

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Contribution à l'étude des inondations dans la vallée du M'Zab  
(w. Ghardaia).

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 7-0001-12

APA Citation ( APA توثيق ):

Benaouadj, Abderraouf (2012). Contribution à l'étude des inondations dans la vallée  
du M'Zab (w. Ghardaia)[Thèse de magister, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بثمين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات بيداغوجية، مقالات الدوريات، كتب...) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE  
ARBAOUI ABDELLAH

Laboratoire de Recherche :  
Mobilisation et Valorisation des Ressources en Eau "MVRE"

N° d'ordre.....  
Série.....

**MEMOIRE DE MAGISTER**

**Option : Génie de l'eau**

Présenté par :  
**Benaouadj Abderraouf**

**Thème**

**Contribution à l'étude des inondations dans la vallée du M'Zab  
(Wilaya de Gharđaia)**

Devant le jury composé de :

<b>Président</b>	<b>: M<sup>r</sup> B.SALAH</b>	<b>M.C (A). ENSH. Blida</b>
<b>Rapporteur</b>	<b>: M<sup>me</sup> B.TOUAIBIA</b>	<b>Prof. ENSH. Blida</b>
<b>Examineurs</b>	<b>: M<sup>r</sup> N.DECHEMI</b>	<b>Prof. ENP. El Harrach</b>
	<b>M<sup>r</sup> M.K.MIHOUBI</b>	<b>M.C (A). ENSH. Blida</b>
	<b>M<sup>r</sup> O.KHODJET KESBA</b>	<b>M.C (A). ENSH. Blida</b>

**Soutenu le / /2011**

## Résumé

Pour alerter d'une possible submersion à l'exutoire d'un bassin versant, il faut être capable d'estimer le débit. Or, pour la plupart des bassins versants, les mesures limnimétriques sont quasi absentes, d'où l'incapacité de suivre l'évolution des débits en temps réel. Le recours à un modèle Pluie-Débit apparaît alors indispensable.

Le but de cette étude est de développer des modèles pluie-débit efficaces pour l'estimation des débits des crues de fréquences rares, applicables dans le bassin versant de l'Oued M'Zab. Le travail consiste d'abord à étudier le bassin versant de l'Oued M'Zab sur le plan géomorphologique, lithologique, hydrographique et climatique et à analyser les processus hydrologiques principalement responsables de la genèse de crues. Après avoir énuméré les principaux modèles hydrologiques pluie-débit, le choix a porté sur l'application de deux modèles qui ont montré leur robustesse et leur performance à l'échelle internationale: le Modèle semi-distribué HEC-HMS et le modèle globale de l'ORSTOM qui est un modèle classique purement déterministe. Les résultats obtenus montrent que les deux modèles arrivent à estimer, d'une manière rapide, les débits des crues de fréquences rares et les autres caractéristiques de la crue et à aboutir au tracé de l'hydrogramme type de la crue. L'écart entre les résultats obtenus par ces deux modèles est faible. Des relations mathématiques donnant les caractéristiques de la crue en fonction de la superficie du bassin versant ont été établies à l'aide du modèle de l'ORSTOM. Une simulation hydrodynamique d'un tronçon de l'Oued M'Zab a été faite par le modèle HEC-RAS en utilisant comme donnée de base le débit centennal obtenu par le modèle HEC-HMS.

**Mots clés :** Ghardaïa, Crues, Bassin versant, Oued M'Zab, Modélisation pluie-débit, Modèle HEC-HMS, Modèle de l'ORSTOM, Modèle HEC-RAS

## Abstract

To warn of possible flooding at the outlet of a watershed, we must be able to estimate the flow. But, for most watersheds, water level measurements are virtually absent, hence the inability to monitor flows in real time. The use of a rainfall-runoff model appears to be essential.

The purpose of this study is to develop effective rainfall-runoff models for estimating flood flows of scarce frequencies, applicable in the watershed of M'Zab valley. The first work is to study the watershed of M'Zab valley terms geomorphological, lithological, climatic and hydrographic and analyze the hydrological processes primarily responsible for the genesis of floods. After listing the main hydrological rainfall-runoff models, the choice was on the application of two models that have proved their robustness and their performance at international level: the semi-distributed model HEC-HMS and the global model of ORSTOM which is a classical purely deterministic model. Results show that both models are able to estimate, in a fast, flood flows of scarce frequencies and few other features of the flood and lead to the layout of the flood hydrograph. The difference between the results obtained by these two models is small. Mathematical relations giving the characteristics of the flood according to the area of the watershed have been established using the model of ORSTOM. A hydrodynamic simulation of a section of M'Zab valley was made by HEC-RAS model using as basic data flow Centennial obtained by HEC-HMS model.

**Keywords:** Ghardaïa, Floods, watershed, M'Zab valley, rainfall-runoff modeling, HEC-HMS Model, Model of ORSTOM, HEC-RAS Model

## ملخص

للتحذير من فيضانات محتملة على منفذ لمستجمعات المياه، يجب أن نكون قادرين على تقدير التدفق. لكن بالنسبة لمعظم مستجمعات المياه ، ليس لدينا قياسات لمنسوب المياه. ولذا فمن غير الممكن رصد التدفقات في الوقت الحقيقي. إذا استخدم نموذج "مطر- تدفق" يعتبر أمرا ضروريا.

الغرض من هذه الدراسة هو تطوير نماذج فعالة "مطر- تدفق" لتقدير معدل تدفقات الفيضانات ذات الترددات النادرة ، قابلة للتطبيق في مستجمع مياه وادي ميزاب. العمل الأول يتمثل في دراسة مستجمع مياه وادي ميزاب من الناحية الجيومورفولوجية ، الصخرية ، المناخية والهيدروغرافية وتحليل العمليات الهيدرولوجية المسؤولة أساسا عن نشوء الفيضانات. بعد سرد النماذج الهيدرولوجية الرئيسية "مطر- تدفق" ، وقع الإختيار على اثنين من النماذج التي أثبتت متانتها وأدائها على المستوى الدولي : النموذج النصف توزيعي HEC- HMS و النموذج الشامل ORSTOM الذي يعتبر نموذج كلاسيكي بحت القطعية. النتائج أظهرت أن كلا النموذجين قادرين على تقدير، في ظرف وجيز، تدفقات الفيضانات ذات الترددات النادرة وغيرها من خصائص الفيضانات و الوصول إلى مخطط هيدروغراف الفيضان. الفرق بين النتائج المحصل عليها من خلال هذين النموذجين بسيط. تم تطوير عدة علاقات رياضية بين مختلف خصائص الفيضانات ومساحة مستجمع المياه بواسطة نموذج ORSTOM. تم إنجاز محاكاة هيدروديناميكية لقسم من وادي ميزاب باستخدام نموذج HEC-RAS وذلك بالإعتماد على التدفق المئوي المحصل عليه عن طريق نموذج HEC-HMS .

الكلمات الجوهرية :

غرداية ، فيضانات ، مستجمع مياه ، وادي ميزاب ، النمذجة "مطر- تدفق" ، نموذج HEC-HMS ،  
نموذج ORSTOM ، نموذج HEC-RAS

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>1. GENERALITES</b> .....	4
1.1 RISQUES MAJEURS-INONDATIONS .....	4
1.2 CONNAISSANCE DU RISQUE D'INONDATION .....	5
1.3 PARAMETRES FONDAMENTAUX D'UN COURS D'EAU.....	6
1.3.1 Lit d'un cours d'eau.....	6
1.3.2 Rive, berge .....	8
1.3.3 Ripisylve .....	9
1.3.4 Alluvions et substratum.....	9
1.4 TYPES D'INONDATION.....	9
1.4.1 Montée lente des eaux en région de plaine .....	9
1.4.2 La formation rapide de crues torrentielles .....	10
1.4.3 Par stagnation d'eaux pluviales .....	10
1.4.4 Le ruissellement pluvial en secteur urbain .....	11
1.4.5 Par submersion de zones littorales (ou lacustres) .....	12
1.4.6 Par dépressions tropicales et cyclones .....	12
1.4.7 Par destruction d'ouvrages.....	12
1.5 LES FACTEURS GENERATEURS DES CRUES .....	12
1.5.1 Facteurs directes .....	12
1.5.2 Facteurs indirectes.....	12
1.6 INFLUENCE DES FACTEURS NATURELS .....	12
1.7 LES PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISANT D'INONDATION.....	13
1.7.1 La période de retour de crues .....	13
1.7.2 La hauteur et la durée de submersion .....	13
1.7.3 La vitesse du courant .....	14
1.7.4 Le volume de matière transportée.....	14
1.8 PROCESSUS CONDUISANT AUX CRUES ET AUX INONDATIONS .....	14
1.8.1 L'eau mobilisable.....	14
1.8.2 Le ruissellement.....	14
1.8.3 Le temps de concentration.....	14
1.8.4 La propagation de la crue.....	14
1.9 FACTEURS AGGRAVANTS LE PHENOMENE D'INONDATION .....	15
1.10 LES DEGATS CREES PAR LES INONDATIONS .....	15
1.11 STRATEGIES DE GESTION DES RISQUES D'INONDATIONS.....	15
1.11.1 Prévention : Information, communication et sensibilisation aux risques d'inondations...16	
1.11.2 Préparation .....	16
1.11.3 Protection contre les risques.....	16
1.11.4 Prévision, surveillance et alerte du risque.....	16
1.11.5 Intervention, secourisme et réhabilitation .....	17
1.11.6 Implication des organisations non gouvernementales et collaboration internationale.....17	
<b>2. PROBLEMATIQUE D'INONDATION EN ALGERIE</b> .....	17
2.1 LES DONNEES HYDROLOGIQUES .....	18
2.2 LE CLIMAT EN ALGERIE .....	18
2.3 CAUSES DES CRUES CATASTROPHIQUES EN ALGERIE.....	19
2.4 ANALYSE DES CAUSES DE DEGRADATION DES SOLS EN ALGERIE .....	20
2.4.1 L'érosion.....	21

2.5 TYPES D'INONDATIONS CATASTROPHIQUES EN ALGERIE.....	22
<b>Conclusion.....</b>	<b>24</b>

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

<b>1. PRESENTATION DE LA WILAYA DE GHARDAIA .....</b>	<b>26</b>
<b>2. PRESENTATION DE LA REGION DU M'ZAB .....</b>	<b>27</b>
2.1 Présentation des cinq cités de la région du M'ZAB.....	27
2.2 L'Industrie dans la région du M'ZAB.....	28
2.3 Le tourisme dans la région du M'ZAB.....	28
<b>3. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DU M'ZAB.....</b>	<b>29</b>
<b>4. VALLEE DU M'ZAB.....</b>	<b>30</b>
4.1 Description générale de la vallée du M'Zab .....	30
4.2 Importance de la vallée dans la wilaya .....	31
<b>5. ASPECTS CLIMATIQUES.....</b>	<b>31</b>
5.1 Indice annuel d'aridité de E. Demartonne .....	32
5.2 Précipitations.....	33
5.3 Températures.....	33
5.4 Le vent.....	33
5.5 Evaporation et Evapotranspiration .....	34
<b>6. LA VEGETATION ET L'UTILISATION ACTUELLE DU MILIEU.....</b>	<b>34</b>
6.1 Végétation .....	34
6.2 Activités agricoles .....	35
<b>7. LES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES.....</b>	<b>35</b>
7.1 L'aquifère du Continental Intercalaire (nappe albienne).....	35
7.2 L'aquifère du Complexe Terminal.....	36
<b>8. LITHOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE.....</b>	<b>37</b>
<b>9. APERCU SUR LES INONDATIONS DANS LA VALLEE DU M'ZAB.....</b>	<b>37</b>
9.1 Inventaire des crues .....	38
9.2 Inondations du 1 octobre 2008.....	40
9.3 Les dégâts causés par les inondations du 1 octobre 2008.....	40
<b>10. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES ET HYDROGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED M'ZAB.....</b>	<b>43</b>
10.1 Morphometrie.....	43
10.1.1 Parametres de forme .....	43
10.1.2 Altitude.....	45
10.1.3 Indices de pente.....	45
10.1.4 Classes de relief et de perméabilité .....	47
10.1.5 Temps de concentration .....	48
10.2 Etude du réseau Hydrographique .....	49
10.2.1 Ordre du bassin versant.....	49
<b>11. ETUDE DES PRECIPITATIONS.....</b>	<b>52</b>
11.1 Réseau d'observation et Acquisition des données.....	53
11.2 Pluie annuelle.....	53
11.3 Pluie mensuelle.....	58
11.4 Précipitations extrêmes et Averses.....	61
11.5 Pluies de courtes durées et courbes HDF-IDF.....	62
11.6 Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des pluies.....	68
<b>Conclusion.....</b>	<b>71</b>

## **CHAPITRE III : MODELISATION HYDROLOGIQUE ET MODELES PLUIE-DEBIT**

<b>1 LES MODELES HYDROLOGIQUES</b> .....	72
<b>2 UTILISATION DES MODELES EN HYDROLOGIE</b> .....	72
<b>3 LA MODELISATION PLUIE-DEBIT</b> .....	73
3.1 Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit .....	74
3.2 Classification des modèles Pluie-débit .....	74
3.2.1 Classification de Clarke et Ambroise .....	75
3.2.2 Classification de Perrin .....	76
3.3 Critères de sélection des modèles pluie-débit .....	78
3.4 Présentation de quelques modèles pluie-débit .....	78
3.4.1 Modèle spatialisé fondé sur la physique : le modèle SHE .....	78
3.4.2 Modèles globaux (IHACRES, Orstom) .....	80
3.4.3 Modèles empiriques : Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) .....	83
3.4.4 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé : TOPMODEL .....	84
3.4.5 Modèles semi-spatialisés (HEC, CEQUEAU, MIKE BASSIN et SWAT) .....	85
<b>Conclusion</b> .....	96

## **CHAPITRE V : APPLICATION DES MODELES ET DISCUSSIONS DES RESULTATS**

<b>1. MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE MODELE HEC-HMS</b> .....	98
1.1 Préparation des entrées du modèle HEC-HMS .....	98
1.1.1 Modélisation du bassin versant .....	98
1.1.2 Modélisation des précipitations par la méthode pluie hypothétique basée sur la fréquence .....	108
1.2 Simulation hydrologique et visualisation des résultats .....	108
<b>2. MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE MODELE ORSTOM</b> .....	112
2.1 Présentation du modèle .....	112
2.2 Etapes à suivre .....	112
2.2.1 Estimation de la précipitation moyenne sur le bassin Pm .....	113
2.2.2 Estimation du coefficient de ruissellement .....	114
2.2.3 Caractéristiques de l'hydrogramme de crue .....	115
2.3 Application à d'autres périodes de retour .....	124
<b>3. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE PAR HEC-RAS</b> .....	127
3.1 Modèles hydrodynamiques .....	127
3.2 Formulations utilisées par HEC-RAS .....	129
3.3 Terminologie utilisée par HEC-RAS .....	130
3.4 Modélisation du tronçon de l'Oued M'Zab .....	131
3.4.1 Définition de la géométrie du tronçon de l'Oued .....	131
3.4.2 Données de base .....	132
3.4.3 Simulation et visualisation des résultats .....	136
<b>Conclusion</b> .....	142
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	144
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	147



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b>	Critères d'identification des zones à risques.....	7
<b>Tableau I.2</b>	Distribution régionale de la pluviométrie moyenne (mm).....	19
<b>Tableau I.3</b>	Ressources en sols inventoriées .....	21
<b>Tableau II.1</b>	Superficies et population des communes de la Wilaya de Ghardaïa .....	27
<b>Tableau II.2</b>	Précipitations de la région de Ghardaïa relevées sur une période de 111 ans .....	33
<b>Tableau II.3</b>	Températures de la région de Ghardaïa relevées sur une période de 111 ans .....	33
<b>Tableau II.4</b>	Liste des crues de l'oued M'Zab .....	38
<b>Tableau II.5</b>	Coefficient de correction Kc de Ig en fonction de la superficie.....	46
<b>Tableau II.6</b>	Nombre des talwegs .....	49
<b>Tableau II.7</b>	Rapport de confluence .....	51
<b>Tableau II.8</b>	Caractéristiques principales de la station pluviométrique de Ghardaïa .....	53
<b>Tableau II.9</b>	Pluie annuelle. Valeurs caractéristiques .....	55
<b>Tableau II.10</b>	Fréquences des pluies annuelles (mm) ,88 ans .....	56
<b>Tableau II.11</b>	Pluies intra-annuelles, 1926-1960 .....	58
<b>Tableau II.12</b>	Valeurs caractéristiques des pluies mensuelles en mm.....	60
<b>Tableau II.13</b>	Les hauteurs mensuelles de pluies supérieures à 5, 10, et 20 mm en 24 heures (1926-1950) .....	60
<b>Tableau II.14</b>	Pluie maximale journalière fréquentielle, Station Ghardaïa .....	62
<b>Tableau II.15</b>	Hauteurs et intensités de pluies de courtes durées obtenues par l'application de la formule de Bennour -Station de Ghardaïa .....	63
<b>Tableau II.16</b>	Hauteurs et intensités de pluies de courtes durées selon la formule de Montanari -Station de Ghardaïa-.....	66
<b>Tableau V.1</b>	Morphologie des bassins versants des oueds formateurs du M'Zab .....	100
<b>Tableau V.2</b>	CN en fonction de groupe de sol et pourcentage des surfaces construites .....	102
<b>Tableau V.3</b>	Paramètres introduits dans le logiciel HEC-HMS pour la fonction de production SCS Curve Number .....	104
<b>Tableau V.4</b>	Paramètres introduits dans le logiciel HEC-HMS pour le modèle de ruissellement de Clarck .....	107
<b>Tableau V.5</b>	Valeurs minimales et maximales des paramètres du modèle de CLARK acceptées par le logiciel HEC-HMS .....	107
<b>Tableau V.6</b>	Résumé des résultats (Summary table) données par HEC-HMS .....	110
<b>Tableau V.7</b>	Les valeurs de n calculées pour les différentes périodes de retour à El Atteuf et à Dayet Ben Dahoua .....	110
<b>Tableau V.8</b>	Les coefficients d'abattement et les pluies moyennes pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab .....	113
<b>Tableau V.9</b>	Coefficient de ruissellement Kr applicable à une pluie journalière centennale (en %)......	114
<b>Tableau V.10</b>	les coefficients de ruissellement pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab.....	115
<b>Tableau V.11</b>	Temps de base de la crue centennale en fonction de la superficie S (en Km <sup>2</sup> ) et la classe de relief R.....	116
<b>Tableau V.12</b>	Temps de base pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab ....	117
<b>Tableau V.13</b>	Temps de montée de la crue centennale en fonction de la superficie S (en Km <sup>2</sup> ) et la classe de relief R.....	117
<b>Tableau V.14</b>	Temps de montée pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab..	118

<b>Tableau V.15</b>	Débits moyens calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab .....119
<b>Tableau V.16</b>	Coefficients de pointe calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab ... .....120
<b>Tableau V.17</b>	Débits de pointe calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab .....121
<b>Tableau V.18</b>	le Volume de crue $V_t$ calculé pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab .....121
<b>Tableau V.19</b>	Facteurs de forme calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab .....123
<b>Tableau V.20</b>	Débit max et Volume de crue pour les différentes périodes de retour à El Atteuf.....124
<b>Tableau V.21</b>	Débit max et Volume de crue pour les différentes périodes de retour à Dayet Ben Dahoua.....125
<b>Tableau V.22</b>	Logiciels de modélisation hydrodynamique .....128
<b>Tableau V.23</b>	Valeurs du coefficient "n" de Manning .....135
<b>Tableau V.24</b>	Débit de projet .....135

