

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Ecole Nationale Polytechnique**

**Ecole Doctorale Sciences de l'Eau et Développement Durable**



**Laboratoire de Recherche des Sciences de l'EAU LRSEAU**

**Mémoire de Magister**  
**Option: Sciences de l'Eau**

Préparé par:

**Mme. Tlili Amel**

**Thème**

**APPROCHE METHODOLOGIQUE DE DETERMINATION DU  
DEBIT PLUVIAL POUR UNE AIDE A LA DECISION: CAS DE  
LA REGION DE BENCHAAABANE.  
WILAYA DE BLIDA**

Membres du Jury:

<b>Président</b>	<b>: Mr KETTAB Ahmed</b>	<b>Professeur. ENP. Alger</b>
<b>Rapporteur</b>	<b>: Mme Touaibia Benina</b>	<b>Professeur. ENSH. Blida</b>
<b>Examineurs</b>	<b>: Mr Aidaoui Abdallah</b>	<b>Professeur. ENSA. Alger</b>
	<b>: Mme BENMAAMAR Saadia</b>	<b>Maitre de conférence (A). ENP. Alger</b>
	<b>: Mr.Salah Boualem</b>	<b>Maitre de conférence (A). ENSH. Blida</b>

**Année Universitaire**  
**2012**

## ملخص

الهدف من هذا العمل يشتمل مقارنة لطريقة منهجية لتحديد تدفق مياه الأمطار لدعم اتخاذ القرار، و ذلك في حالة لقياسات المتعلقة بالسيالة. المحطات المغيائية و السيالية كانت موضوع دراسة معمقة في مجال الأمطار قصيرة المدى. المنهجية المعتمدة تتمثل في النمذجة الهيدرولوجية باستخدام البرمجة HEC HMS مطورة من طرف مركز ( hydrologique Engineering centre du corps of ) اعتمادا على وظيفة إنتاج مستمدة من طريقة ( Soil Conservation Service SCS-CN ) ووظيفة نقل مبنية على طريقة الهيدروغراف الموحد التركيبي. تم اختبار منطقة بن شعبان ولاية البلدة نظرا لقابليتها للفيضانات .

**الكلمات الأساسية:** الفيضانات ، النمذجة الهيدرولوجية، وظيفة إنتاج، وظيفة نقل، HEC HMS, SCS CN, تدفق مياه الأمطار، بن شعبان.

## RESUME

L'objectif de ce travail consiste en une approche méthodologique de détermination du débit pluvial pour une aide à la décision, et ce, en absence de stations hydrométriques. Les stations pluviométriques et pluviographiques ont fait l'objet d'une étude approfondie en terme de pluies de courte durée.

La méthodologie adoptée passe par une modélisation hydrologique utilisant le logiciel HEC HMS développé par le centre HEC (*Hydrologic Engineering Center du Corps of Engineers* de l'armée américaine, 2000), s'appuyant sur une fonction de production dérivée de la méthode SCS-CN (Soil Conservation Service) et une fonction de transfert fondée sur la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique.

Le choix a porté sur la région de Ben Chaabane, Wilaya de Blida, vu sa vulnérabilité aux inondations.

**Mots clés:** Inondation, Modélisation pluie-débit, Fonction de production, Fonction de transfert, SCS CN, HEC HMS, Débit de crue, Ben Chaabane.

## ABSTRACT

The objective of this work is a methodological approach determining the storm water flow to a decision management, and that in the absence of gauging stations. The rainfall station and pluviographics have used to study the rainfall of short duration.

The methodology to be adopted through a hydrologic modeling using HEC HMS software developed by the centre HEC (*Hydrologic Engineering Center, Corps of Engineering U.S. Army, 2000*) based on a production function derived from the SCS-CN (Soil Conservation Service) and a transfer function based on the method of synthetic unit hydrograph.

The selection focused on the region of Ben Chaabane, Wilaya of Blida, given its vulnerability to flooding.

**Key words:** Flood, rainfall-runoff modeling, Production function, Transfer function, SCS-CN, HEC HMS, Flood flows, Ben Chaabane.

## Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma reconnaissance à ma directrice de thèse Mme TOUAIBIA Bénina, Professeur à l'ENSH, pour son suivi et son soutien.

Je suis reconnaissante à Monsieur le professeur KETTAB Ahmed, directeur du laboratoire de Recherche des sciences de l'eau LRS-Eau, pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à Monsieur Boualem Saleh, Maître de conférence (A) à l'ENSH. Blida, Madame Ben MAAMAR Saida, Maître de conférence (A) à l'ENP Alger et Mr AIDAOUI Abdallal, Professeur à l'ENSA Alger, d'avoir répondu favorablement pour faire partie du jury.

Je remercie Monsieur Mustapha Boukhelifa pour son aide précieuse, ses remarques judicieuses, sa disponibilité et ses encouragements.

Je tiens à remercier Mr Salhi Hamza, Ingénieur à l'ANRH (Blida) et Mr Bouchoul Ingénieur à l'ANRH Alger, d'avoir mis à ma disposition toutes les données cartographiques dont j'ai eu besoin dans mon travail .

Je remercie également Mr le subdivisionnaire de Oued El Alleug ainsi que mes collègues de travail de m'avoir encouragé et soutenu durant toutes ces années d'étude de magister.

Je remercie ma famille et surtout mes parents et mon mari pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur patience durant les étapes difficiles de mes études.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenue de près comme de loin, tout au long de cette année, qui se reconnaîtront.

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents Allel et Nacéra que je ne remercierai jamais assez, d'être les meilleurs parents du monde, qui ont tant sacrifié pour moi et de m'avoir toujours encouragé et soutenue dans mes études.

A ma sœur Samia qui m'a été d'une aide précieuse dans ce mémoire de magister, et a ma sœur Meriem et mon petit frère Omar à qui je souhaite tout le bonheur du monde, avec beaucoup de succès et de réussite

A mon mari Sidali et toute ma belle famille qui m'ont encouragé durant mes études.

A ma belle sœur Haifa qui m'a beaucoup encouragée et soutenue.

Et enfin à mon adorable petit garçon Mohamed Aymene que j'aime très fort.

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b>	1
<b>CHAPITRE I: THEORIE DES INONDATIONS</b>	
I-1-définition de l'inondation	3
I.2-le cycle hydrologique	3
I.3-le cours d'eau	4
I.4- les types d'inondations	6
I.5- genèse des crues	9
I.5.1- Formation des crues	10
I.5.2-Paramètres d'une inondation	10
I.6-Conséquences des inondations	11
I.7-Stratégies de lutte contre les inondations	12
I.7.1-Préventivement	12
I.7.2-Les moyens curatifs	13
I-8- Les catastrophes naturelles	14
I.9-Les inondations en Algérie	17
Conclusion	21
<b>CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION</b>	
INTRODUCTION	22
II.1-Définition de la modélisation	22
II.2- Composants d'un modèle hydrologique	22
II.3-Utilisation des modèles mathématiques en hydrologie	23
II.4-Les différents types des modèles hydrologiques	24
II.5-Choix d'un modèle hydrologique	25

II.6-Construction et validation d'un modèle hydrologique	26
II.6.1- Construction et Complexité	29
II.7-Etude comparative des modèles hydrologiques	30
Conclusion	32
<b>CHAPITRE III: PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE</b>	
<b>Introduction</b>	33
III.1-Caractéristiques des bassins versants	34
III.1.1-Caractérisatiques physiques	34
III.1.2-Caractéristiques morphométriques	36
III.1.3-Caractéristiques de forme	37
1- Indice de compacité de Gravelius Kc	37
2- Rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius	37
III.1.4- Le relief	37
1-Courbe hypsométrique	37
2- Indice de pente globale Ig	37
3- Pente moyenne des bassins versants (Im)	37
4- Pente du cours d'eau principal	37
5- Densité de drainage (D <sub>d</sub> )	38
6- Le temps de concentration Tc	38
III.2-Caractéristiques climatologiques	39
III.2.1-Le climat	39
III.2.2-L'évaporation	40
III.3-Géologie de la zone d'étude	40
III.3.1-Caractéristiques géologiques et géotechniques	41
III.3.2-Géomorphologie	41
III.3.3-Aperçu stratigraphique	42
III.4-Banque de donnée	42
III.4.1-Données sur l'occupation du sol	42
III.4.2-Données pluviométriques	45
III.4.3-Les données hydrométriques	45
III.4.4-Pluies de courtes durée: Averses	45

Conclusion	45
<b>CHAPITRE IV: ETUDE STATISTIQUE DES EVENEMENTS PLUVIEUX EXTREMES</b>	
Introduction	46
IV.1- Présentation des données pluviométriques de la zone d'étude	46
IV.2- Présentation des données pluviographiques de la zone d'étude	49
IV.3- Constitution de l'échantillon d'étude	54
IV.4- Modélisation des courbes intensité-durée-fréquence (I-D-F)	54
IV.4.1- Modélisation des courbes IDF dérivées des SMA	55
IV.4.2- Modélisation des courbes IDF dérivées de la totalité des averses	63
Conclusion	61
<b>CHAPITRE V: MODELISATION DE LA TRANSFORMATION PLUIE- DEBIT</b>	
Introduction	62
V.1- Présentation de la pluie	62
V.2- Modélisation de la transformation pluie-débit	65
V.2.1. Modélisation de la fonction de production	66
V.2.2. Modélisation de la fonction de transfert	72
V.3- Application de la modélisation pluie débit avec le logiciel HEC HMS pour le bassin versant de Ben Chaabane	73
Comparaison des résultats obtenus avec d'autres études	83
Conclusion	84
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	85
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	87

## Liste des Tableaux

Tableau III-1: Caractéristiques hydromorphométriques des bassins versants	39
Tableau III-2 : Températures moyennes mensuelles	39
Tableau III-3 : Répartition mensuelle de l'évaporation	40
Tableau III-4 : Vitesses du vent mensuelles moyennes (m/s)	40
Tableau III-5 : Stations pluviométriques	45
Tableau IV.1: Ajustement des pluies moyennes annuelles à la loi Normale (Station de Boufarik)	47
Tableau IV.2: Ajustement des $p_{\max,j}$ à une loi Log-Normale (Station de Boufarik)	48
Tableau IV.3: Ajustement à la loi de Galton (station Mouzaia)	49
Tableau IV.4 : Comparaison des $P_{\max,j}$ de la station de Mouzaia et celle de Boufarik Pépinière	50
Tableau IV.5 Nombre d'averses (classification mensuelle)	52
Tableau IV.6: Nombre d'averses par durée de référence	53
Tableau IV.7 : Quantiles des SMA	55
Tableau IV.8: Test de Pearson pour $\alpha=5\%$	56
Tableau IV.9: Intensités moyennes maximales des SMA	57
Tableau IV.10: Equations des courbes IDF pour chaque période de retour	59
Tableau IV. 11: Quantiles pour la totalité des averses	59
Tableau IV. 12: Intensités moyennes maximales pour la totalité des averses	61
Tableau V.1: Hauteurs de pluies (en mm) pour les périodes de retour de 10, 50 et 100 ans	63
Tableau V.2 Indices de ruissellement CN pour différentes occupations du sol	69
Tableau V.3: Classification des classes de conditions antécédentes d'humidité pour la méthode SCS de calcul des pertes.	70

### Liste des figures

Figure I.1: Le cycle de l'eau	4
Figure I.2: Lit mineur, lit moyen, lit majeur	6
Figure I.3: Inondation par débordement direct d'une rivière qui touche les vallées entières	7
Figure I. 4: Inondation par accumulation d'eau ruisselée	7
Figure I.5: Inondation par remonté dans les réseaux d'assainissement dans les points bas localisés	8
Figure I.6: Inondation par remontée de nappe phréatique	9
Figure I.7:Inondation de Haiti	16
Figure I.8: Inondation de Bab El Oued	19
Figure I.9:Inondation de Guardaia	20
Figure II.1: Composant d'un modèle (Singh,1995)	23
Figure II.2: Classification des modèles hydrologiques selon Anctil et al, 2005	25
Figure II.3:Schéma de construction et de validation d'un modèle hydrologique (Refsgaard, 1997)	28
Figure II.4: Schéma de complexité d'un modèle hydrologique (Wagener et al.,2001)	30
Figure III.1: Plan de situation de la ville de Ben Chaabane	33
Figure III-2: Délimitation du bassin versant	35
Figure III.3: Vue satellite de Ben Chaabane	43
Figure IV.1: Ajustement des pluies annuelles à une loi Normale (Station de Boufarik)	47
	49

Figure IV.2: Ajustement des $P_{\max,j}$ à une loi Log-Normale (station de Boufarik)	
Figure IV.3: Ajustement des $P_{\max,j}$ à une loi Log-Normale (station de Mouzaia)	50
Figure IV.4: Courbse IDF dérivées des SMA	58
Figure IV.5: Courbes IDF dérivées de la totalité des averses	60
Figure IV.1: Courbes "Hauteur Durée Fréquence" pour les période de retour 10, 50 et 100 ans	63
Figure IV.2: Transformation de la pluie brute en pluie nette	64
Figure V.3: Hydrogramme de crue et hyétogrammes de pluie brute et nette	76
Figure V.4: Hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant de Ben Chaabane pour T=10 ans, T=50 ans et T=100 ans	82

## Nomenclature

A: Surface du bassin versant

b: exposant climatique

CN: Numéro de la courbe de saturation

$D_d$ : Densité de drainage

F(X): Fréquence au non dépassement

H: Hauteur (mm)

H moy: Hauteur moyenne

$\bar{i}$ : Intensité moyenne maximale

$I_m$ : Pente du bassin versant (mm/mm)

Kc: Indice de compacité de Gravelius

K: Nombre de classe

L: Longueur du rectangle équivalent

l: Largeur du rectangle équivalent

m: nombre de paramètre de la loi de probabilité

T: Période de retour

$T_c$ : temps de concentration

P: Précipitation (mm)

P: Périmètre (Km)

u: Variable réduite de gauss

$V_R$ : Vitesse de ruissellement

$x_0$ : Mode

$\bar{x}$ : Moyenne

$\sigma$ : Variance

$\gamma$ : Degrés de liberté

## INTRODUCTION

L'Algérie est l'un des pays confrontés aux phénomènes de crues et d'inondations qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social.

Plusieurs régions du pays sont régulièrement menacées par ces catastrophes hydrologiques dont les effets sont souvent intensifiés par une urbanisation anarchique impliquant une occupation des terres inondées et même les rives des oueds.

Le centre de Ben Chaabane constitue une zone de confluence, remplie de dépôts alluvionnaires formant une plaine plate ce qui la rend vulnérable aux inondations. Ce phénomène constitue une préoccupation majeure pour les autorités locales, ainsi qu'en témoigne l'implication de la plupart des services locaux, inspection de l'environnement, l'agriculture, conservation des forêts, l'université et d'autres organismes spécialisés, dans un programme d'activité commun.

Ce travail s'insère dans l'approche de la gestion de risque contre les inondations. L'objectif de ce travail repose sur la détermination de la réponse hydrologique du bassin versant de Ben Chaabane à des événements pluvieux, afin de connaître l'évolution au cours du temps de ses caractéristiques d'écoulement. Pour ce faire, une modélisation pluie-débit est établie, cette dernière est subdivisée en deux composantes; la modélisation de la pluie et la modélisation pluie-débit.

La modélisation de la pluie consiste à modéliser les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence). Cette approche est de première importance dans le domaine hydrologique, car la détermination des paramètres de la pluie probable est nécessaire pour le dimensionnement des ouvrages projetés. Les autorités ont, elles, également besoins de ces mêmes paramètres pour décider des objectifs de protection.

Le deuxième aspect de la modélisation consiste en la transformation de pluie en débit utilisant deux fonctions de transformation indépendantes: la pluie observée est tout d'abord transformée en eau disponible pour le ruissellement au moyen d'une fonction de production; le transfert de cette eau du lieu de production à l'exutoire du bassin versant, se fait au moyen d'une fonction de transfert.

L'étude menée se subdivise en cinq étapes organisées en chapitres, à savoir:

Le premier chapitre évoque l'aspect général des inondations avec ses conséquences.

Le deuxième chapitre concerne la présentation de la modélisation hydrologique avec toute sa diversité, son élaboration et le choix du type de modèle utilisé.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude suivie d'une présentation des données de bases nécessaires.

Le quatrième chapitre traite l'étude statistique des événements pluvieux extrêmes; c'est la phase la plus importante dans la constitution des échantillons. Ces derniers sont déterminés après un travail fastidieux de dépouillement des pluviogrammes choisis pour une modélisation

des courbes "Intensité Durée Fréquence" "IDF" utilisées dans le cinquième chapitre de modélisation hydrologique.

Et enfin, le cinquième chapitre est consacré essentiellement à l'application de la transformation de la pluie en débit et ceci par la détermination de deux fonctions, celle de production qui transforme la pluie brute en pluie nette, et l'autre de transfert qui assure le transfert de cette pluie nette à l'exutoire du bassin versant.

### I.1-Définition de l'inondation

D'après la définition donnée dans le dossier d'information « Inondation » (MEDD-PRIM@: « L'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau ».

D'après le même dossier (Renaud .H, 2006): « Au sens large, les inondations comprennent les débordements d'un cours d'eau, les remontées de nappes, les ruissellements résultant de fortes pluies d'orages, les inondations par rupture d'ouvrages de protection, les inondations estuariennes résultant de la conjonction de fortes marées, de situations dépressionnaires et de la crue des fleuves ».

L'élément majeur à l'origine d'une inondation de plaine est la chute de précipitations importantes sur le bassin versant (Figure I.1). D'après le site Internet du Regroupement des Associations Pour la Protection de l'Environnement des Lacs et des cours d'eau de l'Estrie et du haut bassin de la rivière Saint-François (RAPPEL@), le bassin versant représente : « l'ensemble d'un territoire drainé par un cours d'eau et ses affluents. Son contour est délimité par la ligne de partage des eaux qui passe par les différents sommets et qui détermine la direction de l'écoulement des eaux de surface. En aval, sa limite est définie par son exutoire ».

De façon schématique, au cours de fortes précipitations, une partie de l'eau s'infiltré dans le sol, le reste ruisselle sur les versants et est ainsi acheminé vers les cours d'eau (Figure I.1). Lorsqu'une quantité d'eau très importante parvient au cours d'eau celui-ci déborde de son lit « habituel » (ou lit mineur) et donne ainsi naissance au phénomène d'inondation.

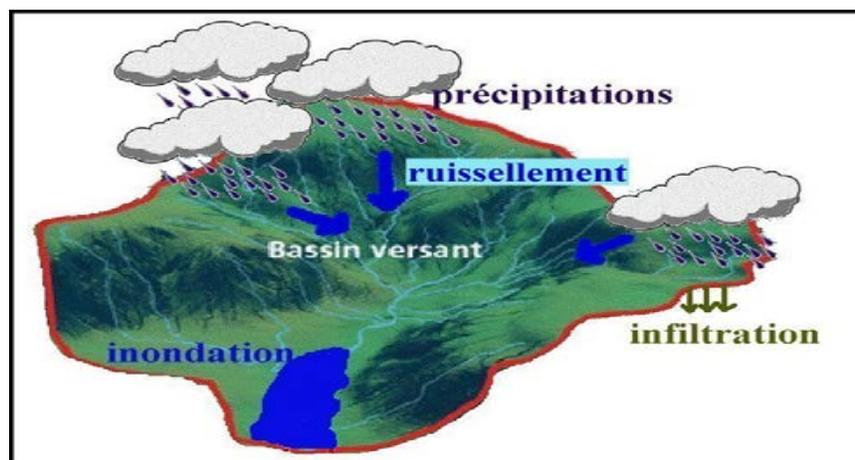


Figure I.1 : La genèse du phénomène d'inondation (débordement de cours d'eau).  
(Renaud .H, 2006)

**I.2-Le cycle hydrologique**

Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère, à la surface du sol et dans le sous-sol. Chaque particule n'effectue qu'une partie de ce cycle et avec des durées très variables : une goutte de pluie peut retourner à l'océan en quelques jours alors que sous forme de neige, en montagne, elle pourra mettre des dizaines d'années. (LABORDE. J.P.2000)

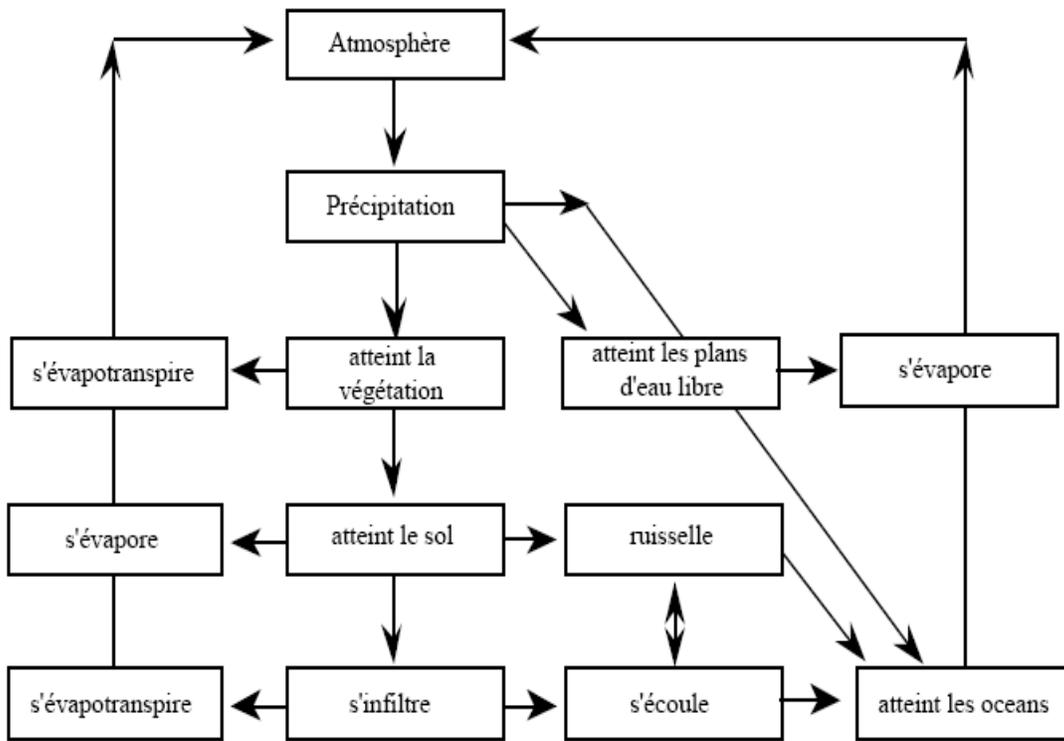
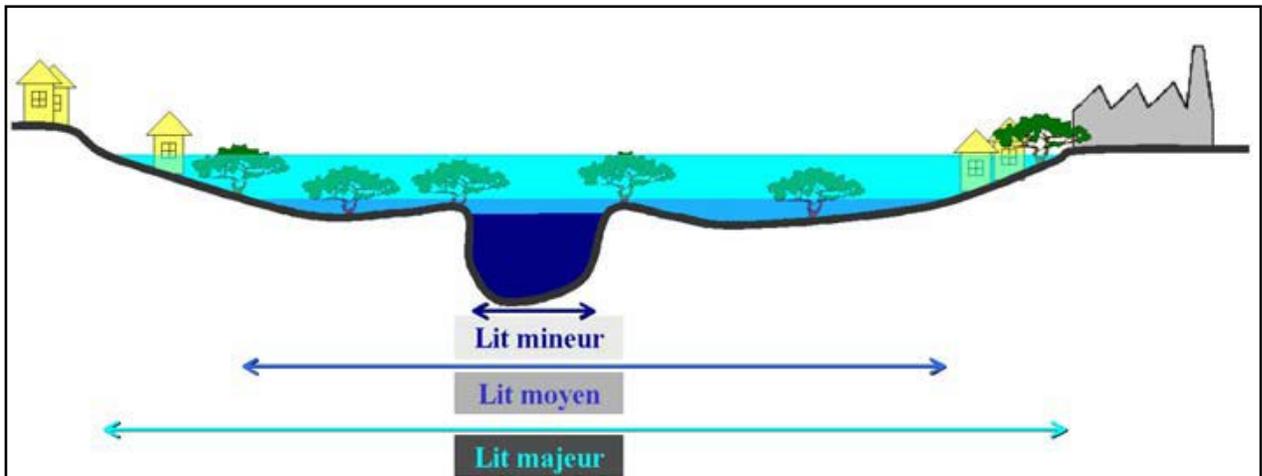


Figure I.2: Le cycle de l'eau (LABORDE. J.P.2000)

### **I.3-Le cours d'eau**

En terme d'écoulement, la plaine alluviale est souvent décomposée en trois zones : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur de la rivière (Figure 1.4). Le lit mineur correspond à la zone d'écoulement du cours d'eau hors débordement. Le lit moyen correspond à la zone d'écoulement pour des crues d'occurrences relativement faibles. Le lit majeur contient toutes les zones de la plaine dans lesquelles le cours d'eau est susceptible de s'écouler et de déborder. (Renaud, H, 2006)



**Figure I.3 : Représentation schématique des lits mineur, moyen et majeur en plaine alluviale. (Renaud, H, 2006)**

## **1.4-TYPES D'INONDATION**

### **1.4.1- Montée lente des eaux en région de plaine**

Les inondations de plaine se produisent lorsque la rivière sort lentement de son lit mineur et inonde la plaine pendant une période relativement longue (Benaouadj, A,2011).

La rivière occupe son lit moyen et éventuellement son lit majeur. Après une ou plusieurs années pluvieuses, il arrive que la nappe affleure et qu'une inondation spontanée se produise : il s'agit d'inondation par remontée de nappe phréatique. Ce phénomène concerne particulièrement les terrains bas ou mal drainés (MEDD, 2004). Sa dynamique lente perdure plusieurs semaines (Fig. I.6).

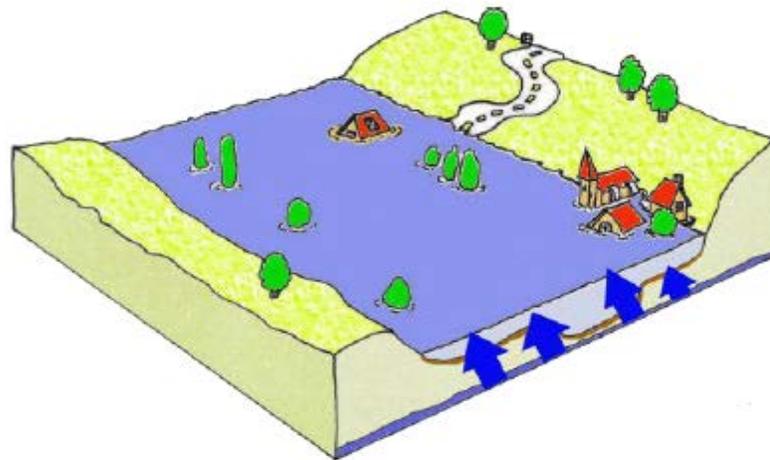


Figure I.6 : Les inondations de plaine par la montée de la nappe (Merabet, 2008)

Il existe deux types de débordements dans l'inondation en région de la plaine :

**Par débordement direct :** Le cours d'eau sort de son lit mineur pour occuper son lit majeur.

**Par débordement indirect :** La rivière sort de son lit mineur lentement et peut inonder la plaine pendant une période relativement longue. Les eaux remontent par les nappes alluviales, les réseaux d'assainissement d'eaux pluviales.

#### 1.4.2 La formation rapide de crues torrentielles

Lorsque des précipitations intenses, telles des averses violentes, tombent sur tout un bassin versant, les eaux ruissellent et se concentrent rapidement dans le cours d'eau, engendrant des crues torrentielles brutales et violentes (MEDD, 2004 et DGPC, 2007) (Fig. I.7).

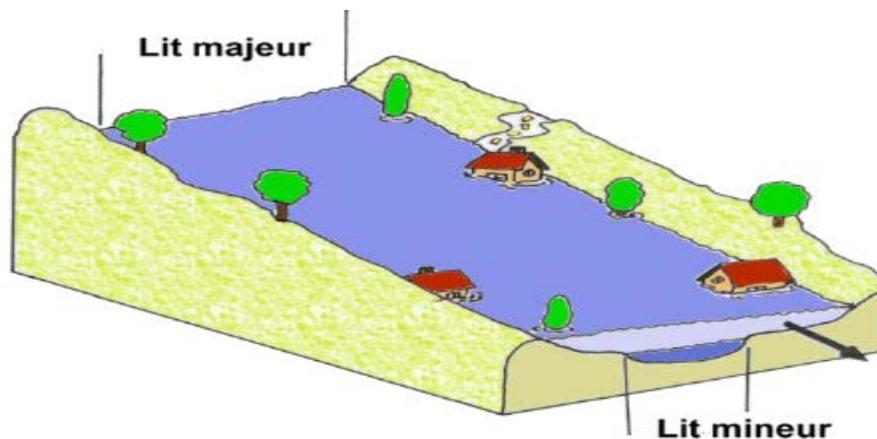


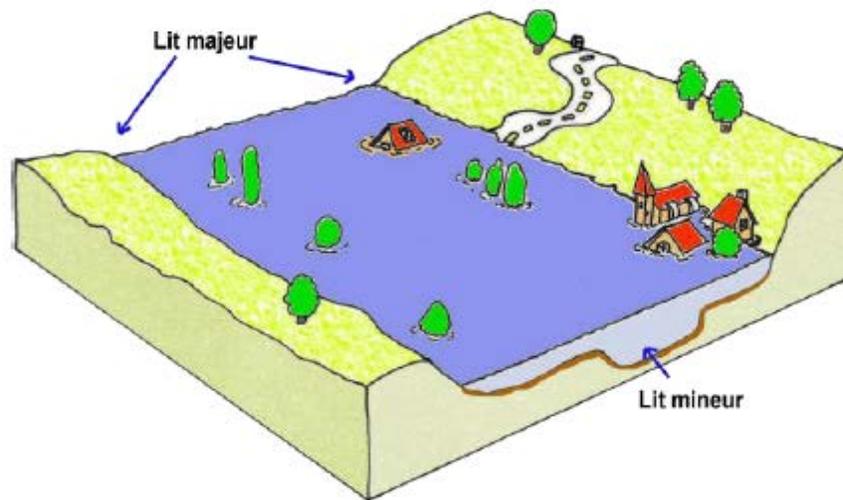
Figure I.7 : Les inondations des crues torrentielles (Merabet, 2008)

Le cours d'eau transporte de grandes quantités de sédiments et de flottants (bois morts, etc.), se traduisant par une forte érosion du lit et un dépôt des matières transportées. Ces dernières peuvent former des barrages, appelés embâcles, qui, s'ils viennent à céder, libèrent une énorme vague pouvant être mortelle.

Ce phénomène se rencontre dans les zones montagneuses, mais aussi sur des rivières alimentées par des pluies de grande intensité.

### **1.4.3-Par stagnation d'eaux pluviales**

La stagnation d'eaux pluviales est liée à une capacité insuffisante d'infiltration, d'évacuation des sols ou du réseau d'eaux pluviales lors de pluies anormales (Fig. I.8).



**Figure I.8 : Les inondations par stagnation des eaux pluviales (Merabet, 2008)**

### **1.4.4Le ruissellement pluvial en secteur urbain**

Le ruissellement est la circulation de l'eau qui se produit sur les versants en dehors du réseau hydrographique lors d'un événement pluvieux.

Sa concentration provoque une montée rapide des débits des cours d'eau, pouvant être amplifiée par la contribution des nappes souterraines (MEDD, 2004 et DGPC, 2007)(Fig. I.9).



Figure I.9 : Inondations par ruissellement pluvial en secteur urbain (Merabet, 2008)

Il existe différents types de ruissellement :

- Le ruissellement diffus dont l'épaisseur est faible et dont les filets d'eau butent et se divisent sur le moindre obstacle.
- Le ruissellement concentré organisé en rigoles ou ravins parallèles le long de la plus grande pente. Il commence à éroder et peut marquer temporairement sa trace sur le versant.
- Le ruissellement en nappe, plutôt fréquent sur les pentes faibles, occupe toute la surface du versant.

Le ruissellement est d'autant plus important que les terrains sont plus imperméables, le tapis végétal plus faible, la pente plus forte et les précipitations plus violentes. L'intervention humaine est parfois source d'aggravation de ce phénomène.

L'imperméabilisation du sol par les aménagements (bâtiments, voiries, parkings, etc.) et par les pratiques culturales limite l'infiltration des précipitations et accentue le ruissellement. Ceci occasionne souvent la saturation et le refoulement du réseau d'assainissement des eaux pluviales. Il en résulte des écoulements plus ou moins importants et souvent rapides.

### I.5- Genèse des crues

Les crues sont le fruit de plusieurs processus simultanés dont l'importance relative varie en fonction des différentes conditions rencontrées sur le terrain, telles la topographie, l'occupation du sol, ( Beckers. E , 2010), la texture du sol en place, etc.

