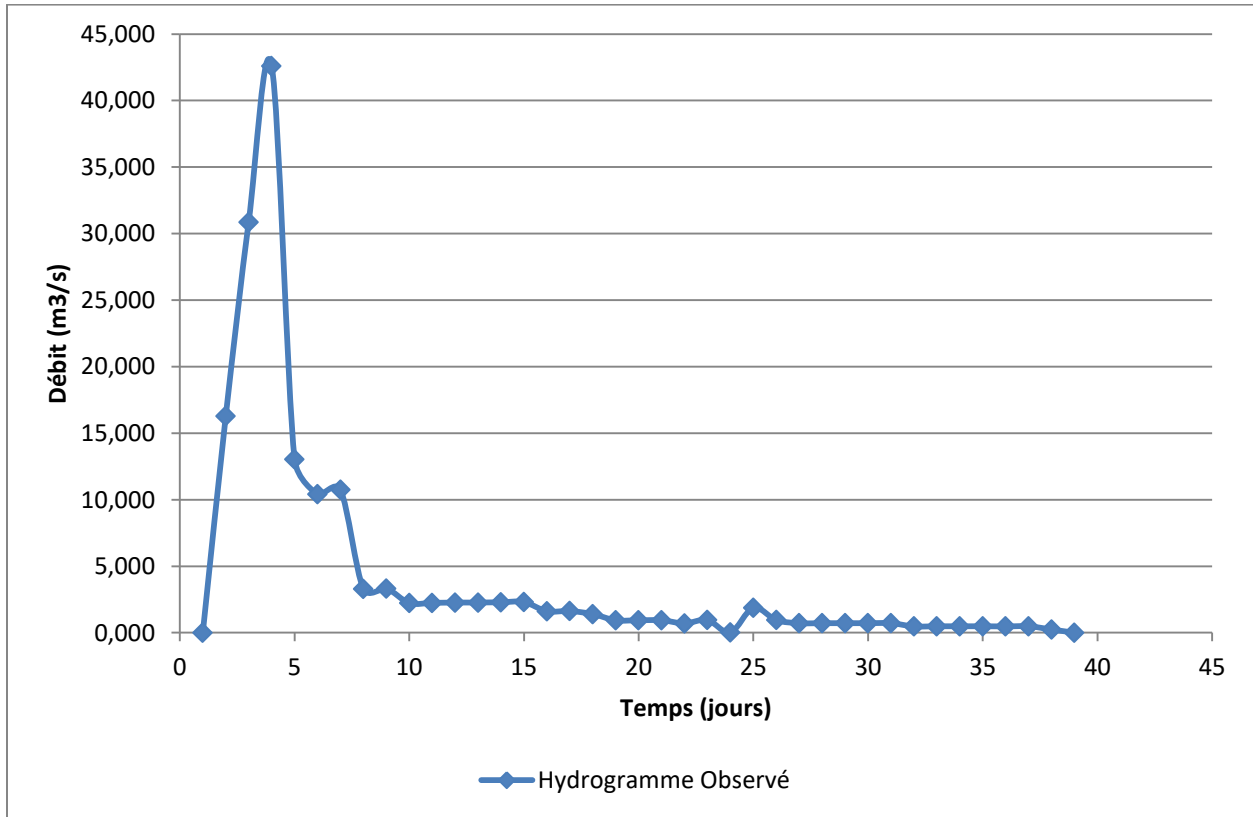


Figure 29 : Hydrogramme observé de l'évènement du 24/04/1996

### 3 Calibration et validation du modèle

Pour calibrer le modèle, nous avons utilisé les précipitations de l'évènement du 24/04/1996 comme données d'entrée du modèle. L'hydrogramme calculé sera comparé à celui observé. Le paramètre CN (curve number) qui est fonction du type de sol et de son utilisation sera utilisé pour calibrer le modèle.

En premier lieu, nous allons attribuer aux sous bassins le paramètre CN et nous lançons la première simulation.

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

Show Elements: All Elements Sorting: Hydrologic

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
bv9		60	0.0
bv7		60	0.0
bv8		60	0.0
bv18		61	0.0
bv11		61	0.0
bv10		61	0.0
bv1		60	0.0
bv16		60	0.0
bv13		60	0.0
bv12		60	0.0
bv2		62	0.0
bv15		60	0.0
bv14		61	0.0
bv5		60	0.0
bv6		60	0.0
bv4		60	0.0
bv17		60	0.0

Apply Close

Figure 30 : Valeur de CN avant Calibrage

Le rapport de simulation initiale par HEC HMS est donné par la figure suivante :

Project: bv01 Simulation Run: 24Apr 1996  
Reservoir: barrage

Start of Run: 23Apr 1996, 00:00 Basin Model: boukerdane  
End of Run: 31May 1996, 00:00 Meteorologic Model: 24Apr 1996  
Compute Time: 17Sep 2021, 22:17:57 Control Specifications: 24Apr 1996

Volume Units:  MM  1000 M3

Computed Results

Peak Inflow: 51.7 (M3/S)	Date/Time of Peak Inflow: 26Apr 1996, 00:00
Peak Discharge: 51.7 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 26Apr 1996, 00:00
Inflow Volume: 13464.8 (1000 M3)	Peak Storage: (1000 M3)
Discharge Volume: 13464.8 (1000 M3)	

Observed Hydrograph at Gage 24/04/1996

Peak Discharge: 42.6 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge: 26Apr 1996, 00:00
Mean Abs Error: 3.3 (M3/S)	RMS Error: 7.2 (M3/S)
Volume: 14073.1 (1000 M3)	Volume Residual: -608.3 (1000 M3)
Nash-Sutcliffe: 0.275	

Figure 31 : Rapport de Simulation avant calibrage

**4 La simulation initiale a donné les résultats suivants :**

Project: bv01 Simulation Run: 24Apr 1996

Start of Run: 23Apr 1996, 00:00 Basin Model: boukerdane  
 End of Run: 31May 1996, 00:00 Meteorologic Model: 24Apr 1996  
 Compute Time: 17Sep2021, 22:20:05 Control Specifications: 24Apr 1996

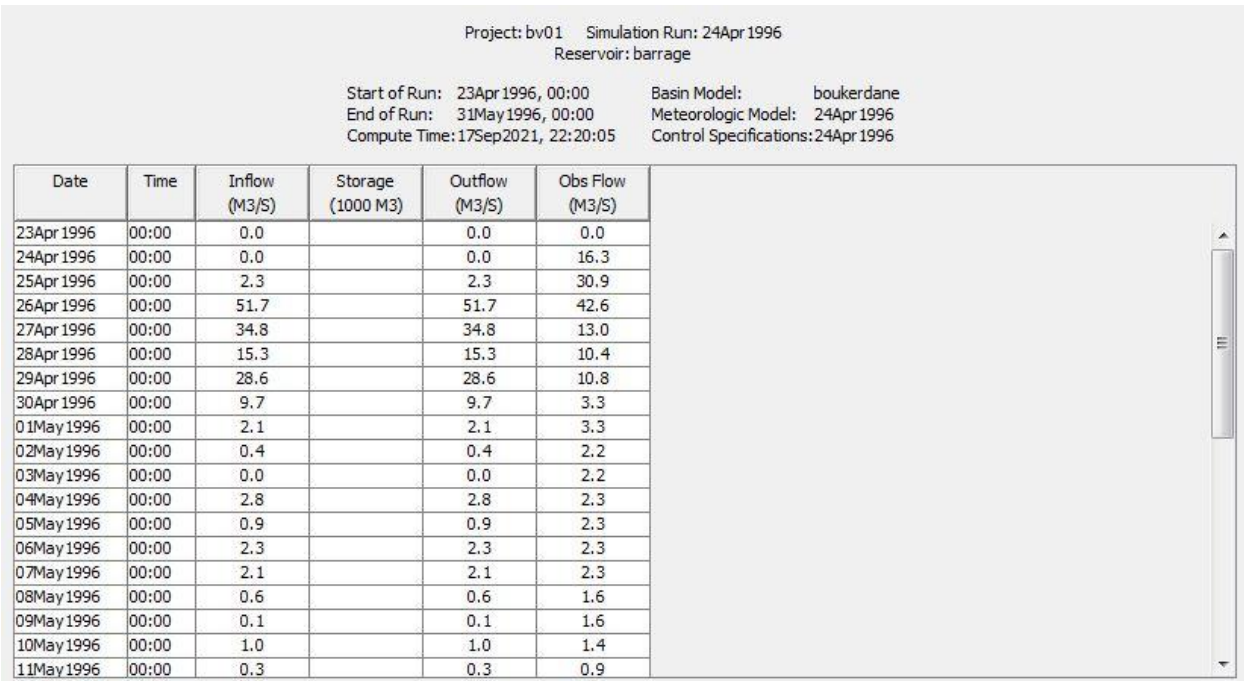
Show Elements: All Elements Volume Units:  MM  1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
bv9	14.38	4.8	26Apr 1996, 00:00	1210.0
bv7	8.31	2.8	26Apr 1996, 00:00	699.2
bv8	5.31	1.8	26Apr 1996, 00:00	446.8
j8	13.62	4.5	26Apr 1996, 00:00	1146.0
Reach-1	13.62	4.5	26Apr 1996, 00:00	1146.3
bv18	0.63	0.2	26Apr 1996, 00:00	54.8
j5	28.63	9.6	26Apr 1996, 00:00	2411.1
Reach-2	28.63	9.4	26Apr 1996, 00:00	2414.2
bv11	14.44	5.0	26Apr 1996, 00:00	1255.7
bv10	6.43	2.2	26Apr 1996, 00:00	559.2
j4	49.50	16.7	26Apr 1996, 00:00	4229.0
Reach-3	49.50	16.6	26Apr 1996, 00:00	4231.7
bv1	24.36	8.1	26Apr 1996, 00:00	2049.7
bv16	2.23	0.7	26Apr 1996, 00:00	187.6
j3	76.09	25.5	26Apr 1996, 00:00	6469.0
Reach-4	76.09	25.3	26Apr 1996, 00:00	6473.8
bv13	8.26	2.8	26Apr 1996, 00:00	695.0
bv12	5.55	1.9	26Apr 1996, 00:00	467.0