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b>	Niveau de crue au niveau des lits de l'oued .....	5
<b>Figure I.2</b>	Lits d'un cours d'eau .....	8
<b>Figure I.3</b>	Représentation de termes géographiques usuels de la rivière .....	8
<b>Figure I.4</b>	Les inondations de plaine par la montée de la nappe .....	9
<b>Figure I.5</b>	Les inondations des crues torrentielles .....	10
<b>Figure I.6</b>	Les inondations par stagnation des eaux pluviales .....	10
<b>Figure I.7</b>	Inondations par ruissellement pluvial en secteur urbain .....	11
<b>Figure I.8</b>	Schématisation de la vulnérabilité de l'aléa d'inondation en Algérie .....	20
<b>Figure I.9</b>	Communes victimes d'inondation en cours des 3 dernières années .....	22
<b>Figure I.10</b>	Ampleur d'inondation en Algérie .....	24
<b>Figure II.1</b>	Carte de situation de la Wilaya de Ghardaïa .....	26
<b>Figure II.2</b>	Carte des grands bassins versants de la région de Ghardaïa .....	29
<b>Figure II.3</b>	Bassin versant de l'Oued M'Zab .....	30
<b>Figure II.4</b>	Abaque de E.DEMARTONNE des indices climatiques .....	32
<b>Figure II.5</b>	Tracé de la carte des vents à 10 mètres d'altitude .....	34
<b>Figure II.6</b>	Carte de situation du Sahara septentrional .....	35
<b>Figure II.7</b>	Extension géographique de la nappe albienne en Algérie .....	36
<b>Figure II.8</b>	Extension géographique de L'aquifère du Complexe Terminal .....	37
<b>Figure II.9</b>	Impacts immédiats des inondations du 1 octobre 2008 .....	42
<b>Figure II.10</b>	Rectangle équivalent du BV .....	44
<b>Figure II.11</b>	Hypsométrie du bassin versant de l'Oued M'Zab .....	44
<b>Figure II.12</b>	Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab .....	45
<b>Figure II.13</b>	Courbe de variation du coefficient de correction en fonction de la Superficie .....	46
<b>Figure II.14</b>	Classification du Réseau hydrographique par Schumm .....	50
<b>Figure II.15</b>	Profils en long de l'oued M'Zab et de ses grands formateurs jusqu'à El Atteuf .....	52
<b>Figure II.16</b>	Carte de la pluviométrie moyenne annuelle du nord d'Algérie et du Sahara .....	54
<b>Figure II.17</b>	Graphique de "P.SELTZER" les trois lois de l'Algérie .....	54
<b>Figure II.18</b>	Variation de la Hauteur de pluie annuelle .....	55
<b>Figure II.19</b>	Ajustement de la racine carrée des pluies annuelles à la loi normale .....	56
<b>Figure II.20</b>	Totaux annuels moyen des précipitations supérieures à 5 mm en 24 heures .....	57
<b>Figure II.21</b>	Totaux annuels moyen des précipitations supérieures à 10 mm en 24 heures .....	57
<b>Figure II.22</b>	Totaux annuels moyen des précipitations supérieures à 20 mm en 24 heures .....	58
<b>Figure II.23</b>	Pluies intra-annuelles .....	59
<b>Figure II.24</b>	Carte de répartition des mois les plus pluvieux de l'année .....	59
<b>Figure II.25</b>	Valeurs caractéristiques des pluies mensuelles en mm (1926-1960) .....	60

<b>Figure II.26</b>	Ajustement des précipitations journalières maximales à la loi de Weibull, Station de Ghardaïa.....	61
<b>Figure II.27</b>	Courbes Hauteur-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) obtenues par l'application de la formule de Bennour .....	64
<b>Figure II.28</b>	Courbes Intensité-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) obtenues par l'application de la formule de Bennour.....	64
<b>Figure II.29</b>	Courbes Hauteur-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) selon la formule de Montanari.....	67
<b>Figure II.30</b>	Courbes Intensité-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) selon la formule de Montanari.....	67
<b>Figure II.31</b>	Abattement de pluie en fonction de la distance à l'épicentre.....	70
<b>Figure III.1</b>	Cycle de l'eau.....	73
<b>Figure III.2</b>	Classification des modèles Pluie-débit selon Clarke (1973), Ambroise (1998).....	75
<b>Figure III.3</b>	Code MIKE-SHE .....	80
<b>Figure III.4</b>	Structure du modèle IHACRES .....	81
<b>Figure III.5</b>	Les sites d'application du Modèle ORSTOM .....	82
<b>Figure III.6</b>	Structure du modèle TOPMODEL .....	85
<b>Figure III.7</b>	Interface du modèle MIKE BASSIN sous le SIG Arcview .....	86
<b>Figure III.8</b>	Fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU .....	88
<b>Figure III.9</b>	Fonction de transfert du modèle CEQUEAU .....	88
<b>Figure III.10</b>	Interface graphique du modèle CEQUEAU .....	89
<b>Figure III.11</b>	Fonctionnement schématique de SWAT .....	92
<b>Figure III.12</b>	Structure hydrologique de SWAT .....	93
<b>Figure V.1</b>	Découpage du bassin versant en sous-bassins versants .....	99
<b>Figure V.2</b>	Schéma du modèle de bassin par HEC-HMS .....	101
<b>Figure V.3</b>	Hydrogramme Synthétique de CLARCK à El Atteuf pour les différentes périodes de retour .....	109
<b>Figure V.4</b>	Hydrogramme Synthétique de CLARCK à Dayet Ben Dahoua pour les différentes périodes de retour.....	109
<b>Figure V.5</b>	Hydrogramme unitaire pour les différentes périodes de retour à El Atteuf et son ajustement à une structure analytique type Maxwell.....	111
<b>Figure V.6</b>	Hydrogramme unitaire pour les différentes périodes de retour à Dayet Ben Dahoua et son ajustement à une structure analytique type Maxwell....	111
<b>Figure V.7</b>	Variation du coefficient d'abattement en fonction de la superficie.....	114
<b>Figure V.8</b>	Coefficient de ruissellement $K_r$ en fonction de la superficie pour R4P2.....	115
<b>Figure V.9</b>	Temps de base $T_b$ en fonction de la superficie pour l'indice de relief R4....	116
<b>Figure V.10</b>	Temps de montée $T_m$ en fonction de la superficie pour l'indice de relief R4.....	118
<b>Figure V.11</b>	Variation du coefficient de pointe en fonction de la superficie.....	120
<b>Figure V.12</b>	Hydrogramme Synthétique (Maxwell) pour une période de retour de 100 ans.....	124

<b>Figure V.13</b>	Variation du débit de pointe en fonction de la période de retour à El Atteuf .....	125
<b>Figure V.14</b>	Variation du volume de crue en fonction de la période de retour à El Atteuf .....	126
<b>Figure V.15</b>	Variation du débit de pointe en fonction de la période de retour à Dayet Ben Dahoua.....	126
<b>Figure V.16</b>	Variation du volume de crue en fonction de la période de retour à Dayet Ben Dahoua.....	127
<b>Figure V.17</b>	Coefficients de rugosité.....	130
<b>Figure V.18</b>	Schéma des fichiers d'un projet .....	130
<b>Figure V.19</b>	Profils en travers construits et importés dans Hec-Ras .....	133
<b>Figure V.20</b>	Profil obtenu sous HEC-RAS .....	137
<b>Figure V.21</b>	Section en travers à l'extrémité amont .....	138
<b>Figure V.22</b>	Variation de la largeur au miroir en fonction des distances cumulées .....	138
<b>Figure V.23</b>	Profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de profondeur critique .....	139
<b>Figure V.24</b>	Variation du nombre de Froude en fonction des distances cumulées .....	140
<b>Figure V.25</b>	Variation de la pente hydraulique en fonction des distances cumulées .....	141
<b>Figure V.26</b>	Variation de la vitesse moyenne en fonction des distances cumulées .....	141

## INTRODUCTION GENERALE

Les inondations correspondent à des aléas naturels susceptibles d'occasionner des pertes en vies humaines, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques et de dégradations de l'environnement. Dans la triste liste noire des victimes, et à l'échelle du bassin méditerranéen, les risques d'inondation viennent en deuxième rang après les risques sismiques, mais ils occupent, en revanche, le premier rang sur le plan de fréquences d'occurrences.

En Algérie, les catastrophes les plus fréquentes et les plus meurtrières sont la récurrence terrible des inondations. Les inondations de l'Oued Koriche (Alger) en Novembre 2001 et la crue de l'Oued M'Zab (Fin Septembre-début Octobre 2008) dans la région de Ghardaïa restent gravées dans les mémoires des algériens.

Pour réduire les dommages causés par les inondations et pour assurer la sécurité des biens et des personnes, il faut une parfaite identification des régions présentant le risque d'inondabilité et des facteurs favorisant ou amplifiant l'ampleur des dégâts et des pertes engendrées par ces catastrophes. La détermination des débits des crues du projet reste un outil précieux pour le dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations.

La connaissance régionale des écoulements de surface, notamment en Algérie est très indispensable pour l'étude des inondations. Or, la qualité des données observées (non continues, non disponibles, entachées d'erreurs de mesure ou de saisie, etc.) fait que la détermination des débits d'écoulement soit très difficile à réaliser voire impossible. Pour cette raison, le recours à la modélisation hydrologique "pluie-débit" est fortement nécessaire.

La modélisation pluie-débit étudie la simulation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. Cette dernière a connu un essor considérable depuis les années 60 grâce notamment à l'accroissement des capacités de calcul.

Il existe aujourd'hui un très grand nombre de modèles pluie-débit, classés dans différentes catégories, à savoir, déterministes ou stochastiques, globaux ou distribués, cinématiques ou dynamiques et enfin empiriques ou physiques. Cela est dû notamment à la nature des variables ou paramètres y intervenant, le bassin versant considéré comme entité homogène ou discrétisé, l'évolution temporelle du système modélisé, et aux relations utilisées dans la modélisation pluie-débit.

La modélisation pluie-débit est un outil indispensable dans divers domaines liés à l'étude des inondations: la prévention et la prédétermination des crues, l'étude des processus responsables de la genèse des crues, l'étude de l'effet des changements climatiques sur la vulnérabilité au risque d'inondation, l'identification des zones vulnérables face aux risques d'inondations, l'étude de l'impact des inondations sur l'homme et sur l'environnement.....etc.

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle "pluie-débit" efficace pour l'estimation des crues de fréquences rares, en zone aride, et en absence de jaugeage.

L'étude menée consiste en :

-Identification des facteurs topographiques, géomorphologiques, lithologiques, hydrographiques, climatiques et même humains, responsables de la genèse des crues;

-Connaissance de l'historique des crues;

-Recherche de modèles "pluie-débit", fiables pouvant estimer les débits et les autres caractéristiques de la crue en fonction des spécificités climatiques et morphologiques. Un modèle "pluie débit" adapté aux conditions spécifiques, aidera à une bonne connaissance de la genèse des crues dans le bassin versant de l'Oued M'Zab non jaugé ;

-Etablissement d'un modèle numérique de tracé de l'hydrogramme type de la crue ;

-Etablissement des modèles analytiques "Coefficients d'abattement – Surfaces" et "Coefficients de ruissèlement – Surfaces", basés sur les caractéristiques physiques du bassin ;

-Etablissement de quelques modèles analytiques et descriptifs : Caractéristiques de la crue (temps de base, débit de pointe, temps de montée et volume de crue) – Surfaces, basés sur une approche statistique de corrélations simples et sur les caractéristiques physiques du bassin ;

-Etablissement des modèles analytiques "Débits de pointe – Périodes de retour" et "Volumes de la crue – Périodes de retour" ;

-Comparaison des résultats obtenus avec quelques débits historiques enregistrés ;

-Application d'un modèle hydrodynamique unidimensionnel sur un tronçon de l'oued M'Zab afin d'étudier le comportement de la ligne d'eau.

Le présent travail a été fait dans le Bassin versant de l'Oued M'Zab sous climat saharien. Le choix est justifié par les raisons suivantes :

- La vulnérabilité de la région d'étude face aux risques d'inondations ;
- L'importance de la région du point de vue socio-économique, une région en pleine expansion;
- Un modèle Pluie-débit s'adapte bien aux bassins versants non jaugés et c'est le cas du bassin versant de l'Oued M'Zab;

Ce travail comprend quatre chapitres distincts, à savoir :

**Le premier chapitre** traite les notions générales. Pour la reconnaissance du phénomène, l'aléa "inondation" sera défini avec les paramètres qui l'influent ainsi que les différents types d'inondation pour comparer les causes engendrant un tel phénomène. Ce chapitre relate également l'ampleur de l'inondation au niveau national.

**Le deuxième chapitre** est consacré à l'étude du bassin versant en tant que système représentatif de ce phénomène (les inondations). Cette unité naturelle sera étudiée sur le plan géomorphologique, lithologique, topographique, climatique et hydrographique pour caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans la genèse des crues. Il vise également l'historique des crues dans le bassin versant, pour ce faire un inventaire des inondations à travers le bassin est élaboré.

Dans **le chapitre trois**, le choix d'un modèle " Pluie-Débit " est considéré. Celui-ci devra d'une part répondre à cet objectif d'estimation des débits des crues, et d'autre part, être le plus simple possible. Dans cette perspective, une synthèse traitant de la modélisation hydrologique pluie-débit est réalisée.

**Le quatrième chapitre** est consacré à l'application du ou des modèles choisis dans le bassin versant de l'Oued M'Zab et à l'interprétation et la discussion des résultats obtenus.

Et pour conclure, une **conclusion générale** est donnée à la fin de ce travail.



À l'échelle mondiale, les inondations comptent parmi les phénomènes naturels les plus fréquents, les plus dangereux et les plus destructeurs. Elles font parfois des centaines de milliers de victimes directes et indirectes; partout, elles entraînent généralement des dommages économiques considérables. Mais elles sont aussi des sources de vie, car les terres inondables des plaines alluviales et côtières, limoneuses et humides, comptent parmi les plus fertiles.

Les crues se produisent à peu près partout dans le monde, et très fréquemment. Elles affectent, en majeure partie, les zones les plus peuplées. Du point de vue du nombre des personnes touchées à travers le monde, les crues viennent en deuxième position, après la sécheresse.

Quels sont les phénomènes générateurs des inondations ? Quelles sont les différents types de crues ? Quelles sont les conséquences de cet aléa ? De quelle façon gère-t-on le risque inondation ? Connaît-on souvent de violentes inondations ? Où se produisent les inondations ? Quelle est l'ampleur des inondations en Algérie ?

Ce Chapitre va tenter de répondre de la façon la plus complète possible à toutes ces questions.

## 1. GENERALITES

### 1.1 RISQUES MAJEURS-INONDATIONS

Comme définition générale, le risque est la possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition à un danger. C'est la composante de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté (incident ou accident) et la gravité de ses conséquences.

Les différents types de risques auxquels chaque individu peut être exposé sont regroupés en cinq (05) grandes familles (Merabet, 2008) :

- **Les risques naturels** : avalanches, feux de forêts, **inondations**, mouvements des terrains, cyclones, tempêtes, séismes et éruptions volcaniques.
- **Les risques technologiques** : d'origine anthropique, ils regroupent les risques industriels, nucléaires, biologiques, ruptures des barrages.
- **Les risques de transports collectifs** (personnes, matières dangereuses) sont des risques technologiques. Il s'agit d'un cas particulier car les enjeux varient en fonction de l'endroit où se développe l'accident.
- **Les risques de la vie quotidienne** (accidents domestiques, accidents de la route...etc.).
- **Les risques liés aux conflits.**

Si un de ces risques s'associe au phénomène d'inondation, les conséquences seront encore plus désastreuses.

Seules les trois premières catégories font partie de ce qu'on appelle le risque majeur. Deux critères caractérisent le risque majeur :

- **Une faible fréquence** : L'homme et la société peuvent être d'autant plus enclins à l'ignorer que les catastrophes sont peu fréquentes ;
- **Une énorme gravité** : Nombreuses victimes, dommages importants aux biens et à l'environnement.

La définition du risque majeur, d'après Haroun TAZIEFF «c'est la menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations, la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre » (Merabet, 2008).

L'inondation, qui fait partie des risques les plus répandus, est une submersion d'une zone pouvant être habitée ou non. Elle correspond au débordement des eaux lors d'une crue. **Le débit** d'un cours d'eau en un point donné est la quantité d'eau ( $m^3$ ) passant en ce point par seconde. **Une crue** correspond à l'augmentation du débit ( $m^3/s$ ) d'un cours d'eau, dépassant plusieurs fois le débit moyen : elle se traduit par une augmentation de la hauteur d'eau.

## 1.2 CONNAISSANCE DU RISQUE D'INONDATION

Le risque d'inondation est la conséquence de deux composantes : que sont la **Vulnérabilité** et l'**alea** (DGPC, 2007).

Il y a risque lorsque nous sommes sur une parcelle avec une occupation du sol incompatible avec l'aléa. Le risque étant déterminé par le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité, il faut être capable de les comparer. Ceci est possible avec les modèles hydrologiques en débit, durée et fréquence qui permettent de traduire dans la même unité les deux facteurs.

Si la vulnérabilité est plus faible que l'aléa, la parcelle est considérée comme ne présentant pas de risque. Elle est correctement protégée, voire surprotégée. Dans le cas contraire, une parcelle à risque qu'il faudra protéger ou évacuer est à identifier.

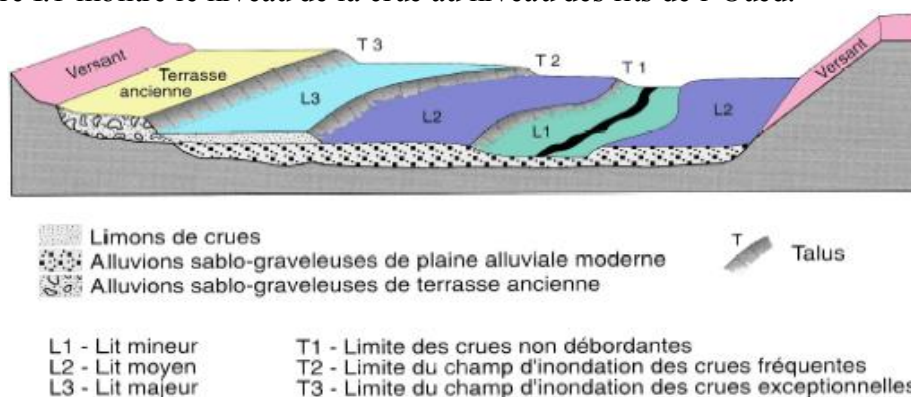
La connaissance du risque d'inondation nécessite quelques définitions :

### -L'inondation

Etymologiquement : Le mot inondation vient du latin: « inundatio » qui signifie submersion

La crue correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans la rivière (débit) et peut concerner l'ensemble du lit majeur de la rivière. L'importance de l'inondation dépend de trois paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue. Ces paramètres sont conditionnés par les précipitations, l'état du **bassin versant** et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur de la vallée, etc.). Ces caractéristiques naturelles peuvent être aggravées par la présence d'activités humaines.

La figure I.1 montre le niveau de la crue au niveau des lits de l'Oued.



**Figure I.1** : Niveau de crue au niveau des lits de l'oued (Merabet, 2008)

### ***-La vulnérabilité***

Le fait qu'une rivière cause des dégâts résulte de la plus ou moins grande sensibilité du lieu où se produit le phénomène : c'est la **composante vulnérabilité** (DGPC, 2007).

La présence de l'homme, qui s'installe dans l'espace alluvial, pour y implanter toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités, joue un double rôle : d'une part elle constitue le risque en exposant des personnes et des biens aux inondations, d'autre part, elle aggrave l'aléa et le risque, en amont comme en aval, en modifiant les conditions d'écoulement de l'eau.

### ***-L'Aléa***

Une rivière qui déborde traduit un phénomène naturel présentant un caractère aléatoire : c'est la **composante aléa** du risque (DGPC, 2007).

Les principaux paramètres nécessaires pour évaluer l'aléa sont :

- La période de retour des crues
- la hauteur et la durée de submersion
- la vitesse d'écoulement
- la torrentialité du cours d'eau.