La première théorie physique de genèse des crues a été développée par Horton (1933). Cette théorie stipule que :tant que l'intensité de la pluie est inférieure à la capacité d'infiltration du sol, toute l'eau précipitée s'infiltré, mais dès que cette capacité est dépassée, l'excédent

ruisselle sur le sol et participe directement à la crue. Le taux d'infiltration du sol varie l'humidité du sol augmente. Depuis l'émergence de cette théorie, très appréciée, des recherches ont montré qu'une partie, parfois majoritaire, de l'eau génératrice de crue a d'abord transité par le sol (Hursh, 1936). Divers phénomènes ont été avancés pour expliquer la participation importante de l'eau souterraine à la crue, nombre de synthèses dans la littérature y faisant référence (notamment Ambroise, 1998a ; Ambroise, 1998c ; Musy & al., 1998).

Les écoulements au sein d'un bassin versant peuvent se répartir en différentes catégories selon leur cheminement : écoulement de surface, écoulement de subsurface et écoulement souterrain.

La théorie du ruissellement par saturation a été développée en contestation de celle de Horton, des observations de terrain mettant en doute le processus hortonien, et postule que le ruissellement qui contribue à la crue est produit sur des zones saturées variables en relation avec la profondeur de la nappe et la topographie (Cappus, 19604 ; Dunne & al., 19705).

L'origine des écoulements de subsurface est plurielle et encore sujette à discussion. Un des processus identifiés est l'écoulement hypodermique par accroissement local de la conductivité hydraulique latérale. L'eau qui percole rencontre une discontinuité texturale ou structurale du sol favorisant son accumulation sus-jacente et donc l'augmentation locale de la conductivité hydraulique et produit un écoulement latéral vers le cours d'eau, avec éventuellement apparition d'une nappe perchée lorsque l'on passe en conditions saturées. L'écoulement en macropores a été évoqué déjà par Hursch en 1944. Les macropores, pores non capillaires (ne fonctionnant qu'en conditions saturées sous la seule force gravitaire), peuvent favoriser un écoulement vertical ou latéral rapide, en fonction de leur orientation préférentielle, en court circuitant la matrice microporeuse du sol. Un autre, celui-ci considère que l'eau de pluie qui arrive sur le versant pousse par effet piston l'eau déjà présente et transmet une onde de pression qui provoque une sortie simultanée d'eau souterraine en bas de versant. Et finalement, le phénomène d'intumescence de nappe, ou remontée de la frange capillaire, explique également en partie la présence d'eau souterraine dans la crue.

Les chemins empruntés par les précipitations lors de la formation des crues sont nombreux et encore sujets à discussion. Néanmoins, il ressort de ces études que les écoulements horizontaux de surface et hypodermiques, ainsi que les écoulements en macropores, jouent un rôle majeur dans la formation de la crue, l'importance relative de chacun de ces processus étant fonction des sols en place de leur pente, ainsi que de leur occupation et structure.

### **I.6- Conséquences des inondations**

Les inondations, notamment dans les pays pauvres font souvent beaucoup de victimes et de dégât matériels. Elles sont responsables de 40 % des accidents mortels dus aux catastrophes naturelles dans le monde. Mais, dans certaines régions du globe, les inondations font partie du

cycle naturel des saisons. Durant plus de deux millénaires, les crues du Nil ont fait prospérer la civilisation égyptienne et de nombreuses zones tropicales sont encore tributaires des crues annuelles, et des moussons qui fertilisent et irriguent les cultures, en reconstituant des réserves d'eau pour la saison sèche, par l'épandage des crues.

- **Conséquences des inondations sur la santé**

La probabilité accrue que surviennent des inondations à l'avenir, ainsi que les événements récents qu'ont connus l'Allemagne, l'Autriche, la Fédération de Russie, la Hongrie et la République tchèque, soulèvent le problème des conséquences que les crues peuvent avoir sur la santé humaine. (Centre européen de l'environnement et de la santé, 2002)

Les effets sanitaires se répartissent en trois catégories, selon le moment où ils surviennent :

- ✓ Effets survenant durant ou immédiatement après l'inondation;
- ✓ Effets se développant dans les jours voire les premières semaines suivant l'inondation ;
- ✓ Effets à plus long terme, susceptibles d'apparaître après des mois ou des années et/ou durer des mois voire des années.

## **I.7-Stratégies de lutte contre les inondations**

Elle est basée sur une évaluation des flux avec une double approche ; préventive, et curative, en élaborant un Atlas des zones inondables (SAFEGE, 2009) .

### **I.7.1-Préventivement**

Les collectivités et individus peuvent chercher à restaurer des zones d'expansion de crue suffisantes. Puisqu'il y a inadéquation entre la quantité d'eau à évacuer et les capacités hydrauliques, la gestion des inondations vise aussi à :

#### **L'aménagement des bassins versants**

Du point de vue de la prévention des crues, l'aménagement du bassin versant apparaît comme fondamental aussi bien au niveau des versants que du lit proprement dit.

##### **Au niveau des versants**

Le reboisement apparaît comme la première solution envisageable pour la protection des versants. Cet aspect est particulièrement net dans les forêts tempérées car la forêt intercepte la pluie (réduction ou anéantissement de l'effet "splash) et retarde la fonte de neige sous son couvert, accroît l'évapotranspiration (en particulier en été où la transpiration des arbres contribue à l'assèchement des sols et à l'abaissement du niveau des nappes phréatiques, au bénéfice de la rétention). L'humus forestier qui est relativement abondant, est capable d'absorber jusqu'à 10 fois son poids d'eau. Inversement la destruction d'une forêt provoque un accroissement

annuel de l'écoulement, mais aussi l'apparition de ravins. En cas d'absence de couverture végétale protectrice importante, l'érosion (depuis l'effet "splash" jusqu'à l'écoulement concentré) se développe.

### **Au niveau du lit**

La correction des lits est souvent la solution proposée par les ingénieurs. On cherche à accroître la section mouillée en élargissant des digues, etc. Tous ces travaux ont pour but de minorer les niveaux, encore faut-il que ces interventions soient précédées d'une connaissance préalable de la crue maximale possible, et mieux encore du bassin versant. Le recalibrage qui consiste à rectifier la section d'écoulement et à augmenter le débit, permet d'évacuer plus rapidement la crue, mais déplace le risque sur le secteur aval, des zones intermédiaires ne permettant pas de stocker une partie des eaux.

Le mieux est de chercher à étaler la crue que la contenir. Un bon plan d'aménagement devrait donc examiner avec soin la solution des retenues de ralentissement, dans toute les variantes axiales ou latérales selon les configurations locales et non pas seulement celles des barrages réservoirs.

En ce qui concerne le lit proprement dit, il convient de cesser tout dragage et d'interdire toute gravière de basse terrasse, notamment dans les zones amont des agglomérations.

### **Les observations de terrains**

Il s'agit d'analyser, aux différents endroits des bassins versants susceptibles de subir une inondation, les paramètres suivants:

- La délimitation précise des secteurs inondables et ce pour chaque type de crues;
- La topologie des inondations (pointe, durée, récurrence, intensité);
- L'ampleur de l'inondation possible;
- Limiter l'imperméabilisation des sols en milieu urbain (infiltration des eaux de toitures et de ruissellement après dépollution le cas échéant), création de noues et d'espaces verts susceptibles de servir de zone tampon.
- En milieu rural, des pratiques culturelles plus adaptées et une gestion anticipatoire du ruissellement visant à stocker l'eau dès le haut du bassin versant , et en la freinant et l'infiltrant mieux via un réseau de talus, haies, noues, prairies et prés inondables et fossés, permet de ne pas grossir les inondations en aval.

### **La mise en place d'un service d'annonce des crues**

La prévision porte sur la collecte et la transmission des données pluviométriques et hydrométriques. Bien entendu, l'efficacité des systèmes d'alerte dépend de leur qualité et des moyens mis à la disposition des spécialistes. Il est très important de multiplier et

d'accumuler des données dans la plupart des cas. Les délais pour alerter les populations se réduisent à quelques heures voir moins.

### **I.7.2-Les moyens curatifs**

Ce sont essentiellement les pompiers ou équipes de sécurité civile qui dénoient les caves et aident la population ou les entreprises.

Des approches globales sont nécessaires. Elles sont en Europe encouragées par la Directive cadre sur l'eau précisée en 2007 par une directive sur les inondations (qui impose une évaluation cartographiée des enjeux, risques et conséquences (et donc des zones inondables) (UE, 2007). Ceci doit se faire par district hydrographique et/ou unité de gestion, avec pour différents scénarios l'étendue de l'inondation ; les hauteurs d'eau ou le niveau d'eau, selon le cas ; et le cas échéant, la vitesse du courant ou le débit de crue, les risques de pollution y afférant, etc. Les états doivent se définir des objectifs et des plans de gestion des risques (avant le 22 décembre 2015 dernière limite) tenant compte d'enjeux hiérarchisés et des aspects alerte, prévention, protection et préparation, en encourageant « des modes durables d'occupation des sols, l'amélioration de la rétention de l'eau, ainsi que l'inondation contrôlée de certaines zones en cas d'épisode de crue ». Ce travail doit être en accord avec la Convention d'Aarhus traduite par la directive 2000/60/CE sur l'information et la consultation du public.

Des pôles d'aide et conseil émergent. Les inondations pourraient être exacerbées avec la fonte des glaciers et avec l'élévation du niveau de la mer. Divers travaux de prospective et modélisations (Voir par exemple les programmes européens « PESETA » et « PRUDENCE ») sont en cours dans le cadre de l'adaptation aux changements climatiques, qui peuvent aider les collectivités à mieux se préparer.

## **I.9-Les inondations en Algérie**

L'Algérie est l'un des pays confronté aux phénomènes de crue et d'inondations qui se manifestent de façon catastrophiques constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et sociale.

En Algérie, plusieurs régions de part leur topographie sont menacées par ces catastrophes hydrologiques aussi bien au nord qu'au sud (**Touaibia, 2004**). Un inventaire des inondations catastrophiques ayant affecté l'Algérie durant ces dernières 30 années ainsi qu'un répertoire des zones inondables recensés par le Ministère des Ressources en Eau en vue d'un aménagement sont présentés ci après, cet inventaire est réalisé grâce au concours de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) (**Oufella, 2004**).

### **I.9.1-Causes des inondations en Algérie**

D'une manière générale, les causes des inondations peuvent être classées en trois types (**Behloui. L, 2003**) :

**a-Celles qui sont liées à des situations météorologiques remarquables se traduisant par une forte pluviosité (pluies importantes, orages violents ) tels que :**

- ✚ les inondations de décembre 1957 et mars 1974 sur les bassins de l'Algérois et le Sebaou.
- ✚ Les inondations catastrophiques de Mars 1973 dans l'Est Algérien .
- ✚ Les inondations de l'automne 1969 en Algérie et en Tunisie.
- ✚ Les inondations de Décembre 1984 sur tout l'Est Algérien etc.....
- ✚ Les inondations de Bab El oued le 09 et 10 novembre 2001.

**b- Celles liées à l'effet de l'homme**( défaillances des différents réseaux, gonflement des oueds par les décombres ,l'urbanisation anarchique des rives immédiates des cours d'eau etc.) telles que :

- ✚ Les inondations presque à chaque hiver de la ville de Tiaret.
- ✚ Les inondations d'octobre 2008 à Ghardaia.

**c- Les inondations produites dans des régions présentant un environnement topographique défavorable:**

- ✚ les villes traversées par des oueds ( BBA,Oued Rhiau, Sidi Belabbes) ;
- ✚ les villes situées au pied de montagne ( Ain Defla ,Batna ,Médéa).

Cette prédisposition associée à la forte concentration et l'effet d'urbanisation présentent de grands risques.

**d-Inondations selon le type de crue (selon sa durée, son étendue et ces caractéristiques)**

✚ Inondations engendrées par des crues torrentielles (crues- éclairs) et affectant le plus souvent les petits bassins, elles sont le plus souvent liées et localement intensives issues de phénomènes de convections sous forme de tempêtes orageuses se produisant généralement en automne ou en été.

Elles sont dangereuses en raison de leur soudaineté; leurs ruissellements rapides et violents peuvent intervenir quelques minutes après la pluie, les débits d'oueds peuvent passer en temps record de quelques m<sup>3</sup>/s à plusieurs milliers de m<sup>3</sup>/s (2 à 3h seulement).

L'inondation de la ville de Oued Rhiau le 20 octobre 1993 où en 20 mn :23 morts ,20 blessés et plusieurs disparus en plus des dégâts matériels importants enregistrés.

**e-Inondations des grands bassins versants :**

Elles résultent le plus souvent de précipitations importantes généralisées sur de grandes étendues et caractérisées par leur longue durée et la quantité de leur écoulement.

**Quelques exemples**

**Présentation des inondations de Tiziouzou**

L'inondation du 28 au 31 mars 1974 dans la wilaya d'Alger et Tiziouzou avec une précipitation de 688mm pendant 4jours ou (52 morts ,4570 maisons détruites ,130 villages isolés, 18000 sinistrés et des dégâts matériels estimés à 27 Millions de DA) sont enregistrés.

Les différents jaugeages de crues ont donné durant ces inondations :

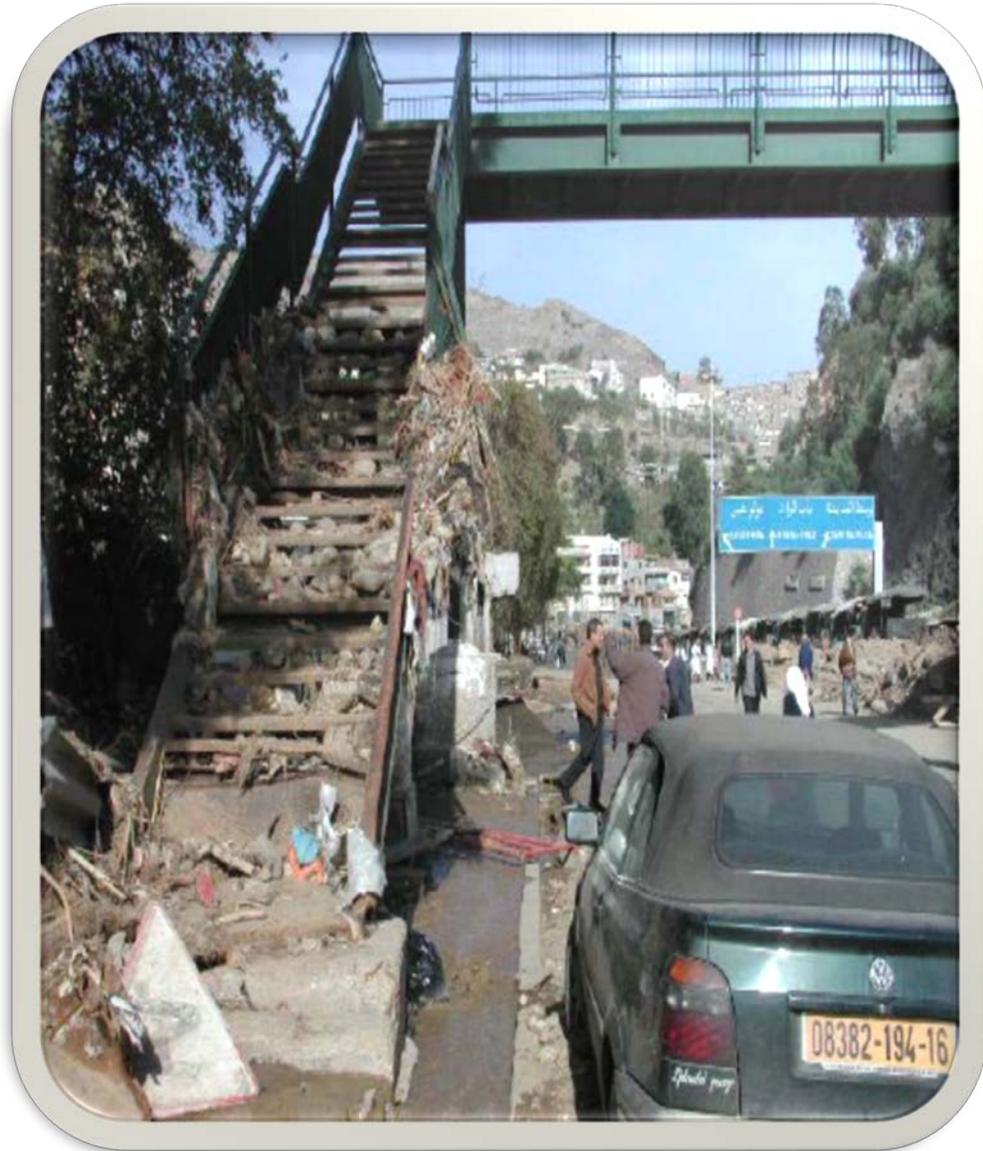
- A Belloua sur Oued Sebaoum le débit maximum a été estimé à 2980m<sup>3</sup>/s avec un volume de 311hm<sup>3</sup>;
- A Baghlia sur Oued Sebaou le débit maximum a été estimé à 3420m<sup>3</sup>/s avec un volume de 476hm<sup>3</sup>;
- Lakhdaria sur Oued Isser le débit a été estimé à 2580m<sup>3</sup>/s avec un volume de 259hm<sup>3</sup>.

### **Présentation des inondation de Bab El Oued, Alger**

Cette catastrophe s'est produite le 09 et 10 Novembre 2001, c'était un événement pluviométrique important à caractère orageux avec un noyau centré sur la région de Bouzaréah. Elle s'est caractérisée par des intensités élevées et répétées et des crues brusques et brutales. La pluviométrie du poste ONM au niveau de Bouzaréah a enregistré 290mm du 09 au 10 Novembre (260mm pour la seule journée du 10 Novembre ).

#### **► Ecoulements de la Crue**

Un travail de terrain a permis de relever les laisses de crues visibles au niveau des passerelles et habitations situées juste avant le Triolet et après la confluence des oueds descendant de l'oued Sidi-Medjbar, de Oued frais vallon, de Oued Scotto et de Oued beau-fraisier. Ces laisses de crues permettent d'estimer le débit de pointe de la crue par des calculs hydrauliques, d'évaluer l'importance des volumes écoulés et de suivre leurs évolutions le long de la voie rapide à partir de l'amont du bassin (Chevalley) jusqu'à Triolet.



**Figure I.8: Inondation de Bab El Oued**

Au niveau du triolet, toutes les eaux se sont accumulées et ont donné de très forts débits. Le niveau d'eau maximum mesuré (laisse de crue) est de 2,45 m, ce qui donne un débit de crue max  $730 \text{ m}^3/\text{s}$  et un apport total  $2\,600\,000 \text{ m}^3$ . L'estimation empirique des sédiments charriés a donné un volume de  $800\,000 \text{ m}^3$ .

**Présentation des inondations de Ghuardaia**

L'une des plus importantes inondations est celle qui s'est produite à Guardaia en Octobre 2008. D'après l'Agence nationale des ressources hydriques -ANRH- ministère des ressources en eau, il a été constaté les évolutions suivantes:

Entre le 28 et le 29 septembre 2008 la pluie est passé de 11mm à 40,5mm et une averse d'une intensité de 15mm/h s'est produite entre 21h et 22h de la journée du 29sept 2008.

Le 30 sep 2008 une averse entre 3h et 4h du matin d'une intensité estimé à 150mm/h.

Le 1er octobre 2008: 28,2mm de pluie, une averse entre 3h et 4h du matin d'une intensité de 28,2mm/h.

C'est à l'aube du 1 octobre 2008 et suite au 28,2mm, qu'une crue dévastatrice s'en est suivie sur l'Oued M'zab. L'écoulement a débordé des berges et inondé tout ce qui est avoisinant comme constructions et autres (plusieurs quartiers ont été inondés avec ponts et infrastructures de bases).

**Constats des inondations:**

- l'Oued Haimeur a drainé le plus grand volume ;
- l'Oued Touzouz (oued El Kelach) a véhiculé une quantité moins importante ;
- l'Oued Labiod équipé d'un barrage de 27millions de m<sup>3</sup> a diminué l'ampleur de la catastrophe ;



**Figure I.9:Inondation de Ghardaia**

### **Inondation dans la région de Ben Chaabane**

Les facteurs contribuant aux inondations dans la région de Ben Chaabane sont: (AM CONSULTING, 2008):

- Pluies abondantes de la zone.
- une topographie marquée par une forte pente (selon l'endroit, cette pente est très forte dans la partie amont du B.V., moyenne dans sa partie centrale et faible dans sa partie avale, selon la zone considérée.
- une urbanisation très forte surtout dans la partie centrale et dans les lits d'oueds.
- des pollutions liquides et solides avérées et qui ne peuvent que s'aggraver (l'écoulement naturel de résurgences d'eau ou sources du Sahel est noyé par les rejets

en eaux usées des cités avoisinantes et centre ruraux avoisinant, le lit de l'oued est souvent obstrué par des gravats, des branchages, des remblais de chantiers voisins, ou carrément de constructions et d'habitations précaires) voir figure I.10.



Branchages d'eucalyptus abattus et jétés envahit dans le lit de l'oued Thlétha



Sédimentation et remblaiement du lit d'oued situé en amont de Ben Chaabane

**FIGURE I.10** Etat de lieu de Ben Chaabane (ampleur des anomalies constatées sur la zone d'étude) ( AM CONSULTING, 2008)



Lit de oued Thlétha remblayé sur une partie de sa longueur en amont de Benchaabane (remarquer la pousse des roseaux).



Pont sur le CW 112 menant à Boufarik – O.Thlétha- passages des eaux sous le pont obstrués par les sédiments en plein centre de Benchaabane.



Envahissement des berges de Oued Thlétha au centre de Benchaabane par les pollutions, ordures et habitations sur le domaine hydraulique public.



Retenue collinaire à Sidi Bennour – piemont de Sidi Abdellah –située juste en amont de la station de lagunage –dallot de crete en beton armé emporté par la crue EFFETS DE LA CRUE DE Nov.2007

**FIGURE I.10 Etat de lieu de Ben Chaabane (ampleur des anomalies constatées sur la zone d'étude) ( AM CONSULTING, 2008)**



Oued Sidi Bennour à la traversée de la RN67-avril 08-Débit d'été aval station de lagunage SIDI BENNOUR



Aval de Oued Sidi Bennour ou Oued Rebai Avril 2008, traversée à gué du nouveau lotissement Nord de Ben

**FIGURE I.10** Etat de lieu de Ben Chaabane (ampleur des anomalies constatées sur la zone d'étude) ( AM CONSULTING, 2008)

### Conclusion

Dans ce chapitre, une présentation générale des inondations et le risque: Aléa et vulnérabilité sont établis . Aussi quelques exemples d'inondation en Algérie ont été présenté afin de montrer l'ampleur des dégâts que peuvent engendrer ce genre de catastrophes naturelles. Notamment quelques facteurs générant les inondations dans la région d'étude ont été présentés, ce qui a permis d'identifier les problèmes rencontrés dans cette région.

### Introduction

Dans ce deuxième chapitre, les questions générales liées à la diversité des modèles hydrologiques et à leurs évaluations sont examinés, pour aboutir au choix du modèle retenu.

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion de la ressource en eau, à l'aménagement du territoire, ou au risque hydrologique. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation de la pluie en débit et en particulier les processus liés à la formation de crues et à l'apparition des étiages.

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

### II.1-Définition de la modélisation

La modélisation est un processus de calcul de l'écoulement qui se produit en un point donné d'un cours d'eau à partir de données météorologiques. Les premières méthodes pour établir une relation entre la pluie et le débit sur un bassin versant remonte au 19<sup>ième</sup> siècle (Blaikie et al, 1985, dans Fortin et al. 2001a). Toutefois, avec l'apparition de l'ordinateur les premiers modèles hydrologiques capable de simuler une succession de processus hydrologiques sont conçus (Crawford et Lindsey, 1966, et al).

Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments:

le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, qui en définissent l'objet et ses limites (spatiales ou temporelles). La connaissance du système est conditionnée par la mesure de ses caractéristiques et l'acquisition de données sur les flux, les stocks et les transformations de phase

l'objectif de modélisation, pour lequel le modèle est développé. Le modèle est construit pour répondre à des questions et peut ainsi, au delà d'un outil de représentation, être également un instrument de connaissance. L'étude du cycle de l'eau est l'objectif général de l'hydrologie. Ce travail de recherche s'intéresse à la représentation de la transformation de la pluie en débit;

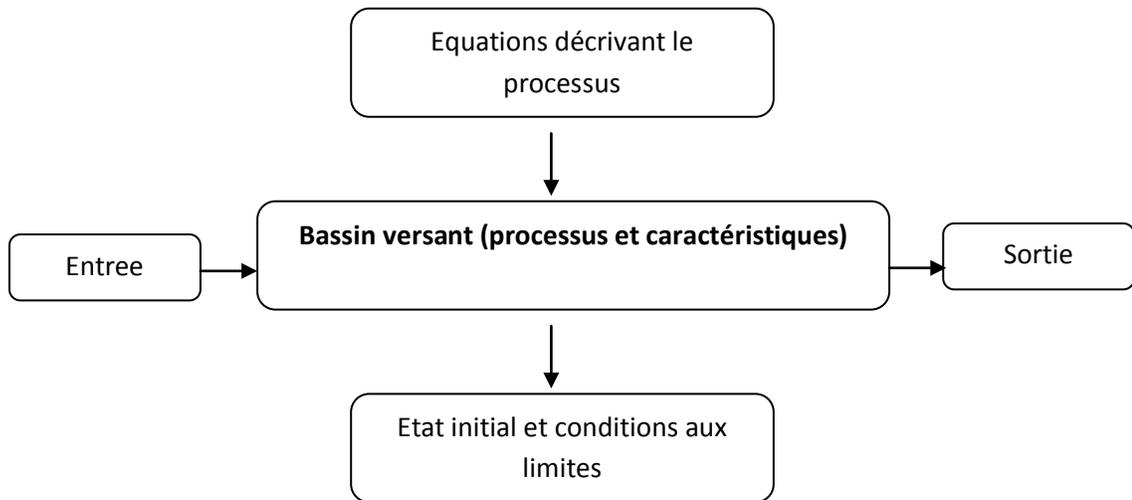
le choix d'une formulation de la réalité. Après la définition des deux points précédents, l'essentiel de la démarche de modélisation consiste à trouver la formulation de la réalité la plus satisfaisante relativement aux objectifs fixés. En fait, le modèle est la plupart du temps le résultat d'un compromis entre généralité, réalisme et précision (Lavigne, 2007).

### II.2- Composants d'un modèle hydrologique

Un modèle est caractérisé par 5 éléments constitutifs (Singh,1995) donnés en figure II.1 à savoir:

- la géométrie du système (bassin versant);
- les entrées dans le système;
- les lois de formalisation des processus;

- l'état initial et les conditions aux limites du système ;
- les sorties.



**Figure II.1: Composant d'un modèle (Singh,1995)**

### **II.3-Utilisation des modèles mathématiques en hydrologie**

Les modèles hydrologiques sont nés bien avant l'avènement de l'informatique. A quel besoin répondaient et répondent encore ces modèles ?

La littérature scientifique présente une très grande diversité de modèles dont très peu ont trouvé une utilisation opérationnelle.

La question de l'utilisation de modèles en hydrologie a pour but:

- effectuer des prévisions, dimensionner des ouvrages d'art, délimiter des zones inondables.
- se pose en particulier pour les bassins versants disposants de séries de débits mesurés.

Ceci dit, trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie sont distingués.

#### **Modélisation comme outil de recherche**

Cela reste aujourd'hui encore le champ d'application privilégié de la modélisation hydrologique, (HENINE, 2002). La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarii de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.

#### **Modélisation comme outil de prévision**

Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables

dépendantes (débits aval ...), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

#### **Modélisation comme outil d'extrapolation**

Dans certains cas, pour le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarii de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié. L'utilisation de longues séries de pluies éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie - couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

#### **II.4-Différents types de modèles hydrologiques**

A ce jour, il existe une multitude de modèles hydrologiques qui est catégorisés selon trois critères (Villeneuve & al,1998b ; Anctil & al,2005), soit la façon dont ils reproduisent le processus d'écoulement, leur distribution spatiale, l'échelle et la plage de temps sur laquelle ils simulent l'écoulement (figure II.2).

**Le premier critère** permet de distinguer les modèles dérivés des processus physiques de ceux dérivés de données. La première catégorie comprend les modèles physiques et conceptuels, dont la formulation mathématique tente de reproduire chaque processus hydrologique selon la physique newtonienne.

Lorsque le calcul des processus est simplifié, c'est le modèle conceptuel, alors que lorsqu'il ne l'est que très peu, ou pas du tout, c'est le modèle physique. Les modèles physiques ont l'inconvénient d'être lourd et nécessite beaucoup de données d'entrée pour être utilisés. Il existe différents degrés de simplification qui permettent de regrouper certains paramètres, ou de calculer certaines données difficiles à obtenir à partir d'autres données plus accessibles.

Suivant le degré de simplification d'un modèle à base physique, le modèle est désigné par "modèle physique", ou "conceptuel". Cette classification est toutefois relative puisqu'aucun modèle n'est entièrement "physique". Les modèles dérivés de données reposent sur l'établissement d'une relation entre les données d'entrée du modèle (précipitation, températures, etc.) et les débits en une section donnée, sans égard à l'ensemble du processus physique qui se déroule sur le bassin versant considéré.

Les modèles déterministes sont aussi distingués, et ne font pas appel au calcul de probabilité, comme les modèles empiriques ou les hydrogrammes unitaires, des modèles stochastiques, comme les régressions et auto-régression linéaires et les modèles non linéaires, qui eux font appel au calcul de probabilité.

**Le second critère** permet de distinguer les modèles globaux, qui n'utilisent aucune discrétisation spatiale, des modèles distribués, qui peuvent simuler les processus hydrologiques sur des sous-entités du bassin versant. Les modèles distribués sont plus aptes de tenir compte de l'hétérogénéité d'un bassin versant lors de la modélisation de l'écoulement. Lorsque, dans un modèle distribué, les sous entités sont définies par les sous bassins du bassin principal, il est distingué comme un modèle par sous-bassins. L'aptitude du modèle à tenir compte de

l'hétérogénéité des caractéristiques physiques et climatiques du bassin versant dépend alors du nombre de sous-bassins modélisés.

Le troisième critère permet de distinguer d'une part, les modèles événementiels, c'est-à-dire simulant uniquement la crue associée à une précipitation donnée, des modèles continus qui simulent tant l'écoulement des crues associées aux précipitations que l'écoulement se produisant entre les crues. D'autre part, il permet de distinguer les modèles selon le pas de temps sur lequel ils simulent. Celui-ci peut être de l'ordre de la seconde, de l'heure, de la journée, du mois ou de l'année, dépendamment des objectifs pour lesquels il a été conçu.

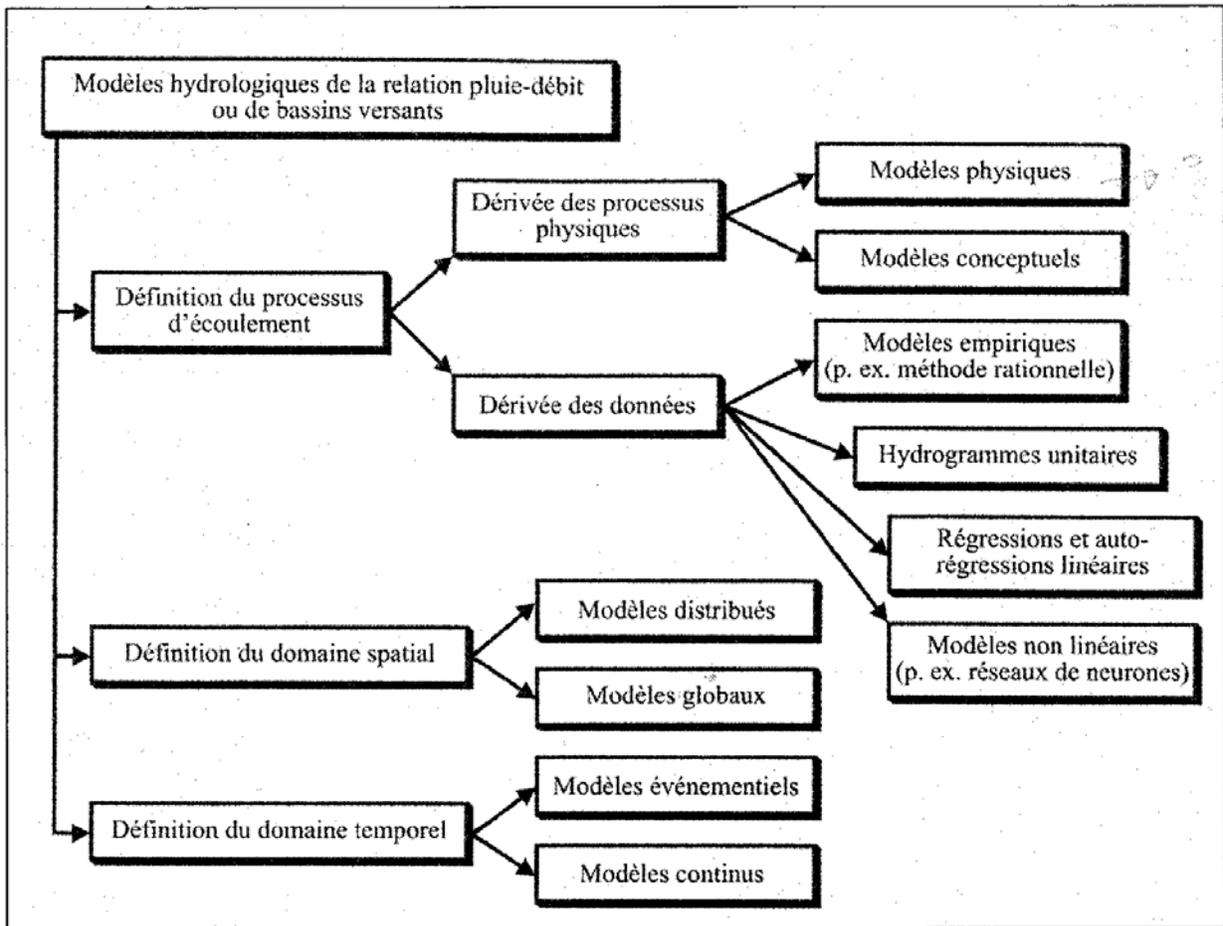


Figure II.2: Classification des modèles hydrologiques selon Ancil et al, 2005

Le modèle utilisé dans cette étude est le modèle HEC HMS, qui est un modèle semi distribué, l'avantage que présentent ce type de modèle est qu'ils disposent d'une structure à base physique et ils demandent moins de données que les modèles distribués (Benaouadj, A, 2011).