**Figure 32 : Résultats de la simulation avant Calibrage**

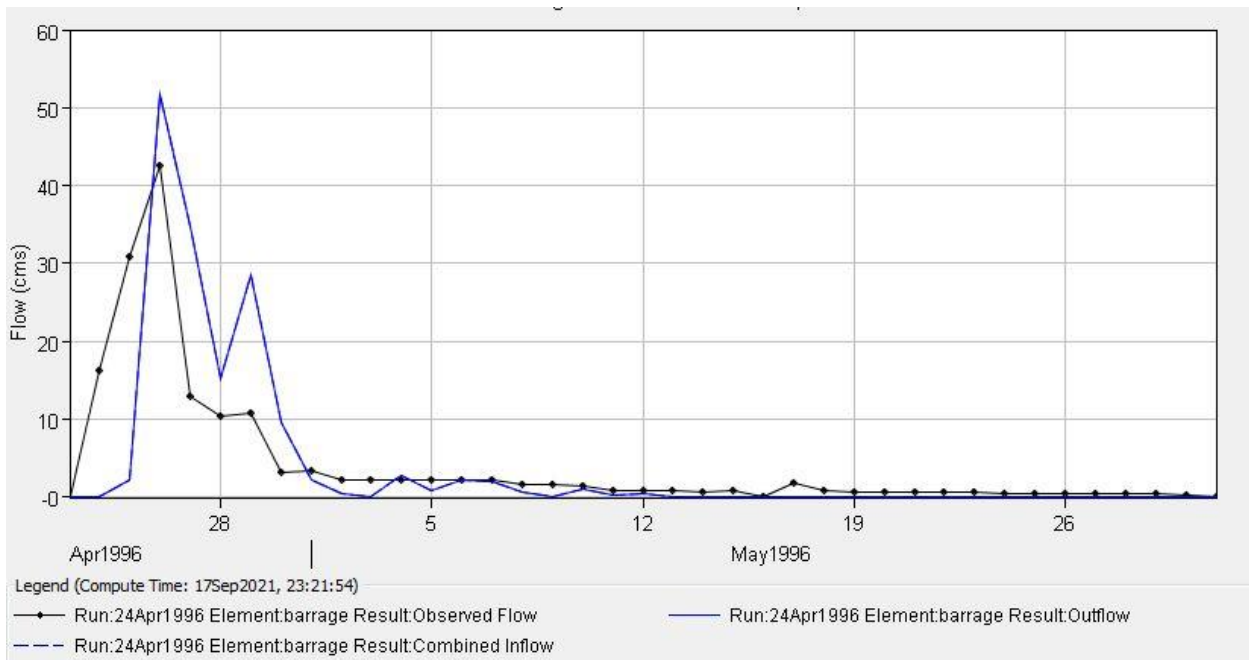
La figure suivante présente le résultat de calcul de l'hydrogramme entrant dans la retenue avant calibrage :

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.



**Figure 33 : Résultats de calcul de l'hydrogramme entrant dans la retenue avant calibrage**

La figure suivante présente le résultat de calcul de l'hydrogramme entrant dans la retenue avant calibrage :



**Figure 34 : Hydrogramme calculé et observé avant calibrage**

D'après ces résultats de simulation, on constate que le débit max simulé est de 51.7 m<sup>3</sup>/s. Ce débit est largement supérieur au débit max observé 42.6 m<sup>3</sup>/s. Le volume entrant dans la retenue est de 13.4648 hm<sup>3</sup>. Quant au volume observé est de 14.0731 hm<sup>3</sup> où une différence en moins de 0.6083 hm<sup>3</sup> est constaté. Les temps de montée des hydrogrammes sont identiques.

## **5 Performance du modèle**

La performance du model de reproduire l'hydrogramme est évalué par l'utilisation du coefficient de Nash–Sutcliffe efficience NSE [Nash and Sutcliffe, 1970], il est donné par la relation :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{i,obs} - Q_{i,sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \dots\dots\dots(1)$$

Où :

Q<sub>i,sim</sub> = débit simulé à l'instant t = i;

Q<sub>i,obs</sub> = débit observé à l'instant t = i;

Q<sub>obs</sub> = debit moyen obsevé;

N = nombre d'observations.

Sachant que la valeur de ce paramètre varie de moins l'infinie à 1, une valeur proche de 1 signifie que le modèle reproduit adéquatement le phénomène observé. Dans notre cas, la simulation avant calibration a donné une valeur de NSE=0.275.

### **Ajustement des paramètres de calibration**

Dans le but d'améliorer la performance de notre modèle nous allons procéder à l'ajustement des paramètres de calibration à savoir le CN des sous-bassins. Cette étape consiste à changer ce paramètre afin d'améliorer l'efficience du modèle.

Donc les nouvelles valeurs du paramètre CN sont dressées dans le tableau suivant :

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
bv9		61	0.0
bv7		61	0.0
bv8		61	0.0
bv18		61	0.0
bv11		61	0.0
bv10		61	0.0
bv1		61.9	0.0
bv16		62	0.0
bv13		62	0.0
bv12		62	0.0
bv2		62	0.0
bv15		62	0.0
bv14		62	0.0
bv5		62	0.0
bv6		62	0.0
bv4		62	0.0
bv17		62	0.0

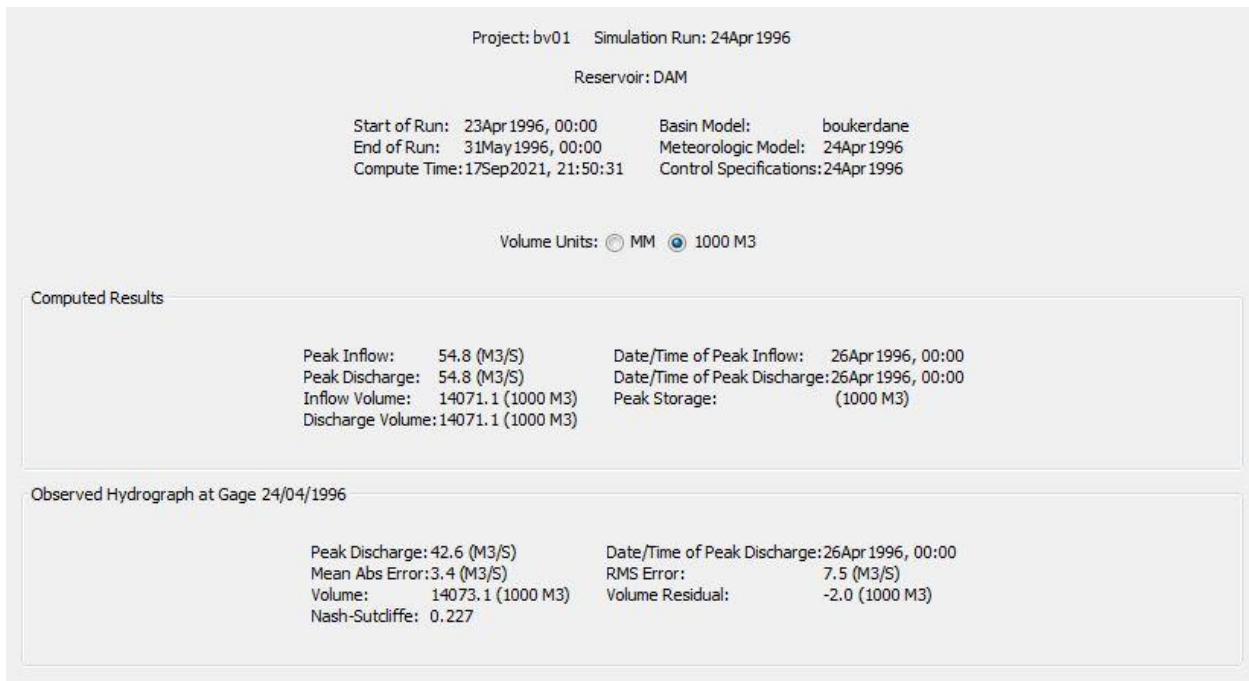
Figure 35 : Valeur de CN après Calibrage

## 6 Evaluation du model

Après avoir ajuster le paramètre qui prend en considération l'occupation du sol ainsi que son utilisation, nous allons relancer la simulation de l'évènement hydrologique du 24/04/1996.

Le rapport de simulation finale par HEC HMS est donné par la figure suivante :

## Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.



**Figure 36 : Rapport de Simulation après calibrage**

La simulation finale a donné les résultats suivants :



**Figure 37 : Résultats de la simulation après Calibrage**



La figure suivante présente le résultat de calcul de l'hydrogramme entrant dans la retenue après calibrage.