La possibilité d'apparition d'une crue dépend de nombreux paramètres, autres que la quantité de pluie tombée : répartition spatiale et temporelle des pluies par rapport au bassin versant, évaporation et consommation d'eau par les plantes, absorption d'eau par le sol, infiltration dans le sous-sol ou ruissellement ... et pour une même quantité précipitée, la crue apparaîtra ou non.

La notion de crue est souvent associée à la notion de période de retour (crue décennale, centennale, millénaire...), les débits et l'intensité étant d'autant plus importants que la période de retour est plus longue.

Par ailleurs, les dégâts occasionnés par une inondation dépendent de plusieurs facteurs : la hauteur de submersion, la durée de submersion, les vitesses d'écoulement, le volume de matière solide transporté, l'érosion des berges.

Ces paramètres permettent d'évaluer l'aléa « inondation » et les critères d'identification des zones à risques (Tab. I.1).

## **1.3 PARAMETRES FONDAMENTAUX D'UN COURS D'EAU**

### **1.3.1 Lit d'un cours d'eau**

Le lit d'un cours d'eau est, en général, la partie la plus profonde de la vallée dans laquelle s'écoule gravitairement un courant d'eau. De manière classique, ce lit de la rivière étant façonné par les eaux qu'il transporte. Ses dimensions sont fortement liées aux régimes hydrologiques. Il faut distinguer le lit mineur limité par des berges, du lit majeur occupé temporairement par les eaux débordantes et le lit moyen qui est entre les deux lits cités (MEDD, 2004).

**Tableau I.1** : Critères d'identification des zones à risques

ALEA	DEFINITION	CRITERES D'IDENTIFICATION
Elevé	Zones où les <b>vitesse de l'écoulement et/ou les hauteurs d'eau</b> peuvent être importantes lors des crues exceptionnelles.	-Ces zones correspondent principalement au <b>lit mineur</b> et à ses abords immédiats (berges instables). -fonds des ravines
	Zones où il est envisageable que le <b>talweg principal puisse changer de tracé et/ou évoluer dans son tracé (méandres)</b> .	Le changement de tracé d'un cours d'eau peut se produire lors de <b>débordements importants durant une crue exceptionnelle et/ou par suite d'accumulation ponctuelle importante d'embâcles et/ou d'apports solides</b>
Moyen	Dans ces zones, les <b>vitesse et les hauteurs de submersion pourront être faibles voire moyennes</b> , la durée de submersion étant limitée.	-zones de <b>débordement au niveau du lit majeur</b> lors des crues exceptionnelles -zones de stagnation des eaux pluviales avec hauteur de submersion relativement importante
Modéré	Zones où les <b>vitesse d'écoulement seront faibles voire nulles</b>	-zones de stagnation des eaux pluviales -zones inondées par remontée de nappe
Faible à nul	<b>probabilité d'inondation faible à nulle</b>	-zones hautes -zones en dehors du lit mineur ou majeur d'un cours d'eau -zones éloignées de la bordure littorale

Source : DGPC, 2007

- **Lit mineur** : Le lit mineur est constitué par le lit ordinaire du cours d'eau, pour le débit d'étiage ou pour les crues fréquentes (crues annuelles).
- **Lit moyen** : Sous certains climats, notamment méditerranéens, il est possible d'identifier un lit moyen. Pour les crues de période de retour de 1 à 10 ans, l'inondation submerge les terres bordant la rivière et s'étend dans le lit moyen. Il correspond à l'espace fluvial ordinairement sur lequel s'écoulent les crues moyennes.
- **Lit majeur** : Le lit majeur comprend les zones basses situées de part et d'autre du lit mineur, sur une distance qui va de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Sa limite est celle des crues exceptionnelles.

Le lit majeur est occupé par un cours d'eau lors d'une inondation. Il peut-être scindé en deux zones :

- **une zone d'écoulement**, au voisinage du lit mineur, où le courant a une forte vitesse;
- **une zone de stockage des eaux**, où la vitesse est faible. ce stockage est fondamental, car il permet le **laminage** de la crue, c'est-à-dire la réduction du débit et de la vitesse de montée des eaux à l'aval.

La figure I.2 représente les lits d'un cours d'eau.

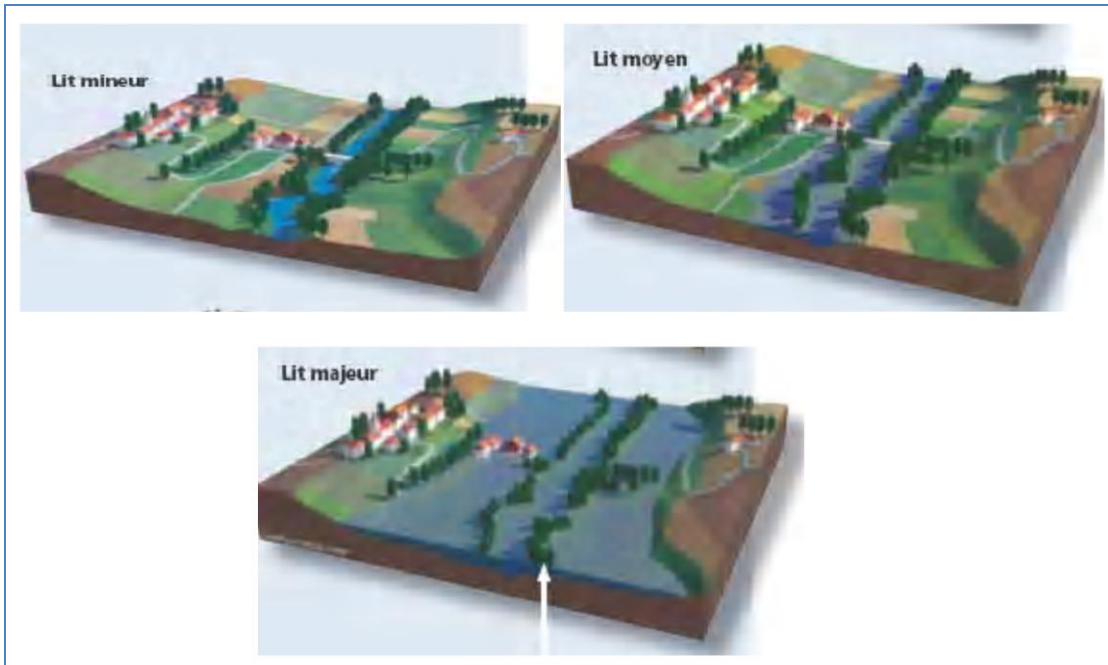


Figure I.2 : Lits d'un cours d'eau (MEDD, 2004)

### 1.3.2 Rive, berge

Rive et berge sont souvent confondues à tort. La berge est le talus incliné qui sépare le lit mineur et le lit majeur. Sa localisation est donc assez précise. La rive est le milieu géographique qui sépare les milieux aquatique et terrestre. Elle démarre au sommet de la berge et constitue une partie plate plus ou moins étendue qui reste sous l'influence du milieu aquatique.

La figure I.3 représente les termes géographiques usuels de la rivière.



Figure I.3 : Représentation de termes géographiques usuels de la rivière (Merabet, 2008)

### 1.3.3 Ripisylve

C'est la formation végétale naturelle située sur la rive. Elle peut être limitée à un cordon arboré étroit qui souligne le bord du lit mineur de la rivière ou bien elle est une véritable forêt alluviale s'étendant sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres de part et d'autre du lit mineur. Cette forêt occupe tout ou une partie du lit majeur. C'est un milieu inféodé à la rivière, particulièrement riche en terme de diversité floristique. Il comporte des strates herbacées souvent très diversifiées et des strates arbustives et arborescentes composées d'un nombre restreint d'espèces.

### 1.3.4 Alluvions et substratum

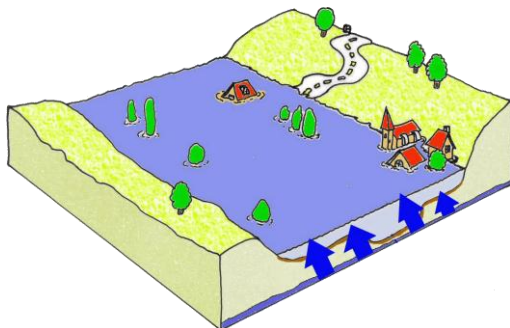
Une rivière coule généralement sur ses alluvions. Les alluvions sont les grains fins ou grossiers alternativement déposés ou repris par le courant. Les alluvions recouvrent le substratum rocheux formé d'une roche dure ou bien d'une roche plus ou moins tendre (schistes, grès, marnes...). Le transport solide est le déplacement vers l'aval d'une partie des alluvions selon un processus de charriage ou de suspension. Si l'on considère l'ensemble du cours d'eau de sa source à la mer, il stocke à chaque instant un volume d'alluvions considérable comparé aux apports solides annuels. Bien que très mobile, ce recouvrement alluvial constitue une protection du substratum. En effet, si l'enfoncement du fond de lit dans ses alluvions est un phénomène de type réversible, l'érosion du substratum mis à nu est un mécanisme souvent extrêmement très lent, parfois rapide mais toujours irréversible.

## 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.

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.4).



- **Causée par une saturation des nappes phréatiques.**
- **Crue et décrue très lentes.**

**Figure I.4 :** Les inondations de plaine par la montée de la nappe (Merabet, 2008)

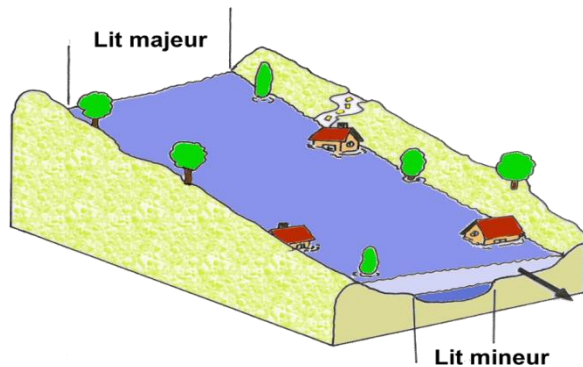
Il existe deux types de débordements dans l'inondation en région de la plaine :

- **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.5).



- **Crue très rapide sur un bassin versant à forte pente.**
- **Transport de matériaux, embâcles, transformation du lit.**

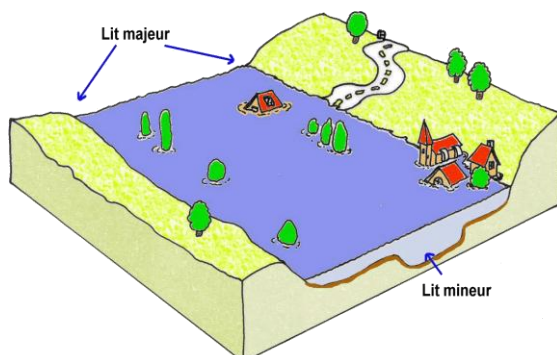
**Figure I.5** : Les inondations des crues torrentielles (Merabet, 2008)

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.6).



- **Crue lente sur un bassin versant à faible pente.**
- **Délais d'annonce importants car montée lente et progressive.**

**Figure I.6** : Les inondations par stagnation des eaux pluviales (Merabet, 2008)

### 1.4.4 Le 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.7).



- Causé par des épisodes orageux violents.
- Sur de petits bassins versants.

**Figure I.7 :** 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 buttent 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.

#### ***-La genèse du ruissellement***

D'après Merabet (2008), Le ruissellement apparaît lorsque les eaux de pluie ne peuvent pas ou plus s'infiltrer dans le sol. Ce refus d'absorber les eaux apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Une combinaison des deux phénomènes est possible.

L'eau qui ruisselle va alors alimenter directement le thalweg en aval. Dès le début d'une averse, les sols peuvent s'humidifier par rétention d'une partie de la pluie qu'ils reçoivent. Lorsque le sol refuse l'infiltration, lors d'une averse, il y a stockage de l'eau dans les dépressions de surface du sol, ce qui se traduit par la formation de flaques avant la génération du ruissellement.



**1.4.5 Par submersion de zones littorales (ou lacustres)** qui est liée à la présence de facteurs anormaux (fortes marées, marées de tempête, raz-de-marée).

**1.4.6 Par dépressions tropicales et cyclones** avec des précipitations pouvant atteindre jusqu'à 2 m par 24 heures et conduisant à des crues soudaines et violentes.

**1.4.7 Par destruction d'ouvrages** (digues, barrages, levées) : Ces inondations comprennent également les inondations par rupture d'ouvrages de protection (brèches dans les digues) et les inondations dans les estuaires. Ces dernières résultent de la conjonction de la crue des fleuves, de fortes marées et de situations dépressionnaires (régime de tempête).

## 1.5 LES FACTEURS GENERATEURS DES CRUES

### 1.5.1 Facteurs directes

- **Précipitations** (crues d'averses en Algérie)

Elles sont les plus fréquentes dans nos régions. Les crues sont liées à des averses exceptionnelles (Merabet, 2008).

Le caractère exceptionnel de l'averse est lié à :

- sa durée
- son intensité
- sa répartition géographique (par exemple le long d'un cours d'eau)
- la répétition de plusieurs averses
- la combinaison de plusieurs des facteurs précédents
- **Fonte des neiges**
- **Crues d'embâcles** (obstruction du lit d'un cours d'eau par un amoncellement de glace) et de **débâcles** (rupture des glaces d'un fleuve gelé) dans les régions subpolaires (Canada, Sibérie)
- **Accident** : ex : rupture accidentel de barrage "naturel" ou artificiel. Parfois cet accident est lui même lié à un autre phénomène exceptionnel (glissement de terrain, lié à des précipitations importantes, volcanisme, séisme...)

### 1.5.2 Facteurs indirectes (notamment bassins versant soumis à de "fréquentes crues")

- temps de concentration faible;
- imperméabilisation forte (conséquences d'aménagements urbains ou agricoles);
- avec en parallèle saturation ou sécheresse (faible perméabilité) du sous-sol
- conjonction des crues de deux affluents (Exemple : la crue de 17-04-2007 à Moulay Slissen wilaya de Sidi Bel Abbés; conjonction de deux rivières GHOR avec un débit  $Q = 350 \text{ m}^3$  et l'oued Mekerra avec un débit  $Q = 400 \text{ m}^3$ )

## 1.6 INFLUENCE DES FACTEURS NATURELS

De nombreux paramètres influencent l'apparition d'une crue. Tout d'abord, la quantité et surtout la répartition spatiale et temporelle des pluies, par rapport au bassin versant, sont déterminantes. Il peut s'agir de pluies répétées et prolongées de régime climatique de la région ou d'averses intenses de courte durée, qui touchent de petits bassins versants. La nature et l'occupation du sol dictent l'évaporation et la consommation d'eau par les plantes. L'absorption d'eau par le sol, l'infiltration dans le sous-sol ou le ruissellement influence fortement le temps de concentration des eaux.

À ces paramètres s'ajoutent des **facteurs naturels aggravants**, comme la fonte des neiges ou la formation et la rupture d'embâcles. Les matériaux flottants transportés par le courant peuvent en effet s'accumuler en amont des passages étroits. La rupture éventuelle de ces embâcles provoque une onde puissante et destructrice en aval. Concernant la fonte des neiges, il est rare en France que des crues importantes soient provoquées uniquement par ce phénomène, même s'il demeure un facteur aggravant.

## 1.7 LES PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISANT D'INONDATION

Quatre paramètres principaux sont nécessaires pour qualifier l'aléa inondation.

### 1.7.1 La période de retour de crues

La notion de période (ou temps) de retour est destinée à caractériser la fréquence d'apparition d'un phénomène.

Définition statistique du temps de retour : si  $p$  est la probabilité que le débit d'une rivière dépasse une valeur donnée au cours d'une année donnée, le temps de retour attaché à cet événement est défini comme l'inverse de cette probabilité,  $T=1/P$

L'amplitude de l'intervalle des très grandes crues mérite une attention particulière. Pour aucun élément de l'Hydrologie, les moyennes ne sont plus difficiles à établir et plus trompeuses. Ces phénomènes peuvent fort bien se grouper au nombre de deux, trois ou quatre dans un temps inférieur à l'intervalle moyen, puis absent pendant une période bien plus longue. Signalons comme événement étrange de ce genre les trois crues de la Loire en 1846, 1856 et 1866, presque doubles, au Bec d'Allier, de la plus forte survenue depuis lors... »

Il y'a par ordre croissant :

- **Les crues fréquentes**, dont la période de retour est comprise entre un et deux ans ;
- **Les crues moyennes**, dont la période de retour est comprise entre dix et vingt ans ;
- **Les crues exceptionnelles**, dont la période de retour est de l'ordre de cent ans ;
- **La crue maximale vraisemblable**, qui occupe l'intégralité du lit majeur.

Les événements les plus souvent représentés sur la carte d'aléa sont la crue décennale (Q10) et la crue centennale (Q100). L'aléa de référence servant de base à l'élaboration des documents réglementaires correspond à l'**événement centennal** ou au plus fort événement connu, s'il présente une fréquence supérieure à cent ans.

La période de retour est l'inverse de la probabilité d'occurrence du phénomène.

Un phénomène ayant une période de retour de cent ans (phénomène centennal) a une chance sur cent de se produire ou d'être dépassé chaque année. Cela est vérifié à condition de considérer une très longue période. Mais elle peut aussi, sur de courtes périodes (quelques années, parfois une seule), se répéter plusieurs fois. Autrement dit, en vingt ans, un individu a une chance sur cinq de vivre la crue centennale (Merabet, 2008 et DGPC, 2007).

### 1.7.2 La hauteur et la durée de submersion

La hauteur de submersion peut avoir un impact important sur le bâti, notamment lorsqu'elle dépasse la cote de référence. La structure porteuse de l'habitation peut être endommagée et les sols et murs gorgés d'eau.

Lorsque la durée de submersion est importante (supérieure à 24 h voire 48 h), des problèmes sanitaires peuvent survenir.

Pour l'homme, les hauteurs d'eau supérieures à 50 cm sont dangereuses. À titre d'exemple, une voiture commence à flotter à partir de 30 cm d'eau.

### **1.7.3 La vitesse du courant**

La vitesse d'écoulement est conditionnée par la pente du lit et sa rugosité. Elle peut atteindre plusieurs mètres par seconde. L'impact de l'écoulement dépend du couple hauteur / vitesse. À titre d'exemple, à partir de 0,50 m / s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure.

### **1.7.4 Le volume de matière transportée**

Ce volume est communément appelé « **transport solide** ». Il s'agit de matériaux (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, etc.) se trouvant dans les cours d'eau et dont le transport peut s'effectuer soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement sur le fond du lit, du fait des forces liées au courant.

Le terme de transport solide ne comprend pas le transport des flottants (bois morts...). Chacun des trois derniers paramètres a plus ou moins d'importance selon les caractéristiques morphodynamiques de la rivière. Par exemple, l'aléa inondation d'une rivière, dont la pente en long est faible (inférieure à 0,1 %) sera surtout caractérisé par la hauteur et la durée de submersion. L'aléa inondation d'une rivière torrentielle sera essentiellement caractérisé par une vitesse du courant élevée et un fort transport solide.

## **1.8 PROCESSUS CONDUISANT AUX CRUES ET AUX INONDATIONS**

Comprendre le processus à l'origine des crues et des inondations suppose d'analyser les différents facteurs concourant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. En simplifiant, on distingue (Merabet, 2008 et DGPC, 2007):

**1.8.1 L'eau mobilisable** : fonte des neiges ou de glaces associées ou non à des pluies ; pluies répétées et prolongées de régime océanique, qui affecteront par exemple les grands bassins; averses courtes mais intenses qui toucheront l'ensemble des bassins versants.

**1.8.2 Le ruissellement** : il correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol et de son occupation de surface.

**1.8.3 Le temps de concentration** : il est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau parvienne jusqu'à l'exutoire.