Le HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un Bassin Versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par

Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs. Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, la réduction des effets des inondations. Le programme présente une interface graphique, des composantes hydrologiques intégrées, un système spécifique de stockage de données (DSS) et des outils de gestion, etc.

Le modèle HEC-HMS est connu par ses performances de calcul et par la qualité de ses résultats ; il est disponible gratuitement dans le domaine public.

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

- Les précipitations : Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique ;
- les pertes (par infiltration, retenue ou évapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant ;
- Les ruissellements directs qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge.

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

### **a-Schématisation du bassin versant**

Avec le HEC-HMS, le bassin versant est découpé en plusieurs sous-bassins délimités par les lignes de partage des eaux. Chacun est représenté par un élément appelé « subbassin ». Ce dernier contient l'ensemble des paramètres physiques et hydrologiques nécessaires pour la simulation à savoir : la surface et le nom du sous-bassin, les méthodes de calcul des « pertes » et des « écoulements ». De même que les sous bassins, les cours d'eau sont aussi modélisés et représentés par des éléments hydrologiques appelés « reach ». L'ensemble de des éléments doit être relié pour former un réseau en incluant des jonctions, des bifurcations, des sources et des puits.

### **b-Les données météorologiques**

En plus du modèle du bassin, le modèle requiert des données des précipitations sur chacun des sous-bassins.

Il existe plusieurs modèles de précipitations disponibles dans HEC-HMS. L'utilisateur doit choisir un modèle convenable pour le calcul. Ces modèles sont :

- Méthode de pondération des données ;
- Inverse du carré de la distance ;
- Les précipitations en grille ;
- La pluie hypothétique ;
- La méthode des hyétographes.

### II.5-Choix d'un modèle hydrologique

Cette présentation des différents types de modèles a permis de mieux souligner les différences de points de vue dans les démarches de modélisation, et la façon dont se traduit cette différence dans la formalisation du modèle (Perrin, 2000). Pour évaluer l'intérêt de ces approches variées, il faut d'abord définir les qualités recherchées pour ces modèles. (Lindström & al , 1997) présentent les qualités suivantes comme règles de modélisation:

- le modèle doit avoir des fondements scientifiques sains,
- les besoins en données doivent être en accord avec la disponibilité de celles-ci sur la majorité des bassins,
- la complexité du modèle doit être justifiée en termes de performances,
- le modèle doit être convenablement validé,
- le modèle doit être compréhensible par les utilisateurs.

Il est ajouté à cela que le modèle doit apporter des réponses satisfaisantes aux questions posées et doit présenter des qualités de généralité et de robustesse. Si certaines de ces qualités sont plutôt qualitatives, d'autres en revanche peuvent être mesurées quantitativement et objectivement. Un moyen d'évaluer le degré de satisfaction que ces modèles apportent dans leurs réponses aux questions posées est alors de conduire des études comparatives. Si les comparaisons sont rarement le point central de travaux de recherche, elles demeurent cependant des sources de réflexion très intéressantes sur la crédibilité et la validité des différentes approches.

### II.6-Construction et validation d'un modèle hydrologique

Afin de mener à bien une modélisation hydrologique, plusieurs auteurs se sont posés la question de la stratégie de construction et de validation des modèles, quels qu'ils soient. Un des pionniers de cette réflexion est certainement (Klemes, 1986) qui propose un schéma hiérarchique de validation en quatre étapes qui permet de tester la capacité du modèle à prédire les effets des changements climatiques, des changements d'occupation des sols ou d'autres conditions non stationnaires. Notons que ce schéma s'applique essentiellement lorsque la seule variable de validation est le débit à l'exutoire du bassin.

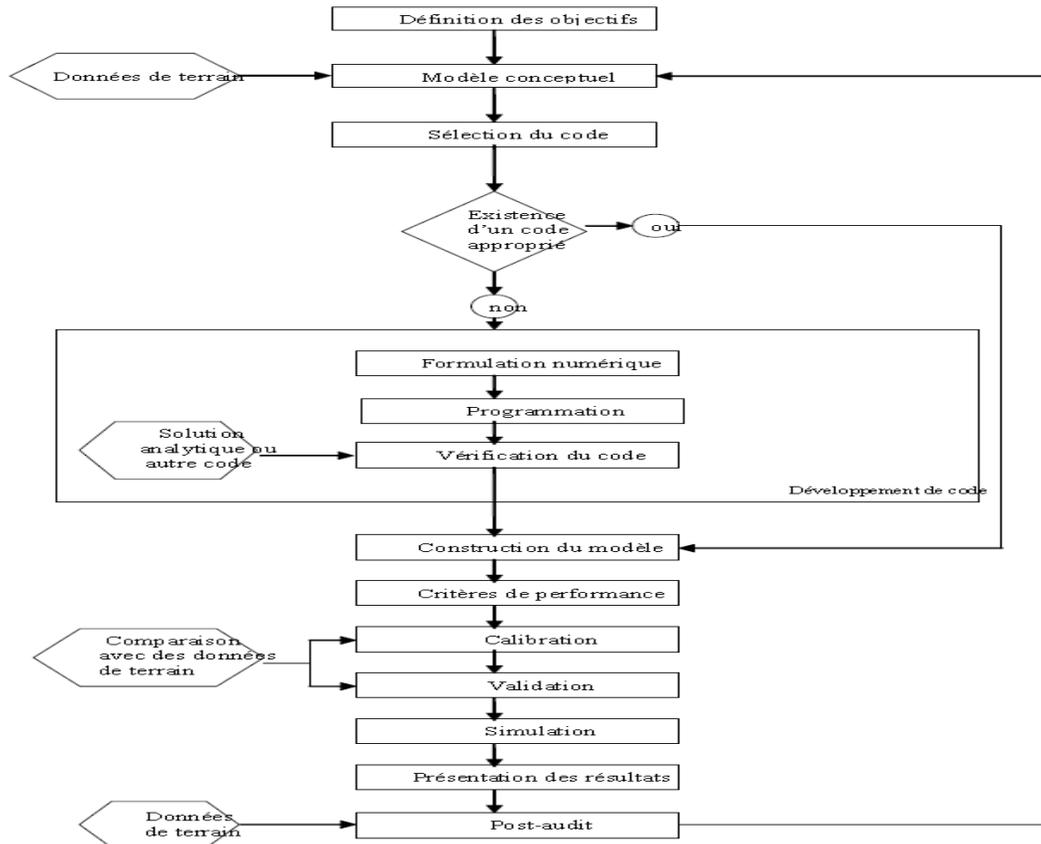
- La première étape est le « split-sample test » (test SS) qui inclut une période de calibration de 3 à 5 ans suivie d'une période de validation sur d'autres séries de données d'une longueur équivalente.
- Le « différentiel split-sample test » (test DSS) inclut une phase de calibration sur des données disponibles avant un changement, l'ajustement des paramètres pour prendre en compte le changement et la validation sur la période après changement.
- Pour le « proxy-bassin test » (test PB) aucune calibration directe n'est permise. Les informations proviennent d'autres bassins similaires jaugés. La calibration se fait sur ces bassins proches, puis les paramètres sont transférés au bassin d'étude en prenant soin de les ajuster à sa spécificité. La validation est menée sur le bassin d'étude.
- La dernière étape est le « proxy-bassin differential split-sample test » (test PB-DSS) couplant l'ensemble des trois tests précédents. Il n'y a pas de calibration sur le bassin d'étude mais sur le bassin proche, d'où proviennent toutes les informations. Le transfert des paramètres vers le

bassin d'étude comprend la sélection de deux jeux de paramètres correspondant chacun à avant et après un changement. La validation s'effectue sur chacune des périodes.

Cette procédure ne concerne donc que la validation mais d'autres auteurs suggèrent un protocole complet pour la construction et l'utilisation d'un modèle hydrologique.

Par exemple, (Refsgaard, 1997) propose un protocole de 11 étapes pour construire un modèle hydrologique (Figure II.3).

La première étape, parfois trop négligée, est la définition des objectifs fixés à la modélisation. Pour passer ensuite à la conceptualisation du modèle et la sélection du code en fonction des données disponibles. Si un code existe déjà pour l'objectif proposé, le modèle est construit à l'aide des données de terrain. Puis les phases de calibration, validation et simulation peuvent venir. Si le code n'existe pas encore, il faut passer avant tout par la formulation numérique, la construction du programme informatique et la vérification du code à partir de solutions analytiques ou d'autres codes numériques.



**Figure II.3:Schéma de construction et de validation d'un modèle hydrologique (Refsgaard, 1997)**

### II.6.1- Construction et Complexité

La complexité d'un modèle fait en général référence aux processus que nous souhaitons représenter et à la façon de le faire. Il existe principalement deux approches de complexification d'un modèle hydrologique en rapport avec les processus à représenter. L'approche descendante correspond à une complexification petit à petit, et l'approche ascendante correspond à une intégration des processus et de leur description lorsque nous passons à des échelles supérieures.

Ces approches sont généralement liées à un changement d'échelle c'est-à-dire à la finesse de la description physique et spatiale des processus. Par exemple, l'approche de Reggiani (1998, 1999) cherchant à écrire les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et de l'entropie à l'échelle du sous-bassin versant est une approche ascendante.

Au contraire Jothityangkoon et al. (2001) proposent une approche descendante : à partir de modèles simples, pouvant s'appuyer sur une quantité limitée de données, ils complexifient petit à petit la représentation des processus ce qui nécessitera en parallèle une augmentation et une densification des variables mesurées.

Wagener et al. (2001) proposent un schéma général de construction des modèles hydrologiques qui repose entièrement sur l'équilibre entre le degré de complexité nécessaire dans la structure du modèle et celui qui peut être supporté par les données disponibles (Figure II.4). Autrement dit, il n'est pas nécessaire de développer un modèle dont la structure interne est trop complexe et non vérifiable à partir des données disposées pour son utilisation.

Pour bien gérer cet équilibre, une analyse fine des processus clés doit être menée en fonction du degré d'exactitude nécessaire, avant de les inclure dans la structure du modèle. Michaud et Sorooshian (1994) arrivent aussi à la conclusion que la complexité n'est pas synonyme d'une meilleure représentation des phénomènes. Pour eux, l'essentiel est d'avoir un modèle spatialisé simple qui utilise de façon optimale une quantité de données limitée, et c'est sur cette notion que ce travail est mené.

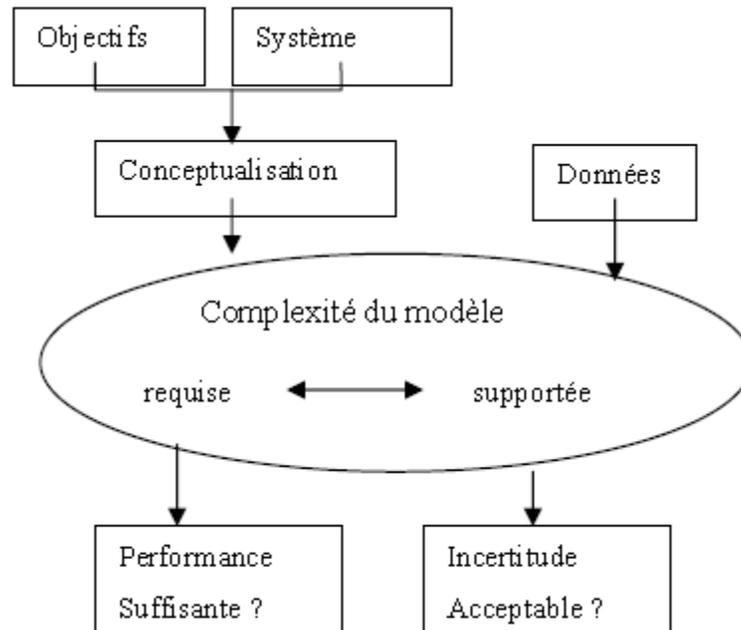


Figure II.4: Schéma de complexité d'un modèle hydrologique (Wagener et al.,2001)

Wagener et al. (2001) soulignent aussi que l'analyse des processus permettra en outre, de déterminer le nombre de paramètres qui peuvent être identifiés et les interactions qui existent entre ces paramètres.

Ceci permettra de réduire significativement le nombre de paramètres du modèle et les incertitudes liées à la détermination de ceux-ci. Les auteurs rappellent que c'est possible de réduire l'incertitude sur les paramètres en augmentant le nombre d'informations disponibles pour l'identification de ces derniers.

Sinclair et Seligman (2000) estiment, eux aussi, qu'une classification hiérarchique des processus est bénéfique à une bonne modélisation. Elle permet de déterminer le niveau hiérarchique d'intérêt immédiat selon les objectifs fixés. Une description précise et physique des processus directement responsables de ce niveau est nécessaire. Pour les niveaux hiérarchiques encore inférieurs, une description physique devient trop complexe et peut cacher l'influence relative des processus. Au contraire, l'utilisation de relations conceptuelles permet une clarification du modèle, de ses composantes ainsi que de ses performances.

Les modèles hydrologiques peuvent être conçus en clarifiant les objectifs en terme de représentation des processus et de validation future. Un modèle trop complexe n'est pas gage de meilleurs résultats.

### II.7-Etude comparative des modèles hydrologiques:

La multitude des modèles existants a donné lieu à beaucoup d'évaluations individuelles, et relativement peu d'analyses comparatives. Or ce sont bien ces dernières qui permettent de juger de la valeur d'un modèle. L'évaluation individuelle, dans l'absolu, sans aucune autre référence que la valeur indicative d'un critère de qualité, est peu révélatrice de la confiance que l'on peut accorder au modèle: un modèle satisfaisant à 80 % peut paraître bon, (Perrin, 2000), mais il devient peu intéressant s'il en existe un autre satisfaisant à 90 %.

Cette évaluation comparative est d'autant plus importante lorsqu'elle est placée dans un contexte opérationnel, où l'utilisateur est désireux d'appliquer le modèle qui donnera les réponses les plus fiables à son problème, avec des enjeux économiques, sociaux ou environnementaux. C'est dans le but d'essayer d'apporter des conseils aux utilisateurs qu'ont été menés les premiers travaux comparatifs, comme l'intercomparaison de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (WMO, 1975).

Une approche plus thématique adoptée et quelques travaux dont les conclusions semblent intéressantes sont cités.

Les travaux comparant des modèles 'boîte noire' à d'autres types de modèles sont peu nombreux. Weeks et Hebbert (1980) montrent qu'un modèle de type ARMAX donne des résultats aussi satisfaisants que des modèles conceptuels complexes (Sacramento, Stanford, Monash) sur trois bassins du sud-ouest de l'Australie sous un climat de type méditerranéen. En revanche, Chiew *et al.* (1993) montrent sur huit bassins australiens aux conditions climatiques variées que de simples équations non-linéaires ne réussissent pas à donner de résultats satisfaisants aux pas de temps journalier ou mensuel par rapport à des modèles conceptuels simples ou complexes.

De même, Loague et Freeze (1985) concluent à un constat d'échec dans les tests d'un modèle régressif linéaire et d'un modèle d'hydrogramme unitaire en prévision, dans une évaluation par événement sur trois bassins versants expérimentaux aux Etats-Unis. Ces modèles sont un peu plus satisfaisants en simulation, et en tous cas meilleurs qu'un modèle à fondements physiques. Hsu *et al.* (1995), eux, indiquent qu'un réseau de neurones appliqué sur un bassin

américain, obtient de meilleurs résultats qu'un modèle ARMAX et le modèle conceptuel complexe de Sacramento.

Ce sont également les conclusions auxquelles aboutissent Coulibaly *et al.* (2000) dans un contexte de prévision des débits sur un bassin canadien: le réseau de neurones donne sur des prévisions de un à sept jours des résultats plus satisfaisants qu'un modèle conceptuel et un modèle ARMAX.

De ces études, il est donc difficile de tirer des conclusions claires quant à la valeur relative des approches qualifiées de 'boîte noire'. Ce manque de tendance nette s'explique par le fait que ces comparaisons, exceptée celle de Chiew *et al.* (1993), ont été menées sur un trop petit nombre de bassins ou dans des conditions climatiques à chaque fois trop homogènes. Leurs conclusions se trouvent de trop dépendantes des caractéristiques des bassins tests.

Quelques études se sont attachées à comparer des modèles fondés sur la physique avec des modèles 'boîte noire' ou des modèles à réservoirs. Une conclusion de l'étude de Loague et Freeze (1985) citée précédemment est que l'application des modèles fondés physiquement pose le problème de mesure de la variabilité spatiale des entrées du modèle (pluie) et surtout des caractéristiques du bassin (propriétés des sols par exemple). N'obtenant pas de meilleurs résultats que des modèles très simples, ils tirent un constat d'échec de cette approche complexe. Michaud et Sorooshian (1994) ont appliqué, sur un bassin expérimental américain sous climat semi-aride, un modèle fondé sur la physique et deux versions, l'une distribuée et l'autre globale, du modèle du SCS couplé à un hydrogramme unitaire. Leurs résultats (évaluation par événement) montrent que lorsque les données permettent de réaliser un calage, le modèle le plus complexe présente un avantage très limité par rapport au modèle simple mais cependant distribué.

Ces conclusions rejoignent celles de Wilcox *et al.* (1990) qui montrent que la sophistication du module d'infiltration d'un modèle simple, remplacé par un module à base physique, n'apporte qu'une amélioration marginale dans les résultats du modèle (évaluation par événement sur six bassins américains sans calage). Enfin, Refsgaard et Knudsen (1996) ont mené une comparaison détaillée de trois modèles allant du conceptuel global au fondé physiquement et distribué, sur trois bassins au Zimbabwe. Cette étude a porté cette fois-ci sur des simulations en continu et non par événements. Lorsque des données sont disponibles pour le calage, aucune supériorité n'apparaît pour le modèle le plus complexe, et l'avantage de ce dernier est marginal lorsque l'on se place en situation de bassins non jaugés.

Il ressort donc assez clairement que les modèles fondés sur la physique sont en état de relatif échec. Le degré de réalisme qu'ils visent et les efforts consentis pour les appliquer (collecte de données par exemple) devraient leur permettre de faire mieux que des modèles beaucoup plus simples, ce qui n'a pu être mis en évidence dans aucune étude comparative. Par ailleurs, si l'avantage d'une approche distribuée par rapport à une approche globale est de pouvoir fournir une représentation spatialisée du fonctionnement du bassin, la validation de cette représentation reste délicate et ce qu'elle apporte dans un contexte de simulation pluie-débit ne ressort pas non plus clairement. Même si la représentation explicite de l'hétérogénéité spatiale paraît souhaitable (en permettant notamment de simuler les variations spatiotemporelles d'autres variables d'intérêt, comme par exemple l'état de saturation des sols), elle ne semble pas trouver jusqu'à présent de réelle justification. Enfin, les modèles fondés physiquement, du fait de leur complexité, restent encore très lourds d'utilisation et très exigeants en capacité de calcul (même si cet aspect devient de moins en moins un facteur limitant). Yang *et al.* (2000) indiquent par exemple que la simulation de deux ans de données au pas de temps horaire nécessite 72 heures de calcul pour le modèle fondé physiquement MIKE SHE et seulement deux minutes pour le modèle conceptuel distribué TOPMODEL.

Nous allons maintenant analyser les études comparatives qui ont impliqué plusieurs modèles globaux à réservoirs, parmi lesquels nous pouvons citer les travaux de Kite (1975,1978), Moore et Mein (1975), Weeks et Hebbert (1980), Franchini et Pacciani (1991), Chiew *et al.* (1993), Franchini *et al.* (1996), Zhang et Lindström (1996) Gan *et al.* (1997), Ye *et al.* (1997) et Perrin et Littlewood (2000). Un premier point à noter est qu'il est difficile de tirer de toutes ces études de réelles conclusions quant à la supériorité de tel ou tel modèle. Aucun ne semble être en mesure de fournir dans tous les cas de figure les résultats les plus satisfaisants. Les enseignements de ces travaux comparatifs restent la plupart du temps conditionnés par leurs objectifs, les caractéristiques des bassins employés ou la méthodologie de comparaison (calage, critères...).

Toutes ces études ont été réalisées sur un nombre limité de bassins. Si certaines regroupent des bassins situés sous des conditions climatiques variées (WMO, 1975; Chiew *et al.*, 1993), d'autres en revanche se sont intéressées à des conditions particulières, notamment à dominante méditerranéenne ou semi-aride (Weeks et Hebbert, 1980; Gan *et al.*, 1997; Ye *et al.*, 1997).

Certaines de ces études comparatives ont été appliquées sur des méthodologies complètes de modélisation, c'est-à-dire que chaque modèle est appliqué dans son propre environnement de développement et suivant les procédures préconisées par le concepteur (WMO, 1975, 1986, 1992; Perrin et Littlewood, 2000). Il est alors difficile d'évaluer le pouvoir réel de simulation des structures elles-mêmes, c'est-à-dire la nature et l'agencement des relations au sein du modèle, qui sont au cœur même de la réussite du modèle. Le choix de différentes procédures de calage par exemple peut venir 'parasiter' le jugement porté sur les capacités des structures. Nous pensons qu'une étude comparative de modèles du même type doit s'attacher à les mettre dans une même situation. C'est à cette condition qu'on peut se faire une idée objective de la valeur de leurs structures dans des travaux de simulation.

### Conclusion

Dans ce chapitre, les grands principes de la modélisation hydrologique ont été présentés, ainsi que la multiplicité de ses formes et applications, sans oublier les critères déterminant le type de la modélisation à mettre en œuvre .

Le type de modélisation choisit dépend des objectifs fixés telle que: prévision en temps réelle les événements hydrologique, simulations des systèmes existants ou projetés, etc , après il faut s'assurer le l'applicabilité de ce modèle.

Le choix du modèle utilisé dans cette étude s'est porté sur le modèle HEC HMS pour les raisons suivantes:

C'est un modèle complet, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat. En plus ce modèle à la capacité de simuler aussi bien les pertes, l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain;

Il est facile à configurer et à mettre en place ;

Les paramètres du modèle peuvent être déterminés sans calage pour les bassins versant non jaugés et c'est le cas de notre bassin versant ;

Le modèle est disponible, gratuit et facile à télécharger (Fadil et al, 2011).

Le chapitre suivant est consacré à la présentation de la région de Ben Caabane wilaya de Blida, une étude géomorphologique, climatique et géologique sera faite ainsi que la présentation de la banque de données utilisé dans cette étude.

**INTRODUCTION**

Le centre de Ben Chaabane se situe au Sud-Est de Mehelma à environ 6 km, à 7 km au Sud-Ouest de Douera et à 5 km au Nord-Ouest de Boufarik. Son altitude est de 23 m, avec des coordonnées Lambert : X = 516,023 km et Y = 368,560 km.

Ayant la forme d'un triangle - rectangle, l'agglomération de Ben Chaabane est limitée à sa base, au Sud, par l'Oued Thlétha qui la traverse pour aller se jeter dans l'Oued Mazafran. Le sommet de ce triangle se trouve sur la RN67 qui relie Tessala El Merdja à Magtaa Kheira.

Tout autour de ce grand rectangle droit se rencontrent des terrains agricoles. Oued Sidi Bennour, aval de Sidi Abdellah, se prolonge dans la plaine sous le nom de Oued Rebai. Oued Rebai rencontre oued Thlétha au centre de l'agglomération de Benchaabane.

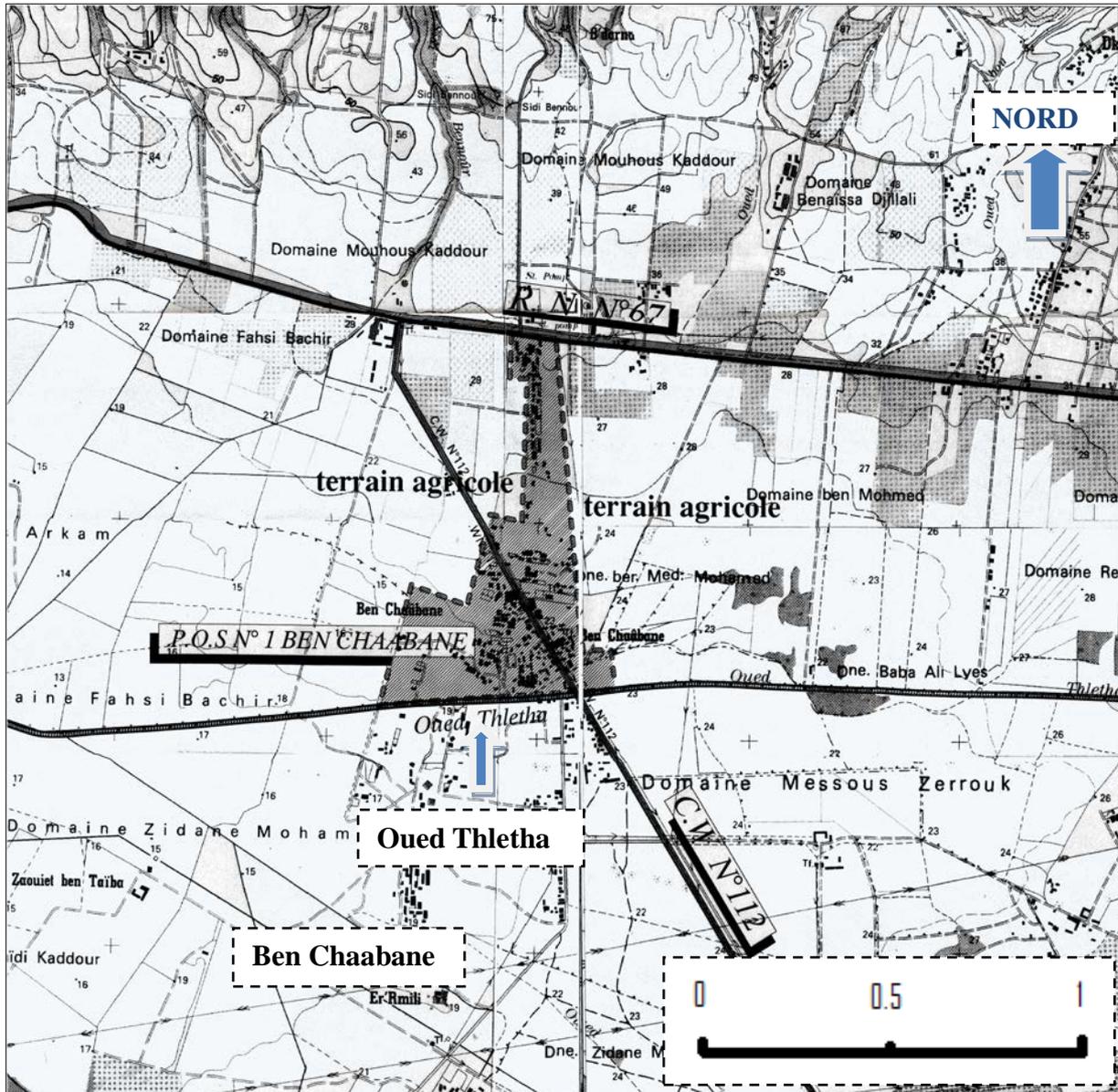


Figure III.1: Plan de situation de la ville de Ben Chaabane (AM . CONSULTING, 2008).

### III.1. Caractéristiques des bassins versants

La délimitation des bassins versants a été faite sur les cartes de Koléa (n° 3-4 et n° 7-8) à l'échelle 1/25.000. Leur présentation cartographique est fournie dans la figure III.2. Le bassin est divisé en deux sous bassins; le bassin de Oued Rébai et celui de Oued Thletha.

#### III.1.1. Caractéristiques physiques

Les Oueds de Rébai et Thletha appartiennent aux grands bassins côtiers Algérois et notamment au bassin versant de Oued Mazafran.

L'Oued Rébai coule du nord vers le sud et se jette aussitôt dans Ben Chaâbane par contre l'Oued Thletha coule par son affluent de sa rive droite d'abord du nord au sud, puis il se jette dans l'oued principal en prenant une direction Est Ouest jusqu'à Ben Chaâbane pour rejoindre Oued Fetis qui à son tour, se déverse dans l'Oued Mazafran, sa rive gauche très étroite ne présente pas d'affluents.

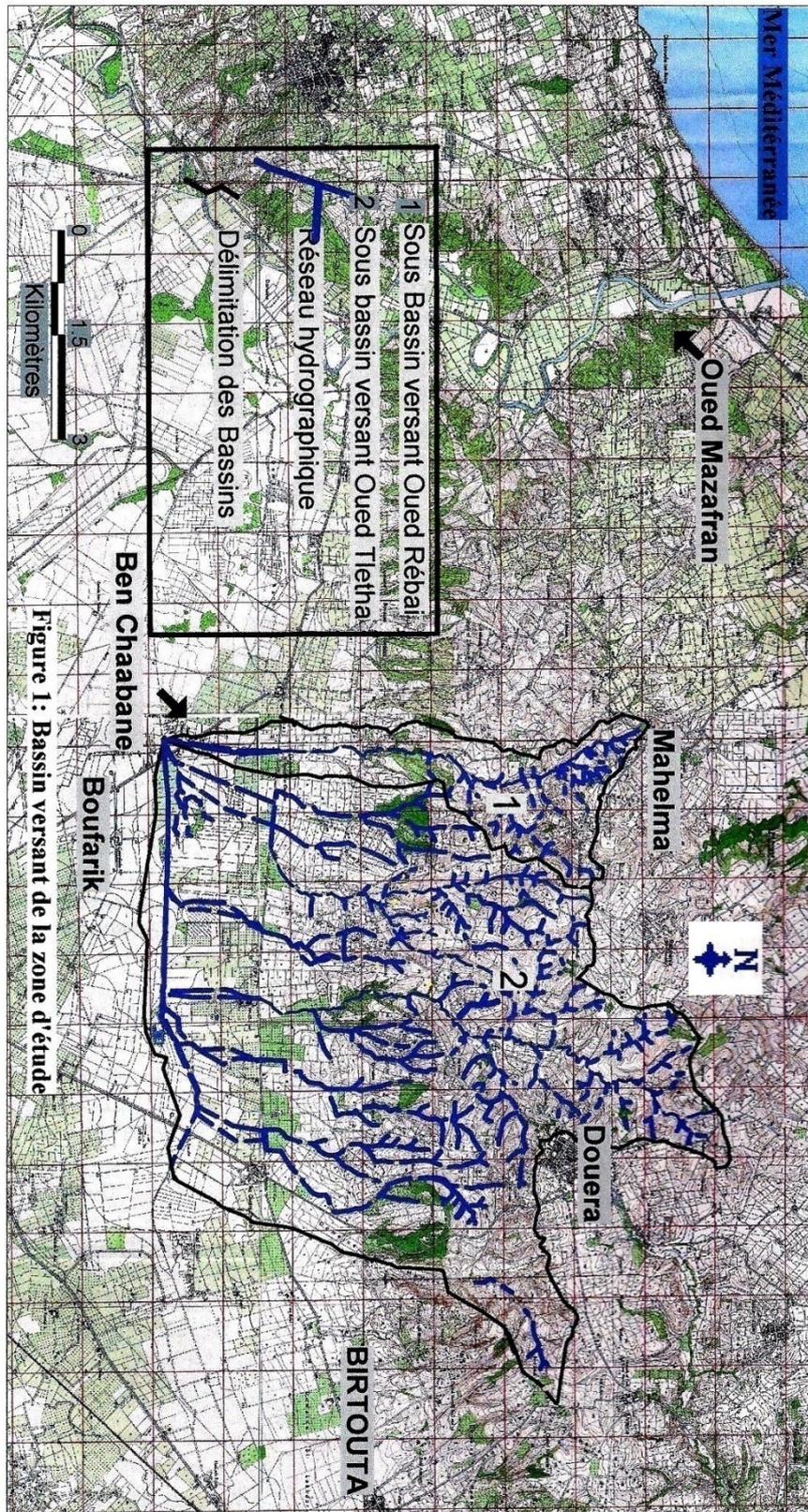


Figure 1: Bassin versant de la zone d'étude

Les principaux affluents de l'Oued Thletha sont les Oueds Darna, Bou Hak, Guerouana, Sidi Hassen, Ben Amar, El Kaf et Merdja.