Project: bv01 Simulation Run: 24Apr 1996  
Reservoir: DAM

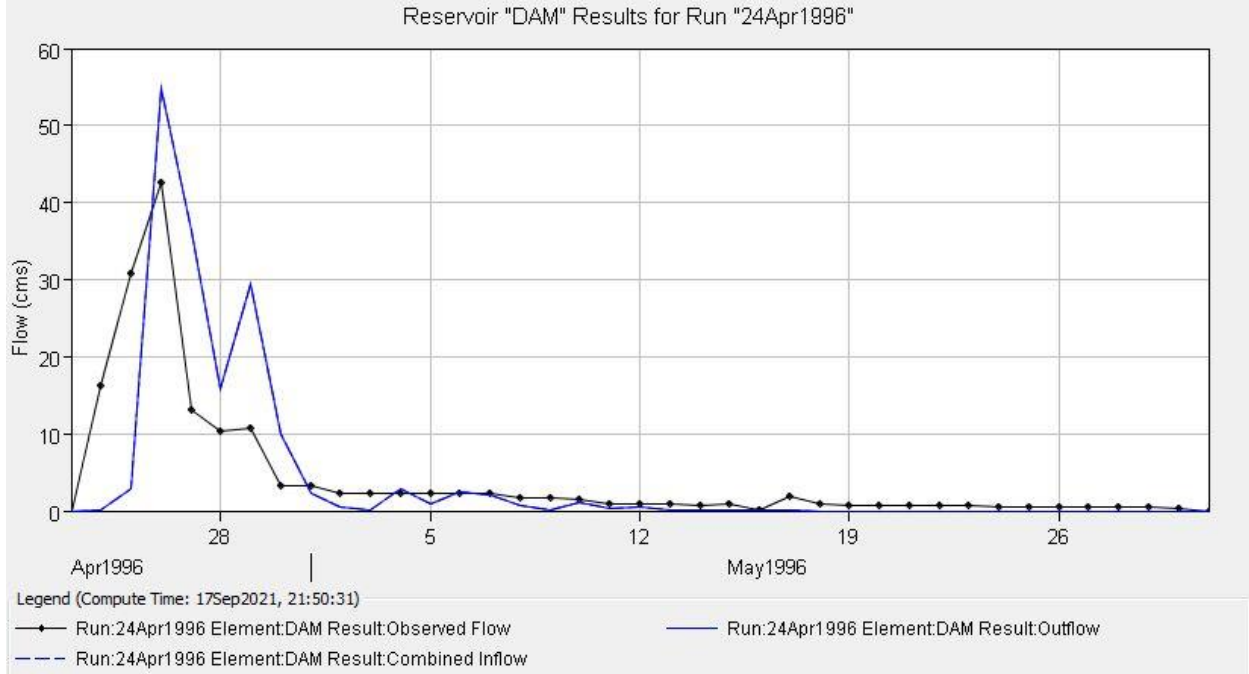
Start of Run: 23Apr 1996, 00:00 Basin Model: boukerdane  
End of Run: 31May 1996, 00:00 Meteorologic Model: 24Apr 1996  
Compute Time: 17Sep 2021, 21:50:31 Control Specifications: 24Apr 1996

Date	Time	Inflow (M3/S)	Storage (1000 M3)	Outflow (M3/S)	Obs Flow (M3/S)
23Apr 1996	00:00	0.0		0.0	0.0
24Apr 1996	00:00	0.0		0.0	16.3
25Apr 1996	00:00	2.9		2.9	30.9
26Apr 1996	00:00	54.8		54.8	42.6
27Apr 1996	00:00	36.3		36.3	13.0
28Apr 1996	00:00	15.8		15.8	10.4
29Apr 1996	00:00	29.3		29.3	10.8
30Apr 1996	00:00	9.9		9.9	3.3
01May 1996	00:00	2.2		2.2	3.3
02May 1996	00:00	0.4		0.4	2.2
03May 1996	00:00	0.0		0.0	2.2
04May 1996	00:00	2.8		2.8	2.3
05May 1996	00:00	0.9		0.9	2.3
06May 1996	00:00	2.4		2.4	2.3
07May 1996	00:00	2.1		2.1	2.3
08May 1996	00:00	0.6		0.6	1.6
09May 1996	00:00	0.1		0.1	1.6
10May 1996	00:00	1.0		1.0	1.4
11May 1996	00:00	0.3		0.3	0.9

**Figure 38 : Résultats de calcul de l'hydrogramme entrant dans la retenue après calibrage**

La figure suivante présente l'hydrogramme calculé et observé après le calibrage :





**Figure 39 : Hydrogrammes calculé et observé après calibrage**

Les résultats de simulation après calibrage montrent que le débit max simulé est de 54.8 m<sup>3</sup>/s. soit une différence en plus de 12.2 m<sup>3</sup>/s. Une différence en moins de 2000 m<sup>3</sup> est constaté entre le volume calculé entrant dans la retenue et volume observé. Les temps de montée des deux hydrogrammes restent inchangés (4 jours). Par ailleurs on constate une faible valeur du coefficient de Nash–Sutcliffe efficience (NSE =0.227).

Ceci pourrait être expliqué par le décalage entre l'hydrogramme calculé et celui observé et la différence entre les débits max. Enfin, nous pourrions dire que le modèle, après calibrage, reproduit avec fidélité le volume d'eau entrant dans la retenue.

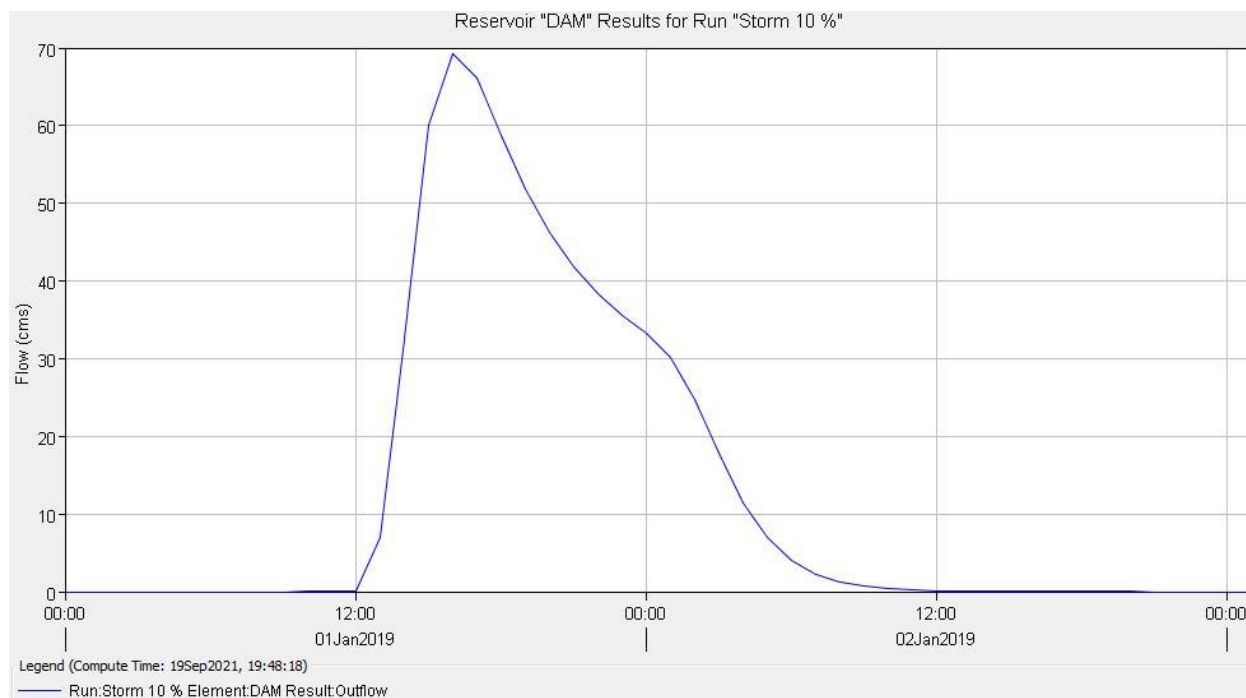
### **Simulation des précipitations hypothétiques fréquentielles**

Après avoir calibré le modèle, nous allons passer à la phase exploitation de ce dernier en procédant à la simulation des pluies fréquentielles déjà calculées dans le chapitre IV.