**1.8.4 La propagation de la crue** : est fonction de l'axe drainant c'est-à-dire du champ d'écoulement des eaux et du coefficient de la pente.

En relation directe avec la formation et l'augmentation des débits de cours d'eau sont pointés du doigt les facteurs aggravants. En effet, les préoccupations actuelles des spécialistes résultent de l'accroissement des risques.

Il est notamment indéniable que la présence de l'homme constitue l'un des principaux facteurs aggravants dans ce processus de formation. D'une part, sa présence constitue le risque en exposant des personnes et des biens et d'autre part, elle aggrave l'aléa en modifiant les conditions d'écoulement de l'eau.

## 1.9 FACTEURS AGGRAVANTS LE PHENOMENE D'INONDATION

- *Sur les bassins versants et dans les zones de stockage* : déboisement, modification des écoulements agricoles, suppression des haies, imperméabilisation des sols (routes, parkings...): tout ce qui empêche le laminage de la crue ou la pénétration des eaux dans le sol.
- *Dans les zones d'écoulement* : constructions, obstacles à la circulation des eaux... : tout ce qui contrarie l'écoulement (DGPC, 2007).
- *L'urbanisation et l'implantation d'activités dans les zones inondables* : L'urbanisation récente s'est faite en grande partie dans des secteurs attractifs, souvent sans tenir compte de leur vulnérabilité. En parallèle, l'augmentation du niveau de vie, le développement des réseaux d'infrastructures ont accru dans des proportions notables la valeur globale des biens et la fragilité des activités exposées (Cas : occupation du lit moyen et lit majeur au niveau la route d'Oran et juste a coté de l'école Marceau).
- *La diminution des champs d'expansion des crues* : consécutive à l'urbanisation et aggravée par l'édification de digues ou remblais. La conséquence en est une réduction de l'effet naturel d'écêtement des crues bénéfique aux secteurs habités en aval des cours d'eau (DGPC, 2007).
- *L'aménagement parfois hasardeux des cours d'eau* : sans respecter leur fonctionnement global. Ainsi beaucoup de rivières ont été modifiées localement sans se soucier des conséquences en amont ou en aval. Ces aménagements peuvent avoir pour conséquences préjudiciables l'accélération de crues en aval et l'altération du milieu naturel.
- *La formation et la rupture d'embâcles* : les matériaux flottants transportés par le courant s'accumulent en amont des passages étroits. La rupture éventuelle de ces embâcles provoque une onde puissante et dangereuse en aval.
- *La défaillance des dispositifs de protection* : Le rôle des dispositifs de protection (digues, déversoirs) est limité. Leur utilisation peut parfois exposer davantage la plaine alluviale que si elle n'était pas protégée.
- *L'utilisation ou l'occupation des sols sur les pentes des bassins versants* : Le bassin versant constitue l'aire géographique d'alimentation du cours d'eau. Toute modification qui empêche le laminage de la crue ou la pénétration des eaux dans le sol favorise une augmentation du ruissellement, un écoulement plus rapide et une concentration des eaux pouvant ainsi contribuer à aggraver les crues. Le déboisement, la suppression des haies, l'imperméabilisation des sols (routes, parkings, ...) sont des facteurs qui contrarient le laminage de la crue et la pénétration de l'eau dans le sol.
- *Le transport et dépôt de produits indésirables* : entraînés par l'eau puis abandonnés et pouvant déclencher des accidents technologiques.

## 1.10 LES DEGATS CREES PAR LES INONDATIONS

Les inondations font beaucoup de dégâts qui entraînent de grandes pertes. Il existe principalement trois grandes catégories de dégâts que créent ces inondations :

- les dégâts matériels
- les dégâts humains
- la dégradation du paysage (catégorie moins importante).

## 1.11 STRATEGIES DE GESTION DES RISQUES D'INONDATIONS

Les stratégies de gestion des risques d'inondations correspondent aux actions qu'il faut mener pour contenir ou réduire le risque, ces actions sont (Zahour, 2010):

- la prévention : la connaissance et la sensibilisation aux risques ;
- la protection contre les risques ;
- la préparation ;
- la prévision, la surveillance et l'alerte ;
- l'intervention, le secourisme et la réhabilitation ;
- la Contribution des Organisations Non Gouvernementales et la collaboration internationale.

### **1.11.1 Prévention : Information, communication et sensibilisation aux risques**

#### **d'inondations**

Il s'agit d'informer le citoyen et les différentes communautés et groupements sociaux sur les causes du risque, ses conséquences et ses impacts à court et à moyen terme et enfin sur les moyens de lutte et les mesures de précaution à prendre pour se défendre contre les agressions de cette catastrophe. La sensibilisation des décideurs à la problématique des risques et leurs impacts sur l'environnement est une action à envisager notamment par les spécialistes de la communauté scientifique.

### **1.11.2 Préparation**

Il s'agit des dispositions à prendre pour maîtriser l'intervention. C'est le cas d'organisation périodiques des exercices de simulation des opérations d'intervention.

### **1.11.3 Protection contre les risques**

Il s'agit d'un ensemble d'activités et des mesures visant à assurer un certain niveau de protection des vies, et des biens individuels ou collectifs.

La protection contre les risques d'inondations exige, un ensemble de mesures et de solutions techniques, entre autres :

- la cartographie des zones à hauts risques et l'identification des zones sensibles et en tenir compte dans les plans d'aménagement urbain (zones potentielles de débordements des eaux de ruissellement sur les voies publiques...). En effet, la géométrie urbaine doit être mieux conçue pour faciliter l'écoulement des eaux ;
- le renforcement de cadre juridique et institutionnel.
- la création de bassins réservoirs, des barrages et des digues pour limiter les débits liquides et capter les débits solides en amont des agglomérations ;
- La lutte contre l'imperméabilité des bassins versants. Cette imperméabilité a pour effet d'accroître les écoulements des eaux et par conséquent d'augmenter les débits reçus en aval. En villes, la création d'espaces verts sont de nature à augmenter l'infiltration des eaux, et à l'opposé, ils réduisent les débits de ruissellements ;
- l'organisation régulière des compagnes de curage et d'entretien des réseaux d'évacuation en milieu urbain.

### **1.11.4 Prévision, surveillance et alerte du risque**

**La prévision** est la connaissance anticipée de la date et du lieu de la catastrophe. Pour réduire le risque, il faut la mise en place de système de prévision de surveillance et d'alerte. Les systèmes d'alerte actuels reposent sur des instruments de mesure sophistiqués et sur des moyens de communication modernes.

**La surveillance** est la continuité de l'observation dans l'espace et dans le temps. Les moyens de surveillance sont variés :

- les réseaux sol (postes d'observation et d'alerte tenus par des opérateurs humains et déclenchés par divers moyens de télécommunications).
- les radars et satellites : Ce sont des systèmes assurant l'observation de surfaces très étendues. Le cercle d'acquisition du radar est de l'ordre de 100ème de Km. Alors que celui du satellite dépasse le millier de Km. Les satellites, par exemple, apportent des informations et des indications essentielles pour la prévision météorologique. C'est le cas des prévisions météorologiques qui représente un bon exemple de système de prévision et d'alerte anticipée des risques d'inondations.

### **1.11.5 Intervention, secourisme et réhabilitation**

D'une façon générale, la stratégie opérationnelle de secourisme, d'urgence et de réhabilitation comprend :

- La création d'une cellule de gestion de crise spécifique en cas de désastre pilotée par les hautes autorités compétentes et qui comprend tous les services concernés ;
- la définition du rôle et des responsabilités de chaque intervenant pendant la crise ;
- La création de procédures d'urgence et de secours immédiats (corps médical, sauveteurs spécialistes comme les sapeurs pompiers pour évacuer les blessés graves et les populations menacées et aider à la survie (fournitures de couvertures, eau, logement même précaire...)) ;
- La constitution d'un "fond d'urgence catastrophe" pour répondre aux besoins de la population ;
- en fin lors de la réhabilitation, il faut évaluer les coûts induits par la catastrophe, et mettre en place un système d'assurance pour couvrir les indemnisations des sinistrés.

### **1.11.6 Implication des organisations non gouvernementales et collaboration**

#### **internationale**

L'implication de la composante sociale (associations) peut être particulièrement efficace en matière de réduction de l'impact de la catastrophe.

## **2. PROBLEMATIQUE D'INONDATION EN ALGERIE**

Plusieurs régions sont soumises aux inondations se manifestant de façon catastrophique et constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social. D'après le recensement effectué par les services de la protection civile, une commune sur trois (485 communes) est susceptible d'être inondée en partie ou en totalité. Ces inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus destructrices, provoquant d'importants dégâts humains et matériels (DGPC, 2007).

L'inventaire des inondations à travers le pays sur la période 1969-2008 révèle l'existence de régions soumises à ce risque et que ces événements spatio-temporelles sont imprévisibles.

Aussi, il ressort que des grandes inondations engendrées par des pluies exceptionnelles généralisées sur de grands bassins versants et pouvant toucher plusieurs régions atteignant parfois l'ampleur d'une catastrophe nationale telle que : les inondations de l'automne 1968 en Algérie et en Tunisie, celles de Mars 1973 affectant l'EST du pays, les inondations de 1974 des bassins versants de l'algérois et du Sebaou, celle de 1984 touchant tout l'EST du pays et les inondations par ruissellement urbain provoquées par des orages localisés d'automne et d'été affectant surtout les agglomérations et les villes (cas des inondations du 10 novembre 2001 qui furent les plus meurtrières de l'histoire des inondations en Algérie) et celle de Ghardaïa en 2008 (DGPC, 2007).

## 2.1 DONNEES HYDROLOGIQUES

L'Algérie septentrionale présente un climat semi-aride qui se caractérise par une forte irrégularité pluviométrique. D'une manière générale, les bassins versants sont imperméables (Kadi, 1997). Ce qui donne sur le plan des régimes hydrologiques:

- une extrême irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements qui est accentuée par de longues périodes de sécheresse;
- des crues violentes et rapides;
- une érosion intense et des transports solides importants.

## 2.2 LE CLIMAT EN ALGERIE

Le climat algérien est un climat de transition, il varie du type méditerranéen et semi-aride dans le Nord et au type désertique dans le Sahara (Kadi, 1997).

- Pluviométrie : Le climat intervient par sa composante hydrique (pluviométrie), qui régit fortement le régime des eaux souterraines et superficielles. Du fait de son appartenance géographique aux zones aride et semi-aride, l'Algérie du Nord est soumise à des conditions hydro climatiques défavorables, caractérisées par :

- Des précipitations irrégulières, avec des variations interannuelles importantes
- Des sols imperméables et à faible couverture végétale, favorisant le ruissellement et l'érosion
- Des régimes hydrologiques dominés par :
  - une forte irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements,
  - la violence des crues,
  - l'importance de l'érosion et des transports solides, entraînent l'envasement des infrastructures hydrauliques, agricoles, portuaires,.....etc.

La hauteur des précipitations passe de quelques mm dans le domaine côtier du Nord-est, avec des écarts importants entre les régions Ouest et Est.

Le tableau I.2 illustre les disparités régionales de la pluviométrie.

Cette pluviométrie, très variable à travers le territoire, a imprimé les grands traits de la répartition régionale des ressources en eaux souterraines et superficielles et même des différentes zones à risque d'inondation.

**Tableau I.2** : Distribution régionale de la pluviométrie moyenne (mm)

Zones	Région Ouest	Région Centre	Région Est
Littoral	400	700	900
Atlas tellien	600	700-1000	800-1400
Hautes plaines	250	250	400
Atlas saharien	150	200	300-400
Sahara	20-150	20-150	20-150

Source : Merabet, 2008

### 2.3 CAUSES DES CRUES CATASTROPHIQUES EN ALGERIE

Les précipitations caractérisées, en Algérie, par une très forte irrégularité intra et interannuelle entraînent des étiages extrêmement sévères et inversement des fortes crues torrentielles engendrant des dégâts humains et matériels considérables (Merabet, 2008).

La genèse des fortes crues et leurs impacts sur l'environnement sont caractérisés par les différentes activités d'une région à une autre en fonction des conditions géographiques, climatiques et d'occupation des sols.

Les causes fondamentales de la majorité des inondations sont l'arrivée d'importantes chutes de pluie mais les inondations des terres basses ou les destructions causées par les crues ne sont pas cependant toutes dues à des phénomènes hydrométéorologiques.

D'une manière générale, les causes des inondations survenues en Algérie peuvent être classées en trois types:

- Les inondations liées à des situations météorologiques remarquables se traduisant par une forte pluviosité (pluies importantes, orages violents)
- Les inondations provoquées par des facteurs liés à l'effet de l'homme: la défaillance des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, le gonflement des oueds par les décombres et les détritiques, sont autant de facteurs qui provoquent des dégâts lors des averses saisonnières.

Les cas de la ville de Tiaret inondée presque à chaque hiver et la plaine du Mzab où des inondations se produisent tous les 02 à 03 ans illustrent parfaitement l'influence de ces facteurs dans l'apparition du phénomène d'inondation.

- Les inondations produites dans des régions présentant un environnement topographique défavorable comme le cas des villes traversées par des oueds (Bordj Bou Arréridj, Oued R'hiou, Sidi Bel Abbés) ou situées au pied d'une montagne (Ain Defla, Batna, Médéa).

Ces agglomérations à forte concentration de population et sous l'effet d'une urbanisation anarchique et non réglementée présentent de grands risques, des pertes humaines et des destructions de constructions sont enregistrées à chaque inondation aussi légère qu'elle soit.

Ces inondations selon les caractéristiques des crues, leurs durées et leurs étendues sont de deux types:

**Les inondations engendrées par des crues torrentielles** : appelées aussi: crues éclair et affectant les petits bassins versants de quelques dizaines de Km<sup>2</sup>. Elles sont le plus souvent liées à des chutes de pluies isolées et localement intenses issues de phénomènes de convection sous forme de tempêtes orageuses se produisant généralement en automne et été.



Les crues de ce type sont particulièrement dangereuses en raison de la soudaineté et de la rapidité avec lesquelles elles se produisent, les ruissellements extrêmement rapides et violents peuvent intervenir moins d'une heure après la pluie et les débits des oueds passent de quelques  $m^3/s$  à plusieurs milliers de  $m^3/s$  en 02 ou 03 heures seulement.

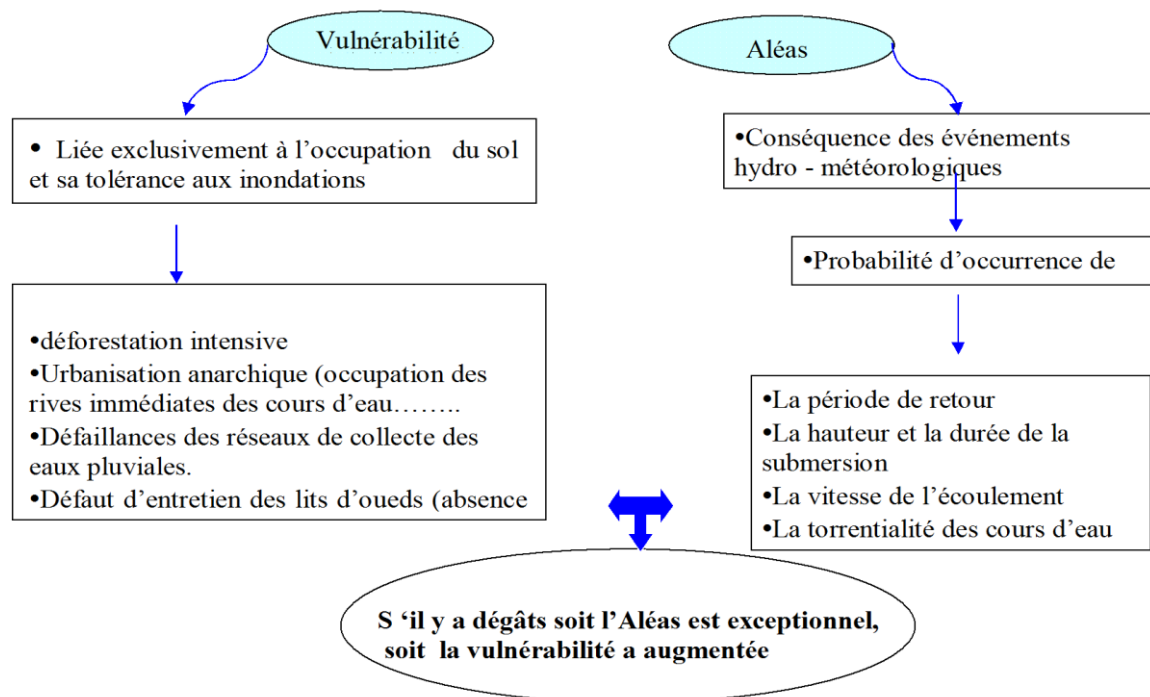
L'inondation de la ville de Oued R'hiou (le 20 octobre 1993) où 20 minutes de pluies ont fait: 23 morts, 20 blessés et plusieurs disparus est l'exemple parfait de ce type de crues, celle de Ghardaïa en 2008.

**Les inondations des grands bassins versants :** elles résultent le plus souvent des précipitations importantes généralisées sur des grandes étendues et caractérisées par leurs quantités et leur durée qui peut atteindre 10 à 15 jours.

Les crues sont massives, lentes et à évolution facilement prévisibles sauf lorsqu'elles sont brutalement aggravées par des affluents aval plus courts et plus rapides.

En Algérie, ce type d'inondation survient généralement en saison hivernale entre les mois de décembre et mai.

La figure I.8 représente une schématisation de la vulnérabilité et de l'aléa d'inondation en Algérie



**Figure I.8 :** Schématisation de la vulnérabilité et de l'aléa d'inondation en Algérie (Merabet, 2008)

## 2.4ANALYSE DES CAUSES DE DEGRADATION DES SOLS EN ALGERIE

Le sol qui est le support et le pourvoyeur des plantes en éléments fertilisants et en eau constitue un facteur vital dans tous les écosystèmes. Sa dégradation a un impact direct sur la production. L'inventaire et la cartographie des ressources en sols sont encore loin de couvrir tout le territoire national (Merabet, 2008).

En effet les études réalisées par l'A.N.R.H (agence nationale des ressources hydraulique) et d'autres organismes montrent que 7.864.032 ha ont été cartographiés à différentes échelles. La superficie des sols considérée apte à la mise en valeur hydro agricole (Tab.I.3) sur la base de leurs propriétés physico-chimiques, ainsi que différents facteurs naturel (géomorphologie, topographie, climat...) est de 2.226.313 ha (Merabet, 2008).

**Tableau I.3 : Ressources en sols inventoriées**

N°	Bassin versant	Superficie Total (ha)	Superficie Irrigable (ha)
1	Chelliff	684 ,156	261,589
2	Côtier Algérois	188 ,301	132,632
3	Côtier Constantinois	127,343	85,646
4	Côtier Oranais	94,590	44,929
5	Chott Hodna	1, 176,636	489,241
6	Chott Melrher	788,645	225,796
7	Plateaux Constantinois	227,981	137,389
8	Plateaux Oranais	534,634	55,615
9	Isser	67,733	37,275
10	Kebir Rhummel	27,799	17,516
11	Mecta	287,810	143,589
12	Medjerda	112,717	64,534
<b>13</b>	<b>Sahara</b>	<b>1, 060,789</b>	<b>136,755</b>
14	Seybousse	178,097	101,490
15	Soummam	543,326	228,732
16	Tafna	41,541	27,845
17	Zahrez	296,576	35,742
	Total de la superficie irrigable (ha)		2, 226,313

Source : ANRH, 2001

Des études pédologiques et géomorphologiques montrent que les sols algériens sont vulnérables à l'érosion causée par la synergie de divers facteurs (climat, relief) et humain (surexploitation des terres).