Le sous bassin versant défini par les Oueds Rebai, Bou Hak Chaabane et Ben Amar est localisé dans la région hydrologique « des bassins côtiers algérois Ouest ». La zone concernée par l'étude se trouve à 25 km au Sud Ouest d'Alger.

Les trois oueds dominants du sous bassin versant étudié descendent des collines du Sahel qui sont constituées d'argiles de l'étage géologique dit Plaisancien. Cette situation fait que la vallée ou plaine de la Mitidja et particulièrement, la zone de Ben Chaabane qui constitue une zone de confluence, est remplie de dépôts alluvionnaires formant une plaine plate. L'épaisseur de ces dépôts est d'au moins 70 m.

Les pentes Nord du sahel s'élèvent latéralement par rapport à Ben Chaabane selon un angle de 15-20° et jusqu'à une altitude de 200m NGA.

En moyenne, la zone d'inondation de la plaine passe de 3m NGA vers son extrémité la plus en aval, à 10 m NGA à son autre extrémité ou amont.

Les alluvions se composent principalement de limons fins et gris avec de rares zones de graviers.

Les effondrements sur les rives des oueds se rencontrent principalement dans la zone à fortes pentes du Sahel et où des affleurements très souvent verticaux apparaissent.

### III.1.2. Caractéristiques morphométriques

#### 1- La surface

La surface topographique est le paramètre le plus important, il permet de contrôler l'intensité de plusieurs phénomènes hydrologiques (apport ; volume de précipitation ou infiltration).

#### 2- Le périmètre

Le périmètre correspond à la limite extérieure du bassin. Chaque bassin réagit d'une façon propre aux précipitations qu'il reçoit. Ces caractéristiques hydrologiques sont fonction d'une part du climat qu'il subit et d'autre part de son propre milieu physique.

Pour pouvoir comparer deux bassins entre eux et expliquer leur comportement distinct, placés dans les mêmes conditions météorologiques, il est nécessaire de quantifier les facteurs du milieu physique.

#### 3-Longueur du bassin versant

C'est la distance mesurée de l'exutoire le long du cours d'eau principal jusqu'à la limite du bassin versant. Puisque le cours d'eau n'atteint pas la limite du bassin, il est nécessaire de tracer une ligne d'écoulement (qui reçoit le plus grand volume d'eau) du point de naissance du cours d'eau jusqu'à la limite du bassin Cette longueur  $L_H$  est désigné comme la longueur hydrologique du bassin versant.

### III.1.3-Caractéristiques de forme

La forme du bassin versant influence fortement l'écoulement global et notamment le temps de réponse du bassin versant. C'est la configuration géométrique projetée sur un plan horizontal. Un bassin versant allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin ramassé même s'ils sont placés dans les mêmes conditions météorologiques.

#### 1- Indice de compacité de Gravelius $K_c$

Appelé aussi indice de forme, cet indice caractérisant la forme du bassin versant est le rapport entre le périmètre du bassin  $P$  et la circonférence du cercle  $P'$  de rayon  $R$  ayant la même superficie  $S$  que le bassin,

#### 2- Rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius

- Le rectangle équivalent

Supposant que l'écoulement sur un bassin versant donné 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, la même densité de drainage.

### III.1.4- 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:

#### 1-Courbe hypsométrique

Elle est d'une grande importance dans l'étude du relief d'un bassin versant. Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

#### 2- Indice de pente globale $I_g$

Il est défini comme étant le rapport entre l'altitude comprise entre 5% et 95% de la surface du bassin et la longueur du rectangle équivalent. Les altitudes correspondantes sont lues sur la courbe hypsométrique.

#### 3- Pente moyenne des bassins versants ( $I_m$ )

La pente influe directement sur sa grandeur. Il est pertinent de bien connaître la pente du bassin versant et celle du cours d'eau principal. Il existe différents indices reflétant la pente du milieu étudié. Mc Cuen, (2004) définit celle-ci ( $I$ , en m/m) comme étant la différence d'élévation ( $\Delta H$ ) entre l'exutoire et le point le plus élevé de la ligne d'écoulement divisé par la longueur hydrologique ( $L_H$ )

#### 4- Pente du cours d'eau principal

La pente du cours d'eau principal est le rapport entre la différence d'élévation  $\Delta H_{cp}$  du point le plus haut et le point le plus bas du cours d'eau par la longueur du cours d'eau.

### **5- Densité de drainage ( $D_d$ )**

La densité de drainage ( $D_d$ ) est le rapport entre la longueur totale de tous les cours d'eau du bassin versant et la superficie de ce dernier.  $D_d$  est exprimé en km/km<sup>2</sup>. Une valeur élevée de la densité de drainage informe sur la densité du réseau hydrographique, soit sur la rapidité de la réponse à un événement pluvieux

### **6- Le temps de concentration $T_c$**

Le temps de concentration  $T_c$  des eaux d'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 :

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

Temps de ruissellement ou d'écoulement  **$T_r$**  : temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un temps d'acheminement  **$T_a$**  : temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire. Le temps de concentration  **$T_c$**  est égal au maximum de la somme de ces trois termes,

Théoriquement  **$T_c$**  est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou estimé à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

La formule de **SCS** est utilisée pour le calcul du temps de concentration.

**Tableau III.1: caractéristiques hydromorphométriques des bassins versants**

<b>S/Bassin versant</b>	<b>Unité</b>	<b>S/BV1</b>	<b>S/BV2</b>
Nom de l'oued		<b>Rebai</b>	<b>Thletha</b>
Surface du bassin versant	km <sup>2</sup>	6,9	43,28
Périmètre du bassin versant	km	17,85	33,73
Longueur du plus long oued	km	7,49	13,28
Longueur du rectangle équivalent	km	7,97	11,49
Largeur du rectangle équivalent	km	0,88	5,22
Coefficient de Compacité	m	1,9	1,43
Altitude maximale du réseau principal	m	200	210
Altitude maximale absolue du bassin	m	219	233
Altitude minimale	m	21	22
Altitude moyenne		105,9	98,01
Temps de concentration	h	1,22	2,39
Vitesse de ruissellement	km/h	6,13	5,55
Densité de drainage	Km/Km <sup>2</sup>	3,14	1,72
Pente moyenne des sous bassins	%	2,5	1,58
Pente moyenne des cours d'eau principales	%	2,6	0,17
Indice de pente moyenne des sous bassins		22,27	14,36

### **III-2- Caractéristiques climatologiques**

#### **III-2-1- Le climat**

La région de Ben Chaabane possède un climat méditerranéen tempéré marqué par une période pluvieuse relativement courte. La pluviométrie annuelle moyenne fluctue entre 600 et 800 mm. Les orages sont parfois très violents et de courte durée avec de fortes intensités.

En règle générale, la zone se caractérise par des étés secs et chauds et des hivers doux avec des précipitations accentuées durant la période allant d'Octobre à Mars. Le mois le plus chaud est Août.

La température, l'évaporation et la vitesse du vent ont été déterminées à partir des données climatiques de la station de Soumaa (altitude 24,4m NGA) (ANRH Blida) (Tableaux III-2, III-3 et III-4).

**Tableau III-2 : Températures moyennes mensuelles**

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	aout
Station de Soumaa	22.4	18.5	14.3	12.0	10.5	11.3	12.4	14.2	16.9	21.1	24.2	24.4

### III-2-2-L'évaporation

Tableau III-3 : Répartition intra-annuelle de l'évaporation

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	aout	année
%	11	8	4	4	5	5	5	6	9	12	15	16	100
(mm)	132	96	48	48	60	60	60	72	108	144	180	192	1200

Tableau III-4 : Vitesses mensuelles moyennes du vent (m/s)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	année
3.1	3.3	3.2	3.2	3.0	3.2	3.1	3.0	2.8	2.8	2.9	3.2	3.1

### III.3-Géologie de la zone d'étude

Avant de parler de la géologie régionale, il semble judicieux d'approcher le problème d'inondation dans la zone de Ben Chaabane par un rappel succinct des phénomènes de l'érosion, des charriages et des transports solides.

En effet, l'érosion des sols et la nature torrentielle des écoulements de nos cours d'eau souligne le problème funeste qui doit être traité aujourd'hui et dont les effets finissent par atteindre la structure toute entière de la vie sociale et économique des habitants de Ben Chaabane.

Cette situation est aggravée par des facteurs dits anthropogènes, c'est-à-dire l'augmentation des habitants et une occupation des sols pas toujours ordonnée. En effet, il n'est pas rare de rencontrer de grosses constructions sur les lits des oueds et des rejets de l'activité humaine de toutes sortes dans ces derniers.

La Mitidja où se situe la zone de Ben Chaabane est une cuvette synclinale dominée par le Sahel, s'est approfondie pendant la dernière partie du Pliocène et a été comblée par les débris arrachés aux hauteurs de l'Atlas et du Sahel en voie de surrection à ce jour.

La plaine et notamment la zone de BenChaabane n'a pris sa forme en creux qu'à la suite du déblaiement qui commença avec l'abaissement du niveau de la mer au quaternaire. Les cours d'eau issus de l'Atlas assurèrent l'évacuation des matériaux.

Ces cours d'eau ont conservé la direction qu'ils avaient à l'époque précédente et à travers le Sahel mis en relief, ils ont creusé des gorges profondes dites épigéniques.

La surface de la zone porte néanmoins la trace d'un léger remblaiement qui a inauguré l'époque actuelle.

Pour ce qui est des sols, il ya une représentativité homogène typique des sols avec toute une suite de sous types et de variétés qui abondent en zone sahélienne à partir de ceux peu profonds à profonds et développé.

Dans la partie Nord du bassin versant des sols dits zonaux qui sont situés au Sahel et des sols dits azonaux dans la partie Sud de BV.

Parmi les sols azonaux, il ya *des sols alluviaux* et *alluviaux calcaires*, *des sols de marais* tout au long de Oued Thlétha, et *des sols salins* dans la partie qui longe l'amont surtout en rive Sud de Oued Thlétha.

En outre, le chantier du barrage de Douéra favorise inévitablement, par les imposants travaux de terrassement qui ont lieu, des perturbations dans les sols (excavations importantes pour l'extraction d'agrégats pour les besoins du chantier) une érosion plus importante et donc des transports solides exceptionnels. Ceci aggrave la sédimentation des oueds qui se jettent dans le Mazafran (AM . CONSULTING, 2008).

### III.3.1-Caractéristiques géologiques et géotechniques

#### ❖ Lithostratigraphie

Les formations géologiques, qui affleurent dans la région du barrage et au niveau de la cuvette, sont des dépôts néogènes post-nappe de l'Algérie du Nord, qui résultent du remplissage du bassin du tell septentrional au cours de la période mio-pliocène. Ces formations sont représentées par les dépôts décrits à la suite :

#### a-Dépôts du Quaternaire

Les versants de la vallée sont activement dégradés par la solifluxion et l'érosion de l'oued Ben Amar et de l'oued Sidi Bennour et ses affluents. Ces phénomènes ont pour résultat la formation de dépôts de caractéristiques alluvionnaires et colluvionnaires mélangés dans le fond des vallées, lesquels sont constitués par des argiles et par des argiles sableuses de couleur brune avec des graviers arrondis en pourcentage variable

#### b-Pliocène Supérieur (Formation de l'Astien)

Cette formation, qui identifie la régression de la mer Plaisancienne et le dépôt de terres littorales, comprend une variété de lithologies associées à une sédimentation marine de hauts fonds. Les lithologies plus communes sont les grès fins, calcaires de couleur jaune et de conglomérats interstratifiés dans les sables.

Ces formations rocheuses n'affleurent pas dans la zone du barrage ou dans la zone submergée par la retenue. Cependant, d'importants affleurements existent en aval du site du barrage, localisés soit en rive gauche soit en rive droite de l'oued Ben Amar. L'affleurement, de la rive gauche de la retenue, s'étend vers l'amont jusqu'au site du barrage, en formant un petit escarpement de 4 à 5 m de hauteur.

#### c-Pliocène Inférieur (Marnes du Plaisancien)

Il s'agit de marnes argileuses grises, souvent sableuses, fossilifères, et marnes jaunes intercalés de nodules et bancs de calcaire jaune sous-jacents. Ces formations d'assise sont homogènes et constituent la base du Pliocène, formant le substratum du bassin subsidant de la Mitidja. Ils n'affleurent qu'en rive gauche de la retenue, près de l'axe du barrage.

La topographie mamelonnée (collines à pentes douces) est parcourue par un réseau hydrographique chevelu, typique des terrains très peu perméables.

Le grand nombre de petits glissements visibles dans cette rive n'intéresse que la couche superficielle d'argiles altérées qui recouvrent cette formation.

### III.3.2-Géomorphologie

Comme résultat de l'évolution décrite dans le paragraphe précédent, quatre unités géomorphologiques peuvent être clairement définies, dans la Mitidja centrale :

a) **L'Atlas** (altitude 1200 et 1600 m), avec son relief rajeuni et ses fortes pentes domine la plaine et est un centre d'érosion active où le lit des oueds est profondément encaissé.

b) **Le piémont**, avec une altitude moyenne variant de 100 à 150 m, est une zone d'alluvions qui masque le contact structural entre les montagnes de l'Atlas et le bassin. Il est le résultat de l'équilibre tectonique entre un bloc ascendant (l'Atlas) et une zone d'affaissement (le bassin de la Mitidja).

c) **La basse plaine limoneuse (Mitidja)**, avec une altitude moyenne variant de 20 à 50 m de direction NE-SO dont l'affaissement est continu.

Le Sahel, avec une altitude comprise entre 200 et 500 m, constitue la limite septentrionale de l'affaissement et est une unité tectonique originale modifiée par les variations climatiques du Quaternaire.

### **III.3.3-Aperçu stratigraphique**

#### **Terrains paléozoïques**

Des formations schisto-cristallines se retrouvent de part et d'autre de l'embouchure de Oued Mazafran jusqu'aux confins du mont Chenoua sont originaires, selon toute probabilité, des dépôts sédimentaires paléozoïques.

#### **Terrains secondaires**

Dans l'Atlas Blidéen, il est considéré, en général, comme Triasique un complexe lagunaire gypso-salin.

Le complexe gypso-salin présente trois catégories de roches et de minéraux :

1. Les premiers sont d'origine sédimentaire et lagunaire.
2. Les deuxièmes correspondent à des intrusions de roches éruptives dans le complexe lagunaire.
3. Les troisièmes représentent des fragments de roches exotiques provenant de niveaux géologiques antérieurs ou postérieurs au Trias et incorporés à celui-ci à la suite de mouvements tectoniques.

### **III.4-Banque de données**

#### **III.4.1-Données sur l'occupation du sol**

D'après des informations recueillies auprès des services techniques de l'APC de Ben Khellil, l'urbanisation du Centre de Ben Chaabane a démarré vers la fin des années 1970 pour connaître un pic vers la fin des années 1980 qui continue à ce jour. (AM . CONSULTING, 2008).

Cette pression urbanistique particulière introduit plusieurs nouveaux facteurs tels que :

- les rejets solides et liquides domestiques et industriels directement dans des lits des oueds qui traversent Ben Chaabane.
- L'empiètement par des constructions sur les lits d'oueds ( or la loi a prévu que le domaine public hydraulique n'est pas constructible).
- Une densité de population avoisinant les 800hab./km<sup>2</sup> ; ce qui est énorme.

A cela, il faut ajouter que l'entretien annuel des oueds n'est pas prévu dans le budget de la commune, ni jugé prioritaire par la collectivité locale pour juguler les menaces d'inondations quasi permanentes.

Ce constat permet d'appréhender les défis à relever en matière d'urbanisme et d'occupation des sols dans la zone de Ben Chaabane.

La photo satellite présentée dans la figure III.3 corrobore parfaitement et pleinement cette situation.

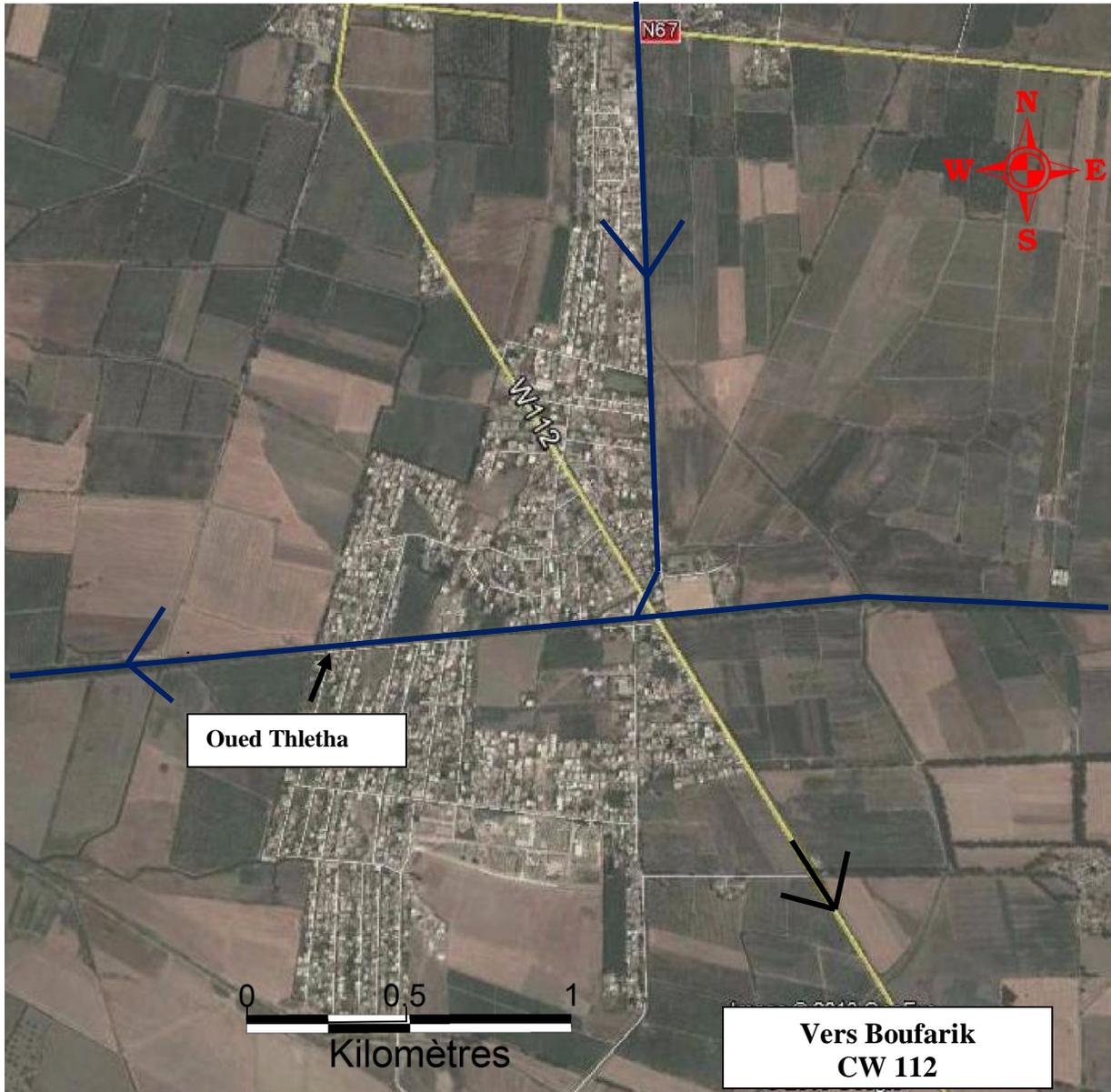


Figure III.3: Vue satellite de Ben Chaabane .

Le niveau fort élevé de la *poussée urbaine* et l'occupation spatiale des sols y est clairement démontré.

La zone urbaine s'accroît particulièrement de manière plus forte vers le Nord et plus faiblement vers le Sud.

Sur ses façades Est et Ouest, l'agglomération est gênée dans son extension par les terres agricoles à fort potentiel.

Une étude portant sur la révision du Plan directeur d'aménagement urbanistique (PDAU) d'Ouled Yaiche a été réalisée. (URBAB Ben Boulaïd pour le compte de la wilaya de Blida et datée du 04/07/2007).

Cette étude, consultée auprès des services techniques de l'APC, est détaillée jusqu'au règlement d'urbanisme.

Le Plan directeur d'aménagement urbanistique – PDAU- de la commune divise le territoire du centre de Ben Chaabane en secteurs :

- urbanisés ;
- urbanisables ;
- à urbanisation future (horizon 2014) ;
- non urbanisables.

En outre, le PDAU institue des zones de protection autour de :

- forages d'eau potable ;
- de l'agglomération ;
- des lignes de transport d'énergie électrique HT/MT ;
- des terres agricoles ;
- et des oueds.

Et des servitudes dont les plus remarquables sont celles relatives:

- aux ouvrages et infrastructures d'irrigation ;
- à la conservation et la protection des eaux de surface et des eaux souterraines ;
- aux canalisations d'eau, d'assainissement et de drainage.

Le PDAU institue aussi une classification des voiries et réseaux divers en trois classes distinctes :

- primaire;
- secondaire;
- et tertiaire ;

dont nous citerons les réseaux d'assainissement et de drainage, pour mémoire.

Pour ce qui est de l'activité des carrières d'agrégat, il leur est fait obligation de se soumettre à un plan d'exploitation approuvé par la Direction des Mines de la Wilaya.

Ce dernier point est important car il est constaté de visu le lavage de graviers sur des plans d'eau aménagés en amont, sur l'oued Ben Amar. En zone naturelle agricole, toute construction à vocation industrielle y est interdite.

Quant aux détails prévus par le plan d'occupation du sol (POS) (figure III.1), il suffit de rappeler que Ben Chaabane est à l'origine, du temps de la colonisation, une ferme agricole appartenant à la famille Chaabane.

Son évolution a suivi la logique de développement le long de parcours de chemins vicinaux. La grande majorité des constructions sont de type individuel qui s'agglutinent le long des voies sans cohérence.

Actuellement, un règlement POS (Plan d'occupation du sol) est en vigueur avec pour objectif affiché se résumant aux 3 fondamentaux suivants:

- 1- régler la destination des constructions dans les différents terrains ;
- 2- limiter pour chaque zone la densité au sol ;
- 3- fixer les normes de construction.

La zone d'étude de protection de Ben Chaabane est dominée en son point amont le plus à l'Ouest par l'imposant barrage de Douéra situé sur l'oued Ben Amar (110 millions de m<sup>3</sup> de capacité).

C'est un barrage réservoir sans apports naturels propres à son BV. Il sera alimenté par le pompage des eaux de surface provenant des Oueds d'El Harrach (dérivation de KEF EL HMAM ou rocher des pigeons à proximité de Megtaa Lazrag à Hammam Melouane et par la dérivation

des eaux en provenance de Oued Mazafran (zone du fer à cheval située à moins de 2000m de la mer).

Les eaux ainsi régularisées seront affectées à l'usage exclusif de l'irrigation agricole dans les futures périmètres de Mitidja centre et Sahel Ouest.

#### **III.4.2-Données pluviométriques**

Concernant les données pluviométriques, l'Agence Nationale des Ressources Hydrique (ANRH) a mis a notre disposition 04 stations pluviométriques, selon leurs situations géographiques, dont leurs caractéristiques sont regroupées dans le tableau III-5:

**Tableau III-5 : Stations pluviométriques**

Station	Code	Coordonnées		
		X (Km)	Y (Km)	Z (m)
<b>Boufarik Pepiniere</b>	021209	518,55	363,4	60
<b>Mouzaia</b>	021208	514,5	358	140
<b>Oued El Alleug</b>	021210	508,5	361,75	55
<b>Soumaa</b>	021234	517,45	517,45	177

#### **III.4.3-Les données hydrométriques**

Les bassins versants des oueds Rebai et Thletha sont dépourvus de stations hydrométriques.

Les stations hydrométriques les plus proches de la zone d'étude et qui contrôlent l'oued Mazafran et ses affluents ne peuvent pas être utilisées vu que leurs cours d'eau drainent des bassins versants de superficies beaucoup plus importantes que celles des bassins des oueds Rebai et Thletha, le ratio avec le plus petit bassin dépasse 63 fois avec Rebai et 6 fois avec Thletha.

#### **III.4.4-Pluies de courtes durée: Averses**

L'étude des averses revêt une importance capitale en hydrologie non seulement dans le dimensionnement des ouvrages en assainissement urbain et rural mais aussi dans l'étude des crues et la connaissance des hydrogrammes probables. La connaissance de la pluie maximale probable est indispensable voir obligatoire pour la détermination du ruissellement.

Pour la région d'étude, les données disponibles au niveau de l'Agence Nationale des Ressources Hydrique de Blida proviennent de deux stations pluviométriques disposant de pluviographes à l'entourage de celle de Boufarik:

- La station de Soumaa ;
- La station de Mouzaia.

Notre choix s'est porté sur la station de Mouzaia parce qu'elle est plus représentative de notre région d'étude par rapport au climat, à la pluviométrie et à l'altitude et aussi à la taille de la série d'observations (32 ans d'observation) ,ce qui favorise la précision de nos résultats.

#### **Conclusion**

Une description physique et morphométrique détaillée de la région de Ben Chaabane a été établie à l'aide du logiciel Mapinfo. Aussi, la présentation des différentes données de bases nécessaires à la modélisation hydrologique dans cette étude a été effectuée.

**Introduction**

Ce chapitre est consacré à la modélisation des courbes intensité-durée-fréquence ( I-D-F), nécessitant une étude statistique des événements pluvieux extrêmes. Dans cette optique, un travail fastidieux de dépouillement des averses est réalisé sur de longues périodes d'observation en fonction de temps de référence courts. Ainsi une analyse minutieuse des données exploitées est effectuée en se basant sur la détermination des maxima annuels, pour la construction et la modélisation des courbes IDF.

**IV.1- Présentation des données pluviométriques de la zone d'étude**

En tenant compte de la situation géographique, de l'altitude, de la longueur de la période d'observation des données et de leur fiabilité, la station pluviométrique de Boufarik Pépinière (021209) a été choisie, pour sa proximité de la région d'étude, et les conditions climatiques similaires.

**❖ Les précipitations annuelles et maximales journalières**

L'ajustement des séries des précipitations maximales journalières et des pluies annuelles à une loi de distribution théorique est effectuée afin de déterminer les intensité de pluie de durée et de période de retour donnée.

**a-Ajustement de la série des pluies annuelles de la station de Boufarik pépinière à une loi Normale**

Une variable appartient à une loi normale lorsque sa fonction de répartition est de la forme:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \tag{IV.1}$$

u : variable réduite de Gauss, donnée par la relation IV.2

$$u = \frac{x-\bar{x}}{\sigma} \tag{IV.2}$$

$\sigma$  et  $\bar{x}$  sont respectivement: l'écart type et la moyenne.

La transformation " $x=\bar{x}+ \sigma . u$ " est l'équation de la droite de Henry sur papier à probabilité gaussienne, elle est présentée dans l'équation IV.3 et la représentation graphique dans la figure I

$$P_{an} = p_{an,p\%} + \sigma.u \tag{IV.3}$$

## Chapitre IV: Etude statistique des événements pluvieux extrêmes

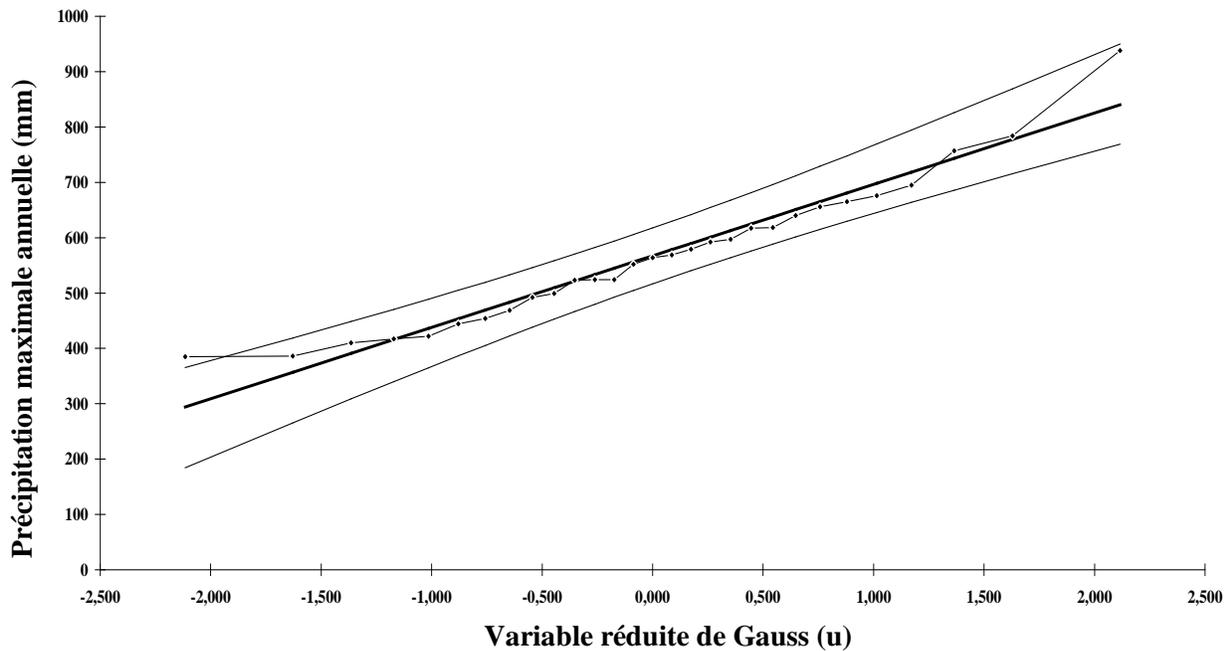
L'équation permettant la détermination des quantiles pour les périodes de retour (10, 50 et 100 ans) est donnée dans l'équation IV.4. Les résultats du calcul sont présentés dans le tableau IV.3.