**Tableau 21 : Tableau des pluies fréquentielles**

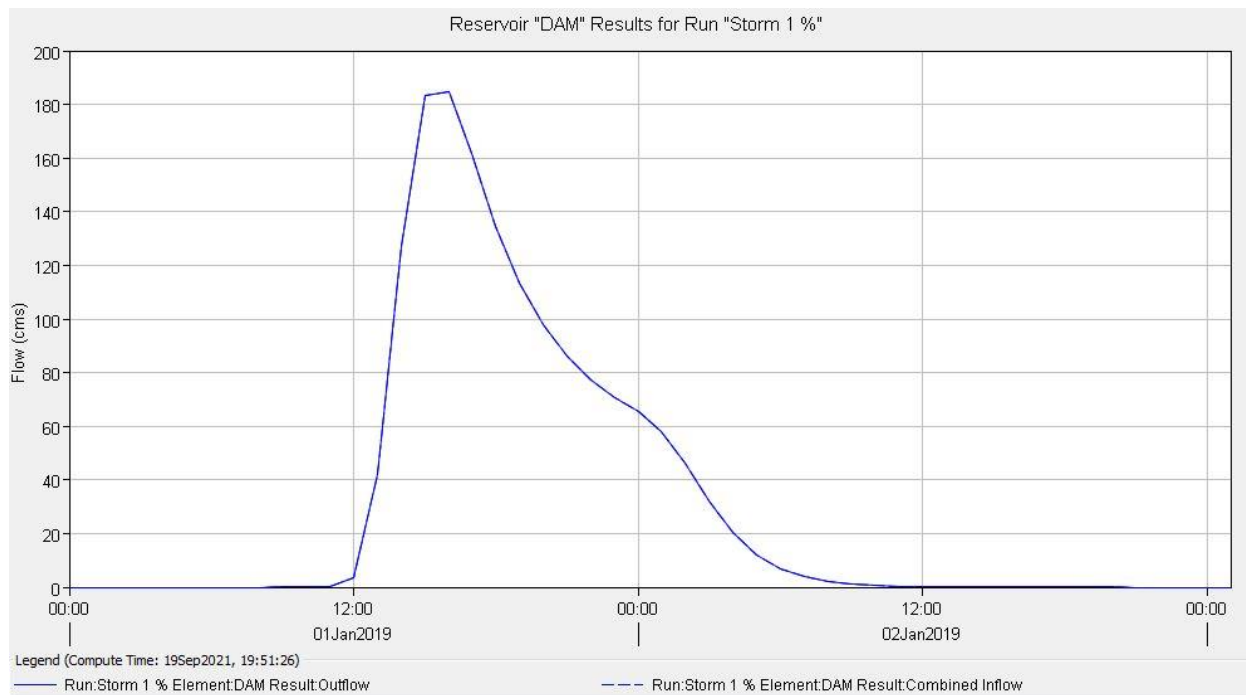
Frequence (Année)	Hauteur de Precipitation (mm)	Débit max (m3/s)	Temps de montée (hours)	Volume (1000 m3)
10	88.9	69.3	16	2 308.9
100	126	185	16	5 515
1000	162	331.1	15	9 220.3
10 000	199	498.9	15	13 474.1

*Les figures suivantes présentent les hydrogrammes simulés des pluies fréquentielles.*

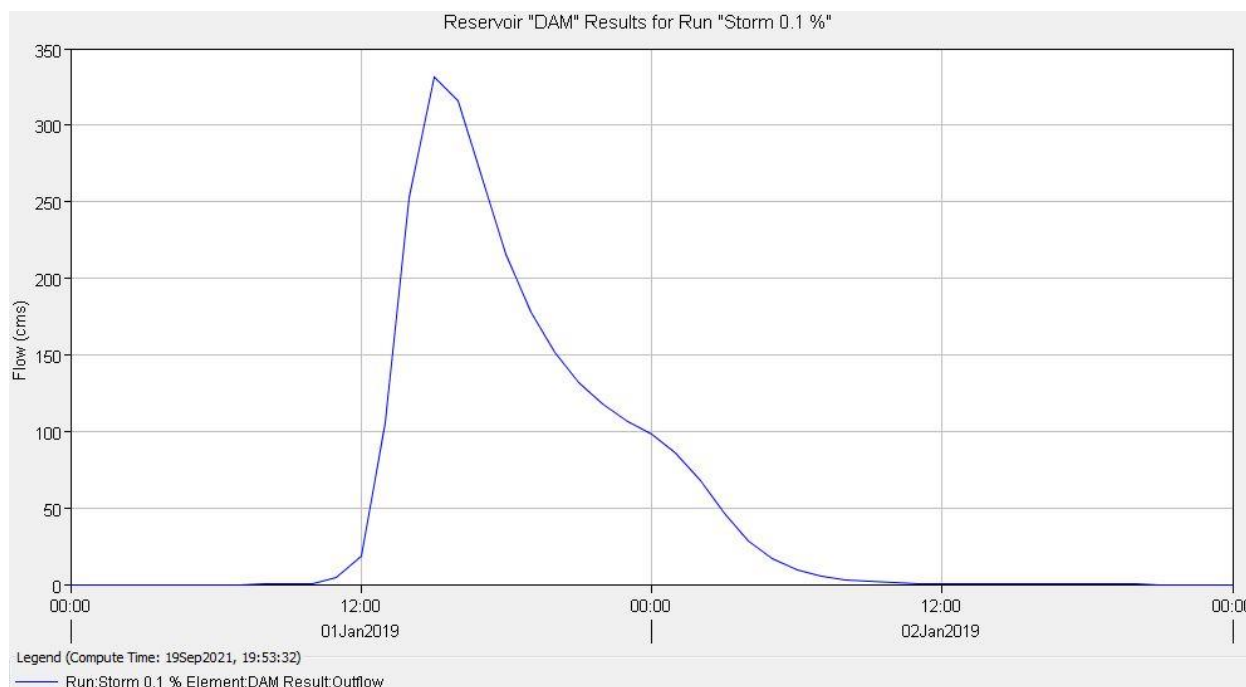


**Figure 40 : Hydrogramme calculé pluie fréquentielle 10 %**

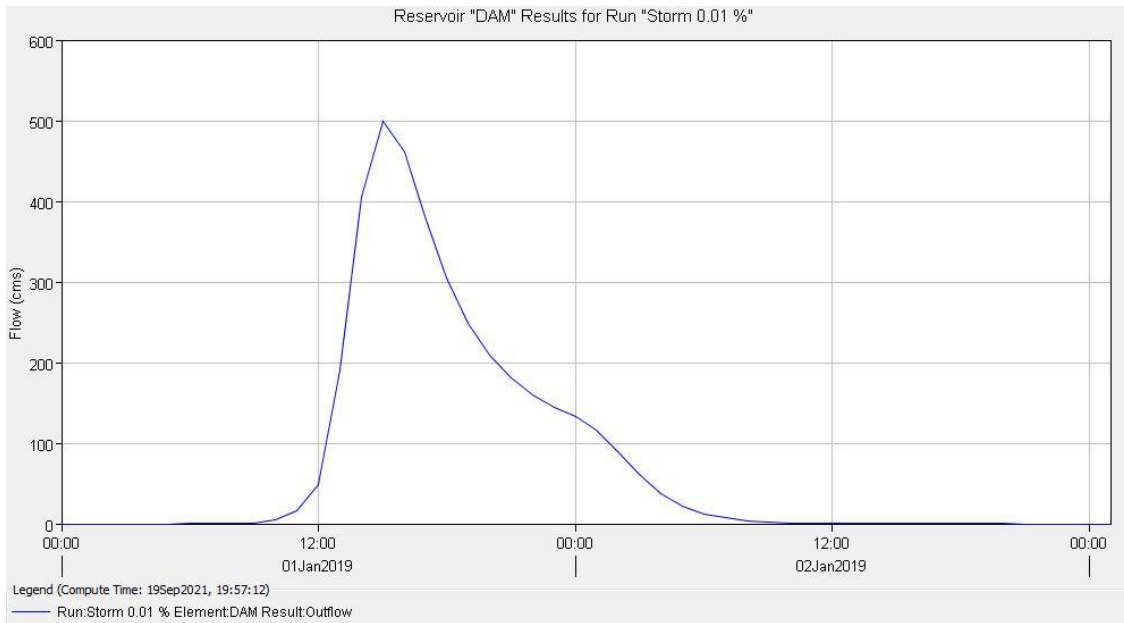
# Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.