**2.4.1 L'érosion :** L'action de l'érosion induite par le manque de couverture végétale explique la non évolution de certains sols algériens et leur pauvreté en matière organique. Ce décapage crée continuellement des sols jeunes alluviaux, colluviaux ou des sols minéraux bruts. L'érosion hydrique est d'abord liée au climat méditerranéen régnant sur le pays et caractérisé, entre autres, par la violence et l'irrégularité interannuelle et inter-saisonnière du régime des pluies.

Le non-respect par l'homme des façons culturales adaptées aux milieux fragiles (labours en courbe de niveau, emploi d'outils à dents...), ses actions de déforestation, le surpâturage, accentuent et accélèrent le processus érosif et le transport solide par le phénomène d'inondation.

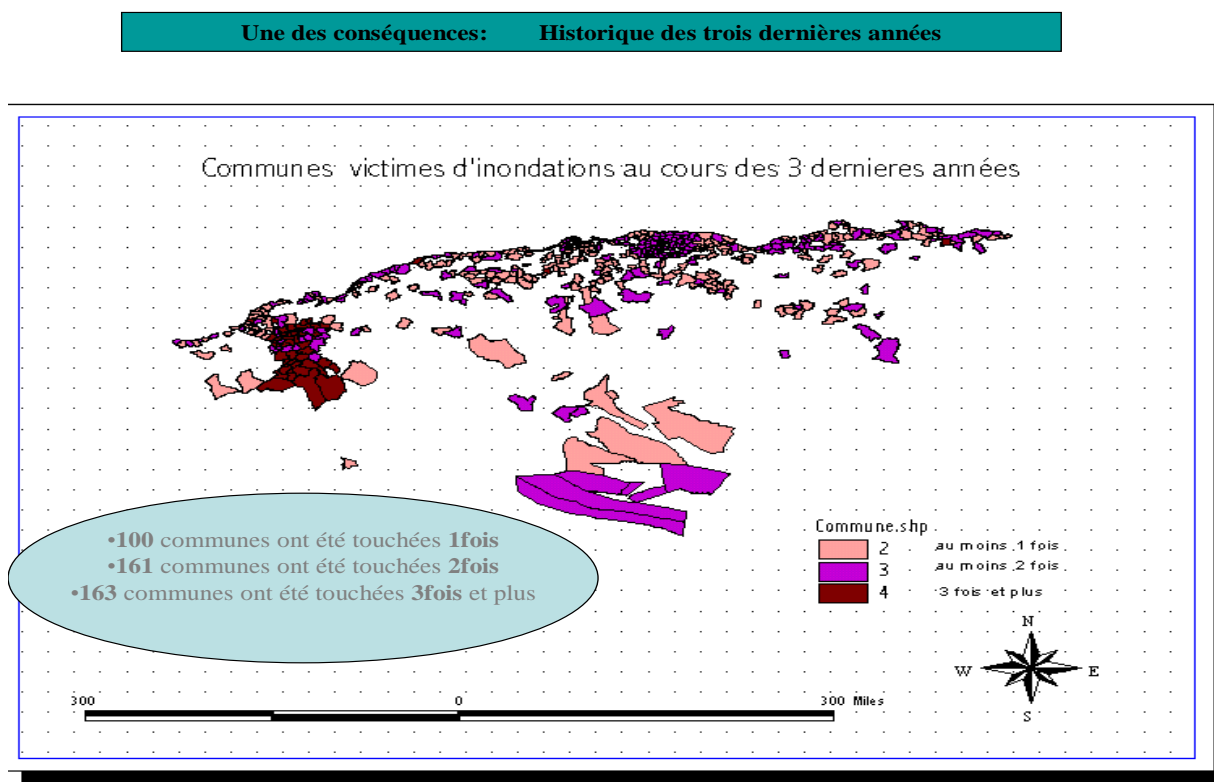
A ce paramètre topographique s'ajoute la nature du substratum géologique tellien essentiellement formé de roches tendres et friables facilement érodables.

Plus de 12 millions d'ha sont soumis à l'action de l'érosion hydrique (Merabet, 2008).

Le relief des bassins versants algérien se caractérise par des réseaux hydrographiques denses et mal entretenus engendrant des volumes écoulés mal répartis et en résultent des bassins versants érodés.

Le climat, la pente, la nature lithologique et le manque de couverture végétale expliquent, qu'annuellement près de 2000 T/km<sup>2</sup> de sédiments sont arrachés aux bassins versants de l'Atlas tellien et que 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetés annuellement à la mer. L'envasement des barrages est la conséquence de cette érosion. Il représente 11.2 % de la capacité initiale des 43 barrages recensés en Algérie. Trois barrages (Forum el Gherza, Biskra et El Guers) ont plus de 50 % de vases. Le taux d'envasement est supérieur à 50 % en zones arides et 30-40 % en zones telliennes (Merabet, 2008).

La figure I.9 représente les communes victimes d'inondation en cours des 3 dernières années.



**Figure I.9 :** Communes victimes d'inondation en cours des 3 dernières années (Merabet, 2008)

## 2.5 TYPES D'INONDATIONS CATASTROPHIQUES EN ALGERIE

Les inondations en Algérie sont classées en fonction de plusieurs paramètres (Merabet, 2008 et DGPC, 2007) :

\* Celles qui sont liées à des **situations météorologiques remarquables** se traduisant par une forte pluviosité (pluies importante, orages violents) telles que :

- les inondations de décembre 1957 et mars 1974 sur les bassins de l'Algérois
- Les inondations catastrophiques de mars 73 sur tout l'Est Algérien.
- les inondations de l'automne 1969 en Algérie et en Tunisie.
- Les inondations de décembre 1984 sur tout l'Est Algérien.

\* Celles liées à l'activité **humaine** (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 de la plaine du M'Zab etc.....

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

- les villes traversées par des oueds (Bordj Bou Areredj , Oued Rhiou, Sidi Bel abbés)
- 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.

\* **Inondations selon le type de crue (selon sa durée, son étendue et ses caractéristiques)**

-Inondations engendrées par des **crues torrentielles** (crues éclairs), 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 un temps record de quelques m<sup>3</sup>/s à plusieurs milliers de m<sup>3</sup>/s (2 à 3h seulement).**

-Inondation de la ville de Oued Rhiou le 20 octobre 1993 ou en 20 minutes **on a enregistré** : 23 morts, 20 blessés et plusieurs disparus en plus des dégâts matériels importants.

-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.

- inondation du 28 au 31 mars 1974 dans les wilayas d'Alger et Tizi Ouzou (688 mm en 4 jours) ou on a enregistré à tizi ouzou (52 morts, 4 570 maisons détruites ,130 villages isolés, 18 000 sinistrés et des dégâts matériels estimés à 27 Millions de DA).
- les différents jaugeages de crues ont donné durant ces inondations :
  - A Belloua sur l' oued Sebaou (  $Q_{max} = 2980 \text{ m}^3/\text{s}$  ,  $V = 311 \text{ hm}^3$ )
  - A Baghlia sur l' oued Sebaou (  $Q_{max} = 3420 \text{ m}^3/\text{s}$  ,  $V = 476 \text{ hm}^3$ )
  - Lakhdaria sur l' oued isser (  $Q_{max} = 2580 \text{ m}^3/\text{s}$  ,  $V = 259 \text{ hm}^3$ )

La figure I.10 représente l'Ampleur des inondations en Algérie.

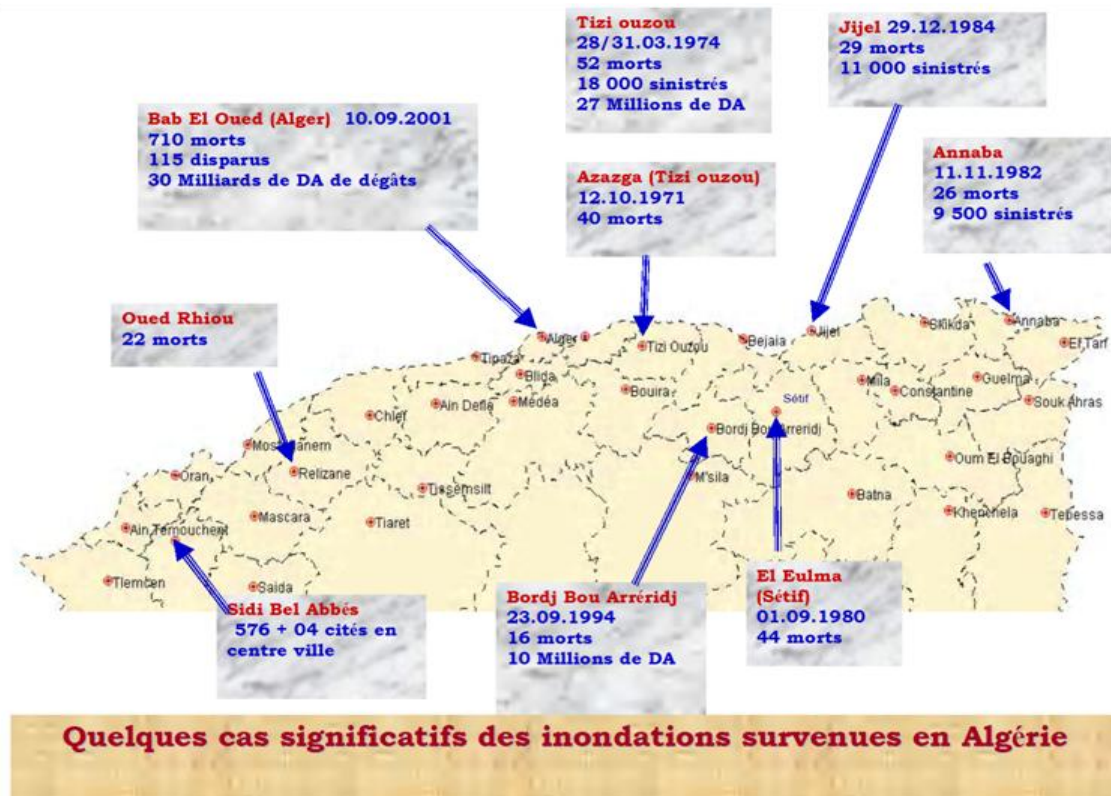


Figure I.10 : Ampleur d'inondation en Algérie

## Conclusion

L'inondation est un risque prévisible dans son intensité, mais il est difficile de connaître le moment où elle se manifesterá. Les paramètres concourant à la formation des crues sont nombreux, cependant l'un d'eux est déterminant : la pluie. La prévision des inondations consiste donc principalement en une observation continue des précipitations.

Face à l'accroissement du risque d'inondation, seule une action volontaire paraît appropriée, fondée sur le constat que la prise en compte des inondations dans l'aménagement et le développement du territoire ne peut se limiter à une approche trop locale, sectorielle et à court terme, mais elle suppose une politique globale de prévention des risques naturels. Une série de mesures a donc été définie en juillet 2003, qui a notamment conduit à l'institution de la **loi 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable**.

La prévention des risques inondation doit être considérée comme une affaire commune des représentants du territoire, de l'état, et de tous les acteurs locaux concernés (**Walis, Conseilles exécutifs, Chefs de Daïras et P.A.P.C**).

Il s'agit d'une stratégie locale de prévention du risque inondation. Cette stratégie est fondée sur les actions suivantes :

- La connaissance des risques
- La surveillance des phénomènes
- L'information de la population
- La prise en compte des risques dans l'aménagement

- Les travaux de prévention
- La préparation aux situations de crise
- Le retour d'expérience

L'analyse de l'état actuel de la gestion des risques d'inondation en Algérie montre des lacunes au niveau de la prise en compte de ces risques naturels dans les plans d'aménagement, au niveau de la cartographie des zones à haut risque et au niveau de la définition d'une stratégie globale de lutte contre les risques d'inondations.

Ce chapitre est une monographie du site considéré dans cette étude. Il vise la présentation du bassin versant et de la région du M'Zab ainsi que les différentes caractéristiques de cette région. Nous abordons dans ce chapitre le contexte climatique, hydrologique, morphologique et géologique de la zone d'étude et un historique des plus graves inondations de ces dernières décennies qui ont affecté particulièrement la région du M'Zab.

## 1. PRESENTATION DE LA WILAYA DE GHARDAÏA

La Wilaya de Ghardaïa est considérée comme l'une des plus importantes régions touristiques en Algérie et dans le monde (Medejerab, 2009). Elle se situe au centre de la partie Nord de Sahara, à 632 km au Sud d'Alger (Fig. II.1). Elle est issue du découpage administratif du territoire de 1984. L'ensemble de la nouvelle Wilaya dépendait de l'ancienne Wilaya de Laghouat. La Wilaya de Ghardaïa compte 13 communes et couvre une superficie totale de 86.560 km<sup>2</sup> (Tab II.1).

La Wilaya de Ghardaïa est limitée :

- Au Nord par la Wilaya de Laghouat ( 200 Km ) ;
- Au Nord Est par la Wilaya de Djelfa ( 300 Km ) ;
- A l'Est par la Wilaya de Ouargla ( 200 Km ) ;
- Au Sud par la Wilaya de Tamanrasset ( 1.470 Km ) ;
- Au Sud- Ouest par la Wilaya d'Adrar ( 400 Km ) ;
- A l'Ouest par la Wilaya d'El-Bayadh ( 350 Km ) .



Figure II.1 : Carte de situation de la Wilaya de Ghardaïa (Medejerab, 2009)

Le tableau II.1 montre que la zone urbanisée de la vallée du M'Zab (Commune de Ghardaïa) s'étend sur moins du millième de la surface de la wilaya de Ghardaïa mais concerne près du 45 % de sa population.

**Tableau II.1** : Superficies et population des communes de la Wilaya de Ghardaïa

Communes	Superficies (Km <sup>2</sup> )	Population
<b>Ghardaïa</b>	<b>300</b>	<b>104645</b>
El-Ménéa	27000	34667
Daya	2175	11055
Berriane	2250	29804
Metlili	7300	40569
Guerrara	2900	58058
El-Atteuf	750	15278
Zelfana	2220	8703
Sebseb	5640	2917
Bounoura	810	32832
Hassi-El-F'hel	6715	3225
Hassi-El-Gara	22000	16716
Mansoura	6500	2668
<b>Total</b>	<b>86560</b>	<b>361137</b>

Source : D.P.A.T, 2005

## 2. PRESENTATION DE LA REGION DU M'ZAB

C'est dans le creux de l'oued M'Zab, sur des pitons rocheux, que s'est érigée la pentapole ou les cinq cités de la région du M'ZAB: Ghardaïa (Taghardayt en berbère), Mélika (At-Mlishet) Bounoura (At-Bunur), al-Atteuf (Tadjnint) et Beni-Isguen (At-Isdjen ou At-Isguen). Chacune de ces cinq cités est entourée par des collines ravinées par l'érosion pluviale. Deux autres cités, Berriane (At-Ibergane) et Guerrara (Iguerraren) font partie aussi de la région, mais qui se situent en dehors de la vallée ; la première à 45 km au nord, la seconde à 110 km au nord-est.

### 2.1 Présentation des cinq cités de la région du M'ZAB

#### *\*Ghardaïa*

Fondée en 1048 sur la rive droite de l'Oued M'ZAB et en amont des quatre autres centres de la Pentapole par deux frères SLIMANE et MOHAMMED ben Yahia, cette ville devint rapidement la capitale commerciale du M'ZAB. Les habitants se répartissent en arabes dits " Agrégés ", tous sédentaires, et Medabih originaires du Djebel Amour qui sont sédentaires ou semi-nomades.

La Mosquée et son minaret en forme de tronc de pyramide très allongé, domine toute la cité. Celle-ci, située sur les flancs d'une éminence conique au milieu de l'oued M'Zab, développe l'étagement de ses maisons en un panorama qui ne manque ni d'originalité, ni de grandeur. La palmeraie de Ghardaïa, située à deux kilomètres en amont de la ville, est de beaucoup la plus florissante de la Pentapole, avec quelque 60.000 palmiers.



**\*Bou-Noura**

Fondée en 1046 par une fraction des Béni-Mthar d'OUARGLA encouragée par le succès de la jeune ville d'ELATTEUF. Vers 1750, une fraction de MELIKA expulsée, les Oulad Abdallah, fut accueillie à BOU-NOURA par les Béni-Mathar qui, après les avoir laissé construire des maisons, les chassèrent à leur tour. Ils se réfugièrent à EL- ATTEUF. Mais les autres ksours vinrent attaquer BOU-NOURA et la détruisirent de fond en comble. Le ksar qui existe aujourd'hui fut rebâti au-dessous du premier par les survivants des, Oulad Abdallah.

Son oasis, limitée à quelques milliers de palmiers, est d'une importance tout à fait négligeable. BOU-NOURA est, comme les autres ksours de la Pentapole, dans la dépendance économique de Ghardaïa dont elle n'est distante que de 3 kilomètres.

**\*Beni-Isguen**

Fondée en 1347 au confluent de l'oued N'TISSA et de l'oued M'ZAB, elle fut d'abord qu'un petit village grossi au XVI<sup>e</sup> siècle d'éléments émigrés de Ghardaïa. C'est aujourd'hui, après Ghardaïa, la ville la plus importante de Pentapole avec Ville sainte du M' ZAB, foyer intellectuel de l'Ibadisme, BENI-ISGUEN occupe une position toute particulière dans sentimentalité mozabite. Sa rigoureuse propreté, la belle ordonnance de ses rues et ses maisons, ses remparts intacts attirent l'attention. C'est une ville antique prolongée jusqu'aux 200 siècles et toujours jalousement préservée des contacts étrangers. La palmeraie s'étend le long de l'oued N'TISSA sur 3 kilomètres. Elle compte quelque 25.000 palmiers.

**\*EI-Atteuf**

La plus ancienne ville du M'ZAB fondée en 1012 de l'ère chrétienne par une fraction d'ibadites venus de l'oued Dya. Située à l'extrémité aval de la Pentapole et détachée par rapport aux autres ksours, EL-ATTEUF est aujourd'hui une cité peu florissante en raison de sa situation géographique. Les 15.000 palmiers de l'oasis sont dispersés le long de l'oued M' ZAB.

**\*Melika**

Petite cité guerrière qui domine la vallée de l'oued M' ZAB. Elle fit alliance avec les Chaamba Berezga de METLILI, qu'elle conquiert à l'influence mozabite après avoir procédé à un échange de population. Sa palmeraie est à peu près inexistante, mais les habitants de MELIKA possèdent à METLILI de très nombreux jardins. Sa population, forte, comprend une fraction arabe originaire de METLILI.

**2.2 Industrie dans la région du M' ZAB**

Au lendemain de l'indépendance, le secteur industriel était pratiquement inexistant au niveau de la région du M' ZAB .la zone industrielle Bou-Noura à été créée en 1970.