Les résultats des quantiles des périodes de retour (10, 50 et 100 ans) sont présentés dans le tableau IV.1 et la représentation graphique dans la figure IV.1

$$P = 567,079 + 129,089 \cdot u \quad (IV.4)$$

**Tableau IV.1: Ajustement des pluies moyennes annuelles à la loi Normale (Station de Boufarik)**

Période de retour (ans)	Quantile (mm)	Intervalle de confiance 95%
10	733	P [676 < 733 < 812]=95%
50	832	P [762 < 832 < 940]=95%
100	867	P [792 < 867 < 986]=95%



**Figure IV.1: Ajustement des pluies à la loi Normale (Station de Boufarik)**

**b-Ajustement de la série maximale journalière de la station de Boufarik pépinière**

**Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Galton**

Une variable aléatoire X a une distribution log normale lorsque  $Y=\ln X$  est normale mais rendue dissymétrique par un changement de variables. Sa fonction de répartition est donnée par la relation IV.5

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (IV.5)$$

Avec :

$$u = \frac{\ln x - \ln \bar{x}}{\sigma_{\ln x}} \quad (IV.6)$$

L'équation de la droite de Galton est formulée par la relation IV.7

$$\text{Log } x_{p\%} = \overline{\log x} + \sigma_{\ln x} \quad (IV.7)$$

La détermination des valeurs extrêmes (quantiles) est établie par l'équation I V.8 et les résultats pour les périodes de retour adoptées sont présentés dans le tableau IV.2. Aussi la représentation graphique est en figure IV. 2

$$P_{\max,j,p\%} = e^{1,7+u_{p\%} \cdot 0,159} \quad (IV.8)$$

**Tableau IV.2: Ajustement des P max,j à la loi de Galton (Station de Boufarik)**

<b>Période de retour (an)</b>	<b>Quantile (mm)</b>	<b>Intervalle de confiance</b>
<b>10</b>	83	P [67 < 83 < 98 ] = 95%
<b>50</b>	111	P [83 < 111 < 140] = 95%
<b>100</b>	124	P [90 < 124 < 158] = 95%

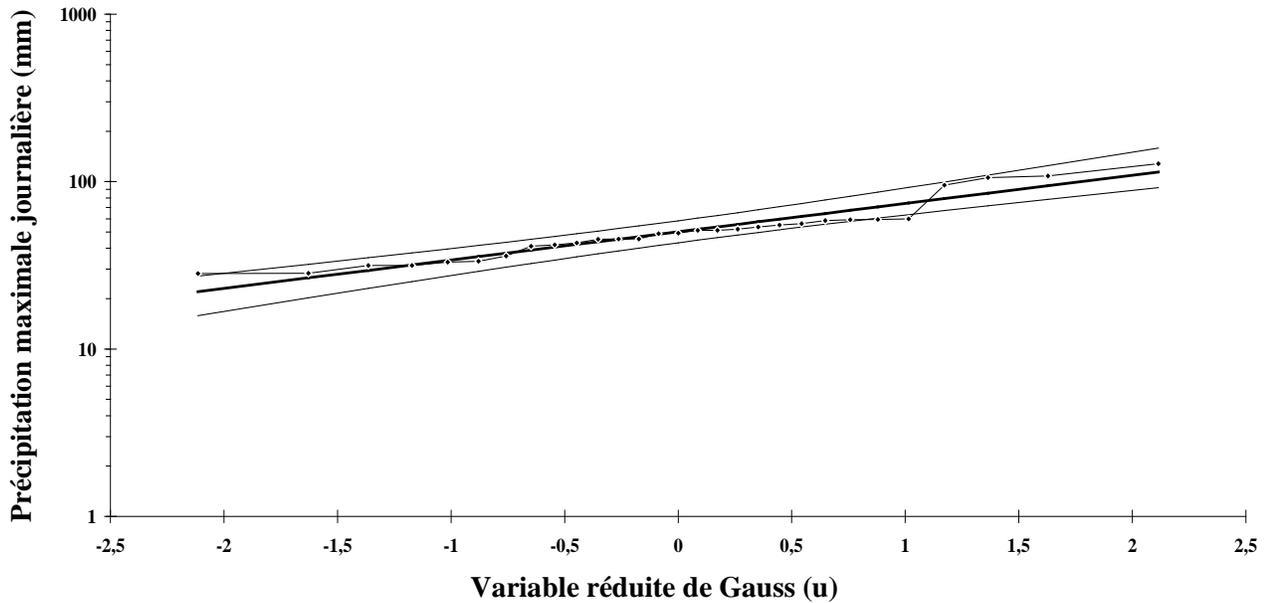


Figure IV.2: Ajustement des  $P_{max,j}$  à la loi de Galton (Station de Boufarik)

#### IV.2- Présentation des données pluviographiques de la zone d'étude

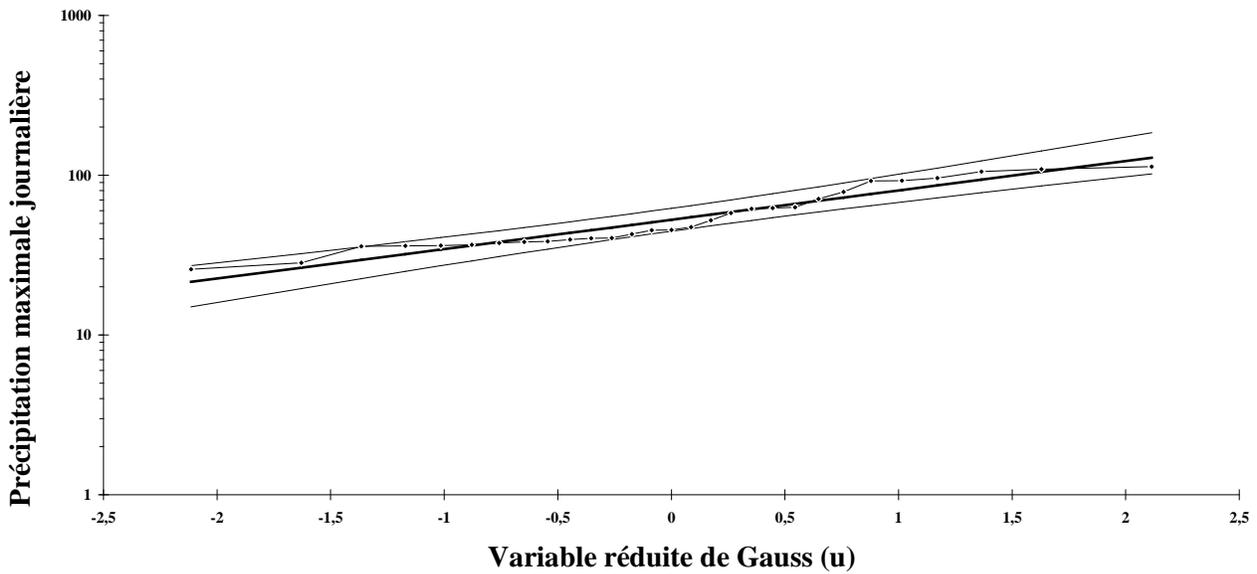
Vu l'absence des données pluviographiques dans la région de Boufarik pépinière, le pluviographe de la station de Mouzaia est pris en considération. La station pluviométrique de Mouzaia est étudiée afin de comparer les deux stations pluviométriques (Boufarik Pépinière et Mouzaia).

#### Ajustement des $P_{max,j}$ de la station de Mouzaia à une loi Log Normale (loi de Galton)

Les résultats des quantiles des périodes de retour (10, 50 et 100 ans) sont présentés dans le tableau IV.3 et la représentation graphique dans la figure IV.3

Tableau IV.3: Ajustement à la loi de Galton (station Mouzaia)

Période de retour (ans)	Quantile (mm)	Intervalle de confiance 95%
10	90	P [75 < 90 < 117]
50	125	P [99 < 125 < 178]
100	140	P [110 < 140 < 205]



**Figure IV.3: Ajustement des  $P_{max,j}$  à la loi de Galton (station Mouzaia)**

**Comparaison des quantiles des  $P_{max,j}$  de la station de Mouzaia avec celle de Boufarik pépinière**

Les résultats de comparaison des  $P_{max,j}$  des deux stations (station de Mouzaia et Boufarik pépinière) sont présentés dans le tableau IV.4

**Tableau IV.4 . Comparaison des  $P_{max,j}$  de la station de Mouzaia et celle de Boufarik Pépinière**

<b>Période de retour (ans)</b>	<b>Quantile (mm) (station de Mouzaia)</b>	<b>Quantile (mm) (station de Boufarik pépinière)</b>
<b>10</b>	90	83
<b>50</b>	125	111
<b>100</b>	140	124

Après comparaison des résultats de l'ajustement des pluies maximales journalières entre les deux stations, il a été constaté que la différence entre les valeurs des quantiles des différentes périodes de retour n'est pas très importante. Ainsi la station pluviographique de Mouzaia est retenue pour cette étude.

### Analyse des données pluviographiques

Les données pluviographiques brutes collectées, à partir de la station de Mouzaia (021132), sont fournies par l'ANRH. Ce pluviographe enregistre la hauteur de pluie cumulée en fonction du temps pendant un épisode pluvieux. Les enregistrements se font à des pas de temps variables de l'ordre de la minute à quelques minutes selon l'intensité de la pluie.

Ces données caractérisées par une longue durée d'observations 32 ans (de 1970/1971 à 2002/2003) contribuent largement à la crédibilité des résultats obtenus.

Le dépouillement des averses consiste à déterminer les valeurs maximales de lames d'eau tombées pendant des durées d'agrégation de (15, 30, 45, 60, 90, 180, 360 minutes), et ceci en traçant pour chaque averse un graphe représentant les lames d'eau en fonction du temps. Afin de s'assurer des résultats du dépouillement, une programmation a été effectuée, assistée par le programme **JAVA**.

Le dénombrement des averses a donné 956 averses enregistrées, variant de 15 minutes à 24 heures.

Deux types de classifications des résultats obtenus par le dépouillement sont effectués pour les 32 années d'observations :

**La première** est une classification mensuelle des averses qui consiste à déterminer le nombre d'averses par mois durant chaque année hydrologique, les résultats sont présentés dans le tableau IV.5.

**La deuxième** est une classification par durée de référence; c'est-à-dire la détermination du nombre d'averses pour chaque pas de temps  $\Delta t=15, 30, 45, 60, 90, 120, 180$  et 360 minutes. Les résultats de cette classification sont présentés dans le tableau IV.6.

**Tableau IV.5 Nombre d'averses (classification mensuelle)**

Année	Mois												Total
	S	O	N	D	J	F	MA	A	M	J	J	A	
1970/1971	1	5	0	0	1	2	11	8	5	3	0	0	<b>36</b>
1971/1972	3	0	7	1	8	5	7	9	4	1	0	0	<b>45</b>
1972/1973	3	6	1	9	4	12	5	1	0	3	0	0	<b>44</b>
1973/1974	3	2	2	6	0	9	12	9	0	0	1	0	<b>44</b>
1974/1975	1	3	0	0	2	6	8	2	4	1	0	0	<b>27</b>
1975/1976	0	1	12	2	1	9	2	4	4	2	2	1	<b>40</b>
1976/1977	1	6	6	6	3	1	2	4	4	1	0	0	<b>34</b>
1977/1978	1	1	5	0	5	1	5	4	2	0	0	0	<b>24</b>
1978/1979	1	8	0	3	2	8	2	3	2	0	0	1	<b>30</b>
1979/1980	3	5	7	4	3	2	5	6	4	0	0	0	<b>39</b>
1980/1981	0	2	3	10	2	6	5	5	5	3	0	0	<b>41</b>
1981/1982	0	1	1	3	7	6	4	2	6	1	0	0	<b>31</b>
1982/1983	1	6	10	6	0	4	3	0	0	0	0	0	<b>30</b>
1983/1984	0	0	1	3	5	7	4	4	8	0	0	0	<b>32</b>
1984/1985	0	4	4	0	5	1	11	3	9	0	0	0	<b>37</b>
1985/1986	2	0	2	3	5	2	10	2	1	1	1	0	<b>29</b>
1986/1987	2	4	6	6	3	7	3	0	1	0	0	0	<b>32</b>
1987/1988	2	1	5	1	2	3	1	1	0	0	0	0	<b>16</b>
1988/1989	0	0	4	20	6	0	7	16	2	1	0	0	<b>56</b>
1989/1990	3	2	6	4	4	0	5	3	4	0	1	0	<b>32</b>
1990/1991	0	1	5	5	3	4	4	2	0	0	0	0	<b>24</b>
1991/1992	1	6	2	1	3	0	7	2	3	2	1	0	<b>28</b>
1992/1993	1	0	0	0	0	4	1	9	1	0	0	0	<b>16</b>
1993/1994	0	0	2	3	0	1	0	4	2	0	0	0	<b>12</b>
1994/1995	3	7	3	3	8	2	6	1	0	0	0	0	<b>33</b>
1995/1996	3	2	3	2	5	9	2	7	1	0	0	0	<b>34</b>
1996/1997	2	1	0	1	3	2	1	7	2	0	1	0	<b>20</b>
1997/1998	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>1</b>
1998/1999	0	0	2	5	6	5	4	0	0	0	0	0	<b>22</b>
1999/2000	2	1	3	12	1	0	1	2	0	0	0	0	<b>22</b>
2000/2001	0	3	5	0	6	2	0	3	1	0	0	0	<b>20</b>
2001-2002	2	1	3	4	4	1	3	1	2	0	2	2	<b>25</b>
<b>Total</b>	<b>42</b>	<b>79</b>	<b>110</b>	<b>123</b>	<b>107</b>	<b>121</b>	<b>141</b>	<b>124</b>	<b>77</b>	<b>19</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>956</b>

**Tableau IV.6 Nombre d'averses par durée de référence**

Années	Pas de temps en minutes							
	15	30	45	60	90	120	180	360
1970/1971	33	30	29	29	29	29	26	13
1971/1972	43	37	37	36	33	27	25	15
1972/1973	45	43	41	41	41	38	34	18
1973/1974	44	44	44	43	41	35	28	18
1974/1975	27	27	27	27	27	25	21	16
1975/1976	41	39	38	38	38	37	32	17
1976/1977	34	34	34	34	32	32	29	17
1977/1978	24	24	24	24	20	19	19	14
1978/1979	30	28	26	25	24	23	19	12
1979/1980	40	39	38	38	36	34	30	17
1980/1981	36	36	35	34	34	32	30	22
1981/1982	32	32	31	29	28	27	24	16
1982/1983	30	29	27	26	24	22	20	15
1983/1984	32	31	30	29	27	22	19	15
1984/1985	39	39	38	36	34	32	31	16
1985/1986	29	27	27	26	23	22	19	9
1986/1987	34	34	32	31	30	28	24	14
1987/1988	15	15	15	15	14	12	9	5
1988/1989	28	27	24	24	21	20	17	9
1989/1990	63	61	60	60	57	57	46	28
1990/1991	26	26	26	26	23	20	20	14
1991/1992	28	28	26	26	23	23	21	16
1992/1993	16	16	16	16	15	15	14	7
1993/1994	12	11	11	10	10	10	9	6
1994/1995	34	33	33	33	28	25	24	15
1995/1996	37	36	36	35	33	29	28	19
1996/1997	18	17	17	16	14	12	12	7
1997/1998	2	2	2	2	2	1	1	1
1998/1999	23	22	22	22	20	19	14	10
1999/2000	20	20	19	19	18	17	15	11
2000/2001	18	18	18	18	17	16	15	10
2001/2002	23	22	22	22	21	17	17	8
<b>Total</b>	<b>956</b>	<b>927</b>	<b>905</b>	<b>890</b>	<b>837</b>	<b>777</b>	<b>692</b>	<b>430</b>

Au vu du Tableau IV.5, il en ressort que la plupart des averses enregistrées se produisent à partir du mois de Septembre et s'étalent jusqu'au mois de Mars et, puis ce nombre diminue jusqu'à atteindre des valeurs minimales aux mois de Juin Juillet et Aout.

La série pluviographique de la station de Mouzaia comprend 32 ans années d'observation de 1970/1971 jusqu'à 2002/2003, sauf qu'une année a été tronquée (1997/1998) du fait que l'enregistrement des lames d'eau pour cette année hydrologique ne couvre que le mois de septembre (voir Tableau IV.5) et donne des valeurs minimales, ce qui n'est pas représentatif en terme de lames d'eau tombées pour cette année.

Le nombre d'averses par temps de référence montre que la majorité des averses ont une durée inférieure à 6 heures (360 min). Ces averses ont des intensités variables avec une succession de fortes intensités sur de courtes durées puis d'intensités moins importantes sur de longues durées.

### IV.3-Constitution de l'échantillon d'étude

L'analyse fréquentielle a permis de montrer que pour les séries chronologiques dépassant la trentaine d'années, il est possible de se limiter à l'étude des valeurs extrêmes annuelles (Meylan et al,1999). Il est toujours intéressant de comparer les résultats obtenus par les SMA avec ceux obtenus avec d'autres échantillons, vu la disponibilité des données sur une longue période d'observations. Dans cette optique, des séries de précipitations sont constituées en considérant toutes les averses enregistrées pour chaque temps de référence. A ce titre, deux séries d'échantillons sont étudiées, l'une est celle des séries du maximum annuel (SMA) et l'autre celle de la totalité des averses.

#### IV.3.1. Premier échantillon (séries du maximum annuel (SMA))

Les séries du maximum annuel sont déterminées à partir des séries dépouillées, et ceci en détectant la valeur maximale de lame d'eau tombée durant les pas de temps de références (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 et 360) minutes pour chaque année hydrologique.

#### IV.3.2- Deuxième échantillon ( totalité des averses)

Concernant la constitution de cet échantillon, il suffit de considérer la totalité des averses dépouillées pour chaque intervalle de référence (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180 et 360 minutes).

### IV.4- Modélisation des courbes intensité-durée-fréquence (I-D-F)

#### ❖ Aperçus sur les courbes IDF

Qu'est ce qu'une courbe IDF ?

Il est bien connu que l'intensité **I** de la pluie est très variable. Aux profanes, cette variabilité peut sembler totalement aléatoire. Pour celui qui s'y intéresse d'un peu plus près, même s'il n'est pas météorologue, il apparaît toutefois qu'il y a certaines « règles » observables qui régissent le phénomène (**Meylan, 1999**).

De l'observation, il est déduit que, « en moyenne », plus la durée analysée (le **D** d'IDF) augmente, plus l'intensité diminue : les averses les plus brèves sont souvent les plus violentes ;

au contraire les longues pluies, sont généralement assez « tranquilles » (de faible intensité). Cette tendance à l'augmentation de l'intensité lorsque la durée diminue, ou inversement à la diminution de l'intensité lorsque la durée augmente, n'est toutefois qu'une moyenne.

Finalement, pour mieux caractériser le phénomène, il est associé à chaque événement une probabilité d'apparition. Pratiquement les ingénieurs et les hydrologues parlent de temps de retour : tel événement se produit, en moyenne sur une longue période, toutes les x années. Il s'agit de fréquence d'apparition (le F d'IDF).

Ainsi, par l'observation soignée des précipitations et l'analyse statistique des résultats, il est possible d'établir une « loi » de comportement qui lie l'intensité, la durée et la fréquence : c'est une courbe dite "Intensité .Durée. Fréquence" soit "IDF".

La méthodologie d'établissement des courbes intensité-durée-fréquence utilisée, est constituée de trois étapes. Dans la première étape, une distribution de probabilité est ajustée à chaque échantillon de chaque durée (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 360 minutes). Dans la seconde étape, les quantiles correspondant aux périodes de retour (10, 50, 100 ans) sont déterminés en utilisant la distribution ajustée et enfin, les courbes IDF sont modélisées en ajustant une équation sur les quantiles estimés pour chaque période de retour au moyen des régressions non linéaires.

La loi statistique utilisée pour l'ajustement des échantillons est la loi Log-Normale. Concernant le modèle utilisé pour la modélisation des courbes IDF, il est déduit de la forme des équations des courbes IDF établies.

Dans cette étude, les courbes IDF sont établies pour les deux séries (les SMA et la totalité des averses).

#### **IV.4.1-Modélisation des courbes IDF dérivées des SMA**

La loi Log-Normale a permis d'identifier les quantiles des S.M.A. Et les représentations graphiques sont illustrées dans l'Annexe 1.

#### **Quantiles des séries du maximum annuel**

Les valeurs extrêmes ou quantiles pour les périodes de retour 10 ans, 50ans, et 100 ans sont présentées dans le tableau IV.7

**Tableau IV.7 : Quantiles des SMA**

Période de retour (T) ans	minutes							
	15	30	45	60	90	120	180	360
10	13,93	20,13	23,91	26,37	27,37	29,31	33,49	46,11
50	19,94	27,94	33,92	36,74	37,79	41,76	47,54	68,52
100	22,63	31,37	38,37	41,29	42,34	47,31	53,81	78,80

**Vérification de l'adéquation de l'ajustement des S.M.A**

**Test de Pearson test de  $\chi^2$  ( $\chi^2$ )**

Parmi tous les tests existants, le test de PEARSON reste le plus pratique et le plus utilisé (Laborde, 1996). Toutefois le test de  $\chi^2$  peut être utilisé comme un test d'adéquation et même parfois comme un test d'homogénéité .

La statistique  $\chi^2$  du test de Pearson, pour un nombre de degré de liberté "  $\gamma$  " est formulée en équation IV.9.

$$\chi^2_{cal} = \sum_{i=1}^K \frac{(n_i - \mu_i)^2}{n_i} \tag{IV.9}$$

où

K: nombre de classe;

$n_i$  : nombre d'observation contenues dans la classe;

$\mu_i$  : nombre d'observation théoriques calculés dans la classe i.

$\chi^2$  est une variable aléatoire qui peut varier de 0 à  $\infty$  .

L'adéquation de l'échantillon est vérifiée si la relation IV.10 est satisfaite. "  $\alpha$  " représente l'erreur de première espèce, est prise égale à 95%

$\chi^2_{cal} \leq \chi^2_{théorique}$  soit:

$$\sum_{i=1}^K \frac{(n_i - \mu_i)^2}{n_i} \leq \chi^2 (1 - \alpha) \tag{IV.10}$$

Concernant la vérification, l'adéquation de l'ajustement des S.M.A avec la loi de Gauss, les résultats du test de PEARSON sont représentés dans le tableau IV.8

**Tableau IV.8 Test de Pearson pour  $\alpha=5\%$**

$\Delta t$ (mn)	$\chi^2$ calculé	$\chi^2$ théorique	Observation
<b>15</b>	2,21	3,84	La loi est vérifiée
<b>30</b>	1,34	3,84	La loi est vérifiée
<b>45</b>	1,51	3,84	La loi est vérifiée
<b>60</b>	3,08	3,84	La loi est vérifiée
<b>90</b>	3,63	3,84	La loi est vérifiée
<b>120</b>	5,79	5,99	La loi est vérifiée
<b>180</b>	7,42	7,81	La loi est vérifiée
<b>360</b>	10,68	11,43	*La loi est vérifiée

\* :  $\alpha=10\%$

## Chapitre IV: Etude statistique des événements pluvieux extrêmes

Les résultats du test d'adéquation de  $\chi^2$  montrent que les S.M.A ajustées à la loi de Galton pour les différentes durées (de 5 min à 180 min ) présentent une bonne adéquation pour un seuil de signification de 95% . Pour la durée de 360 minutes, le seuil de signification est de 10 % .

### Courbes intensité durée fréquence I.D.F

Après validation par le test de  $\chi^2$  les courbes IDF sont élaborées, les résultats sont dans le tableau IV.10. Des graphes superposés sont dressés en mettant en abscisse les durées (15, 30, 45, 60, 90, 180, 360 minutes) et en ordonnée les intensités maximale en (mm/h) pour chaque période de retour.

Les intensités moyennes maximales représentent les valeurs théoriques des quantiles pour les périodes de retour 10, 50 et 100ans. Les résultats de calcul sont dans le tableau IV.9 et les courbes I.D.F sont présentées dans la figure IV.4.

**Tableau IV.9: Intensités moyennes maximales des SMA**

Période de retour (T) ans	minutes							
	15	30	45	60	90	120	180	360
10	55,72	40,26	31,88	26,37	18,25	14,65	11,16	7,68
50	79,76	55,89	45,22	36,74	25,19	20,87	15,84	11,42
100	90,52	62,75	51,169	41,29	28,22	23,65	17,93	13,13

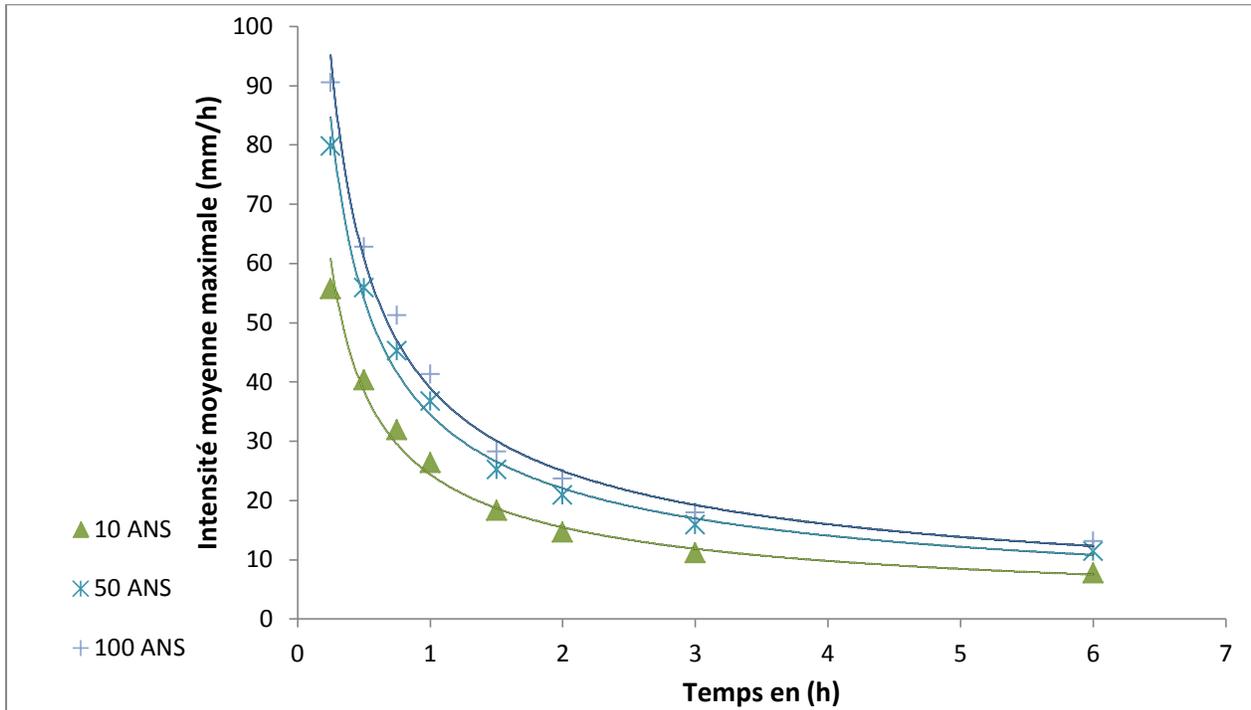


Figure IV.4 Courbes IDF dérivées des SMA pour les période de retour de (2ans à 100ans)

La figure IV.4 représente une superposition des courbes I.D.F correspondante chacune à une période de retour de la station de Mouzaia (Blida) pour différents pas de temps. La relation fonctionnelle qui en découle est de type puissance «  $\bar{i}_t = a \cdot t^{-b}$  » et est représentée dans le tableau IV.10.

**Tableau IV.10. Equations des courbes IDF pour chaque période de retour**

Période de retour (ans)	Modèle $\bar{i}_t = a \cdot t^{-b}$
10	$24,40 \cdot t^{-0,64}$
50	$34,51 \cdot t^{-0,64}$
100	$39,01 \cdot t^{-0,64}$

Où : a et b sont des coefficients d'ajustement déterminés par la méthode des moindres carrés. Dans ce traitement, " b " représente l'exposant climatique de la station pluviométrique. Pour la région d'étude b=0,64.

Après vérification de quelques études dédiées à la protection de la ville de Ben Chaabane contre les inondations, il est constaté que l'exposant climatique utilisé est de l'ordre de " 0,44", inférieur à celui déterminé dans cette étude. Cette sous estimation de l'exposant climatique peut induire un sous dimensionnement du réseau d'assainissement des eaux pluviales dans la mesure où il rentre dans le calcul du débit pluvial.

**IV.4.2- Modélisation des courbes IDF dérivées de la totalité des averses**

La détermination des quantiles pour la totalité des averses est effectuée par l'ajustement à la loi Log Normale dont les résultats graphiques sont présentés dans l'Annexe 2.

Les quantiles pour les différentes périodes de retour sont résumés dans le tableau IV.11, les intensités moyennes maximales sont présentées dans le tableau IV.12 et les courbes IDF sont en figure IV.5.

**Tableau IV. 11: Quantiles pour la totalité des averses**

Période de retour T(ans)	minutes							
	15	30	45	60	90	120	180	360
10	3,92	6,10	7,65	8,82	10,19	11,25	13,41	19,75
50	7,15	10,84	13,55	15,56	17,75	19,50	23,27	34,50
100	8,83	13,29	16,58	19,01	21,59	23,67	28,62	42,01

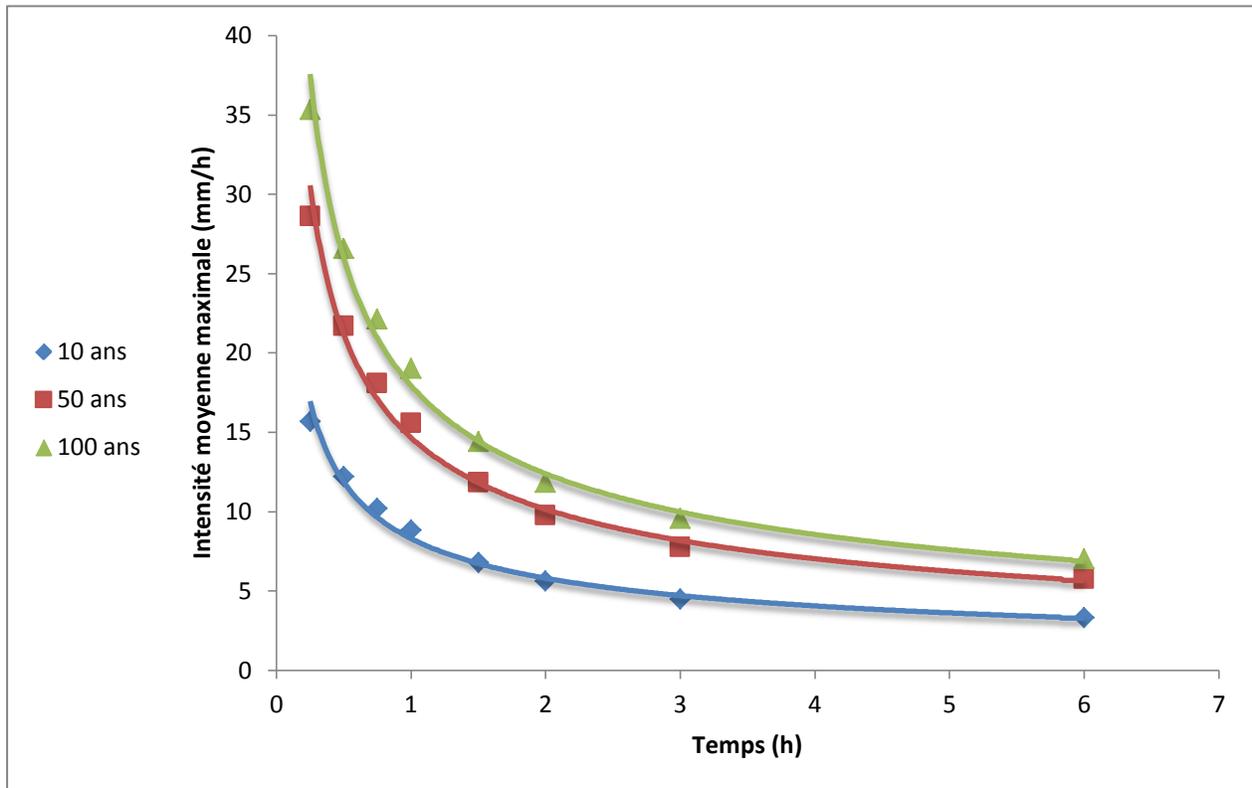


Figure IV.5: Courbes IDF dérivées de la totalité des averses

**Tableau IV. 12: Intensités moyennes maximales pour la totalité des averse**

Période de retour T(ans)	minutes							
	15	30	45	60	90	120	180	360
10	15,68	12,2	10,20	8,82	6,79	11,25	5,63	3,29
50	28,6	21,68	18,07	15,56	11,83	9,75	7,76	5,75
100	35,32	26,58	22,11	19,01	14,39	11,84	9,54	7,00

**Comparaison des quantiles dérivés de la totalité des averse et des SMA**

Après comparaison des résultats des quantiles dérivés de la totalité des averse (tableau IV.12) et les quantiles dérivés des SMA (tableau IV.8), il a été constaté un grand écart concernant les lames d'eau tombées durant les différents intervalles de références. C'est-à-dire que les quantiles de la totalité des averse sont beaucoup plus inférieurs à ceux des SMA entraînant une sous estimation des résultats. Ainsi les quantiles des SMA sont retenus pour la suite de cette étude.

**Conclusion**

L'objectif de ce chapitre était d'établir les courbes IDF et de déterminer l'exposant climatique, afin d'estimer avec précision l'intensité de la pluie sur une durée donnée (durée critique de la pluie) pour des périodes de retour bien déterminées.

L'échantillon d'étude a été déterminé à partir de la modélisation de ces courbes IDF, Cet échantillon constituera l'une des données d'entrées principales (les précipitation) dans la transformation pluie-débit.

Afin d'atteindre ce but, une étude rigoureuse des événements pluvieux extrêmes est établie; ainsi la fiabilité des données disponibles a été vérifiée et validée avant d'entamer cette analyse.

Il a été conclut qu'une analyse fréquentielle des événements extrêmes basée sur une approche SMA était envisageable vu la longue période d'observation du pluviogramme de la station de Mouzaia (Blida) (32 ans) et sa fiabilité prononcée par un processus de test de validation.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation pluie-débit de la région d'étude, avec une description des étapes de cette transformation.

### Introduction

L'estimation des apports d'eau à l'exutoire d'un bassin versant requiert l'étude des écoulements sur le bassin en question. Ces écoulements étant une conséquence des précipitations, il devient nécessaire de remonter aux transformations pluie-débit pour estimer les apports à différents pas de temps.

Ce chapitre se base essentiellement sur la transformation de la lame précipitée en débit à l'exutoire du bassin versant. Cette transformation utilise deux fonctions de transformation indépendantes et juxtaposées. La pluie observée est transformée en eau disponible pour le ruissellement au moyen d'une fonction de production ; le transfert de cette eau du lieu de production à l'exutoire du bassin versant se fait au moyen d'une fonction de transfert.

La modélisation hydrologique du système a été réalisée en utilisant le modèle HEC HMS développés par le centre HEC (*Hydrologic Engineering Center du Corps of Engineers* de l'armée américaine, 2000). La fonction de production adoptée est celle définie par la méthode SCS, fondée sur l'emploi du paramètre de rendement CN ("*curve number*"). La fonction de transfert employée est fondée sur la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique (HUS).

Le débit de crue, ainsi que sa propagation dans le temps est établi pour les périodes de retour de 10, 50 et 100 ans.