**Figure 41 : Hydrogramme calculé pluie fréquentielle 1 %**



**Figure 42 : Hydrogramme calculé pluie fréquentielle 0.1 %**



**Figure 43 : Hydrogramme calculé pluie fréquentielle 0.01 %**

## **7 Caractérisation des crues du bassin versant Oued El Hachem**

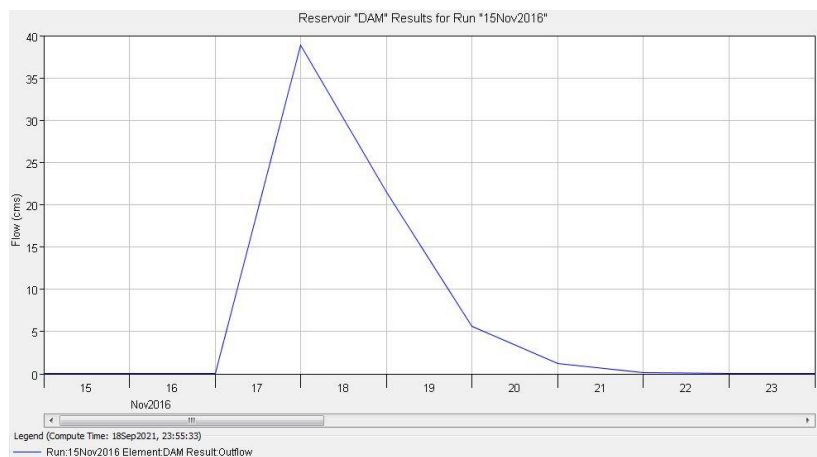
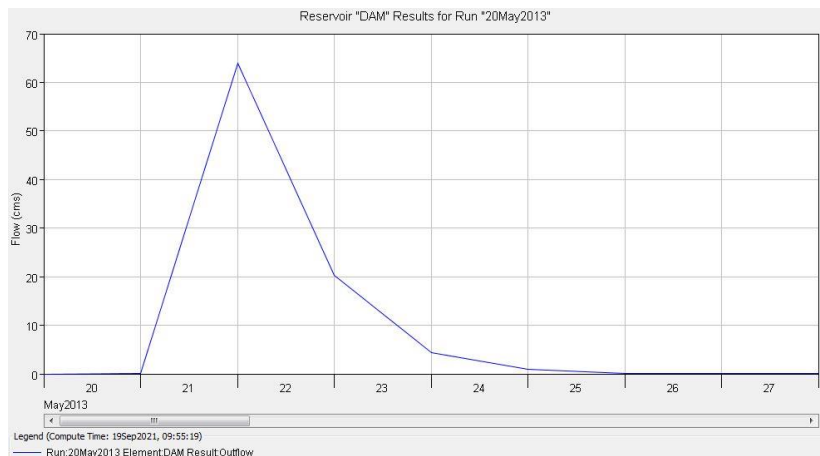
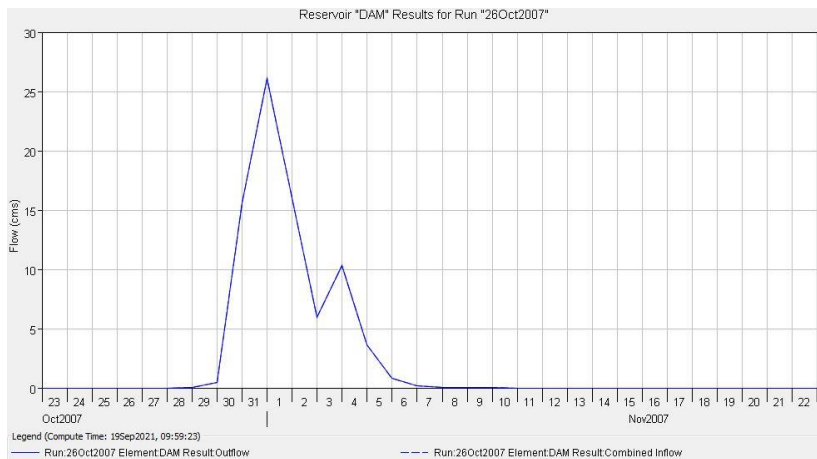
Après avoir simulé le comportement du bassin versant vis-à-vis des précipitations fréquentielles, nous allons simuler dans cette partie les évènements hydrologiques déjà enregistrés au niveau du barrage Boukerdane dont nous disposons le cumul journalier des précipitations. Pour ce faire nous avons pris en considération seulement les évènements météorologiques où le cumul de précipitation égale ou dépasse 30 mm. En effet, nous avons recensé 172 évènements répartis sur toute la période de l'exploitation du barrage qui s'étale de 1995 à 2019.

La simulation va nous permettre de calculer les différentes caractéristiques des crues entrantes dans le barrage à savoir : le débit max, le temps de montée et de décrue, le volume de la crue.

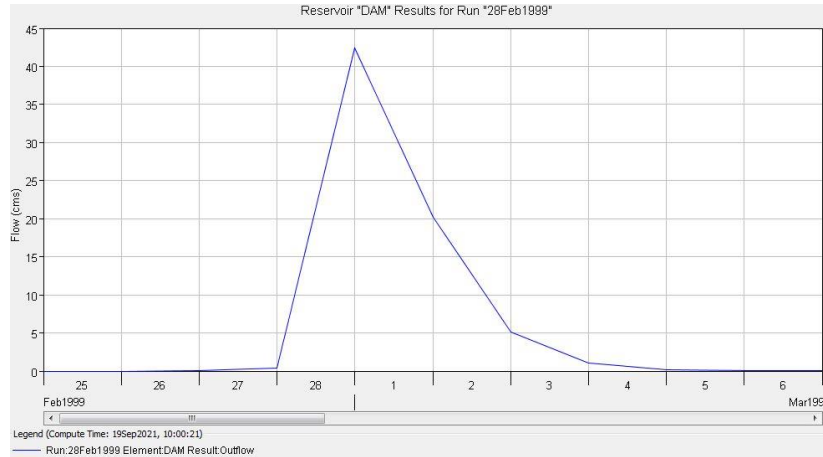
### **Simulations des évènements historiques**

Les figures suivantes illustrent quelques crues extrêmes survenues dans le bassin versant Oued El Hachem. :

# Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.



## Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.



### Conclusion

Après avoir terminé ce chapitre qui a constitué l'objectif principal de notre travail, nous recommandons aux gestionnaires du barrage de Boukerdane l'utilisation de ce modèle calibré afin de prévoir l'éventuel volume d'eau entrant dans la retenue suite aux alertes météorologiques de précipitations.

### Caractérisation des crues du bassin versant Oued El Hachem

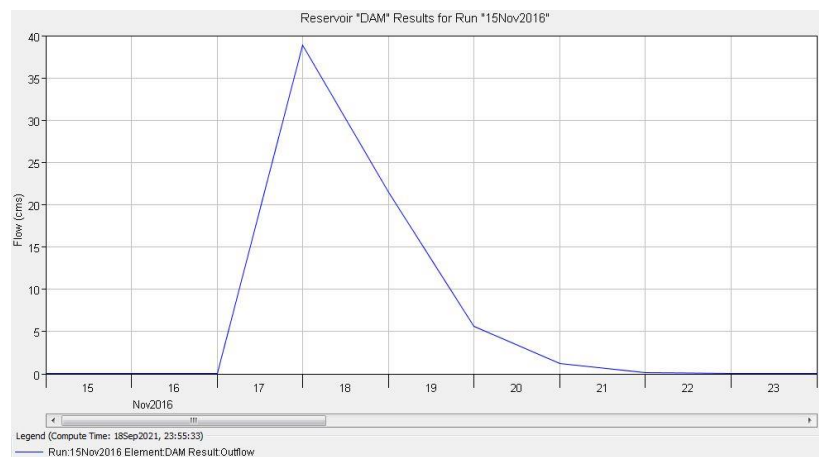
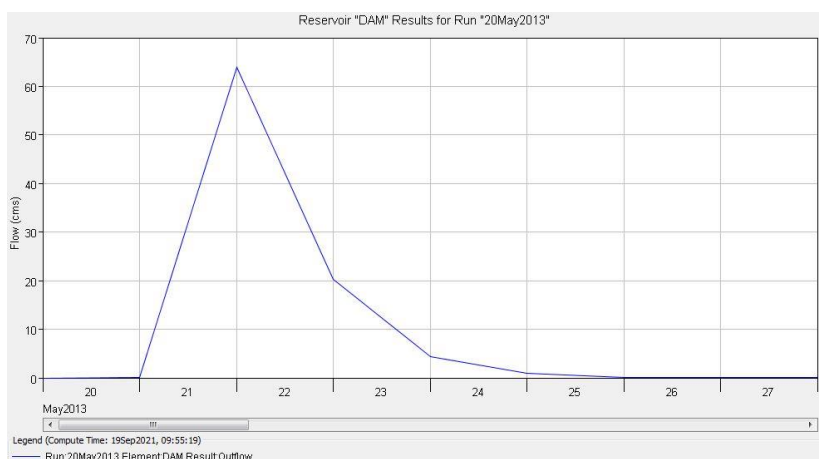
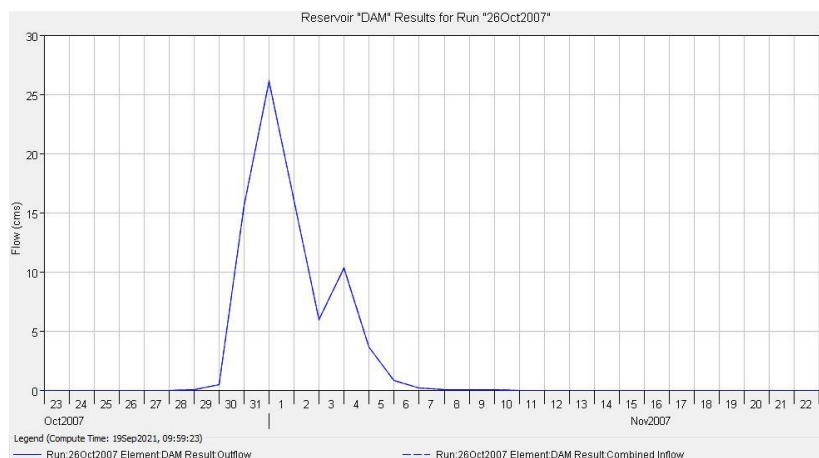
Après avoir simulé le comportement du bassin versant vis-à-vis des précipitations fréquentielles, nous allons simuler dans cette partie les évènements hydrologiques déjà enregistrés au niveau du barrage Boukerdane dont nous disposons le cumul journalier des précipitations. Pour ce faire nous avons pris en considération seulement les évènements météorologiques où le cumul de précipitation égale ou dépasse 30 mm. En effet, nous avons recensé 172 évènements répartis sur toute la période de l'exploitation du barrage qui s'étale de 1995 à 2019.