**2.3 Tourisme dans la région du M' ZAB**

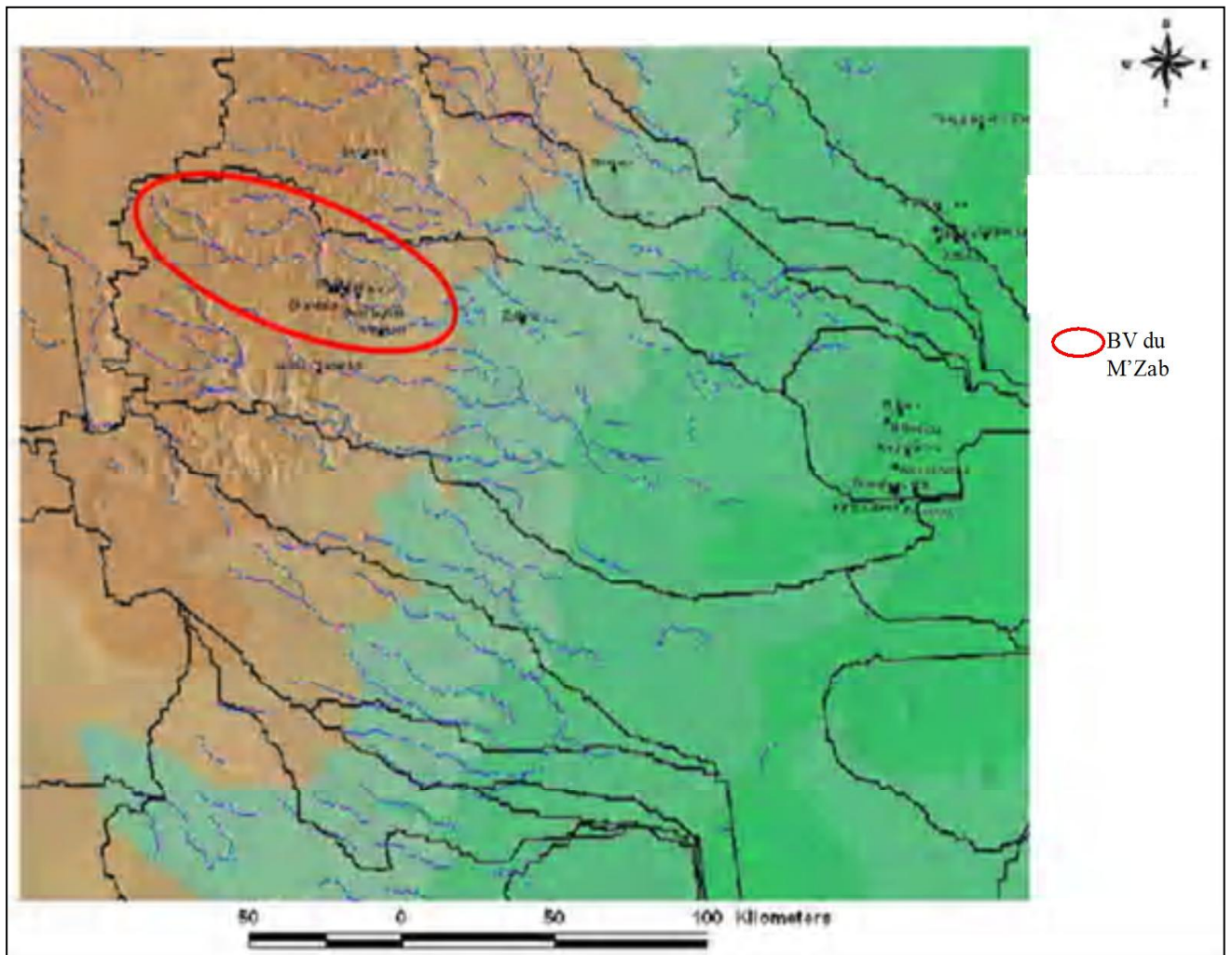
La région comme tout le sud algérien recel des paysages d'une grande importance touristique. Ainsi, l'architecture, le mode de vie de la population, la palmeraie et le système hydraulique traditionnel constituent un atout considérable pour la région.

### 3. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DU M'ZAB

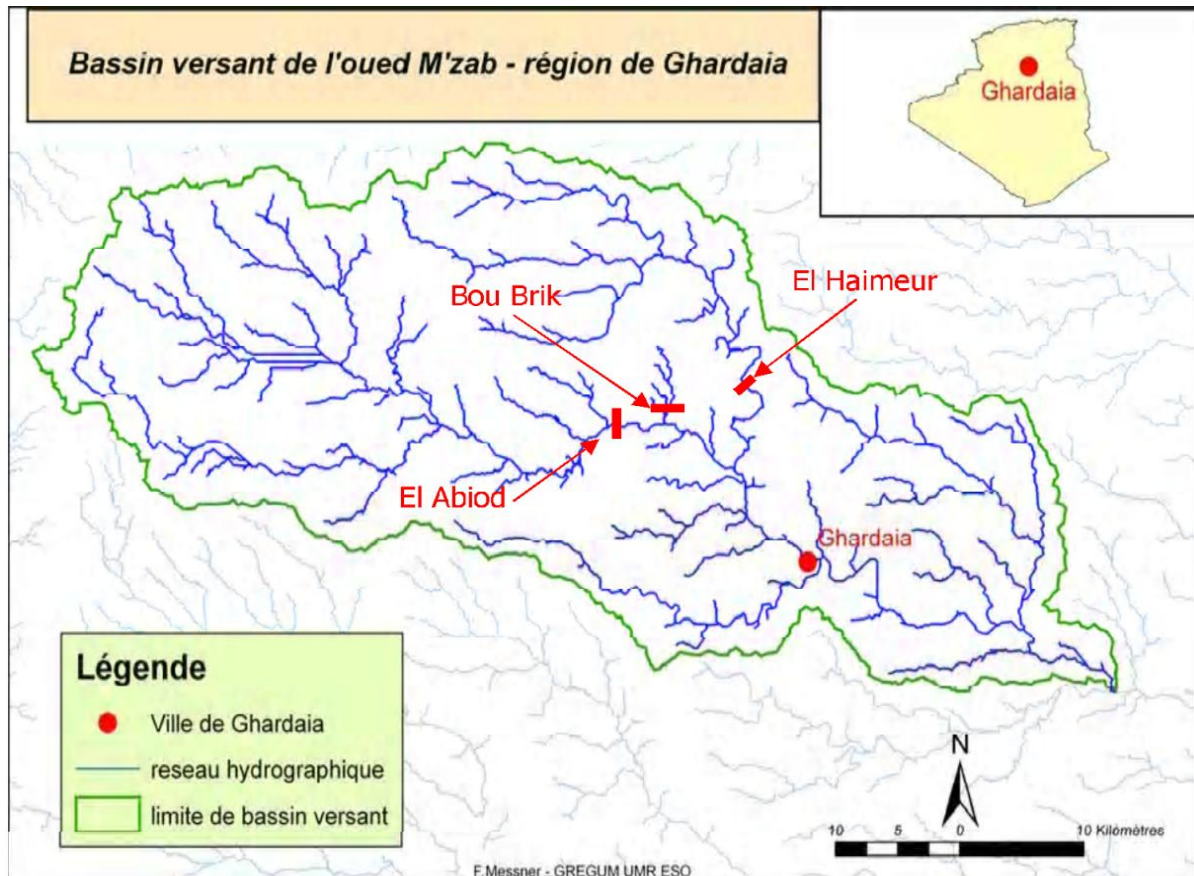
L'Algérie comporte du nord au sud cinq agences de bassins : « Oranie - Chott chergui », « Cheliff – Zahrez », « Algérois – Houdna - Soumam », « Constantinois – Seybouse - Melegue » et « Sahara ».

La wilaya de Ghardaïa se trouve dans le bassin «Sahara», qui représente la partie sud du pays.

Le bassin versant du M'Zab (Fig. II.2 et II.3) s'étale sur une superficie de 1573 km<sup>2</sup> dont la totalité de cette surface se trouve dans la Wilaya de Ghardaïa. Cette surface est drainée par plusieurs Oueds .Le cours d'eau principal, appelé l'Oued El Abiodh, est d'une longueur de 54 km. L'altitude maximale est à 779 m et l'altitude minimale est à 445m.



**Figure II.2 :** Carte des grands bassins versants de la région de Ghardaïa



**Figure II.3 :** Bassin versant de l'Oued M'Zab

## 4. VALLEE DU M'ZAB

### 4.1 Description générale de la vallée du M'Zab

L'oued M'Zab prend naissance au Nord-Ouest de Ghardaïa, au point où se rejoignent trois oueds en provenance du secteur Ouest / Nord-Ouest; les oueds El Abiod et Lahdhira sont les plus importants, l'oued Argdeine est plus local.

A partir de Ghardaïa, l'oued M'Zab prend la direction générale Ouest - Est sur 160 km et va se perdre dans la Sebket Safroun, à la côte 110, à 30 km au Nord de Ouargla.

A l'amont, les importants oueds Lahdhira et El Abiod n'en forment plus qu'un qui est rejoint, moins de deux kilomètres plus bas, en rive droite, par l'oued Argdeine plus modeste et par le chaabet Inireze en rive gauche. C'est ce point l'origine de l'oued M'Zab. Deux kilomètres en aval, l'oued Touzouz, long de 6 km environ, rejoint l'oued principal en rive droite.

Le confluent des oueds M'Zab et Touzouz marque le début de la palmeraie de Ghardaïa.

La semi-plaine qui suit la palmeraie est totalement urbanisée de façon dense sur une largeur de l'ordre du kilomètre. Vient alors, en rive droite, Ghardaia ksar, la vieille ville sur sa colline.

La vallée se resserre ensuite avec, la digue de Melika qui barre l'oued, Melika ksar en rive gauche et Béni Isguen précédée de ses quartiers urbains neufs en rive droite. La palmeraie de Béni Isguen se situe sur l'oued N'Tissa, affluent de rive droite de l'oued M'Zab et barré de deux digues traditionnelles.

Presque en face du confluent, se trouve Bounoura ksar avec ses quartiers neufs en contrebas et sa modeste palmeraie.

Les dix kilomètres qui suivent sont occupés par la palmeraie d'El Atteuf tout en longueur, parsemée d'habitations sur les deux rives. El Atteuf ksar se présente à mi-parcours de sa palmeraie.

Tout à l'aval, la digue historique d'El Atteuf est suivie d'une vaste zone humide où stagnent les eaux de l'oued qui, en période sèche, sont constituées avant tout par les rejets de l'amont.

La zone habitée le long de l'oued revêt ainsi l'aspect d'une longue bande orientée Nord-Ouest Sud - Est. Elle est traversée en son centre par la route nationale N°1 qui vient du Nord, traverse l'oued au pont de Bounoura et se poursuit en s'infléchissant vers le Sud-Est. A environ 20 km, au Sud, un embranchement sur la RN 1 conduit à l'aérodrome tout proche de Ghardaïa-Noumerat. C'est le long des dix premiers kilomètres de ce tronçon de la route que se situe la zone industrielle principale de Ghardaïa.

La zone de l'étude se trouve au cœur de la Chebka, région à dominance calcaire.

#### 4.2 Importance de la vallée dans la wilaya

La vallée de M'Zab regroupe 3 daïrates et 4 communes, à savoir :

- La daïra de Ghardaïa                      commune de Ghardaïa (avec Béni Isguen et Melika)
- la daïra de Bounoura                      communes de Bounoura et d'El Atteuf
- la daïra de Daya                              commune de Daya.

La vallée du M'Zab est, de loin, la plus importante des zones habitées de la wilaya comme le montrent les éléments qui suivent.

-Ghardaïa est le chef-lieu de la wilaya;

-45 % de la population y est concentré;

-l'**agglomération** de Ghardaïa qui comprend celles des communes de Ghardaïa, Bounoura et El Atteuf est 2,5 fois plus peuplée que Guerrara qui la suit dans le classement des agglomérations par ordre d'importance;

-En 1983, 48 % de l'emploi de la wilaya était fourni par la vallée du M'Zab;

-65 % des entreprises de la wilaya se concentre dans la vallée du M'Zab.

### 5. ASPECTS CLIMATIQUES

Le bassin versant de l'oued M'ZAB se situe dans le domaine climatique désertique Hyper aride et son climat est de type saharien caractérisé par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver. Son climat est également caractérisé par la sécheresse de l'air.

### 5.1 Indice annuel d'aridité de E. DEMARTONNE

Cet indice définit l'aridité « I » de la région par le régime pluviométrique et thermique. Il est obtenu en appliquant la relation II.1 (Merabet, 2008):

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

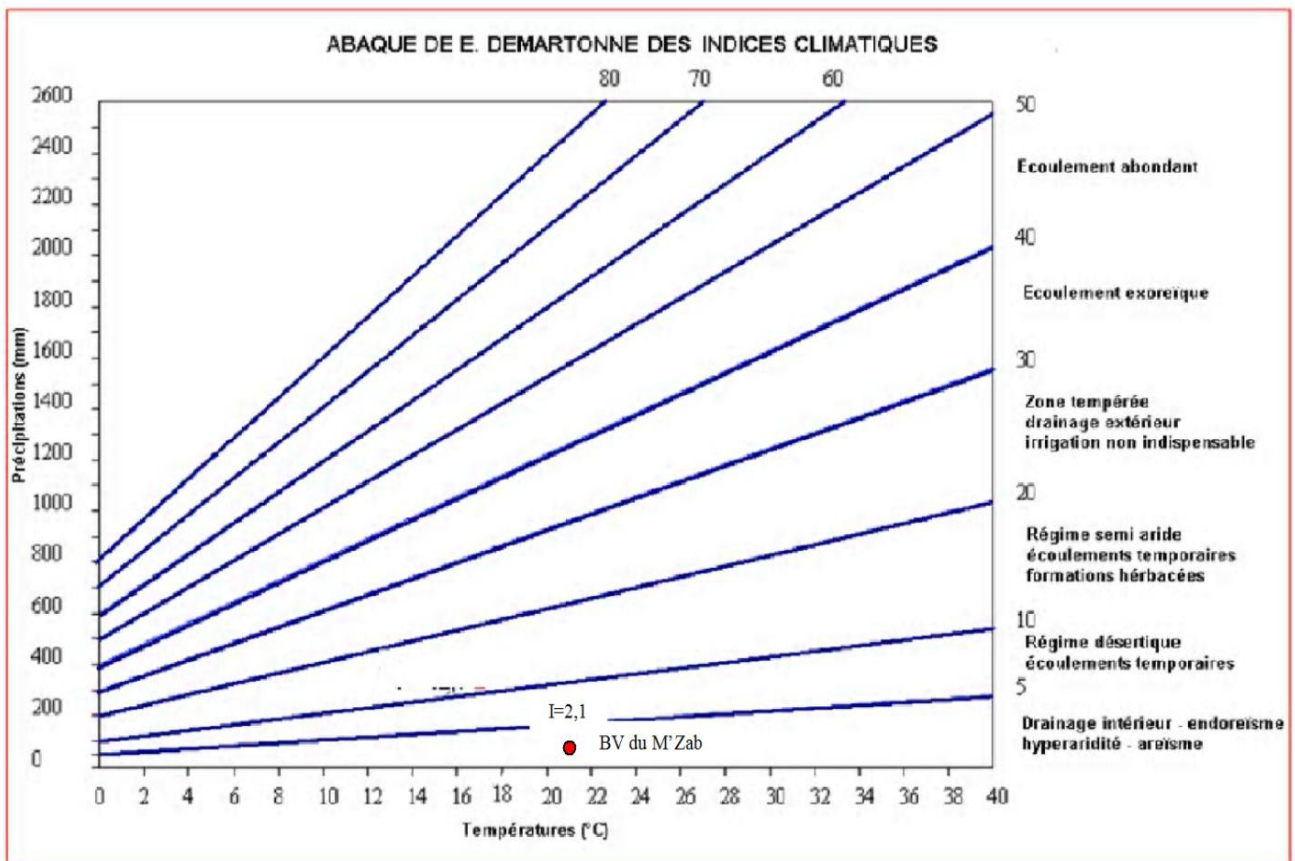
$P$  : Précipitations moyennes annuelles = 65 mm (Bousdira, 2007) ;

$T$  : Températures moyennes annuelles = 21°C (Bousdira, 2007).

Le classement suivant a été réalisé Selon la valeur de « I » (Merabet, 2008) :

- 20 < I < 30: Climat Tempéré
- 10 < I < 20: Climat Semi Aride
- 7.5 < I < 10: Climat Steppique
- 5 < I < 7.5 : Climat Désertique
- I < 5 : Climat Hyperaride

L'indice d'aridité est de 2,10, cette valeur a été ensuite reportée sur l'abaque de E. Demartonne qui a permis de classer le climat du bassin versant du M'Zab dans la région « Hyperaride » (Fig. II.4).



**Figure II.4 :** Abaque de E.DEMARTONNE des indices climatiques (Merabet, 2008)

### 5.2 Précipitations

Les précipitations sont très faibles et irrégulières. elles varient entre 13 et 68 mm sur une durée moyenne de quinze ( 15 ) jours par an. Les pluies sont en général torrentielles et durent peu de temps sauf cas exceptionnels. La pluviométrie observée sur une période de 111 ans est très faible. La moyenne annuelle est de 65 mm. Le tableau II.2 résume les précipitations de la région de Ghardaïa relevées sur une période de 111 ans.

**Tableau II.2 :** Précipitations de la région de Ghardaïa relevées sur une période de 111 ans

MOIS	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Tot
Précipitations Moyennes (mm)	4	6	9	9	10	5	8	5	4	3	1	1	65

Source :Bousdira, 2007

### 5.3 Températures

La température est marquée par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver (Bousdira, 2007). La période chaude commence au mois de Mai et dure jusqu'au mois de Septembre. La température moyenne enregistrée au mois de Juillet est de 36,3 °C, le maxima absolu de cette période a atteint 47 °C. Pour la période hivernale, la température moyenne enregistrée au mois de Janvier ne dépasse pas 9,2 °C, le minima absolu de cette période a atteint -1°C.

Le tableau II.3 résume les températures de la région de Ghardaïa relevées sur une période de 111 ans

**Tableau II.3 :** Températures de la région de Ghardaïa relevées sur une période de 111 ans

MOIS	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Températures Moyennes (°C)	28	21	15	10	10	12	15	19	24	30	33	33

Source :Bousdira, 2007

### 5.4 Le vent

Pendant certaines périodes de l'année, en général en Mars et Avril, de véritables tempêtes de sable sont enregistrées. Des trompes de sable se déplacent avec violence atteignant plusieurs centaines de mètres de haut.

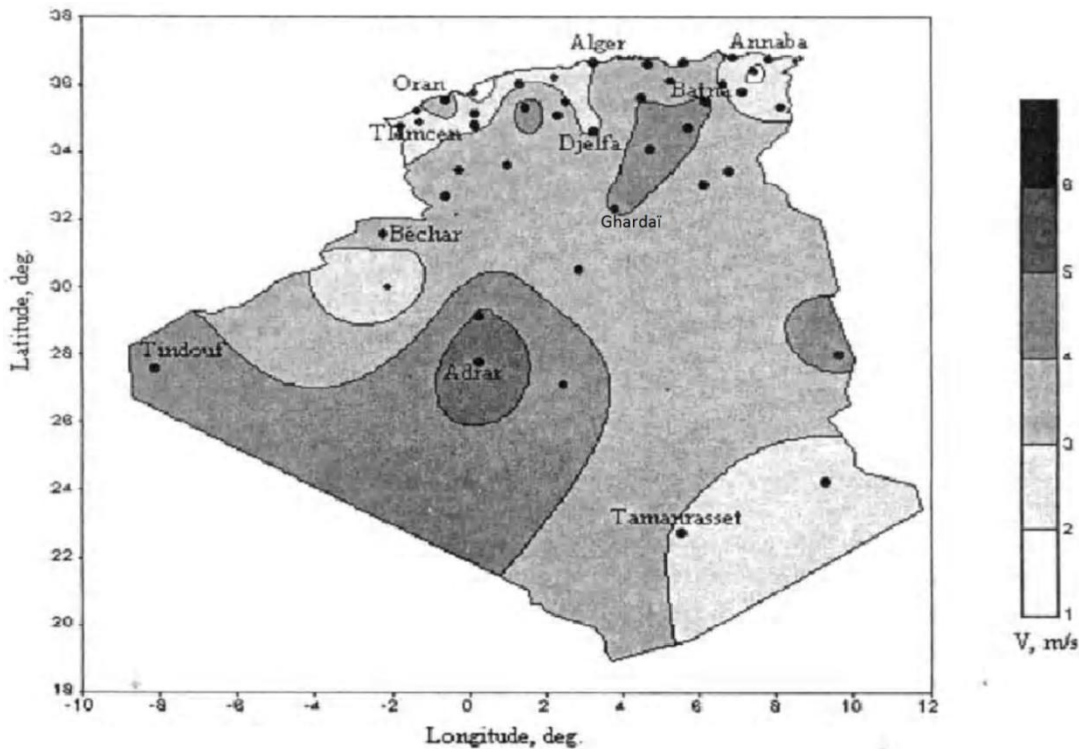
Ces phénomènes peuvent durer de un à trois jours et plus, avec cependant une accalmie durant la nuit. Des masses de sable peuvent être transportées à des distances considérables.