### V.1-Présentation de la pluie

La pluie est l'élément clé pour toute étude hydrologique, sa connaissance détaillée est nécessaire. En effet, cette dernière conditionne le débit maximum de ruissellement (Kuichling, 1989; In Ben Zvi, 2009).

Quelque-soit le modèle "pluie débit" élaboré, le hyétogramme représentant la modélisation, servira d'entrée pour l'établissement d'hydrogrammes de ruissellement. Il existe plusieurs méthodes pour l'élaboration des hyétogrammes.

Dans cette étude, la méthode utilisée pour l'établissement des hyétogrammes est celle dérivée des courbes IDF. Les hyétogrammes résultants sont nommés les hyétogrammes synthétiques, dans le sens où la forme de l'averse provient d'une synthèse d'averses observées dans un lieu donnée .

Le logiciel HEC HMS utilise les courbes HDF (Hauteur, Durée, Fréquence) pour les transformer en hyétogrammes de pluie brute qui serviront de données d'entrée pour la fonction de production. Les courbes HDF sont obtenues à partir des courbes IDF et vice versa par une simple relation (V.1)

$$H = \bar{I}_t * \Delta t \text{ (mm/h)} \quad (V.1)$$

Où:

$\bar{I}_t$  en (mm/h) : Intensité moyenne maximale de la lame d'eau pendant un intervalle de temps  $\Delta t$  et pour une période de retour T

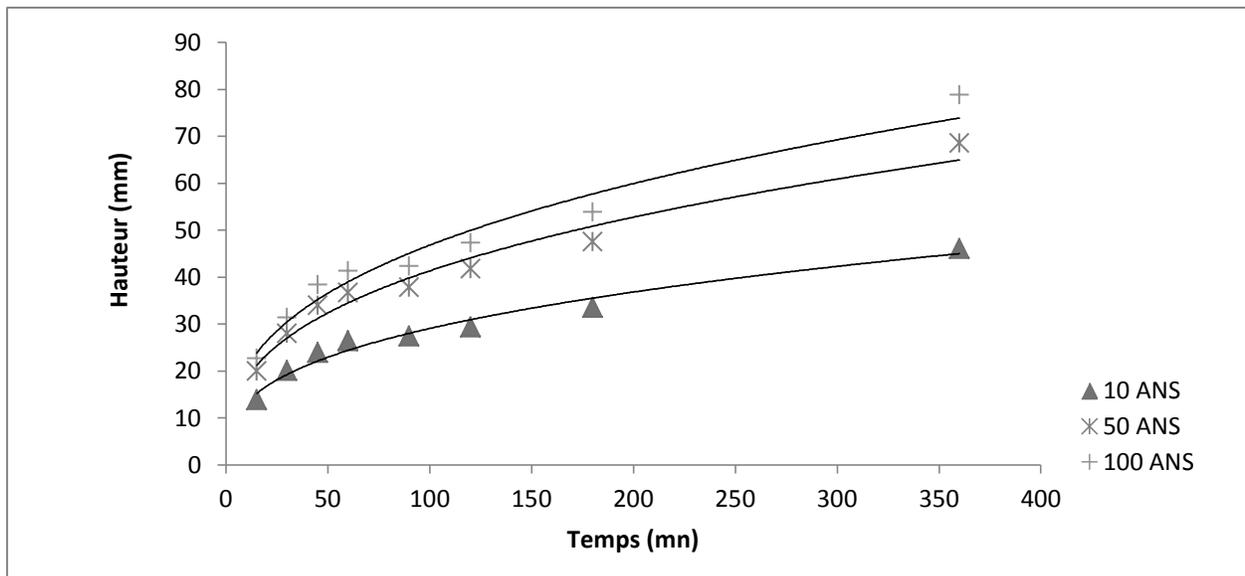
H en (mm) : Hauteur de pluie durant un intervalle de temps  $\Delta t$  et la même période de retour T.

Les hauteurs d'eau utilisées pour l'établissement des courbes HDF sont présentées dans le tableau V.1

**Tableau V.1 Hauteurs de pluies (en mm) pour les périodes de retour de 10, 50 et 100 ans**

Pas de temps (mn)	Période de retour (ans)		
	10	50	100
15	14,23	21,04	24,15
30	20,13	27,95	31,38
45	23,91	33,92	38,38
60	26,37	36,74	41,30
90	27,38	37,79	42,34
120	29,31	41,76	47,31
180	33,49	47,55	53,81
360	46,1	68,52	78,80

Les courbes HDF pour les périodes de retour de 10, 50 et 100ans sont présentées dans la figure V.1



**Figure V.1 Courbes "Hauteur Durée Fréquence" pour les périodes de retour de 10, 50 et 100 ans**

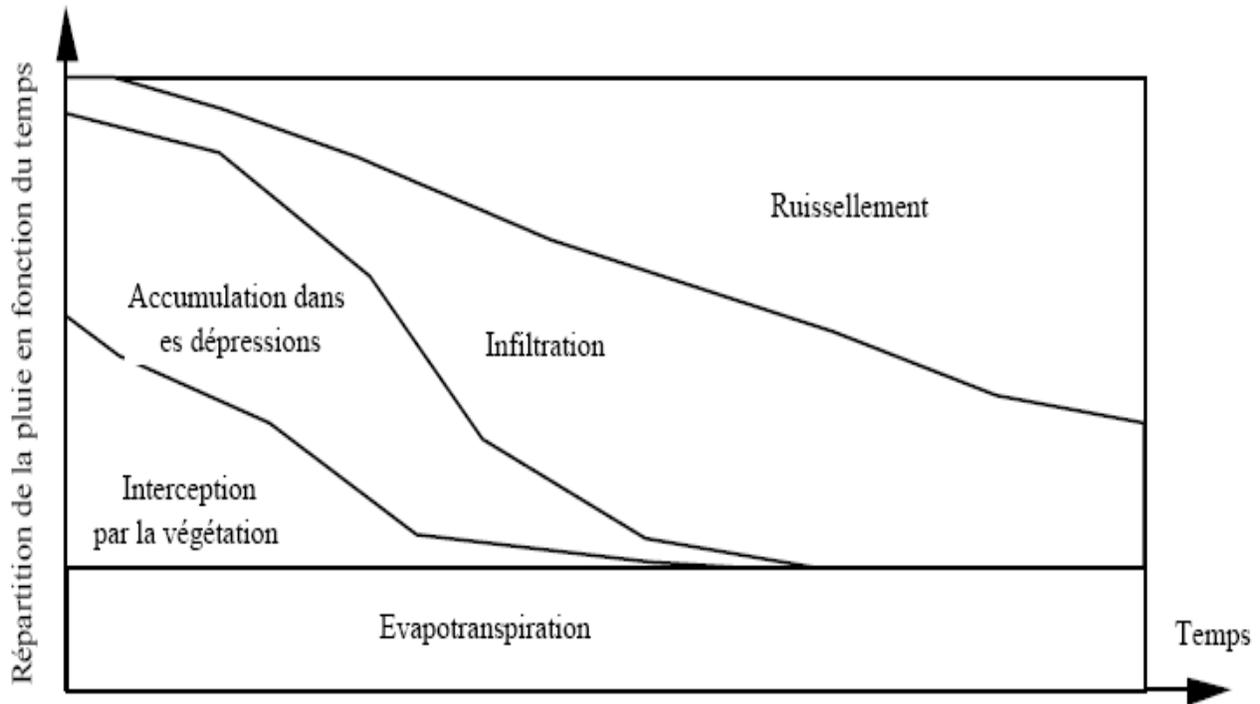
Les hyétogrammes résultants sont présentés ultérieurement dans la partie consacrée à l'application de la modélisation par le logiciel HEC HMS.

### **V.1.1- Transformations de la précipitation**

La pluie précipitée (pluie brute) est soumise à trois types de pertes: les pertes par interception, celles par emmagasinement ou rétention de surface et celles par infiltration. En milieu fortement urbanisé, avec un pourcentage d'imperméabilisation appréciable, les pertes par interception et rétention de surface sont généralement regroupées pour les analyses et sont par ailleurs moins importantes que celles causées par l'infiltration.

#### **❖ Interception et rétention de surface**

Ce devenir est complexe et multiple ; plusieurs auteurs l'ont étudié ; les principales observations sont résumées dans la figure V.2 (LABORDE, 2000).



**Figure V.2: Transformation de la pluie brute en pluie nette**

En fonction du temps ou de la qualité de pluie déjà tombée, une hauteur de pluie se répartit entre :

#### **❖ Interception**

- ▶ une évaporation directe (souvent négligeable)

- ▶ une accumulation dans les dépressions (puis évaporation ou infiltration)
- ▶ une interception par les végétaux (puis évaporation)

### ❖ Infiltration

- ▶ un écoulement souterrain vers les nappes
- ▶ une humidification du sol (puis évaporation ou égouttage)

### ❖ Ruissellement

- ▶ un ruissellement retardé
- ▶ un ruissellement pur

Dans les différents phénomènes de l'interception, seule l'évaporation persiste dans le temps mais elle peut généralement être considérée comme négligeable. L'accumulation dans les dépressions et le stockage dans la végétation ne peuvent que tendre vers une limite finie.

L'infiltration peut s'étudier expérimentalement. Les études faites montrent qu'il existe une vitesse d'infiltration qui évolue avec le temps et le degré initial d'humidité.

La modélisation de l'infiltration en hydrologie a évolué selon deux directions principales : une approche empirique ou hydrologique [avec les modèles du NRCS (Natural Resources Conservation Service) et de Horton] ou une approche basée sur une approximation des modèles physiques (modèle de Green-Ampt, 1991).

## V.2-Modélisation de la transformation pluie-débit

Dans le cadre d'une description des processus selon le principe établi par Horton, la transformation de la pluie en hydrogramme de crue se traduit par l'application successive de deux fonctions, nommées respectivement fonction de production ou fonction d'infiltration et fonction de transfert.

La fonction de production permet de déterminer le hyétogramme de pluie nette à partir de la pluie brute. La fonction de transfert permet quant à elle de déterminer l'hydrogramme résultant de la pluie nette (la fraction de pluie brute participant totalement au ruissellement).

Le passage du hyétogramme de pluie à l'hydrogramme de crue fait intervenir toutes les caractéristiques météorologiques, physiques et hydrologiques du bassin versant considéré, sachant que la détermination d'une relation analytique rigoureuse entre précipitation et débits est une tâche très difficile. Toutefois, l'analyse de séries de couples pluies-débits permet d'obtenir des informations pertinentes sur la fonction de transfert du bassin versant.

### V.2.1. Modélisation de la fonction de production

Il existe une multitude de fonctions de production dans la littérature prenant en compte, l'ensemble des surfaces productives de débit, et considérant plus ou moins individuellement, toutes les différentes pertes au ruissellement (interception par les arbres, rétention des dépressions, etc.) (Motta et al; 1984; Radojevic, 2002; Berthier et al, 2004; Moréna, 2004).

Toutefois la plupart de ces fonctions de production nécessite un calage de leurs paramètres (état de saturation du sol, capacité d'infiltration du sol, etc) ou même un calage de la fonction de production (comparaison des volumes produits par le modèle avec les modèles ruisselés mesurés à l'exutoire).

Dans le cas où le bassin à étudier est dépourvu de stations de jaugeages (pas de données hydrométriques), la fonction de production utilisée ne nécessite pas de calage, comme c'est le cas dans cette étude. Ainsi, le choix de la fonction de production se restreint aux modèles mécanistes.

Dans cette étude, la fonction de production choisie est fréquemment utilisée, et dont la fiabilité était prouvée, et ne nécessite pas de calage. Cette fonction tend à présenter l'écoulement du ruissellement de la manière la plus réaliste possible, c'est-à-dire elle doit prendre en considération (i) les différents types de surfaces contributives au ruissellement, perméables, imperméables, connectées et non connectées, (ii) les pertes initiales dues à la rétention et à l'interception, (iii) la variation du taux d'infiltration dans le temps et en fonction de l'intensité de la pluie, (iv) et l'état hydrique du sol.

La fonction de production qui remplit ces conditions, est la fonction de perte au ruissellement dérivée de la méthode SCS-CN (soil conservation service).

La méthode du SCS-CN (USDA-SCS 1972) a été développée par l'USDA-NRCS (US Département of Agriculture – Natural Resources Conservation Service), anciennement appelé l'USDA-SCS (US Département of Agriculture – Soil Conservation Service). Elle permet d'estimer le ruissellement de surface induit par un épisode pluvieux donné en fonction des caractéristiques du bassin versant dans lequel il survient. Bien qu'à l'origine cette méthode ait été développée pour calculer des débits pour de petits bassins agricoles et pour évaluer les impacts de différentes pratiques agricoles sur le ruissellement, elle a été subséquentement élargie et appliquée à l'analyse des bassins urbain et rural.

Une fonction de production de type SCS est appliquée à la pluie brute pour obtenir une pluie nette. A chaque pas de temps un taux d'infiltration est calculé.

Le modèle du SCS s'appuie sur le concept que la précipitation totale tombant sur un bassin peut être séparée en trois composantes: le ruissellement direct (Q), la rétention qui se produit dans le bassin (F) et les pertes initiales (Ia). La relation entre la précipitation (P) et les trois composantes est formulée par la relation V.2 :

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (V.2)$$

Avec:

- Q : Ruissellement direct (mm) ,
- P : Précipitation cumulée (mm),
- I<sub>a</sub> : Pertes initiales (mm),
- S : Rétenion potentielle maximale du sol(mm) .

La rétenion se produisant réellement se définit avec la relation V.3 .

$$F = (P - I_a) - Q \quad (V.3)$$

Substituant V.3 dans l'équation V.2 la relation V.3 devient :

$$\frac{(P - I_a) - Q}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (V.4)$$

Soit: Q

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (V.5)$$

Cette équation contient une quantité connue (P) et deux inconnues (I<sub>a</sub> et S). En se basant sur les résultats de simulations, il est considéré que les perte initiale " I<sub>a</sub> = 0,2 .S". Ceci donne donc en transposant dans l'équation V.5 la relation V.6

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P + 0,8S)} \quad (V.6)$$

La relation V.6 est l'équation de base permettant de calculer le ruissellement Q à partir de la précipitation P. Pour évaluer la seule inconnue, S, le concept d'un indice de ruissellement CN (run off curve number) est développé . L'indice CN est relié au stockage S par la relation V.7  
Le potentiel de rétenion maximum, S, et les caractéristiques du bassin versant sont reliés par l'intermédiaire du nombre de courbe CN (Curve Number) par la relation V.8

$$S = \frac{25400 - 254. CN}{CN} \quad (V.7)$$

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (V.8)$$

(S en mm)

Le CN est une transformation non-linéaire de S qui est un paramètre de stockage; il est déterminé en considérant essentiellement les types de sol du bassin et le couvert végétal.

Le CN varie de 0 à 100. Le CN de 100 correspond à un stockage nul sur le bassin, donc à un ruissellement de 100% des eaux de pluie. Un CN de faible valeur correspond à des sols très perméables.

Le CN est estimé en fonction du type du sol (groupe de sol) et en fonction du pourcentage des surfaces construites par rapport à la surface totale du site à étudier.

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

**Groupe A (faible potentiel de ruissellement) :** Sols présentant des taux élevés d'infiltration même lorsque saturés et étant principalement constitués en profondeur de sable ou de gravier bien drainés ou excessivement bien drainés. Ces sols possèdent un haut taux de transmission de l'eau infiltrée.

**Groupe B :** Sols avec des taux d'infiltration moyen à saturés, composés essentiellement de sable ou de gravier modérément drainés à bien drainés sur des profondeurs modérées à importantes, avec des textures modérément fines à modérément grossières. Ces sols possèdent un taux modéré de transmission de l'eau.

**Groupe C :** Sols présentant des taux d'infiltration lents presque saturés, composés principalement de sols avec une couche qui retarde le mouvement vertical de l'eau ou de sols avec une texture modérément fine à fine. Ces sols ont un taux de transmission de l'eau qu'on peut qualifier de faible.

**Groupe D (potentiel élevé de ruissellement) :** Sols avec de très faibles taux d'infiltration presque saturés, constitués principalement d'argile en surface ou à une faible profondeur ou de sols avec une nappe phréatique haute en permanence. Ces sols présentent un très faible taux de transmission de l'eau.

Le tableau V.1 donne les valeurs de CN pour différentes surfaces et les différents groupes de sols.

Soulignons que les valeurs présentées au tableau V.2 sont valides pour des conditions antécédentes d'humidité moyennes (CAH II). Une fois le CN connu pour ces conditions moyennes, les équations V.9 et V.10 sont utilisées pour évaluer le CN pour des conditions sèches ou pratiquement saturées (CAH I ou III) (SCS, 1986; Chow *et al.*, 1988) :

$$CN(I) = \frac{4,2 CN(II)}{10 - 0,058CN(II)} \quad (V. 9)$$

$$CN(II) = \frac{23 CN(I)}{10 - 0,3CN(I)} \quad (V. 10)$$

La définition plus ou moins arbitraire des conditions sèches, moyennes ou humides est donnée au tableau V.2 . Les équations à la base des valeurs contenues dans ce tableau sont fournies par la littérature (NRCS, 1986).

**Tableau V.2 Indices de ruissellement CN pour différentes occupations du sol (conditions antécédentes d'humidité moyennes (II), Ia = 0,2S et le pourcentage des surfaces construites**

Pourcentage des surfaces construites (Impervious) (%)	Groupe de sol		
	A	B	C
65	77	85	90
38	61	75	83
25	54	70	80
20	51	68	79

Source: (SCS, 1986)

Pour un bassin versant composé de différents types de sols, le CN moyen est calculé par la relation V.11

$$N(I) = \frac{\sum_i^n a_{ij} CN}{\sum_i^n A_i} \quad (V. 11)$$

Où, j: 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 et A<sub>i</sub> : l'aire du sous-bassin i.

**Tableau V.3 Classification des classes de conditions antécédentes d’humidité pour la méthode SCS de calcul des pertes.**

Groupe de conditions antécédentes	Précipitation pour les 5 jours précédents (mm)	
	Saison dormante	Saison de culture
I	moins de 12,5	moins de 35,4
II	12,5 à 28	35,4 à 53,3
III	plus de 28	plus de 53,3

Source : (Soil Conservation Service, 1972)

**Calcul du numéro de la courbe de saturation CN (Curve Number) de la région d’étude**

D’après l’étude d’occupation du sol présenté dans le chapitre III, la ville de Ben Chaabane a connu une poussée urbaine importante ces dernières années (Figure III.2). Le pourcentage des surfaces construites est estimé à 38%. Rappelons que le bassin versant est dominé par une couverture végétale très développée, 2/3 du bassin sont une plaine de terres agricoles occupées par des vergers et en jachère avec une bonne infiltration donnant lieu à un faible ruissellement d’où le numéro de la courbe de saturation est de 75. Le 1/3 restant du bassin est un versant couvert par des agrumes et de la viticulture, avec une infiltration moyenne d’où un numéro de la courbe de saturation de l’ordre de 61.

Par pondération, le numéro de la courbe de saturation adopté est de l’ordre de 70 pour les sous bassins de Tletha et Rebai.

La relation V.5 ne permet pas une distribution temporelle. Afin d’obtenir l’évolution du ruissellement dans le temps, une modification de la relation V.5 est effectuée, (Boukhelifa, M, 2010), soit:

$$F = \frac{S(P - I_a)}{P - I_a - S} \tag{V.12}$$

L’équation V.12 contient deux constantes: S et I<sub>a</sub> et deux variables en fonction du temps: F et P. Donc le taux d’infiltration F(t) s’obtient en dérivant la relation V.13 par rapport au temps.

$$F(t) = \frac{dF}{dt} = \frac{S^2}{(P - I_a + S)^2} \frac{dP}{dt} \tag{V.13}$$

Où:  $\frac{dP}{dt}$  représente l'évolution de l'intensité de la pluie durant l'averse et peut être tirée des courbes IDF ou du hyétogramme de pluie brute.

Ainsi en considérant la relation V.13 et le hyétogramme de pluie brute, l'évolution de la pluie nette au cours du temps peut facilement être déduite.

Dans cette étude, le logiciel HEC-HMS utilise la pluie brute déductible des courbes HDF (Hauteur, durée, fréquence) pour la détermination de la pluie nette.

### Variation temporelle de la fonction de production

L'utilisation conjointe de plusieurs pas de temps, mensuel, journalier et élémentaire, permet d'éclairer les phénomènes sous des aspects différents. (Cah ORSTOM, 1985)

La description phénoménologique complète n'est possible et n'est intéressante qu'aux petits pas de temps, inférieurs à une heure.

Au pas de temps journalier, les différents écoulements rapides se sont déjà regroupés. Aucune information n'est donnée sur la forme de l'averse, et les algorithmes de substitution qui tiennent compte d'une forme moyenne d'averse pour un certain climat, sont suffisants.

Au pas de temps mensuel, la détermination des écoulements se fait à partir de considérations encore plus globales de bilans hydriques alors que les phénomènes transitoires de décroissance de l'infiltration pendant l'averse deviennent très secondaires. Les écoulements mensuels résultent de l'accumulation d'un ensemble d'événements météorologiques et sont faiblement influencés par les circonstances particulières de ces événements.

Le nombre de paramètres augmente au fur et à mesure que la description des phénomènes devient plus précise, c'est-à-dire que le pas de temps diminue.

Il est évidemment souhaitable que les différentes fonctions de production à des pas de temps différents, qui traduisent une approche différente des mêmes phénomènes, aient en commun le plus grand nombre possible de paramètres, mais ce résultat n'est pas automatique et ne peut être obtenu qu'après un assez long travail de réglage des algorithmes divers utilisés dans ces fonctions de production, de façon à les rendre compatibles.

Une fois ce résultat acquis, une chaîne de programmes de calcul est obtenue, à différents pas de temps, qui s'emboîtent les uns dans les autres.

#### ❖ Avantages et inconvénients respectifs de chaque pas de temps

Les différents pas de temps ont leur intérêt propre, et peuvent être utilisés séparément pour répondre à des problèmes précis partiels, (Cah ORSTOM, 1985).

**a-Pas de temps mensuel :** le principal intérêt de ce pas de temps, qui utilise en entrée les précipitations et l'ETP mensuelles, est sa rapidité et sa simplicité de mise en œuvre. Il peut très bien convenir pour une prédétermination des écoulements mensuels ou dans une phase provisoire ou préliminaire à une étude plus conséquente. Le principal inconvénient de ce pas de temps se situe au niveau des transferts. En effet, de transfert au pas de temps mensuel est inconcevable. Sur les bassins de grandes dimensions où le transfert n'est pas total dans le pas de temps, ce

problème est traité en se ramenant à un pas de temps pseudo-journalier obtenu en divisant l'écoulement mensuel produit par le nombre de jours du mois.

**b-Pas de temps journalier :** le pas de temps journalier est assez hybride du point de vue de la fonction de production. La forme de l'averse n'est pas connue, et le calcul de la production des écoulements rapides est très approximatif. Le transfert au pas de temps journalier est, par contre, intéressant pour la plupart des bassins d'assez grande dimension. C'est en fait le pas de temps le plus pratique pour les extensions de données. Il ne faut pas oublier toutefois qu'une extension fiable ne peut être effectuée qu'à partir d'un fichier de précipitations journalières homogénéisées. Sur le plan théorique, l'utilisation du pas de temps journalier peut permettre d'étudier les mouvements des écoulements, débit de tarissement, ressuyage lent, et le calage des paramètres qui règlent ces écoulements.

**c-Pas de temps élémentaire :** la mise en œuvre de modèles aux petits pas de temps est assez lourde puisqu'elle nécessite l'utilisation de relevés d'enregistrements de pluie à un ou à plusieurs pluviographes.

Ce pas de temps est essentiellement destiné à l'étude et à la compréhension des phénomènes de distribution temporelle des débits et a pour objectif pratique l'étude des débits de pointe et l'élaboration de méthodes de prédétermination de ces débits.

Pour des systèmes hydrologiques, la précipitation est sans conteste le paramètre le plus important puisqu'elle constitue l'élément moteur générant les débits et volumes de ruissellement devant être pris en compte dans un bassin versant.

Dans cette étude, le type de pas de temps utilisé pour la modélisation de la fonction de production est le pas élémentaire. En effet, les enregistrements d'un pluviographe dont la durée d'observation est satisfaisante sont disponibles ce qui permet la détermination du débit de pointe de la région d'étude.

### V.2.2.Modélisation de la fonction de transfert

La transformation de la pluie nette en hydrogramme de ruissellement peut se faire selon deux hypothèses quant au comportement hydrologique du bassin : cette réponse hydrologique peut être assumée linéaire ou non linéaire, et dans ce dernier cas on doit également spécifier quelle forme prend cette non-linéarité. Une réponse hydrologique linéaire implique une augmentation proportionnelle de la valeur calculée en fonction d'une augmentation des valeurs d'entrée.

L'exemple le plus courant de cette approche est la méthode rationnelle ; en considérant un coefficient de proportionnalité, un débit est obtenu à partir de données de pluie et de la surface du bassin. Les bases de la méthode appelée rationnelle remontent au milieu du 19<sup>e</sup> siècle (Mulvaney, 1851). En Amérique du Nord, c'est à Emil Kuichling (Kuichling, 1889) qu'est généralement attribuée la paternité du concept, qui a survécu jusqu'à nos jours à peu près dans sa forme originale.

Cette méthode a de nombreuses dérivées. La plus connue étant la méthode superficielle de **Caquot (Bourier, 1997; CERTU,2003; Satin et al,2006)**. Ces approches permettent seulement le dimensionnement du réseau d'assainissement pluvial, c'est-à-dire le calcul du débit maximum

à l'exutoire. Donc, la simulation du ruissellement ne peut être établie par cette méthode car elle ne permet pas d'obtenir d'hydrogramme.

Une autre approche où une linéarité est assumée entre la pluie nette et le calcul du débit est celle de l'hydrogramme unitaire. Cette méthode a été développée dans les années 30 par l'école des hydrologues Américains, Shérman et Horton (Touaibia, 2004). Cette méthode permet de calculer l'hydrogramme à l'exutoire, généré par une pluie d'intensité constante. La méthode de l'hydrogramme synthétique est une dérivée de la méthode de l'hydrogramme unitaire ne nécessitant pas de mesures hydrométriques. Néanmoins cette méthode ne prend pas en compte le stockage dans le bassin versant, elle considère que l'écoulement à l'exutoire commence en même temps que l'évènement pluvieux. Toutefois la méthode de l'hydrogramme unitaire est une contribution importante à l'étude du phénomène de l'écoulement de surface, car elle sert de base aux fonctions de transfert les plus couramment utilisées (Musy et al., 1998).

D'autre part, il est considéré d'après les observations et mesures que les débits ne varient pas nécessairement au même taux que la pluie nette et qu'il existe la plupart du temps un décalage entre le moment où se produit le débit maximum et celui où la pluie nette est observée, alors un modèle non linéaire est utilisé pour reproduire adéquatement la réponse hydrologique du bassin. Dans ce cas, l'établissement de la forme que prendra cette non linéarité et comment elle sera exprimée est indispensable. Les principales méthodes qui ont été utilisées en hydrologie urbaine sont l'utilisation des équations de Saint-Venant décrivant l'écoulement non permanent, des bassins fictifs au comportement linéaire arrangés en cascade (Nash, 1957) et la définition d'un bassin non linéaire.

Dans ce travail, la fonction de transfert utilisée est une fonction linéaire par la méthode de l'hydrogramme synthétique.

### **V.3-Application de la modélisation pluie-débit avec le logiciel HEC HMS pour le bassin versant de Ben Chaabane**

#### **V.3.1.Présentation du logiciel HEC HMS utilisé pour la modélisation pluie-Débit**

La modélisation hydrologique a été menée en utilisant le logiciel HEC HMS. Ce logiciel fait partie de la famille des logiciels développés par le centre HEC (*Hydrologic Engineering Center du Corps of Engineers* de l'armée américaine). C'est un logiciel très flexible employé pour modéliser la transformation pluie-débit dans un bassin versant ou une région. Il offre une grande liberté dans la modélisation des bassins versants grâce aussi bien aux nombreux éléments proposés pour le bassin versant qu'à la variété des théories proposées pour modéliser le ruissellement, les pertes ou encore les précipitations.

#### **Préparation des entrées du logiciel**

Pour se faire, trois composantes doivent nécessairement être décrites:

- le modèle du bassin
- l'aspect météorologique du bassin ou précipitation, infiltration, évaporation,.....
- la spécification des contrôles (temps du début et la fin de l'averse, incrément du temps)

### 1-Description du modèle du bassin

Pour décrire le modèle du bassin à étudier, des bases de données sont introduites dans le logiciel HEC HMS:

#### Schématisation du bassin

Le bassin versant de Ben Chaabane (présenté dans le chapitre II) est subdivisé en deux sous bassins, le sous bassin de Oued Rébai et celui de Oued Thléta (Figure III.2)

La schématisation consiste à décrire le bassin versant, générer ses composants et représenter les connections entre les éléments du bassin.

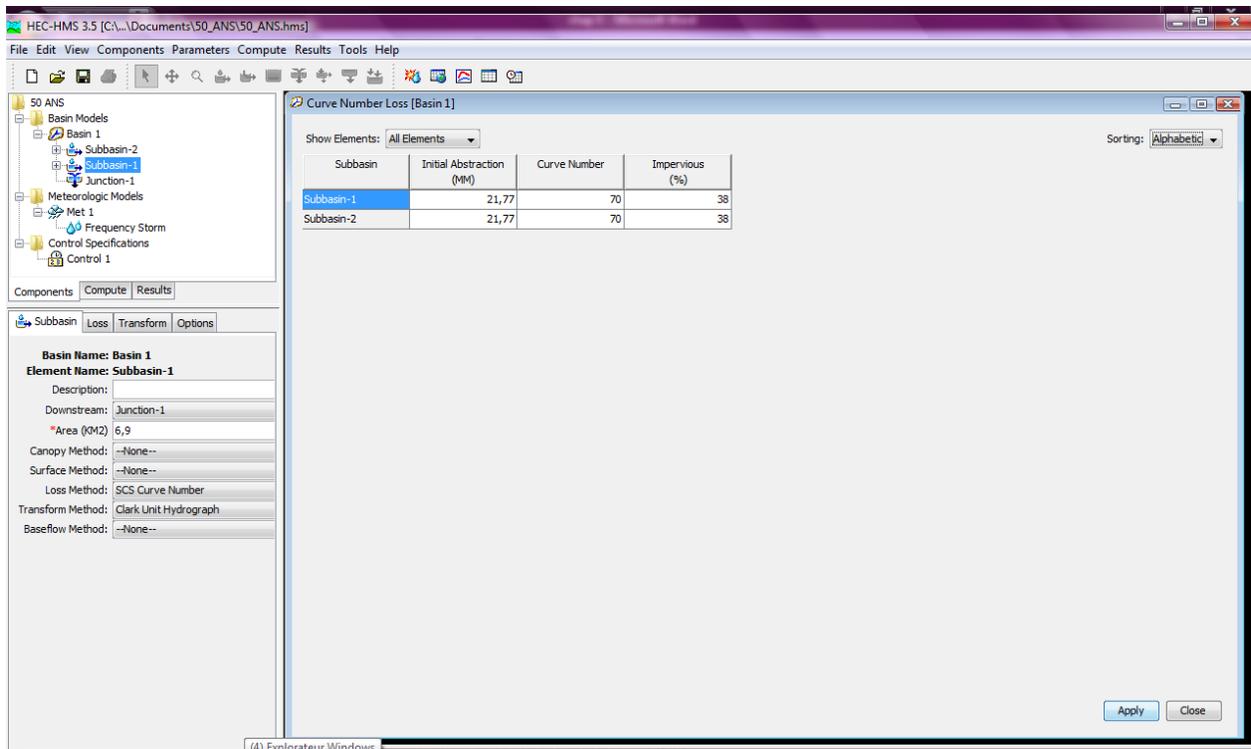
#### Modélisation de la fonction de production

Le volume écoulé à travers le bassin versant est déterminé par le logiciel, en soustrayant aux précipitations brutes la quantité d'eau infiltrées, évaporées et interceptées.

La modélisation de la fonction de production est établie par la méthode SCS-CN (Service Conservation Soil) décrite précédemment dans le paragraphe V.

Rappelons que le modèle SCS Curve Number (CN) 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 V.6 (HEC-HMS, 2000)

Dans le paragraphe V.2.1, concernant la présentation de la fonction de production, le numéro de la courbe de saturation est estimé à 70. L'introduction des données pour la fonction de production sont présentés dans la figure V.3



**Figure V.3 Paramètres introduits dans le logiciel HEC-HMS pour la fonction de production SCS Curve Number**

**Modélisation de la fonction de transfert**

La simulation du ruissellement par le logiciel HEC HMS utilise la méthode dérivée de la méthode de l'hydrogramme unitaire.

L'hydrogramme unitaire calcule le débit de ruissellement par unité de hauteur d'eau en excès tombée sur le bassin versant. Cette méthode repose donc principalement sur l'hypothèse de linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement. L'équation de convolution s'écrit sous la forme de la relation V.14 (HEC-HMS, 2000).