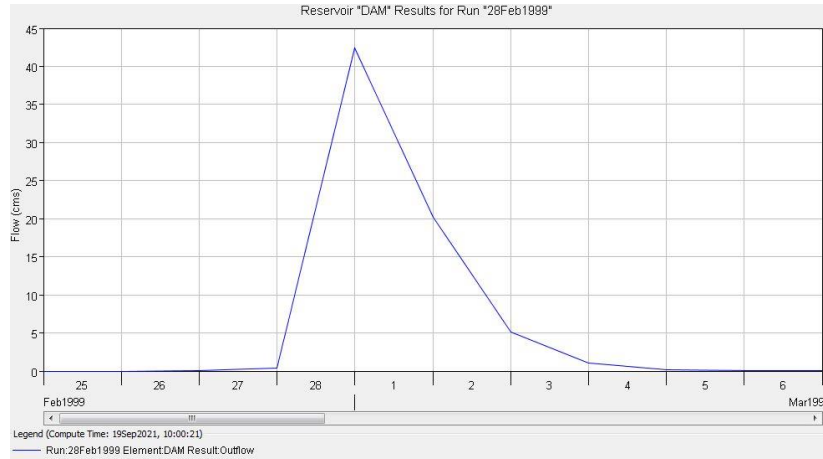
La simulation va nous permettre de calculer les différentes caractéristiques des crues entrantes dans le barrage à savoir : le débit max, le temps de montée et de décrue, le volume de la crue.

Simulations des évènements historiques

# Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

Les figures suivantes illustrent quelques crues extrêmes survenues dans le bassin versant Oued El Hachem :





**Figure 44 : Précipitations enregistrées**

## **8 Interprétation des résultats :**

### **Débits max des crues**

D'après la simulation des précipitations enregistrés dans la station du barrage de Boukerdane nous enregistré un débit max = 74.6 m<sup>3</sup>/s qui reste inférieur au débit fréquentiel centennial (185 m<sup>3</sup>/s). Ceci signifie que la totalité des crues survenues dans le bassin versant Oued El Hachem sont de période de retour moins de 100 ans.



Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

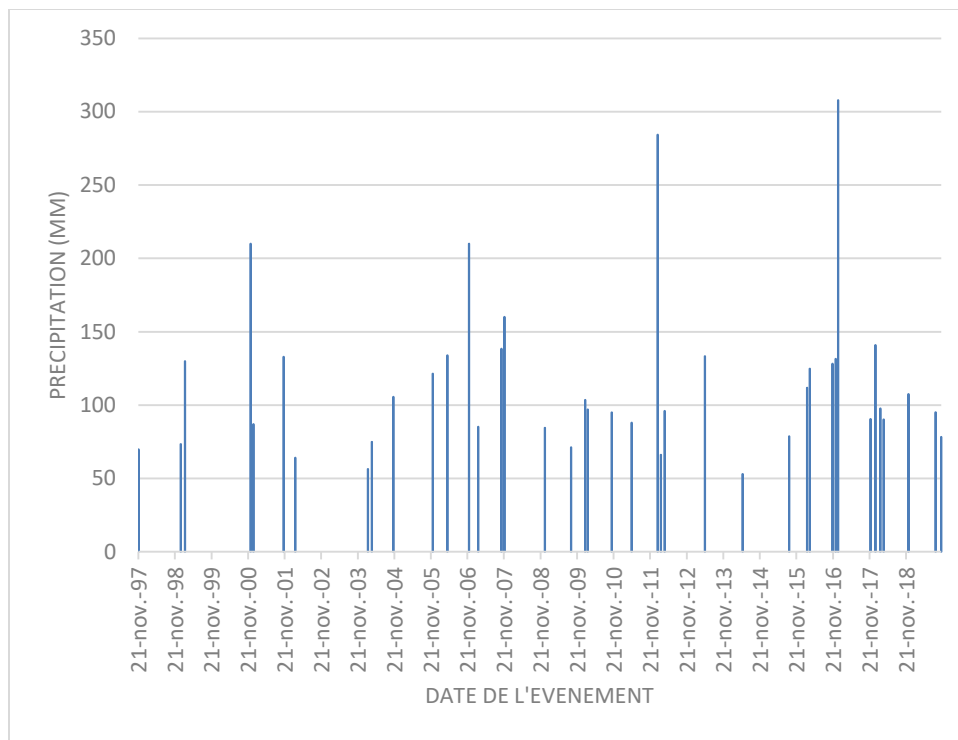


Figure 45 : Figure Précipitation enregistrée

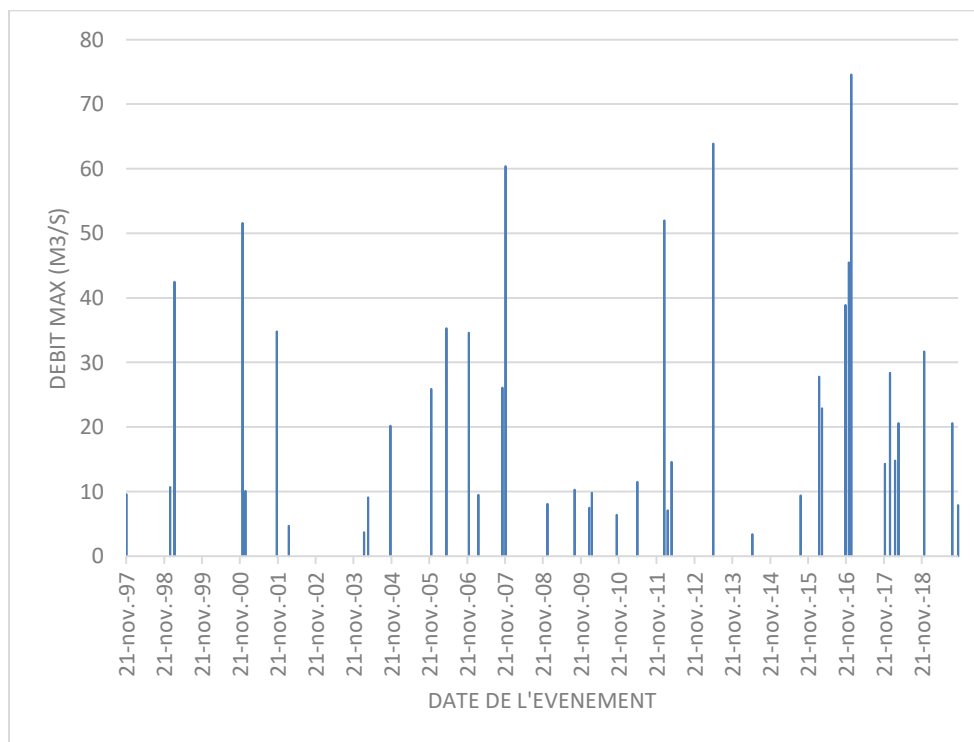
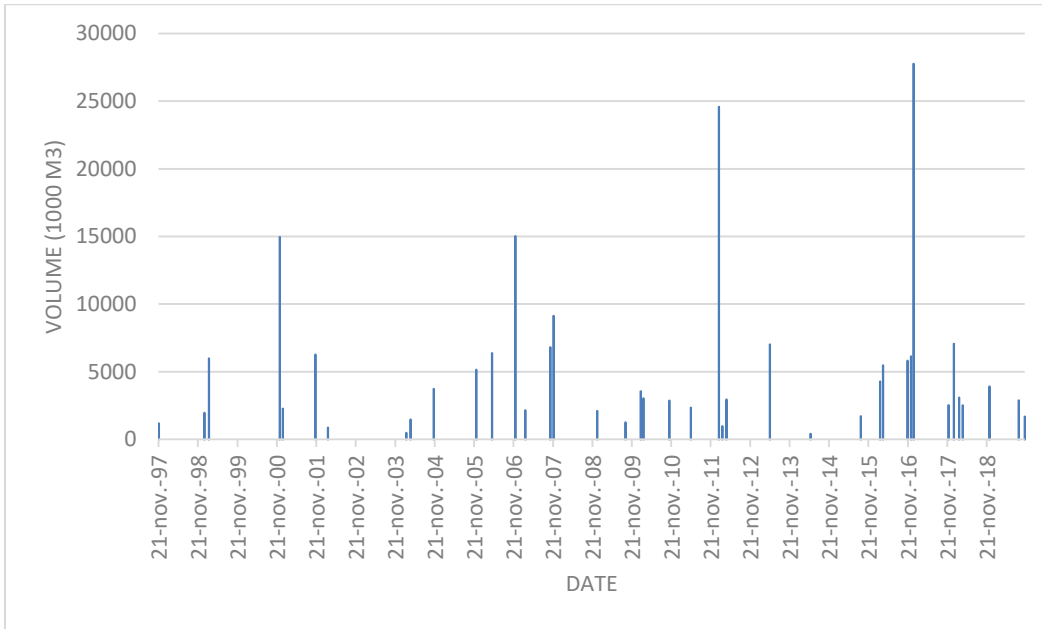


Figure 46 : Débits max simulés

## 2. Volume des crues

Le volume max simulé est de 27.7716 Hm<sup>3</sup> qui correspond à un cumul de précipitation de 307.8 mm. Ce volume est largement supérieur à la crue dix millénaire (13, 4741 Hm<sup>3</sup>). Ceci pourrait être expliqué par l'éventualité de succession de plusieurs averses.



**Figure 47 : Précipitation –débit max**

On constate qu'il y a une disparité entre la précipitation enregistrée et le débit max simulé. Ceci est dû à la répartition temporelle des précipitation. C'est-à-dire un cumul de précipitation de 24 heures ne donne pas le même débit si ce dernier est réparti sur une durée plus longue ou moins courte.