Les vents qui ne trouvent plus d'obstacles à leur progression sur les régions dénudées apportant la sécheresse. L'érosion éolienne prend la relève de l'érosion hydrique. Les vents dominants d'été sont forts et chauds tandis que ceux d'hiver sont froids et humides (Djennane, 1990).

Pour ce qui est du Sirocco, dans la région de M'ZAB, une moyenne annuelle de 11 jours est enregistrée pendant la période qui va du mois de Mai à Septembre (Djennane, 1990).

La mesure de la vitesse du vent est effectuée généralement à des hauteurs manométriques égales à 10 mètres du sol (Kasbadji, 1999).

En figure II.5, est présentée la carte des vitesses moyennes annuelles du vent estimées à une altitude de 10 mètres au-dessus du sol. On remarque que la région de Ghardaïa se trouve classée dans la gamme de vitesses allant de 4 à 5 m/s,



**Figure II.5 :** Tracé de la carte des vents à 10 mètres d'altitude (Kasbadji, 1999)

### 5.5 Evaporation et Evapotranspiration

L'évaporation et l'évapotranspiration potentielle sont très élevées et le déficit hydrique est permanent avec des écarts climatiques très importants entre les mois de décembre-janvier et juillet-août.

L'évaporation mesurée en bac Colorado peut atteindre annuellement 3500 mm.

L'évapotranspiration potentielle de référence, calculée selon la méthode de Penman-Monteith est de l'ordre de 2000 mm. Elle est maximale en juin, juillet et août, minimale en décembre et janvier (BRL BNEDER).

## 6. LA VEGETATION ET L'UTILISATION ACTUELLE DU MILIEU

### 6.1 Végétation

Dans la Chebka (ou al-Shabka), le paysage est désolant et la végétation spontanée, toujours très rare, ne se rencontre qu'en bordure des oueds. Les espèces qui reverdisent après chaque pluie sont des herbacées et des arbustes appartenant tous à la flore saharienne.

En dehors de la Chebka, la végétation est plus abondante. Mais, même dans ces régions moins défavorisées, l'arbre demeure une exception remarquable et la flore ne comporte pas d'espèces plus développées que le jujubier (Bonnard et Gardel, 1996)

## 6.2 Activités agricoles

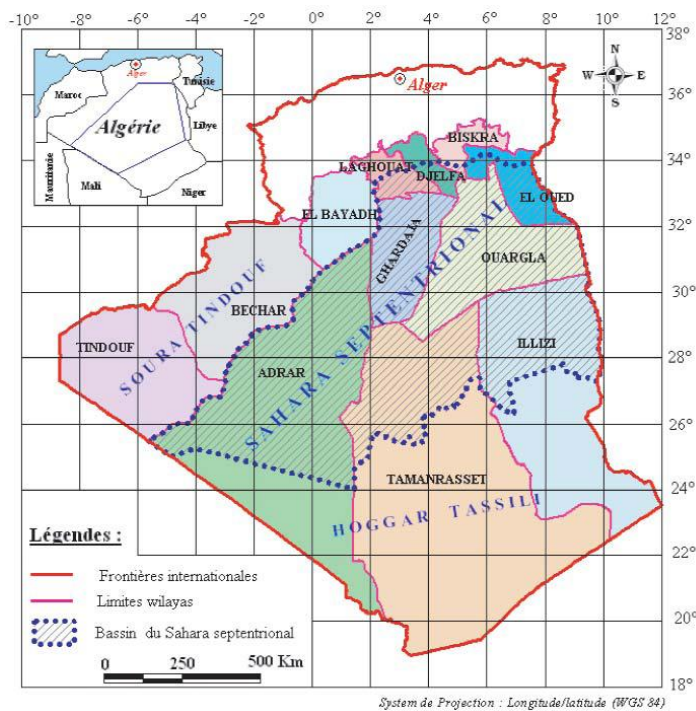
La région du M'ZAB est parmi les grandes régions agricoles au Sahara. La progression des surfaces cultivées a été considérable au cours de la dernière décennie. La phoeniciculture constitue la principale culture. Les cultures maraîchères principalement développées dans la région du M'Zab occupait près de 32.000 ha en 1995 (Bousdira, 2007).

## 7. LES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES

La région d'étude est située dans le Sahara septentrional central (Fig. II.6) où les ressources hydrauliques sont essentiellement souterraines. Dans le bassin versant du M'ZAB les eaux superficielles sont intimement liées à la pluviométrie et elles sont relativement importantes. L'oued M'ZAB est caractérisé par des écoulements intermittents (ABHS).

Les principales ressources d'eaux souterraines ont pour origine deux nappes principales :

- Nappe du continental intercalaire (C.I)
- Nappe du complexe terminal (C.T)



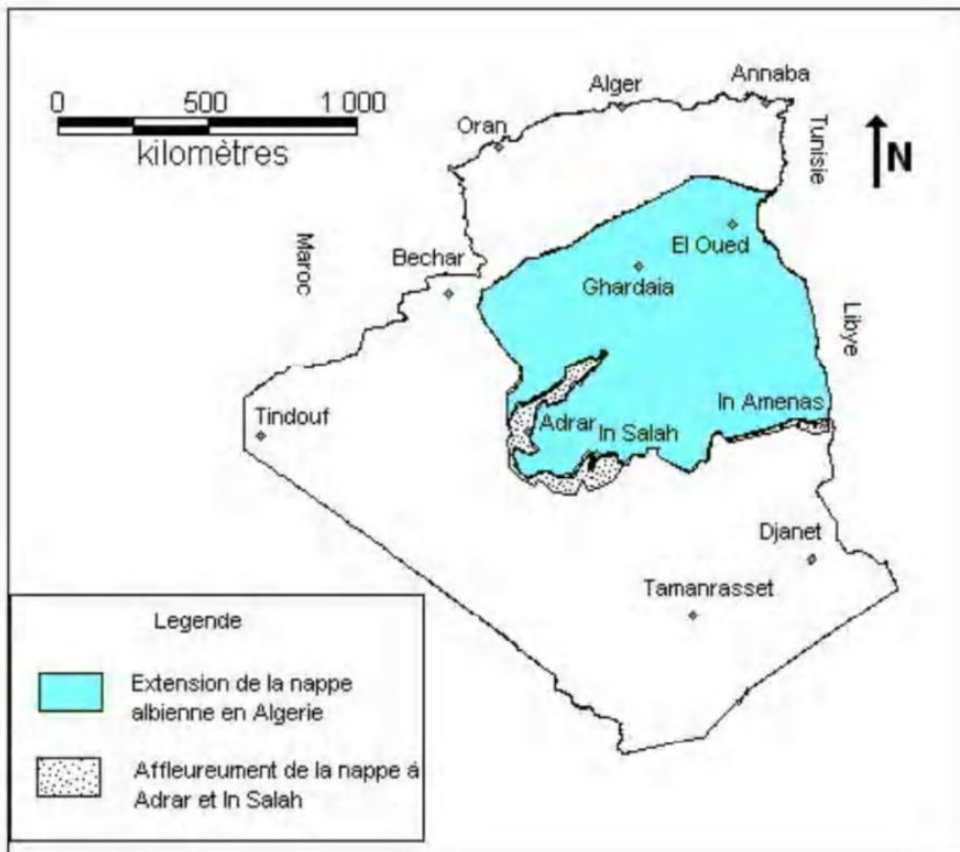
**Figure II.6 :** Carte de situation du Sahara septentrional (ABHS)

### 7.1 L'aquifère du Continental Intercalaire (nappe albienne)

Le Continental Intercalaire occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'albien. Ce réservoir a un volume considérable du à la fois à son extension sur tout le Sahara Septentrional (600.000 Km<sup>2</sup>) et à son épaisseur, qui peut atteindre 1000 mètres au Nord Ouest du Sahara (Fig. II.7).

Actuellement, l'alimentation en eau s'effectue dans la vallée du M'ZAB par des forages de profondeur variable de 350 à 500 mètres puisant l'eau fossile de la nappe albienne (continental intercalaire) dont les réserves sont estimées à 15.000 milliards de mètres cubes.





**Figure II.7 :** Extension géographique de la nappe albiennne en Algérie

### 7.2 L'aquifère du Complexe Terminal

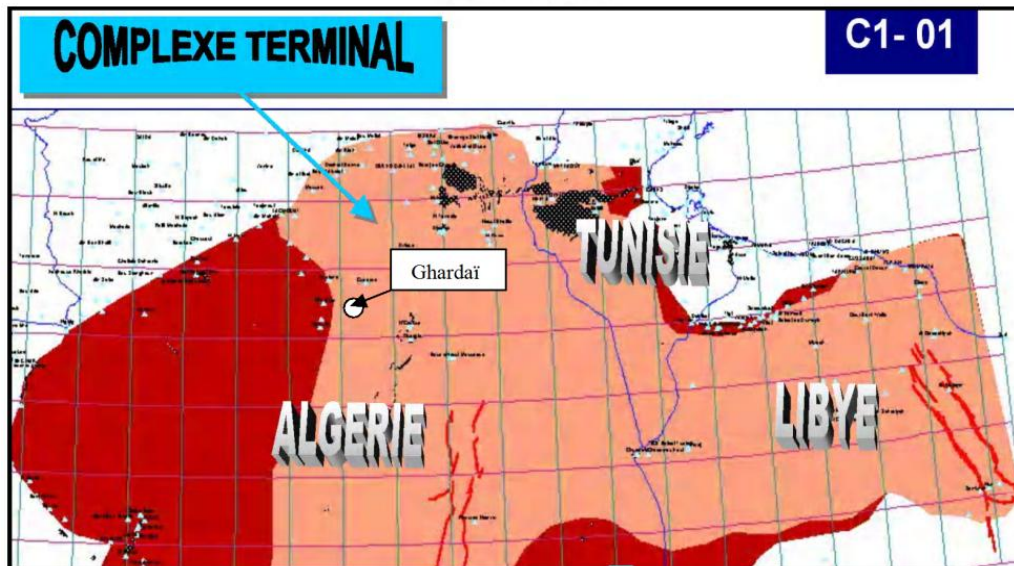
La nappe du Complexe Terminal (CT) se localise dans le Sahara occidental et s'étend sur une superficie de 350.000 Km<sup>2</sup> avec une profondeur oscillant entre 100 et 500 m (Fig. II.8).

Cette nappe regroupe deux systèmes aquifères, qui sont appelés nappe des sables et nappe des calcaires.

Les eaux de cet aquifère se caractérisent par une température peu élevée; l'eau est moins chargée en sels sur les bordures et relativement plus chargée au centre (plus de 3g/l).

Dans la région du M'ZAB, les nappes inféro- flux (nappes peu profondes) sont également exploitées pour les besoins de l'agriculture, de même pour les besoins de l'alimentation en eau potable. L'exploitation de l'eau s'opérait le creusement progressif de certains puits traditionnels atteignant la nappe phréatique.

Les inondations créées par les crues des Oueds alimentent les nappes inféro - flux et irriguent les palmeraies par des digues.



**Figure II.8 :** Extension géographique de L'aquifère du Complexe Terminal

## 8. LITHOLOGIE ET GEOMORPHOLOGIE

L'ensemble géomorphologique dans lequel s'inscrit cette région est un plateau rocheux dont l'altitude varie entre 300 et 800 mètres. Il s'agit d'un plateau créacé formé par les calcaires durs du Turonien. Le paysage est donc caractérisé par une vaste étendue pierreuse où affleure une roche nue de couleur brune et noirâtre. Ce plateau a été marqué par la forte érosion fluviale du début du Quaternaire qui a découpé dans sa partie sud des buttes à sommet plat et a façonné des vallées. Cet ensemble se nomme al-Shabka, "filet", à cause de l'enchevêtrement de ses vallées. L'oued M'Zab traverse ce filet de 38000 km<sup>2</sup> du nord-ouest vers le sud-est. Le lit des oueds, qui coulent que très rarement, est constitué de sables alluviaux et éoliens. La vallée du M'Zab atteint, à hauteur de Ghardaïa, une altitude de 500 mètres (Roche, 1973 et Ravereau).

## 9. APERCU SUR LES INONDATIONS DANS LA VALLEE DU M'ZAB

La région de Ghardaïa présente une vulnérabilité très élevée face aux risques d'inondations, surtout dans les secteurs où les constructions et les activités économiques se sont développées, tels que la palmeraie et le lit majeur de la vallée de l'Oued M'Zab. Le rôle de l'aléa météo-hydrologique dans la genèse de ces inondations a été aussi amplifié par l'activité humaine, notamment par une urbanisation anarchique, ainsi que l'élan du développement économiques dans la palmeraie et les zones inondables. Cette situation risque même de s'empirer avec le « changement climatique » (Medejerab, 2009).

Les crues peuvent être parfois considérables et peuvent submerger complètement tous les jardins, comme par exemple celles de décembre 1922 et d'octobre 1950. Les habitants ont été obligés de féconder leurs palmeraies ou récolter leurs dattes à l'aide de radeaux improvisés (Dubief, 1953).

## 9.1 Inventaire des crues

### *De 1848 à 1920*

Jean Dubief (1953) transmet une précieuse information sur les crues de l'oued M'Zab :

-Les tolbas de Ghardaïa auraient conservé depuis 1728 des informations sur ces crues.

Il ne nous a pas été possible d'obtenir des renseignements à ce sujet. D'après Matylinski (Bonnard et Gardel, 1996), il est rapporté qu'en 1264 de l'Hégire, soit autour de 1848 après JC, à la suite d'une longue période de « sécheresse » qui aurait duré sept ans, une crue formidable a causé des dégâts importants dans toute la vallée de l'oued M'Zab. Les habitants d'El Atteuf se sont réfugiés dans les mosquées. A Ben Isguen 300 maisons auraient été détruites.

-Les plus anciennes crues notées dans les archives françaises sont celles d'octobre 1884 et du 15 janvier 1886. De 1887 à 1900 il n'y a aucun document. Les observations sont à nouveau notées pour la crue catastrophique du 30 septembre 1901. Les Mozabites l'appelèrent "la rivière qui balaie tout" en raison de sa violence exceptionnelle. La hauteur d'eau atteignit 10 m avant la rupture du barrage. L'inondation dépassa 2 m de hauteur dans la palmeraie. Tous les barrages furent détériorés. L'oued coula à plein bord pendant deux jours et atteignit la Sebket Safioune.

-En 1902 et 1903, Charlet (Dubief, 1953) vit couler l'oued à trois reprises, notamment les 17 et 18 septembre 1903. Plus tard, les 18 et 19 février 1906, les oasis d'El Atteuf et de Beni-Isguen furent inondées par une crue. D'autres crues furent observées en avril et octobre 1909.

-Des crues furent ensuite observées les 7 et 8 février 1914, ainsi que le 20 juillet 1915. De l'été 1915 au printemps 1920, on rapporte une longue période de sécheresse, une crue intervenant enfin à cette dernière date.

-A partir de 1921, un listing des crues est recueilli par Dubief (1953) (Tab. II.4)

**Tableau II.4 :** Liste des crues de l'oued M'Zab

Dates des crues	Importance	Observations
<b>de 1921 à 1937</b>		
<b>1921 28 mai</b>	Importante	la palmeraie est inondée
<b>1922 décembre</b>	Importante	la palmeraie est inondée
<b>1923 23 mai</b>	Importante	Inondation des oasis de Ghardaïa, Melika, Bou Noura, El Atteuf. Atteint Zelfana à 64 km en aval de Ghardaïa, à 150 km de la source.
<b>1925 15-17 mars</b>	Importante	Dépasse Bou Noura après avoir rempli tous les barrages situés en amont
<b>1929 7 septembre</b>	Importante	-
<b>1931 29 mai</b>	Importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
<b>1932 8 novembre</b>	Importante	oasis arrosée.
<b>1933 3 novembre</b>	Très importante	-
<b>1935 23 avril</b>	Peu importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa

<b>de 1938 à 1951</b>		
<b>1938 18 avril</b>	Importante	Coule jusqu'à la ville de Ghardaïa
<b>1938 25 novembre</b>	Importante	Inondation totale des oasis de Ghardaïa, Beni Isguen, partielle de celle de Bou Noura (oued Zouil).
<b>1939 février</b>	Importante	Arrive jusqu'à El Atteuf
<b>1940 mars</b>	Légère	Crues des affluents des oueds El Abiodh et M'zab
<b>1941 mars</b>	Importante	Inondation de la palmeraie
<b>1941 avril</b>	Moyenne	Inondation de l'oasis
<b>1942 7 juin</b>	Moyenne	Crue des oueds secondaires
<b>1943 18 février</b>	Faible	Oued Adira au NW de Ghardaïa
<b>1943 mars</b>	Faible	Partie N de la palmeraie arrosée.
<b>1943 avril</b>	Faible	Inondation de l'oasis. Fortes crues des oueds secondaires
<b>1943 octobre</b>	Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa
<b>1943 décembre</b>	Peu importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa
<b>1944 février</b>	Peu importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
<b>1944 mars</b>	Peu importante	-
<b>1946 21 janvier</b>	Très importante	Inondation de toutes les oasis
<b>1946 24 avril</b>	Assez importante	Inondation de la partie nord de l'oasis de Ghardaïa
<b>1946 15 septembre</b>	Faible	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
<b>1947 6 avril</b>	Moyenne	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
<b>1948 avril</b>	Faible	-
<b>1948 septembre</b>	Fortes	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
<b>1949 24 mars</b>	Légère	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
<b>1949 24 avril</b>	Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa
<b>1950 6 septembre</b>	Forte	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
<b>1950 octobre</b>	Forte	Inondation de l'oasis de Ghardaïa
<b>1951 5 mars</b>	Forte	Inondation de l'oasis de Ghardaïa. La crue arrive jusqu'à El Atteuf

<b>de 1951 à 1953</b>		
<b>1951 13 et 19 septembre</b>	Moyenne	Crue moyenne des oueds secondaires Bouchamdne, Takdit, Touzouze, Argdane. Une partie de la palmeraie a été arrosée
<b>1951 2 octobre</b>	Forte	L'oued M'Zab est arrivé jusqu'à El Atteuf
<b>1952 24 avril</b>	Très forte	La chute de pluie a été considérable
<b>1952 23 septembre</b>	Assez forte	Crue de l'oued M'Zab alimentée par les oueds immédiatement en amont
<b>1953 mars</b>	Faible	La palmeraie de Ghardaïa a été partiellement arrosée
<b>1953 12 juillet</b>	Faible	-
<b>1953 5 septembre</b>	Faible	Oueds secondaires: Touzouze, Akhalkhal, ...
<b>de 1954 à 2008 (Lacune d'information, et liste incomplète)</b>		
<b>1984 fin octobre</b>	-	-
<b>1990 11 mai</b>	-	Laisse de crue repérée à l'altitude de 498,85 à la distance de 473,70 m en amont du pont Adaoud
<b>1991 3 juin</b>	Très importante	Nombreux dégâts
<b>1993</b>	Probable forte	-
<b>1994 29 septembre</b>	Très importante	-
<b>1995 8 octobre</b>	Assez forte	-
<b>2008 1 octobre</b>	Très importante	Nombreux dégâts

Source : Dubief, 1953

D'après le tableau II.4, il se produit en moyenne près de 2 crues par an, d'importance très contrastée.

Les crues importantes se produisent le plus fréquemment de mars à mai et de septembre à décembre, disons au printemps et à l'automne. Toutefois, elles peuvent intervenir en tout mois de l'année (Crue de juin 1991). Les mois de fréquences les plus faibles, ou nulles, sont juillet et août.