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq m} P_m U_{n-m+1} \quad (\text{V.14})$$

Avec :

$Q_n$  est le débit de ruissellement au temps  $n.\Delta t$ ,

$P_m$  est l'excès de précipitation entre  $m\Delta t$  et  $(m+1)\Delta t$  (en hauteur d'eau),

$U_{n-m+1}$  est la valeur de l'hydrogramme unité au temps  $(n-m+1)\Delta t$ .

Cette méthode repose sur un ensemble d'hypothèses, soit:

- La distribution spatiale de l'excès de précipitations doit être uniforme et son intensité reste constante durant l'intervalle de temps  $\Delta t$  ;
- La linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct;
- L'hydrogramme unitaire résultant est indépendant des précipitations antécédentes;
- L'excès de précipitation en un pas de temps donné est censé produire un hydrogramme, avec un temps équivalent, indépendamment de l'intensité des précipitations.

La méthode dérivée de la méthode de l'hydrogramme synthétique utilisée par le logiciel est celle de l'hydrogramme unitaire synthétique de CLARK.

**Présentation du modèle d'HU synthétique**

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

La simulation avec HEC-HMS par le modèle de CLARK nécessite la détermination du temps de concentration (time of Concentration) et du coefficient de stockage (Storage Coefficient) des sous bassins versant.

Le temps de concentration pour chaque sous bassin a été déterminé dans le chapitre III.

Le coefficient de stockage ( $C_s$ ) (en heure) est approximé par une valeur correspondant à la moitié de celle du temps de concentration, soit (HEC-HMS, 2000):

L'insertion des données pour la modélisation de la fonction de transfert est présentée dans la Figure V.4

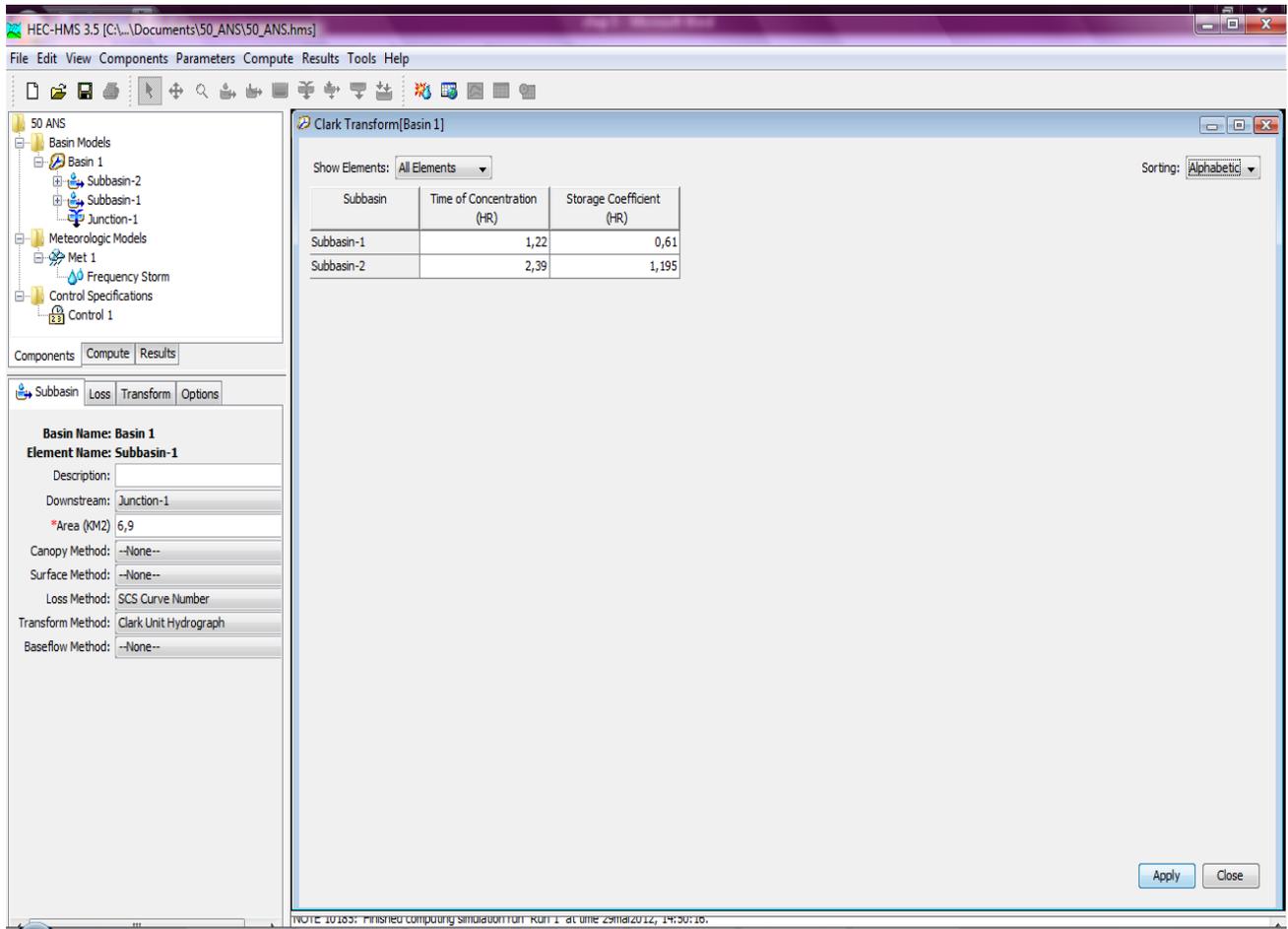


Figure V.4 Paramètres introduits dans le logiciel HEC-HMS pour le modèle de ruissellement de Clark

$$C_s = 0,5 * T_C$$

V.15

## **2-Description des précipitations**

Les hauteurs de pluie sont déduites des courbes HDF (hauteur, durée, fréquence) présenté dans ce chapitre dans le paragraphe concernant la présentation de la pluie.

HEC-HMS applique un coefficient de correction de surface aux hauteurs données par les courbes HDF. La distribution de l'intensité des précipitations est non uniforme sur le bassin versant. La hauteur moyenne sur la surface du bassin est inférieure à la hauteur donnée par les courbes HDF. Pour palier à ce problème, le US. Weather Bureau, a défini des facteurs qui permettent d'ajuster les hauteurs données par les courbes HDF à la hauteur moyenne. Ces facteurs sont fonction de la surface du bassin et de la durée de la pluie (Henine, 2005).

## **3-Définition des contrôles**

Cette étape consiste à introduire comme entrée :

❖ **La durée de l'averse**, Dans le chapitre IV consacré à l'étude statistique des événements pluvieux extrêmes, et après l'analyse minutieuse des pluviogrammes ainsi que la classification des averses par pas de temps de référence, la durée de l'averse retenue est de 6 heures.

❖ **L'Intervalle de temps de simulation**, l'intervalle retenu pour la simulation de l'hydrogramme de crue est de 15 minutes, c'est le même intervalle utilisé pour la modélisation des courbes IDF et HDF.

❖ **La Simulation hydrologique et présentation des résultats**, Après détermination des données d'entrée, ainsi que leur insertion, la simulation est lancée. Les résultats graphiques pour les différentes périodes de retour sont présentés dans la figure V.5

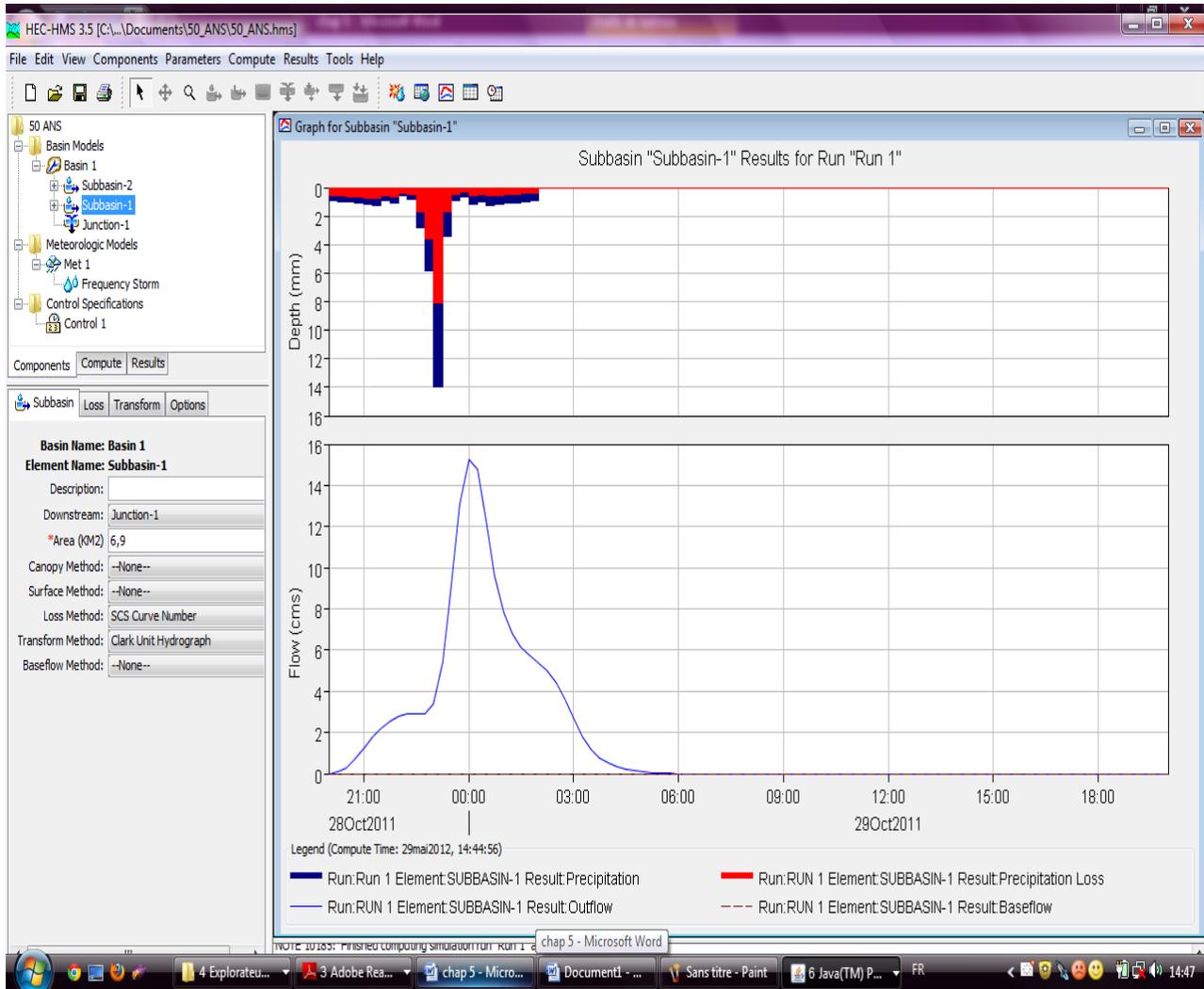


Figure V.5: Hydrogramme de crue et hyétogrammes de pluie brute et nette

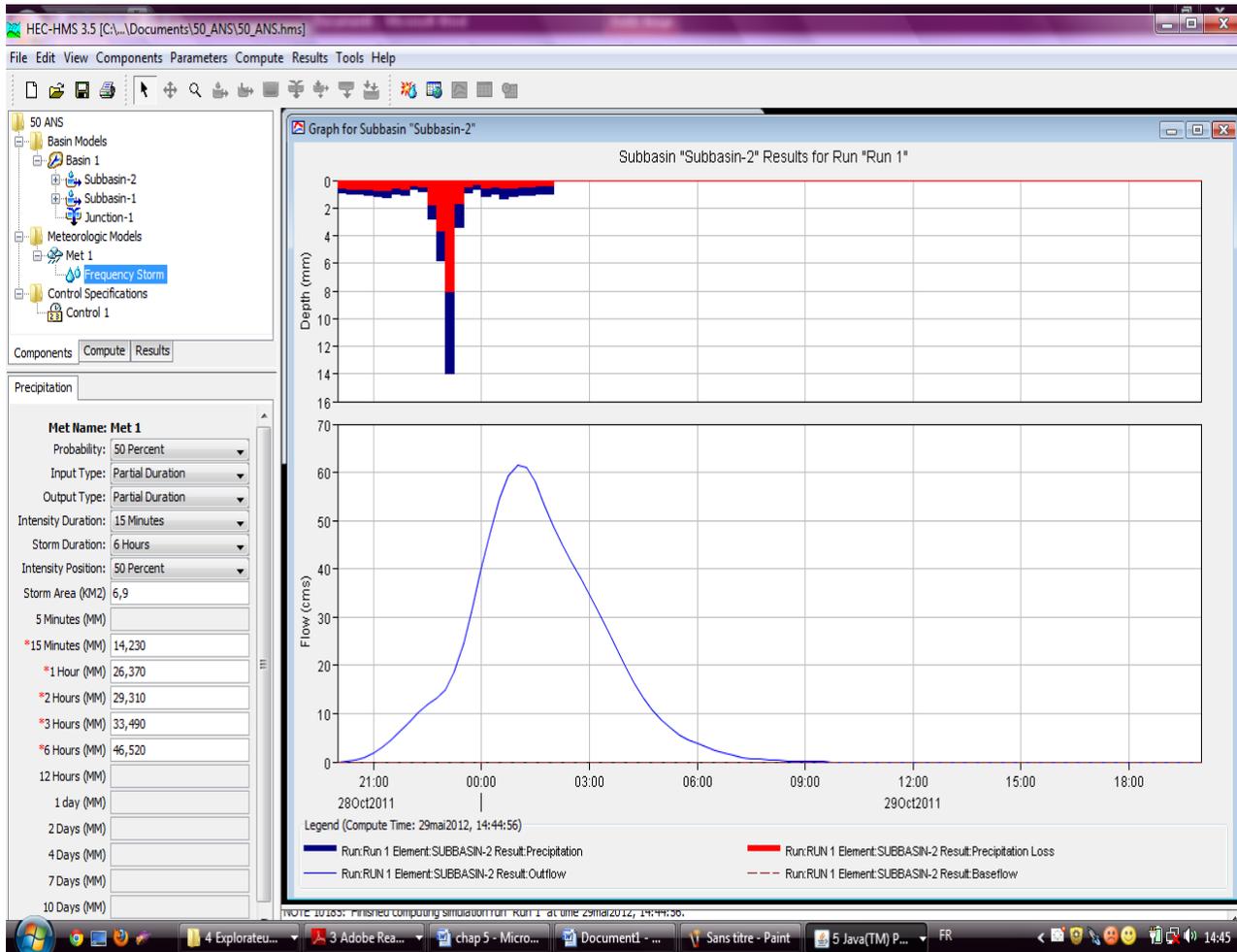


Figure V.5: Hydrogramme de crue et les hyétogrammes de pluie brute et nette (suite)

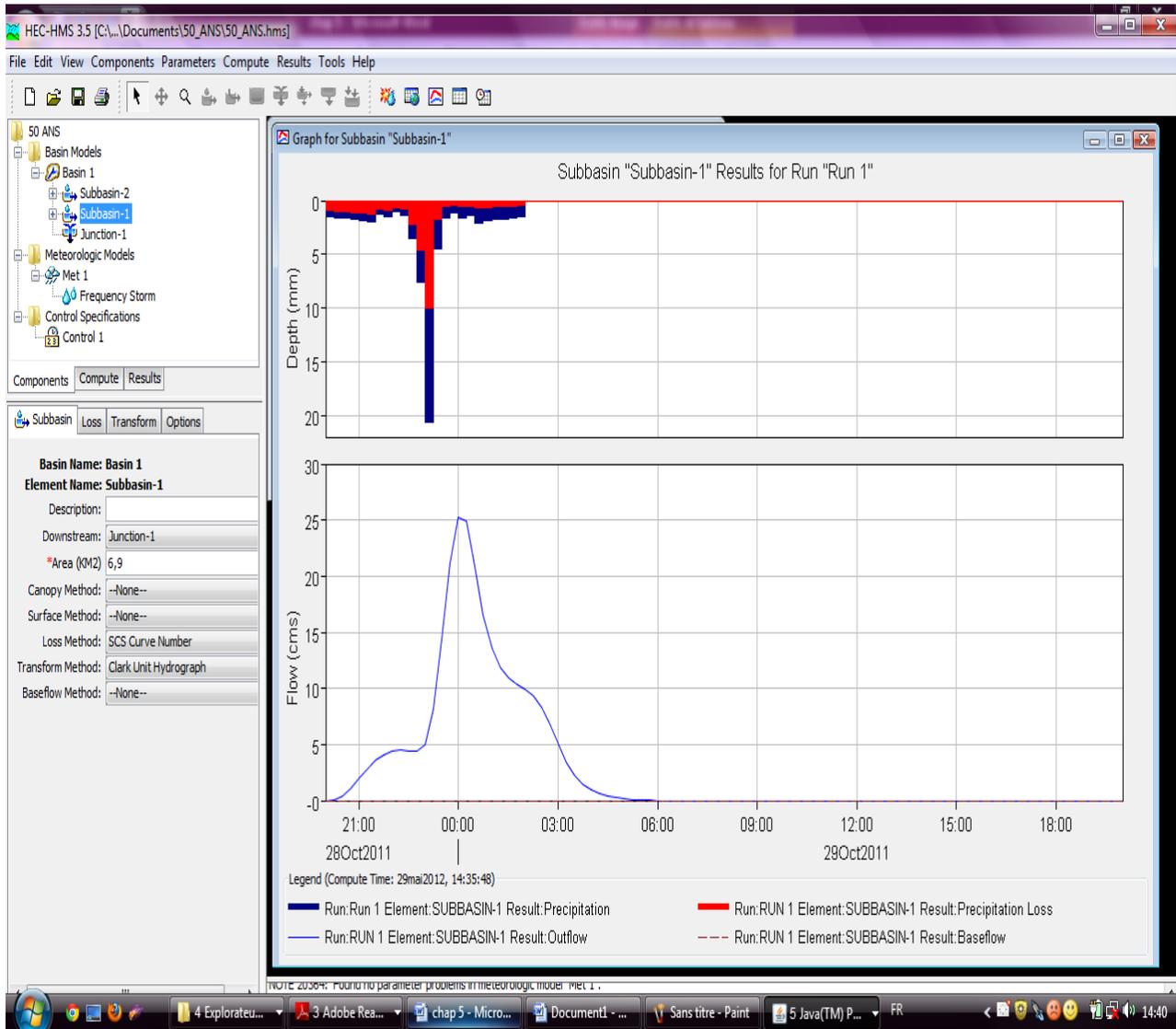


Figure V.5: Hydrogramme de crue et les hyétogrammes de pluie brute et nette (suite)

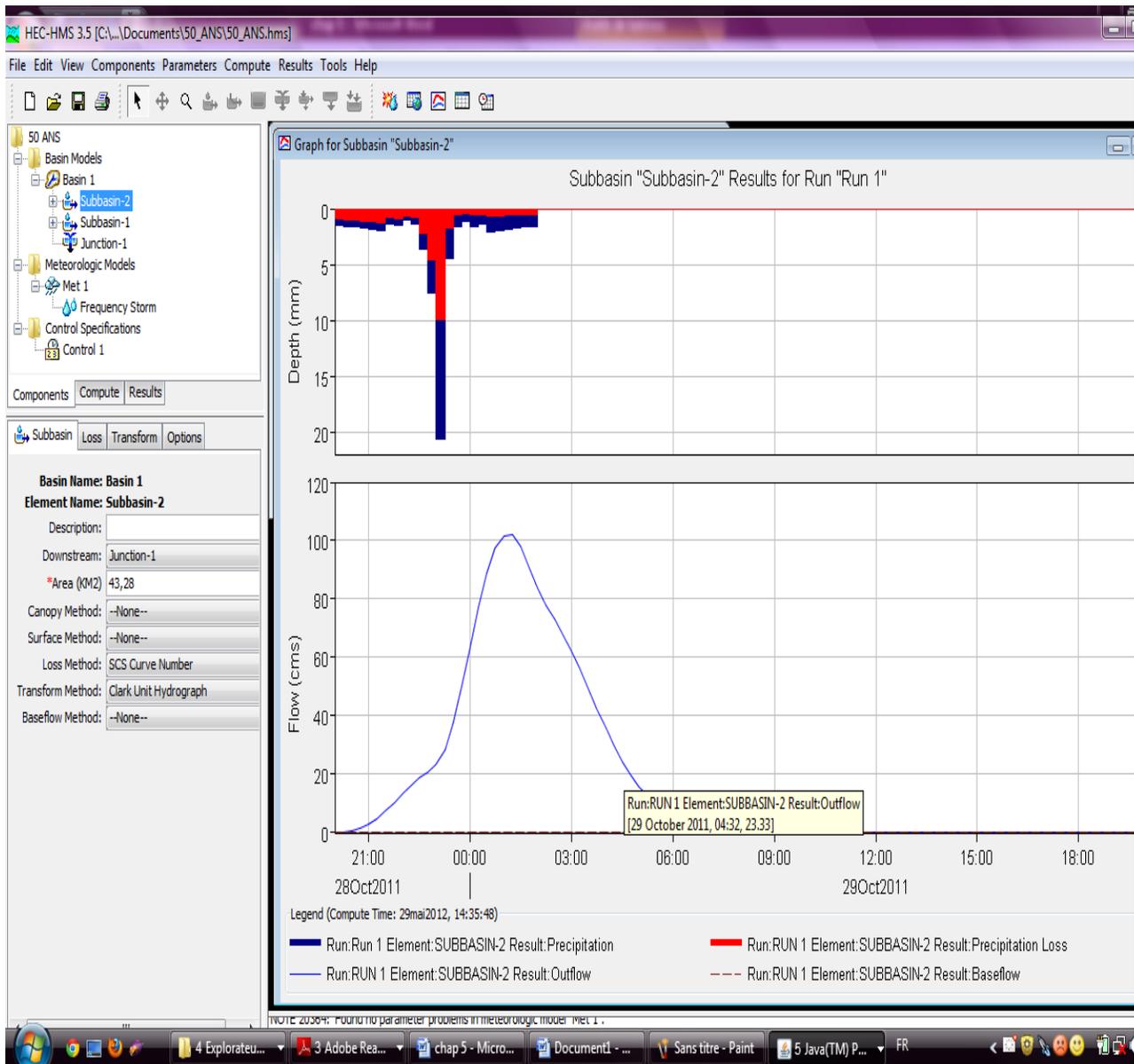


Figure V.5: Hydrogramme de crue et les hyétogrammes de pluie brute et nette(suite)

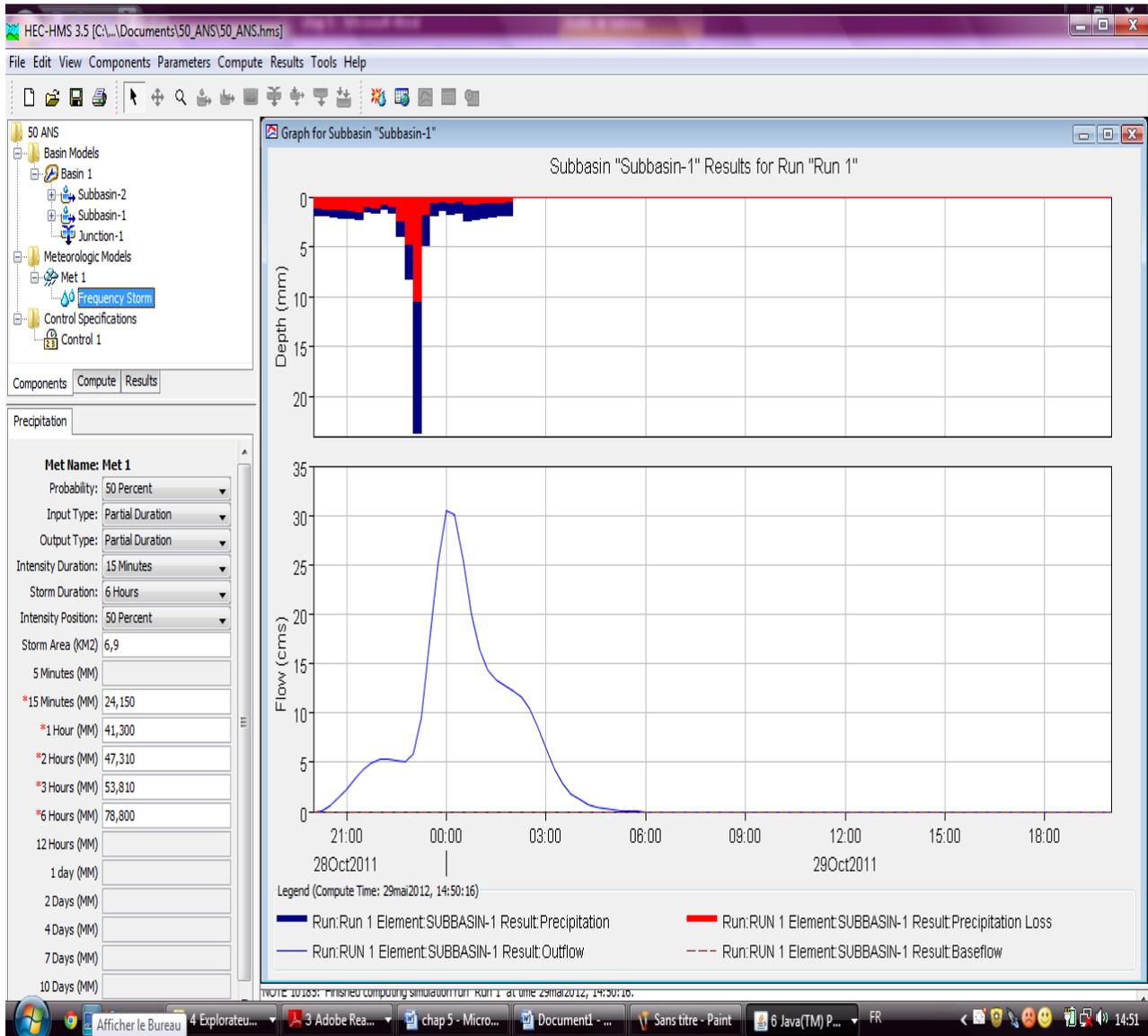


Figure V.5: Hydrogramme de crue et les hyétogrammes de pluie brute et nette(suite)

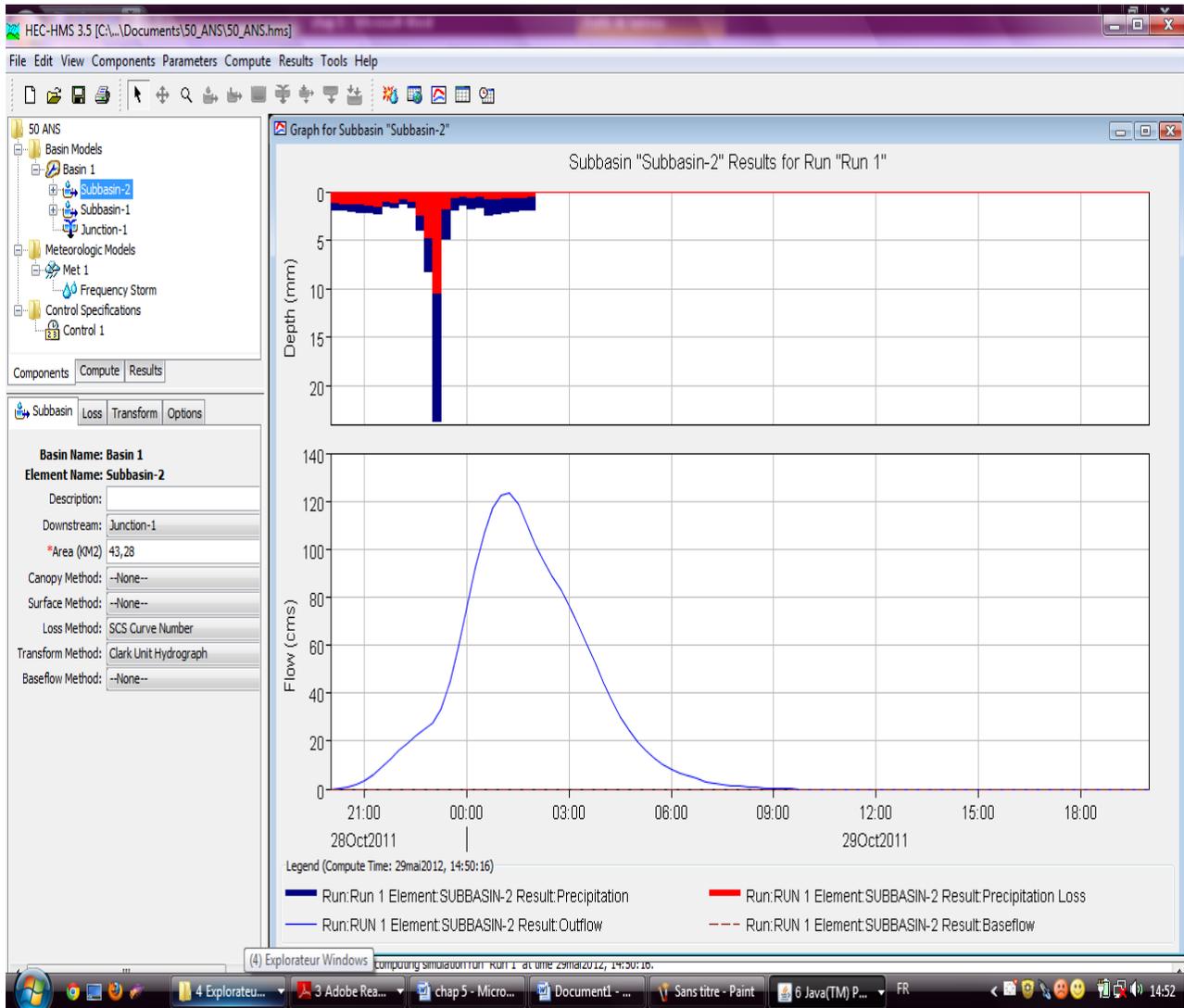


Figure V.5: L'hydrogramme de crue et les hyétogrammes de pluie brute et nette (suite)

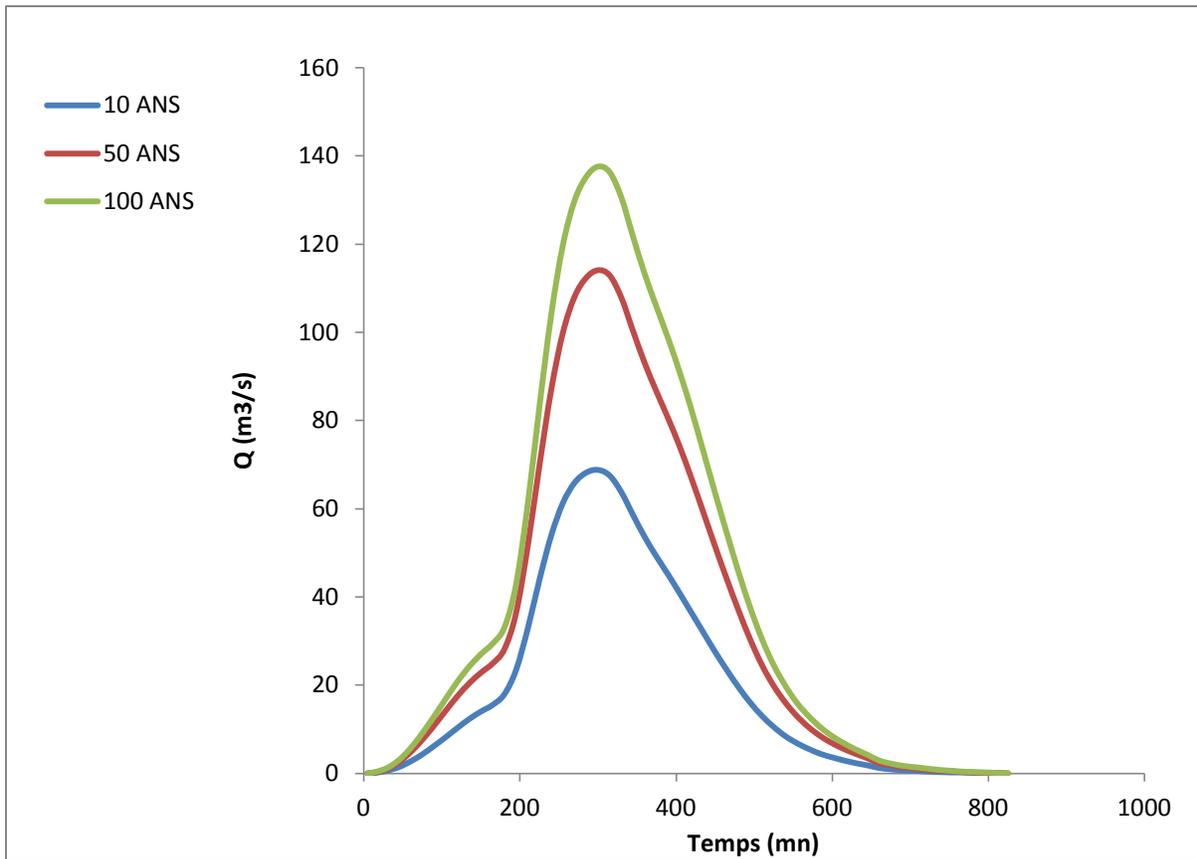


Figure V.6: Hydrogramme de crue à l'exutoire du bassin versant de Ben Chaabane pour  $T=10$  ans,  $T=50$  ans et  $T=100$  ans

Le récapitulatif des résultats est représenté dans le tableau V.4

**Tableau V.4- Récapitulatif des résultats du HEC-HMS**

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	Période de retour (ans)	Temps de montée (h)	Temps de base (h)	Débit max (m <sup>3</sup> /s)	Volume de crue (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
Oued Rébai	6,3	10	4	9,15	13,9	127
		50	4	9,15	23	217
		100	4	9,45	27,7	263
Oued Thleta	43,28	10	4,15	13,30	61,6	871
		50	5,15	13,45	102,1	1491
		100	5,15	13,45	123,2	1807
L'exutoire	49,58	10	5	13,45	68,8	997
		50	5	13,45	114	1708
		100	5	13,45	137,6	2069

**Interprétation des résultats**

Les débits de pointe varient proportionnellement avec la superficie des sous bassins (13,9 m<sup>3</sup>/s à 61,6 m<sup>3</sup>/s) pour la même période de retour;

Le temps de réponse et par conséquent le temps de base est plus élevé pour le sous bassin de Oued Thleta, vu sa surface importante par rapport au sous bassin de Oued Rébai.