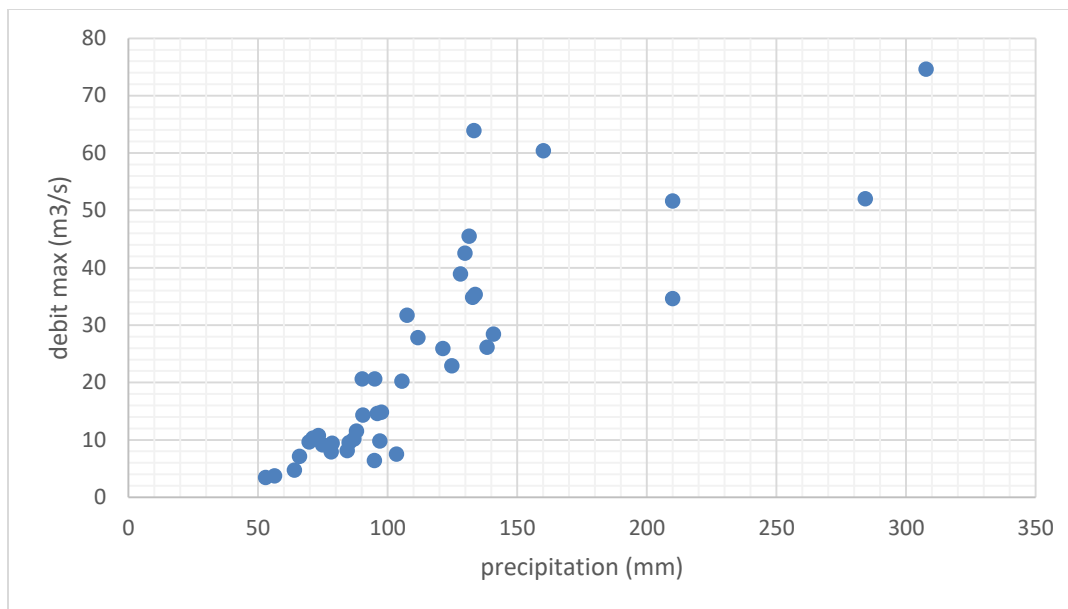
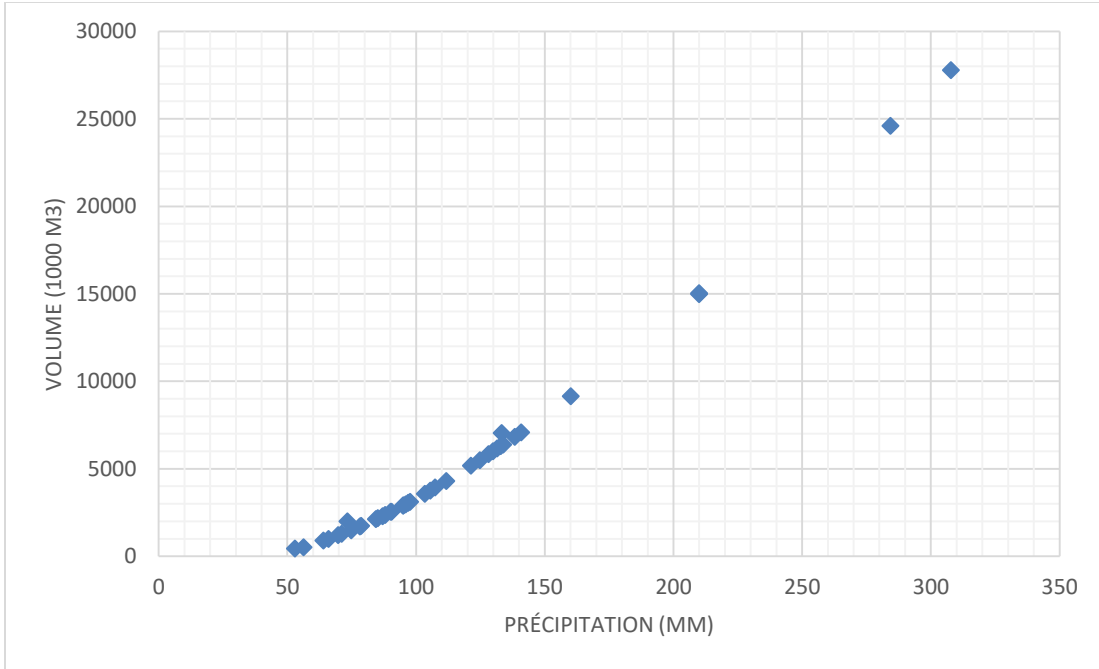


Figure 48 : Débit max en fonction de la précipitation

#### 4. Précipitation-Volume.

D'après les résultats de simulation on constate que le volume est fonction de la précipitation comme montré dans la figure suivante.



**Figure 49 : Volume en fonction de la précipitation**

### Conclusion

Après avoir terminé ce chapitre qui a constitué l'objectif principal de notre travail, nous recommandons aux gestionnaires du barrage de Boukerdane l'utilisation de ce modèle calibré afin de prévoir l'éventuel volume d'eau entrant dans la retenue suite aux alertes météorologiques de précipitations.

## CONCLUSION

---

La modélisation et la simulation des évènements hydrologiques sont indispensables pour pouvoir maîtriser les ressources en eau, les exploiter dans les meilleures conditions et en tirer profit au mieux.

Le bassin versant représente l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique. Ses différentes caractéristiques influent sur l'écoulement de l'eau surtout que ces dernières 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. Etant donné qu'une maîtrise parfaite d'un bassin versant nécessite des moyens colossaux, techniques ou financiers soient-ils, ceci n'empêche pas d'entreprendre, par le biais de l'utilisation des moyens informatiques, des investigations sur le comportement hydraulique lors des évènements pluviaux.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de fin d'étude et qui vise comme objectif la caractérisation des crues du bassin versant Oued El Hachem afin de pouvoir gérer le barrage de Boukerdane, qui se trouve en aval, lors des alertes météorologiques.

Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel HEC HMS comme moyen de modélisation et de simulation des précipitations extrêmes. Nous avons opté pour un modèle hydrologique de calcul du ruissellement direct à savoir le SCS curve number CN pour le calcul de la perte de précipitation, et l'hydrogramme unitaire pour la transformation des pluies en débits au niveau des sous-bassins. Pour la modélisation de l'écoulement dans les talwegs principaux, nous avons opté pour le modèle de Muskingum-Cunge.

En fait, en premier lieu le bassin a été découpé en plusieurs sous bassins versants qui sont au nombre de 18. Le découpage du bassin versant a été exécuté selon la topographie et le réseau hydrographique du bassin. Cela est fait pour faciliter la phase de paramétrage du modèle qui consiste à déterminer et à introduire les caractéristiques géométriques et hydrométriques du bassin versant ainsi que des données nécessaires au fonctionnement du logiciel.

Par la suite, nous avons procédé au calibrage de notre modèle par rapport à un évènement hydrologique extrême survenu dans le bassin versant en optant pour Le Coefficient de Nash–

Sutcliffe efficacité (NSE) qui a été utilisé pour évaluer les performances du modèle afin de simuler l'évènement observé.

Le modèle calibré a été utilisé pour simuler les crues fréquentielles pour constituer une base de données à la caractérisation des crues survenues dans le bassin versant depuis la mise en eau du barrage Boukerdane. La simulation des précipitations dont le cumul dépasse 30 mm nous a permis de générer les caractéristiques des crues résultantes à savoir : le débit max, le temps de montée et de décrue et le volume de la crue. La comparaison des caractéristiques des crues survenues dans le bassin versant avec les caractéristiques des crues fréquentielles nous a permis d'identifier le fonctionnement hydrologique du bassin versant en matière d'évènement extrêmes.

A travers cette étude, on a pu disposer d'une compréhension en détail du fonctionnement hydrologique, de la modélisation et de la simulation, mais aussi saisir l'importance de certains paramètres du bassin notamment l'occupation du sol qui influe considérablement sur le débit à l'exutoire.

Enfin, nous espérons que nous avons ajouté un plus en matière de modélisation et de simulation des crues extrêmes et que notre travail sera valorisé afin de mieux gérer le barrage de Boukerdane en situations extrêmes.

## Références bibliographiques

- ANCTIL F., PERRIN C. et ANDREASSIAN V. (2004).** Impact of the length of observed records on the performance of ANN and of conceptual parsimonious rainfall-runoff forecasting models. *Environmental Modelling & Software*, vol 19, n° 4, 357-368.
- BOX, G.E.P. et JENKINS, G.M. (1976).** Time series analysis - Forecasting and control. Holden Day (Ed.), Oakland, California, 575 p.
- BONELL M. (1993).** Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology*. 150, 217-275p
- BORGA M.; DA ROS D., (1997).** Influence of various weather radar. Correction procedures on mean areal rainfall estimation and rainfall-runoff simulation. *In: Weather radar technology for water resources management*. Sao Paulo, Brazil: IRTCUD/University of Sao Paulo; IHP-UNESCO, 73-86.
- CHE WALLINGFORD. 2005.** PDM Rainfall-Runoff Model. Version 2.2, Center for Ecology and hydrology, Wallingford. (Includes Guide, Practical User Guides, User Manual and training Exercices).
- CERNESSON F. (1993).** Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courante à rare sur petits bassins versants méditerranéens. Thèse de doctorat, Université des sciences et technique du Languedoc. 240 p.
- CLEMENT B, (2006).** Thèse de doctorat Diagramme de pareto.
- CUDENNEC, C (2000)** Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure agronomique de Rennes. France. 261p.
- DUMAS A. (2006).** Méthode de maximisation : estimation des crues maximales probables (CMP). *La Houille Blanche*, n° 5, 74-79.
- ESTUPINA B,V. (2004).** Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair : Application à de petits bassins versants du sud de la France. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse., P254.
- FOUCHIER C. (2010).** Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. Thèse De Doctorat De L'université Montpellier II Sciences Et Techniques Du Languedoc. Thèse préparée au sein du Groupe de Recherche en Hydrologie, Cemagref, Aix-en-Provence., P266.
- HUFTY, A., (2001)** Introduction à la climatologie. De Boeck université. Laval. Canada. 542p.
- LABORDE J.P., (2007)** Elément d'Hydrologie de Surface (ECOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITE DE NICE - SOPHIA ANTIPOLIS).
- LAMAS, J., (1993)** Hydrologie générale. Principes et application, 2ème édition. Gaetan Morin Edition. Québec. Canada 527p.

- MAKHLOUF Z., (1994).** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.
- MARCHENDISE, A (2007)** Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèse sur les processus hydrologiques. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, France. 214p.
- MATHVET, T. (2005)** Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de doctorat. Ecole nationale du génie rural, des eaux et forêts, centre de Paris, France. 463p.
- MEDDI M ; HABIBI B ; BOUCEFIANE A., (2012).** Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales Cas du Bassin Chott-Chergui. *Nature&Technologie Art\_08\_c06*.
- MICHEL C., (1989).** Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux, Cemagref, Antony.
- MOORE, R.J. (1985).** The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. *Hydrological Sciences Journal*, **30**(2), 273-297.
- MORADKHANI H., SOROOSHIAN S., (2005).** Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. *Adv. Water Resour.*, **28**, 135-147.
- MUSY A., (2005).** Hydrologie Générale Prof. André Musy Section SIE et GC 4ème semestre 2005.
- PERRIN C., (2000).** Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Cemagref. Antony, Institut National Polytechnique de Grenoble: 530 p.
- REFSGAARD, J.C. et ABBOTT, M.B. (1996).** The role of distributed hydrological modelling in water resources management - Chapter 1. In: Distributed Hydrological modelling, M. B. Abbott et J. C. Refsgaard (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1-16.
- ROCHE-HYDROLOGIQUE DE SURFACE.** Ed. Gauthier-villars, Paris 1963
- SATIN, M., SELMI, B.(2006).** Guide technique de l'assainissement, 3ème éditions. Edition le Moniteur. Paris. France. 726P
- SINGH, P. (1995).** Hydrologic systems, vol. 1 : Rainfall - Runoff modeling.
- TATE E.; CAUWENBERGHS K., (2004).** An innovative flood forecasting system for the Démer basin: a case study. In: *Proceedings of the 1st international conference on managing rivers in the 21st century: issues & challenges, 21-23 September, Penang, Malaysia.*
- TOUAIBIA, B. (2004).** Manuel pratique d'hydrologie. Edition Madani. Blida. Algérie. 166p.



Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

---

**ZHAO, R.J., ZHUANG, Y., FANG, I.R., (1980).** The Xinanjiang model. In: Hydrological Forecasting (Proc. Oxford Symp., April 1980) IAHS Publ. no 129, 351-356.

## Annexe I

SCS TR-55 Table 2-2d – Runoff curve numbers for arid and semiarid rangelands<sup>1</sup>

Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition <sup>2</sup>	A <sup>3</sup>	B	C	D
Herbaceous – mixture of grass, weeds, and low-growing brush, with brush the minor element.	Poor	80	87	93	
	Fair	71	81	89	
	Good	62	74	85	
Oak-aspen – mountain brush mixture of oak brush, aspen, mountain mahogany, bitter brush, maple, and other brush	Poor	66	74	79	
	Fair	48	57	63	
	Good	30	41	48	
Pinyon-juniper – pinyon, juniper, or both; grass understory.	Poor	75	85	89	
	Fair	58	73	80	
	Good	41	61	71	
Sagebrush with grass understory.	Poor	67	80	85	
	Fair	51	63	70	
	Good	35	47	55	
Desert shrub – major plants include saltbrush, greasewood, creosotebush, blackbrush, bursage, palo verde, mesquite, and cactus.	Poor	63	77	85	88
	Fair	55	72	81	86
	Good	49	68	79	84

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

PARTIE I	GENERALITES.....	2
CHAPITRE I :	HYDROLOGIE GENERALE .....	2
1	Définition : .....	2
2	Les précipitations : .....	3
3	L'évapotranspiration.....	4
3.1	L'évapotranspiration réelle (ETR) :.....	4
3.2	L'évapotranspiration de référence (ET0) : .....	4
4	L'interception et le stockage dans les dépressions.....	5
5	L'infiltration et la percolation .....	5
6	Les écoulements .....	6
7	Le bilan hydrique.....	7
CHAPITRE II :	LE BASSIN VERSANT .....	9
1	Définition du bassin versant .....	9
2	Comportement hydrologique .....	11
2.1	Le temps de concentration .....	14
2.2	Les courbes isochrones.....	14
3.1	Les caractéristiques géométriques .....	16
3.1.1	La surface .....	16
3.1.2	La forme .....	16
3.1.3	Le relief.....	18
3.2	L'indice de pente ip.....	21
3.3	Le réseau hydrographique .....	22
3.3.1	La topologie : structure du réseau et ordre des cours d'eau.....	23
3.4	Les longueurs et les pentes caractéristiques du réseau .....	25
3.4.1	Les longueurs caractéristiques.....	25
3.4.2	Courbe aire-distance.....	27
3.5	Le Degré de développement du réseau.....	27
3.5.1	La densité de drainage .....	27
3.5.2	La densité hydrographique .....	28
4	Les caractéristiques agro-pédo-géologiques.....	29

# Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

4.1	La couverture du sol.....	29
4.1.1	La couverture végétale.....	29
4.1.2	Les plans d'eau.....	29
4.1.3	Les surfaces urbanisées.....	30
4.1.4	Le coefficient de ruissellement.....	30
4.1.5	La nature du sol.....	30
4.2	La géologie du substratum.....	31
5	Informations digitales et modèles numériques.....	32
<b>PARTIE II PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DU LOGICIEL UTILISE .....</b>		<b>34</b>
<b>CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE .....</b>		<b>34</b>
1	Introduction .....	34
2	Situation géographique.....	34
3	Le barrage .....	37
4	Géomorphologie et physiographie du milieu étudié.....	38
5	Coefficient de compacité .....	38
6	Hydrographie .....	39
7	Les caractéristiques.....	39
8	Climatologie .....	40
9	Température .....	41
10	Humidité relative .....	41
11	Les vents.....	42
12	La pluviométrie .....	42
13	Prévision hydrologique .....	43
<b>CHAPITRE II : DESCRIPTION DU LOGICIEL HEC HMS ET MODELES UTILISES .....</b>		<b>44</b>
1	Historique :.....	44
2	Utilité :.....	45
3	Principe général de fonctionnement du système de modélisation hydrologique sur le HEC-HMS :.....	45
4	Modélisation des précipitations .....	47
5	Calcul des volumes de ruissellements .....	47
6	Description du model.....	48
7	Les caractéristiques générales du modèle :.....	49

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

7.1	Le processus de fonctionnement : .....	49
7.2	Structure événementielle du modèle HEC-HMS : .....	50
7.3	L'organisation du modèle : .....	51
7.3.1	Le module structural du bassin : .....	51
7.3.2	Le module météorologique : .....	52
7.3.3	Le module de la fonction de production : .....	53
7.3.4	Le module de la fonction de transfert : .....	54
7.3.5	Le module du débit de base : .....	55
7.3.6	Le module de routage : .....	56
7.3.7	La fonction objective : .....	56
7.3.8	La fonction d'optimisation automatique : .....	57
8	La structure du modèle HEC-HMS choisie : .....	58
8.1	Modèle du ruissellement direct : .....	58
8.2	La méthode de perte : SCS Curve Number (CN) : .....	58
8.3	Les variables : .....	59
8.4	Les paramètres.....	60
8.5	Concept de base l'hydrogramme unitaire de la NRCS : .....	62
8.6	Le débit de base : .....	64
8.7	Modèle de l'écoulement en canal : .....	64
CHAPITRE III : ETUDE HYDROLOGIQUE .....		67
1	Introduction .....	67
2	Caractéristiques morphologiques du bassin versant.....	68
2.1	La surface : .....	68
2.2	Le périmètre : .....	69
2.3	Indice de compacité de Gravelius : .....	70
2.4	Rectangle équivalent : .....	71
2.5	Le temps de concentration Tc : .....	72
2.6	Vitesse moyenne de ruissellement .....	75
3	Analyse des données pluviométriques .....	77
3.1	L'étude des Pluies maximales journalières : .....	77
3.2	Ajustement des pluies maximales journalières .....	80
3.2.1	Choix la loi d'ajustement : .....	80

Caractérisation des crues dans le bassin versant de Oued El Hachem pour la gestion du barrage de Boukerdane en situation d'évènements extrêmes.

4	Pluie de courte durée.....	87
4.1.1	Les intensités maximales .....	89
PARTIE III RESULTAT ET DISCUSSION .....		92
1	Introduction .....	92
2	Choix de l'évènement de calibration .....	93
3	Calibration et validation du modèle .....	94
4	La simulation initiale a donné les résultats suivants :.....	96
5	Performance du modèle .....	98
6	Evaluation du model .....	99
7	Caractérisation des crues du bassin versant Oued El Hachem .....	105
8	Interprétation des résultats : .....	109