D'après les résultats de simulation présentés dans la figure 5 que:

l'hydrogramme de crue du sous bassin de Oued Rébai (B/S 1), présente une répartition irrégulière dans le temps, qui est due principalement à l'irrégularité du relief. Et caractérisé par une forme pointue, à cause de sa forte pente (2,4%);

Cependant, L'hydrogramme de ruissellement du sous bassin de Oud Thletha (B/S 1) est caractérisé par une répartition uniforme et régulière dans le temps, du à une forme plus au moins régulière du relief. Et présente une allure de forme arrondie, du a une pente moins importante (1.58%).

### Comparaison des résultats obtenus avec d'autres études

En vérifiant des études établies par quelques bureaux d'étude, il a été constaté que les débits déterminés par ces derniers sont ne différent pas vraiment de ceux obtenus dans cette étude. Mais, il faut signaler que les débordements dans la ville de Ben Chaabane ne sont pas dus nécessairement à une mauvaise estimation du débit pluvial, mais aussi à un ensemble de facteurs, à savoir:

- Les phénomènes de l'érosion, des charriages et des transports solides. En effet, l'érosion des sols et la nature torrentielle des écoulements des cours d'eau souligne le problème majeur qui doit être traité aujourd'hui et dont les effets finissent par atteindre la structure toute entière de la vie sociale et économique des habitants de Ben Chaabane.(AM.Consuling, 2007).
- Les facteurs anthropogènes, c'est-à-dire l'augmentation des habitants et une occupation des sols pas toujours ordonnée. En effet, il n'est pas rare de rencontrer de grosses constructions sur les lits des oueds et des rejets de l'activité humaine de toutes sortes dans ces derniers.
- La nature plate de la plaine, ce qui ne favorise pas un bon écoulement des eaux.
- L'irrégularité d'entretien des Oueds (curage).

### Conclusion

A travers ce chapitre, la détermination du débit pluvial a été faite suivant une méthodologie bien déterminée. L'étape la plus importante est celle de la détermination de l'échantillon de pluie participant à la modélisation ; elle représente l'élément clé dans la transformation de la pluie en débit. L'échantillon de pluie a été déterminé par une modélisation des courbes IDF dérivées des SMA où les courbes HDF ont été déduites à partir des courbes IDF par une simple relation temporelle. Les hauteurs d'eau provenant des HDF ont été introduites dans le code de calcul HEC HMS qui par la suite construit les hyétogrammes de pluie nette. Ces hyétogrammes représentent la variable d'entrée pour la fonction de production.

Le code choisi pour la modélisation dans cette étude est le logiciel HEC HMS. Il ne nécessite pas de calage, vu que la région d'étude est dépourvue de station hydrométrique à l'exutoire. La fonction de production est la méthode SCS CN et celle de transfert est la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique.

La fonction de production dérivée de la méthode SCS CN a permis de déterminer des hyétogrammes de pluie nette. Une carte d'occupation du sol a été analysée afin de déduire les classes de sol utilisées pour la détermination du paramètre CN.

La fonction de transfert utilise la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique et a permis l'établissement des hydrogrammes de crue pour les périodes de retour 10, 50 et 100 ans.

## CONCLUSION GENERALE

A travers cette étude, la détermination du débit pluvial est faite selon une méthodologie bien déterminée. L'étape la plus importante est l'échantillonnage de pluie participant à la modélisation. Elle représente l'élément clé dans la transformation de la pluie en débit. L'échantillon de pluie a permis la modélisation des courbes IDF, dérivées des SMA, ensuite les courbes HDF ont été déduites à partir des courbes IDF par une simple relation temporelle. Les hauteurs d'eau provenant des HDF ont été introduites dans le logiciel HEC HMS qui servent à la construction des hyétogrammes de pluie nette. Ces dernières représentent la variable d'entrée pour la fonction de production.

Le mode de calcul choisit pour la modélisation est celui du HEC HMS, il ne nécessite pas de calage car la région d'étude est dépourvue de station hydrométrique à l'exutoire. Ce logiciel utilise pour la fonction de production la méthode SCS CN et pour la fonction de transfert: la méthode de l'hydrogramme synthétique.

La fonction de production dérivée de la méthode SCS CN a permis de déterminer des hyétogrammes de pluie nette. Une carte d'occupation du sol a été analysée afin de déduire les classes de sol utilisées pour la détermination du paramètre CN.

La fonction de transfert utilise la méthode de l'hydrogramme unitaire synthétique et a permis l'établissement des hydrogrammes de crue pour les périodes de retour 10, 50 et 100 ans.

Les débits de crues déterminés pour les sous bassins de Ben Chaabane ne présentent pas des valeurs très importantes, rappelons que le problème d'inondation dans cette région sont aggravés par d'autres phénomènes telles que l'érosion, les charriages et des transports solides.

Les facteurs anthropogènes, c'est-à-dire l'augmentation des habitants et une occupation des sols pas toujours ordonnée. En effet, il n'est pas rare de rencontrer de grosses constructions sur les lits des oueds et des rejets de l'activité humaine de toutes sortes dans ces derniers.

-La nature plate de la plaine, ce qui ne favorise pas un bon écoulement des eaux.

-L'irrégularité d'entretien des Oueds (curage).

Cette étude fournit un outil d'aide à la décision pour les autorités responsables. Dans cette optique, quelques recommandations sont proposées :

- Intégrer la maîtrise du cycle de l'eau dans l'aménagement; que ce soit par la définition de zones constructibles ou non, par des règles constructives relatives à des surélévations, à l'assainissement non collectif, au raccordement des eaux pluviales ou à l'imperméabilisation des sols, ainsi que par des pratiques agricoles. L'objectif peut être de rétablir des zones d'expansion des crues et interdire les constructions en zones inondables, de limiter les rejets aux milieux récepteurs, de ne pas aggraver les crues torrentielles, de préserver la capacité de collecte et de traitement du système d'assainissement, ...
- Limiter les ruissellements à la source et l'imperméabilisation des sols, favoriser l'infiltration des eaux dans les voiries et le recycler les eaux de toiture ;
- maîtriser le débit et l'écoulement des eaux pluviales, notamment en limitant l'apport direct des eaux pluviales au réseau ;
- maintenir une couverture végétale suffisante et des zones tampons pour éviter l'érosion et l'aggravation des débits en période de crue ;
- privilégier des systèmes cultureux limitant le ruissellement ;
- préserver les réseaux de fossés agricoles lorsqu'ils n'ont pas de vocation d'assèchement de milieux aquatiques et de zones humides, inscrire dans les documents d'urbanisme les

éléments du paysage déterminants dans la maîtrise des écoulements, proscrire les opérations de drainage de part et d'autre des rivières .....

- La perspective de limiter l'impact des rejets d'eaux pluviales ;

Cartographier les zones exposées aux risques et les délimiter en tant que "zones de danger"

- Etablir des modèles hydrologiques spécifiques au contexte Algérien
- Etablir un plan d'aménagement et de gestion durable (PAGD) de la ressource en eau avec définition des priorités et des conditions de réalisation des objectifs, notamment les moyens financiers. Ce plan peut aussi définir des zones stratégiques pour la gestion de l'eau et identifier, en vue de les préserver, les zones naturelles d'expansion de crues.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ambroise B., 1998a.** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré. 1 : processus et facteurs. Rev. Sci. Eau, 11(4), 471-495.
- Ambroise B., 1998c.** La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles. Bucarest : Éditions HGA.
- AM Consulting, 2009.** Etude de protection du centre Ben Chaabane contre les crues d'oueds, Avant projet, Direction de l'hydraulique de la Wilaya de Blida, 60 p.
- Anctil, F., Rousselle, J., & Lauzon, N., 2005.** Modélisation des débits de crue. Hydrologie: cheminement de l'eau. Presses Internationales Polytechnique, Montréal, pp 217-270.
- ANRH (Agence nationale des ressources hydriques), 2009.** Données pluviométrique, pluviographique, cartes topographiques. Direction régionale de l'ANRH Alger et Blida.
- Behlouli, L., 2003.** Crues et Inondations en Algérie, Présentation, ANRH Alger/Ministère des ressources en eau.
- Beker, E & Degré, A., 2010.** la prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques, Revue bibliographique, 151 p.
- Benaouadj, A., 2011.** Contribution à l'étude des inondations dans la vallée du M'Zab (Wilaya de Ghardaïa), Mémoire de Magister, 52P.
- Ben Zvi, A., 2009.** Rainfall- intensity- duration-frequency relationships derived from large partial duration, series. j. hydrol, 367p.
- Berthier, E., Andieu, H., Greutin, J-D, 2004.** The role of soil in generation of urban runoff: development and evolution of 2D model. J. Hydrol, 299, 255-266.
- Blaikie, J. R., & Eeles, CWO, 1985.** Lumped catchment models Hydrological forecasting, M.O. Anderson and T.P. Brut, eds., Wiley, New York, pp 311-345.
- Boukhelifa, M., 2010,** Contribution à la modélisation pluie- débit en absence de données hydrométriques: cas d'une zone urbaine (Ville de Tipaza), Mémoire de Magister ENSH, Blida, Algérie, 138 p.
- Bourier, 1997.** Les réseaux d'assainissement, calcul application perspectives, Edition Lavoisier, Collection Tec et Doc, Paris, France, 810 p.
- Cah. ORSTOM, 1985. Série. Hydrol., vol. XXI, no 3.**
- Cappus C, 1960.** Bassin expérimental d'Alrance : étude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des débits. La Houille Blanche, n°A. Cité par Cosandey et al, 1996.

- Centre européen de l'environnement et de la santé, 2002.** Inondations : conséquences sanitaires et mesures préventives, Aide-mémoire 05/02, Copenhague et Rome.
- CERTU ( Centre d'étude sur les réseaux, les transports, l'Urbanisme et les constructions publiques, 2003.** La ville et son assainissement. Principe et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau, CERTU, Lyon, France, 503 p.
- Chiew, F.H.S. et McMahon, T.A. (1993).** Detection of trend or change in annual flow of Australian rivers. *International Journal of Climatology*, **13**, 643-653.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., et Mays, L. W. 1988.** Applied hydrology, McGraw-Hill, New York.
- Coulibaly, P., Anctil, F. et Bobbée, B. 2000.** Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *Journal of Hydrology*, **230**, 244-257.
- Crawford, N. H. & Lindsey, R. K. 1966.** Digital situation in hydrology: Stanford Watershed model IV. Tech. Rep. No. 39, Stanford, Univ., Stanford, Calif.
- DGPC (Direction Générale De La Protection Civile) «Algérie », Bureau des risques naturels., 2007.** Les inondations en Algérie, 21p, disponible sur le site de la Direction Générale de la Protection Civile, <http://www.protectioncivile.dz>
- Dunne T. & Black R.D., 1970.** Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Wat. Resour. Res.*, **6**, 1296-1311. Cité par Cosandey et al, 1996.
- Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., 2011.** Modélisation Hydrologique Du Bassin Versant De Bouregreg A Travers Des Modèles Différents : HEC-HMS Et SWAT. *Proceedings Colloque International sur les Ressources en Eau et le Développement Durable*, 22 et 23 Février ,2011. Alger, p.100-104.
- Fortin, J.P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., et Villeneuve, J.P. 2001a.** Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model, *Journal of Hydrologic Engineering*, **6**(2), 91-99.
- Franchini, M. et Pacciani, M. (1991).** Comparative analysis of several conceptual rainfallrunoff models. *Journal of Hydrology*, **122**, 161-219.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. et Todini, E. (1996).** Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *Journal of Hydrology*, **175**, 293-338.
- Gan, T.Y., Dlamini, E.M. et Biftu, G.F. (1997).** Effects of model complexity and structure, data quality and objective function on hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, **192**, 81-103.
- Green, W. H. et Ampt, G. A. (1911).** Studies on Soil Physics, 1. The flow of Air and Water Through Soils, *Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 4, pp.11-24.

- HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center), 2000.** hydrologic modeling system. Technical reference manual, CPD-74B. Davis, CA: US Army Corps of Engineers.
- Henine, H, 2005.** Interface entre un modèle hydrologique/modèle hydrodynamique au sein d'un système intégré sous Web incluent les SIG, Mémoire de Magister, ENP, Alger, Algérie, 99 p .
- Horton R.E., 1933.** The role of infiltration in the hydrologic cycle. Trans. Am. Geophys. Union, **14**, 446-460.
- Hsu, K.L., Gupta, H.V. et Sorooshian, S. (1995).** Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff processes. Water Resources Research, **31**(10), 2517-2530.
- Hursh C.R., 1936.** Storm-water and absorption. Trans. Am. Geophys. Union, **17**, 301-302. Cité par Joerin, 2000 & Béker, E.
- Hursh C.R., 1944.** Report of the sub-committee on subsurface flow. Trans. Am. Geophys. Union, **25**, 743-746. Cité par Joerin, B2000
- Jothityangkoon, C., Sivapalan, M. and Farmer, D.L., 2001.** Process controls of water balance variability in a large semi-arid catchment: downward approach to hydrological model development. Journal of Hydrology, **254**: 174-198.
- Journal officiel de l'Union européenne, 2007,** Relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.
- Kauark-Leite, L.A. et Nascimento, N.O. (1993).** Développement, utilisation et incertitudes des modèles conceptuels en hydrologie. Séminaire Eaux - Environnement n° 3, Modélisation du comportement des polluants dans les hydrosystèmes, Paris, 191-219.
- Kite, G.W. (1975).** Performances of two deterministic hydrological models. IAHS Publication n° 115, 136-142.
- Kite, G.W. (1978).** Development of a hydrologic model for a Canadian watershed. Can. J. Civ. Eng., **5**, 126-134.
- Klemes (1986)** Water Resour. Res., **22**, 177S-188S. Cité par Loague et al., 2004. 2 Cosandey C. & Robinson M., 2000. Hydrologie continentale. Paris : Armand Colin. Cité par Ayral, 2005.
- Kuichling, E. (1889).** The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts, ASCE, **20**, 1-60.
- Laborde, J.P, 2000.** Eléments d'hydrologie de surface, Cours, U.M.R. 5651 "Espace" du C.N.R.S. Equipe "Gestion et Valorisation de l'Environnement" , France, 192 p.

- Lavigne, M.P, 2007.** Modélisation du régime hydrologique et de l'impact des coupes forestières sur l'écoulement du ruisseau des Eaux-Volées à l'aide d'HYDROTEL, Thèse de Doctorat, Université de Québec. INRS ETE, 264p.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. et Bergström, S. (1997).** Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201, 272-288.
- Loague, K.M. et Freeze, R.A. (1985).** A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. *Water Resources Research*, **21**(2), 229-248.
- Mc Cuen, R., H, 2004.** Hydrologic analysis and design, 3<sup>rd</sup> edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA, 859 p.
- MEDD-PRIM@** Portail de la prévention des risques majeurs, Ministère de l'écologie et du développement durable, *site Internet*, <http://www.prim.net/>.
- Merabet, A., 2008.** Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations. Mémoire de Magister. Univ. de Sidi Bel Abbés Algérie.
- Meylan, P & Musy, A, 1999.** Hydrologie fréquentielle, Edition HGA, Bucharest Hongrie, 414p.
- Michaud, J. and Sorooshian, S., 1994.** Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed. *Water Resources Research*, 30(3): 593-605.
- Moore, I.D. et Mein, R.G. (1975).** An evaluation of three rainfall-runoff models. *Hydrological Symposium*, Sydney, 75/3, 122-126.
- Moréna, F, 2004.** Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé: reproduction des processus de production et développement du modèle URBS, Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France, 243 p.
- Motta, J.C.Jr., Tucci, K.E.M, 1984.** Simulation of urbanisation effect in flow. *Hydrol. Sci. J.*, 29(2), 131-147.
- Mulvaney, T. J. (1851).** On the Use of self-registering rain and flood gauges in making observations on the relation on rainfall and of flood discharges in a given catchment, *Institution of Civil Engineers*, Ireland, 4(2), 18-31.
- Musy A. & Higy C, 1998.** Hydrologie appliquée. Bucarest : Éditions HGA.
- Nash, J. E, (1957).** The Form of the Instantaneous Hydrograph, *Int. Ass. Science Hydr.*, Publication no. 45, pp. 114-121.
- NRCS, 1986.** Urbain Hydrology for small watersheds, TR-55. NRCS, Conservation engineering Division, USA, p 163.

**Oufella Omar 2004.** Contribution à l'étude des inondations : application de la méthode d'inondabilité : Cas de la ville de Sidi Bellabes. Mémoire de Magister. ENSH. Blida. 153p.

**Payraudeau S., 2002.** Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens, Thèse : Sciences de l'Eau, UMR Structures et Systèmes Spatiaux Cemagref-Engref, Engref de Montpellier (France).

**Perrin, C, 2000.** Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse de Doctorat, 287 p.

**Perrin, C. et Littlewood, I.G. 2000.** A comparative assessment of two rainfall-runoff modelling approaches: GR4J and IHACRES, Proceedings of the Liblice Conference (22-24 September 1998), V. Elias and I.G. Littlewood (Eds.), IHP-V, Technical Documents in Hydrology n° 37, UNESCO, Paris, 191-201.

**Radojevic, B, 2002.** Méthode d'évaluation de l'influence urbaine sur le régime des crues d'un bassin versant de 130 Km<sup>2</sup>, Thèse de Doctorat, Institut Nationale des Sciences Appliquées (INSA), Lyon, France, 261 p.

**RAPPEL**<sup>@</sup> Regroupement des associations pour la protection de l'environnement des lacs et des cours d'eau de l'Estrie et du haut bassin de la rivière Saint-François, *site Internet*, <http://www.rappel.qc.ca/EAbassins.html>.

**Refsgaard, J.C., 1997.** Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology, 198: 69-97.

**Refsgaard, J.C. et Knudsen, J. 1996.** Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. Water Resources Research, 32(7), 2189-2202.

**Reggiani, P., Hassanizadeh, S.M., Sivapalan, M. and Gray, W.G., 1999.** A unifying framework for watershed thermodynamics: Constitutive relationships. Advances in Water Resources, 23: 15-

**Reggiani, P., Sivapalan, M. and Hassanizadeh, S.M., 1998.** A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics. Advances in Water Resources, 22(4): 367-398.

**Remineras, G, 1986.** L'hydrologie de l'ingénieur, 2<sup>ème</sup> édition, Eyrolles.

**Renaud.H, 2006.** Analyse d'Images Satellitaires d'Inondations pour la Caractérisation Tridimensionnelle de l'Alea et l'Aide a la modélisation hydraulique, Thèse de Doctorat, Montpellier, 210 p.

**SAFEGE, 2009.** Equipement et Aménagement Urbain à haute performance environnementale, Actu-Environnement.com.

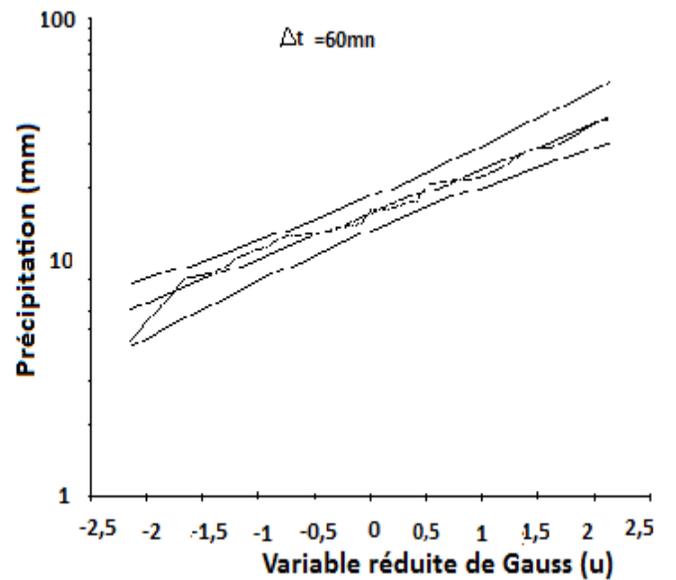
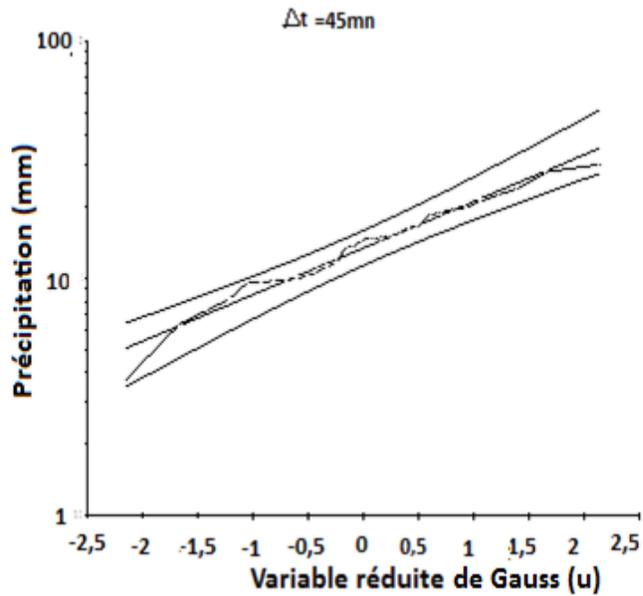
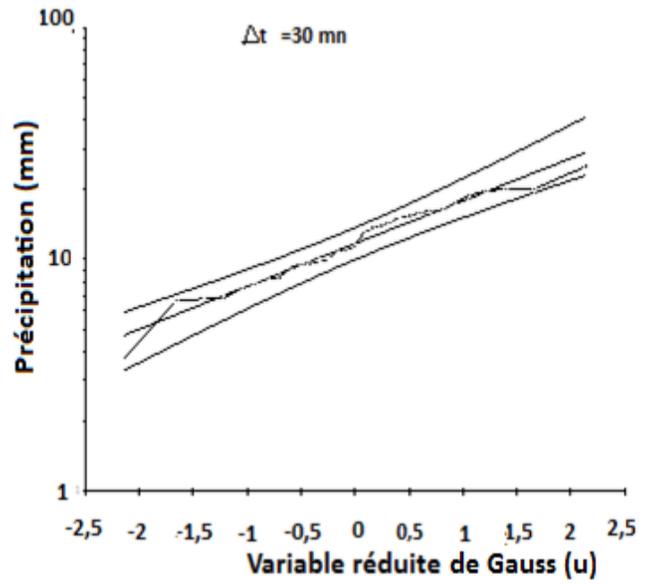
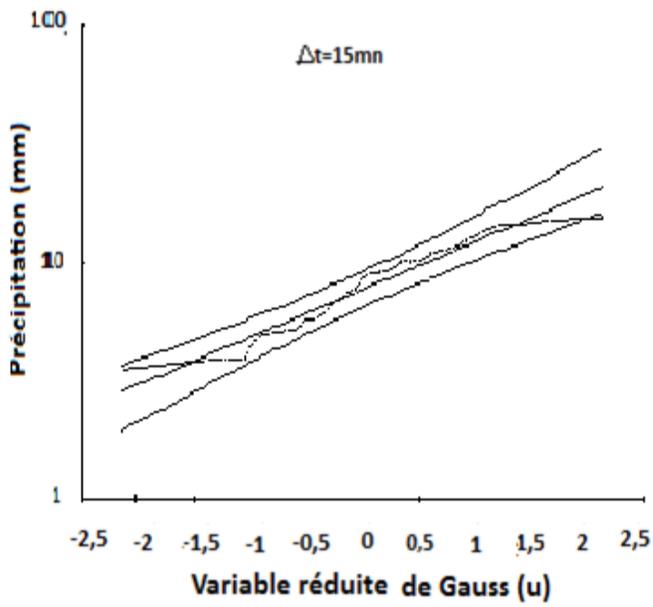
- Satin, M., Selmi, B, 2006.** Guide technique de l'assainissement, 3<sup>ème</sup> éditions, Edition le moniteur, Paris, France, 726 p.
- SCS (Soil Conservation Service) 1986.** Urban Hydrology for small Watersheds, Technical release no. 55.
- SCS (Soil Conservation Service) 1972.** National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. SCS, US department of agriculture, Washington, Etat-Unis.
- Singh, V. P. 1995.** Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch, CO: Water Resources Publications.
- Sinclair, T.R. and Seligman, N., 2000.** Criteria for publishing papers on crop modeling. Field Crops Research, 68: 165-172.
- Touaibia, B, 2004.** Manuel pratique d'hydrologie. Edition Madani, Blida, Algérie.
- UE, 2006,** Environnement: la Commission adopte une nouvelle directive pour combattre les inondations, (Communiqué de presse).
- Villeneuve, J.-P., Blanchette, C., Duchemin, M. Etong, N. Maheu, D., Mailho., Rousseau, A.N. Trépanier, S., Turcotte, R, 1998b.** Rapport synthèse du projet GIBSI: Gestion intégrée des Bassins versant à l'aide d'un système informatisé, Rapport synthèse No RS-462, INRS-EAU, Ste-Foy (Quebec).
- Wagener, T., Boyle, D.P., Lees, M.J., Wheeler, H.S., Gupta, H.V. and Sorooshian, S., 2001.** A framework for development and application of hydrological models. Hydrology and Earth System Sciences, 5(1): 13-26.
- Weeks, W.D. et Hebbert, R.H.B. 1980.** A comparison of rainfall-runoff models. Nordic Hydrology, 11, 7-24.
- Wilcox, B.P., Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. et Wight, J.R. 1990.** Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. Water Resources Research, 26(10), 2401-2410.
- WMO 1975.** Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. Operational Hydrology Report n° 7, WMO n° 429, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- WMO 1986.** Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational Hydrology Report n° 23, WMO n° 646, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- WMO 1992.** Simulated real-time intercomparison of hydrological models. Operational Hydrology Report n° 38, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Yang, X. et Michel, C. 2000.** Flood forecasting with a watershed model: a new method of parameter updating. Hydrological Sciences Journal, 45(4), 537-546.

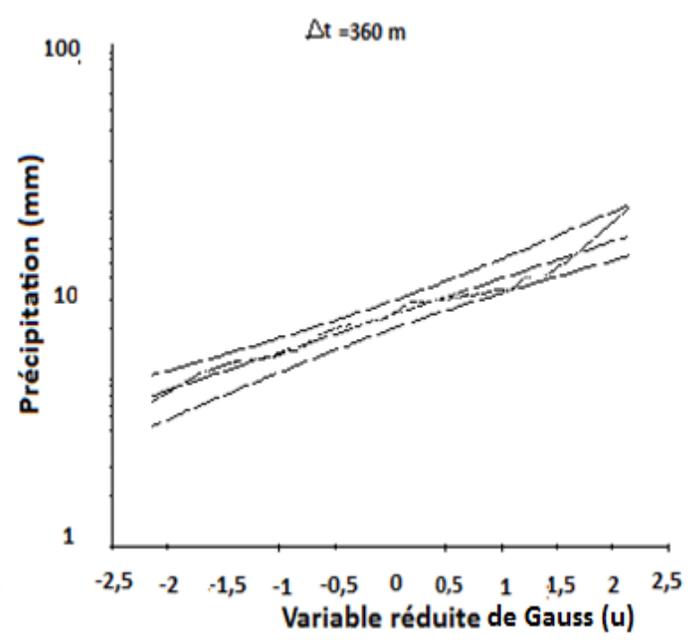
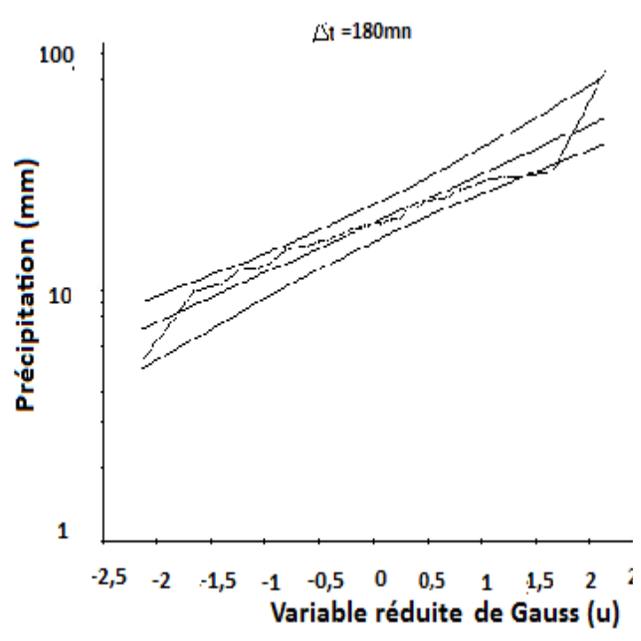
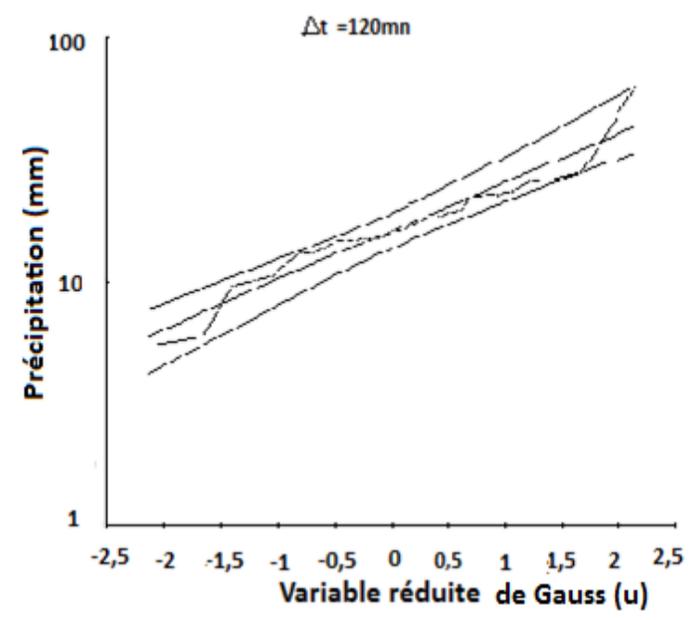
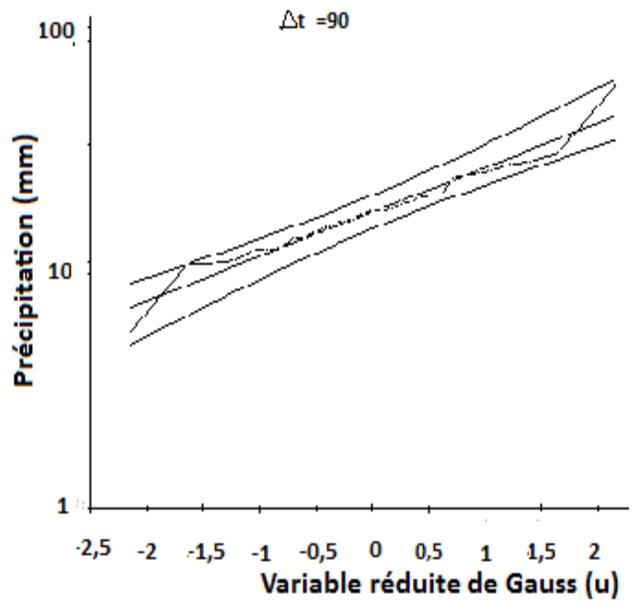
**Ye, W., Bates, B.C., Viney, N.R., Sivapalan, M. et Jakeman, A.J. 1997.** Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research*, 33(1), 153-166.

**Zhang, X. et Lindström, G. 1996.** A comparative study of a Swedish and a Chinese hydrological model. *Water Resources Bulletin*, 32(5), 985-994.

## ANNEXES

Annexe : 1 Ajustement des SMA à une loi log-Normale





Annexe 2: Ajustement des série de la totalité des averses à une loi Log-Normale