## 9.2 Inondations du 1 octobre 2008

Les pluies diluviennes, qualifiées de « tsunami fluviale », accompagnées de violents orages, ont commencé le lundi 29 septembre 2008, après quatre années de sécheresse. La pluie a continué progressivement le mardi avec une intensité moyenne, puis le mercredi 1er octobre le jour de l'Aïd (la fête qui marque la fin du jeun chez les musulmans, c'était le déluge, avec une pluie diluvienne, totalisant près de 150 mm en une heure. Les principaux oueds de la région (M'Zab, Zeghir, Nsa, Metlili) ont fonctionné à plein régime.

Selon les sources locales, c'est la première fois depuis 70 ans que les trois oueds affluents du l'oued M'Zab sont en crue. Habituellement seul un des trois oueds déborde sans mettre en danger les populations environnantes. Les autorités parlent d'un débit de 900 m<sup>3</sup>/s. L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) l'a estimé à 1200 m<sup>3</sup>/s. Cette catastrophe qui a touché la ville est liée, d'une part, à l'intensité de l'aléa concerné et d'autre part, à la vulnérabilité de cette région aux inondations (Medejerab, 2009).

C'est une crue exceptionnelle puisqu'elle a atteint la Sebkha Séfiouane. Dubief, qui a travaillé plus de 40 ans sur les précipitations au Sahara algérien, retient le fait que si lors d'une crue les eaux atteignent la Sebkha Sefiouane, considérant que celle-ci est cinquantenaire.

A Metlili située à 40 Km au nord de la ville de Ghardaïa, une hauteur d'eau de 6 m a été enregistrée, alors qu'en aval de Ghardaïa, celle-ci a frôlé les 10m. Ce déluge a entraîné l'effondrement d'une retenue collinaire construite en 2005 au niveau de l'oued Laadhira situé à 20km du chef lieu de la wilaya de Ghardaïa (Fig. II.10). En effet, les fortes pluies ont engendré une accumulation des eaux sur un rayon d'environ 2 km. La pression de l'eau a provoqué une brèche de 70m dans la retenue.

### **9.3 Les dégâts causés par les inondations du 1 octobre 2008**

Jamais de mémoire d'octogénaires résidant dans la vallée du M'zab, la région n'a vécu une telle catastrophe. L'oued M'Zab, qui est sorti de son lit vers 4 h du matin a, en effet, tout emporté sur son passage. Les dégâts sont énormes : décès de 100 personnes, 89 blessés, 756 familles sinistrées, 19 établissements scolaires endommagés, 7200 foyers privés d'électricité et 2300 familles privées d'eau. Plus de 1200ha de cultures maraîchères, arboricoles et de palmeraies ont été laminés par les eaux. Plus de 1000 têtes de bétail ont péri et plus de 300 véhicules ont été emportés par les eaux. Une usine de fabrication de batteries sous licence (Tudor), employant plus de 200 ouvriers, a été complètement saccagée par les eaux (Medejerab, 2009).

L'estimation des dégâts touchant les infrastructures avoisine les 20,1 Milliards de Dinars, soit environ 200 millions d'euros.

La figure II.9 représente les impacts immédiats des inondations du 1 octobre 2008.



**(a) L'Oued M'Zab en crue**



**(b) L'effondrement de la retenue collinaire**



**(c) Des voitures emportées par les eaux**



**(d) Une route transformée en torrent**



**(e) Le niveau d'eau a atteint 10 m**



**(f) Un quartier transformé en torrent**

**Figure II.9 : Impacts immédiats des inondations du 1 octobre 2008.**

## 10. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES ET HYDROGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED M'ZAB

Les divers paramètres d'un bassin versant (forme, altitude, pente, relief ...etc.) interviennent le plus souvent de façon combinée, agissant sur les modalités de l'écoulement. Ils offrent la possibilité de réaliser une analyse quantitative, et une comparaison des différentes unités hydrologiques. Néanmoins ils doivent être manipulés avec précaution.

### 10.1 Morphométrie

Cette section a pour but de présenter le bassin versant avec ses principaux paramètres morphologiques qui agissent sur la variation du signe hydrologique.

En revanche, une étude morphométrique succincte du bassin versant de L'oued M'Zab est présentée.

L'exactitude du périmètre « P » du bassin dépend de l'échelle de la carte de la densité du réseau hydrographique ; plus ce dernier est marqué, plus la délimitation est bien nette et plus le calcul des divers paramètres sont plus au moins précis.

Le bassin versant s'étend sur une superficie de 1573 Km<sup>2</sup> avec un périmètre de 181 Km.

#### 10.1.1 Paramètres de forme

##### a) Coefficient de compacité de GRAVELIUS (K<sub>c</sub>)

Ce coefficient permet de différencier entre les bassins allongés et ceux ramassés, Nous utilisons la formule :

$$K_c = 0.28P / \sqrt{S} \quad (\text{II.2})$$

P : périmètre du BV en Km.

S : surface du BV en Km<sup>2</sup>.

Pour notre BV  $K_c = 0,28 \cdot (181 / \sqrt{1573})$

Nous trouvons donc un  $K_c = 1.28 > 1 \Rightarrow$  le BV est allongé.

##### b) Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent (Fig. II.10) est un modèle établi par ROCHE. Il assimile le bassin en un rectangle ayant même surface et même périmètre que celui du bassin versant considéré de longueur L et largeur l, l'exutoire est représenté par une des largeurs du rectangle et les courbes de niveaux sont des parallèles.

$$L = K_c \sqrt{S} / 1.12 \left[ 1 + \sqrt{1 - (1.12 / K_c)^2} \right] \quad l = K_c \sqrt{S} / 1.12 \left[ 1 - \sqrt{1 - (1.12 / K_c)^2} \right] \quad (\text{II.3})$$

L : longueur du rectangle (Km).

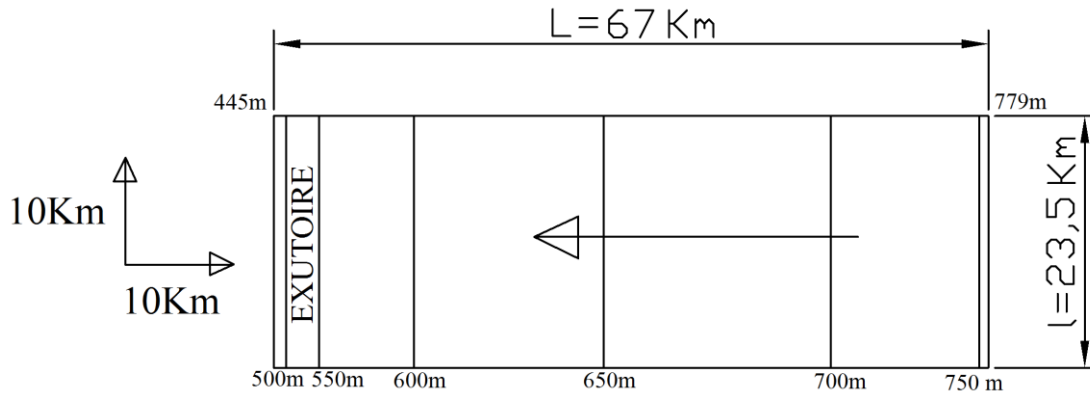
l : largeur du rectangle (Km).

K<sub>c</sub> : coefficient de GRAVELIUS.

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

$$\Rightarrow \begin{aligned} L &= 67 \text{ Km} \\ l &= 23.5 \text{ Km} \end{aligned}$$

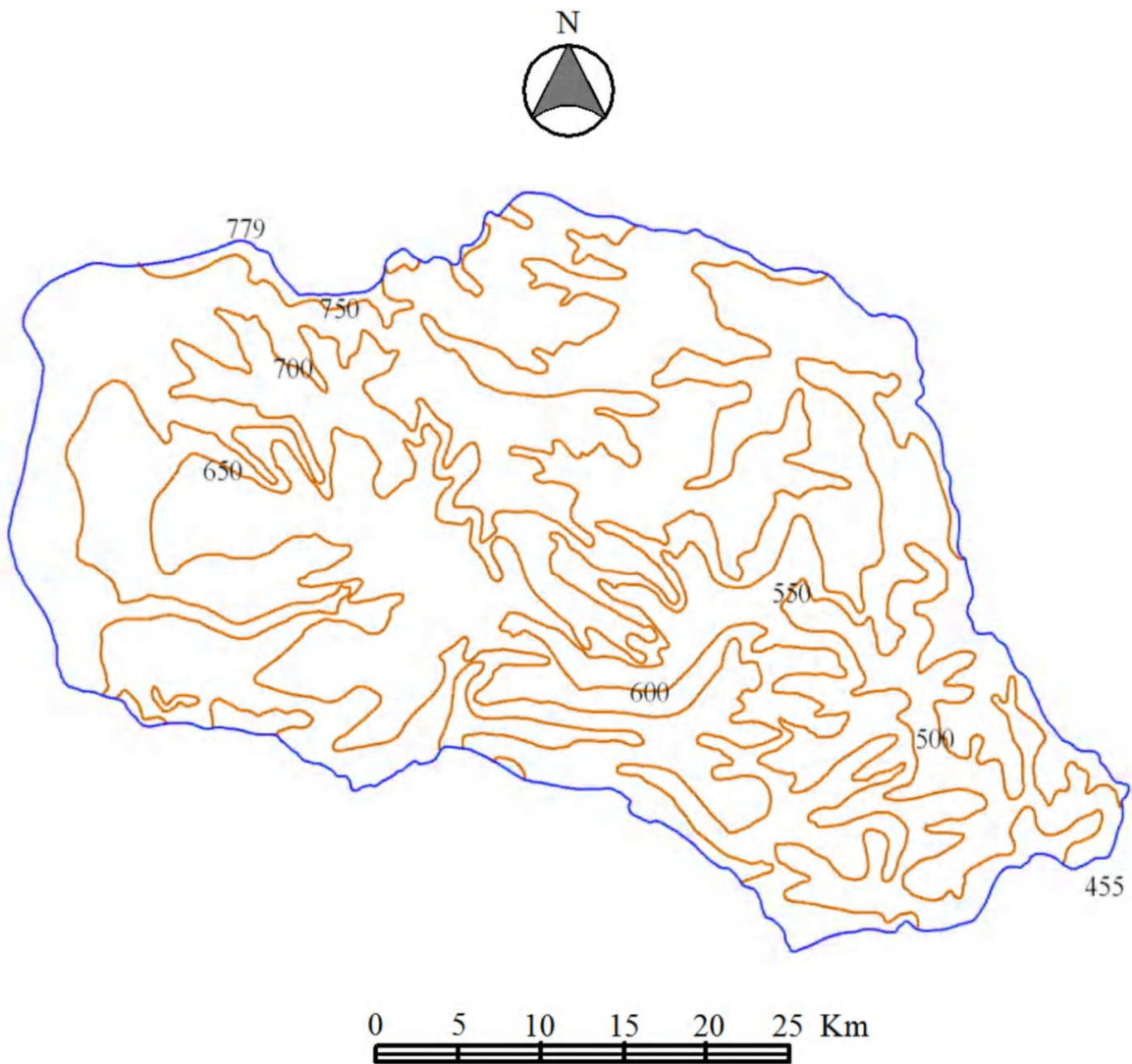




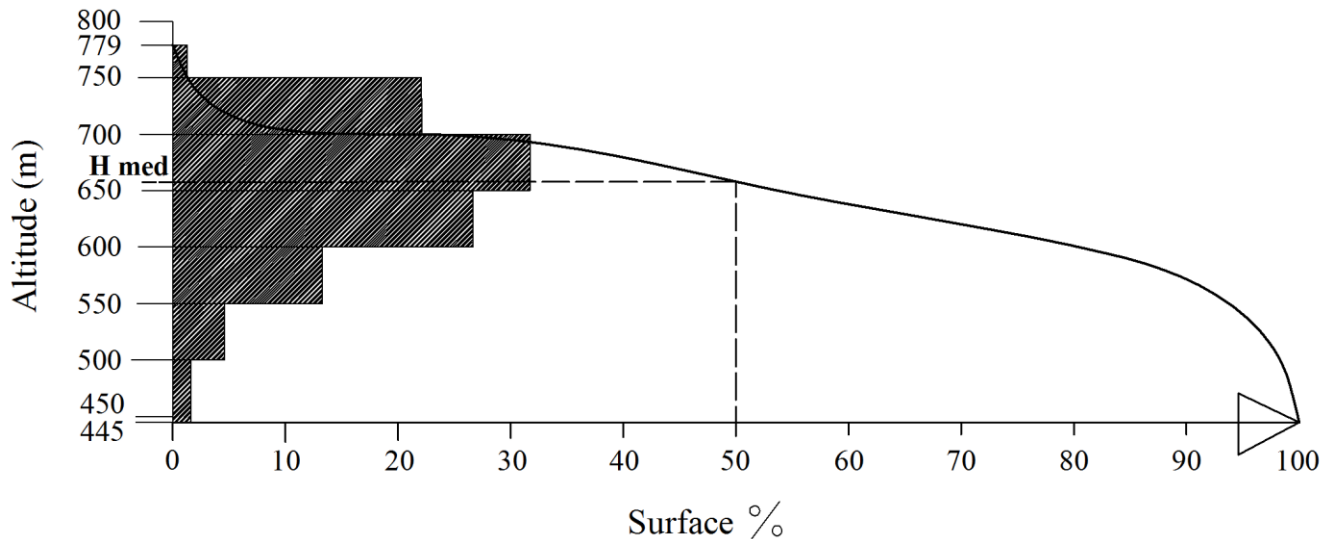
**Figure II.10 :** Rectangle équivalent du BV

**c) Hypsométrie et courbe hypsométrique du bassin versant**

L'hypsométrie et la courbe hypsométrique du bassin versant sont représentées dans les figures II.11 et II.12



**Figure II.11 :** Hypsométrie du bassin versant de l'Oued M'Zab



**Figure II.12 :** Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab

### 10.1.2 Altitude

a) Altitude moyenne ( $H_{moy}$ ): Ce paramètre est calculé à partir de la courbe hypsométrique, il est défini comme étant l'ordonnée moyenne de la courbe donnée par la relation suivante :

$$H_{moy} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n H_i \cdot A_i \quad (\text{II.4})$$

$$\Rightarrow H_{moy} = 649.77 \text{ m.}$$

b) Altitude maximale ( $H_{max}$ ): C'est le point le plus haut du bassin versant ;

$$H_{max} = 779 \text{ m}$$

c) Altitude minimale ( $H_{min}$ ): C'est le point le plus bas du bassin versant ;

$$H_{min} = 445 \text{ m}$$

d) Altitude médiane ( $H_{med}$ ): C'est l'altitude correspondante à 50% de la surface totale du bassin versant tirée à partir de la courbe hypsométrique ;

$$H_{med} = H_{50\%} = 658 \text{ m}$$

### 10.1.3 Indices de pente

Ils permettent de déterminer des classes de ruissellement des eaux superficielles.

a) Indice de pente global ( $I_g$ )

Il est déterminé par la relation II.5 :

$$I_g = D/L \quad (\text{II.5})$$

D : dénivelée entre les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant tirées à partir de la courbe hypsométrique, exprimée en (m)

L : la longueur du rectangle équivalent (m)

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} = 735 - 545 = 190 \text{ m}$$

$$\Rightarrow I_g = 2.84 \text{ m/km}$$

Pour tenir compte de pentes transversales fortes, supérieures de 30m/km à  $I_g$ , un indice de pente corrigé ( $I_{gc}$ ) est parfois utilisé.

$$I_{gc} = (I \text{ transversale} + I_g) / 2 \quad (\text{II.6})$$

En région de montagne à pente longitudinale faible et transversale forte, c'est la pente transversale qui est prise en considération.

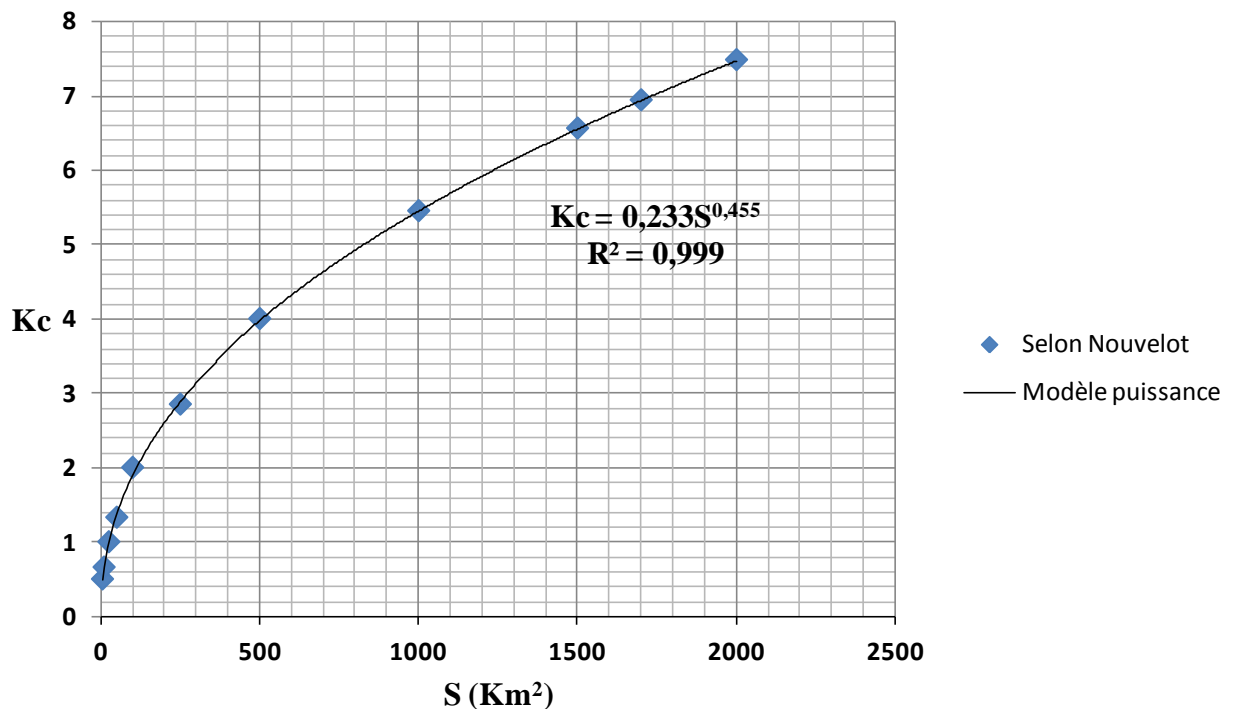
L'indice  $I_g$  diminue quand la superficie augmente. Nouvelot (Bonnard et Gardel, 1996) propose une correction  $K_c$  de  $I_g$  en fonction de la superficie  $S$  (Tab. II.5).

**Tableau II.5 :** Coefficient de correction  $K_c$  de  $I_g$  en fonction de la superficie

$S(\text{Km}^2)$	5	10	25	50	100	250	500	1000	1500	1700	2000
<b><math>K_c</math></b>	0.5	0.66	1	1.33	2	2.85	4	5.45	6.56	6.94	7.48

Source : Bonnard et Gardel, 1996

Sur la figure II.13, le tableau II.5 a été transformé en diagramme. Ce diagramme donne le coefficient de correction en fonction de la superficie.



**Figure II.13 :** Courbe de variation du coefficient de correction en fonction de la superficie

Le diagramme a été traduit en une équation, dont la formulation est en II.7:

$$K_c = 0,233 * S^{0,455} \quad (\text{II.7})$$

Pour le bassin versant de l'Oued M'Zab, d'une superficie totale de  $1573 \text{ Km}^2$ , le  $K_c$  est égal à 6,8

D'où :

$$I_{gc} = 19,3 \text{ m/Km}$$

b) Indice de pente de roche ( $I_p$ )

L'indice de pente de M. Roche, sert à déterminer la pente moyenne avec les données réelles du bassin versant.  $I_p$  est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent et pondérée par les surfaces comprises entre deux courbes de niveau  $H_i$  et  $H_{i-1}$ .

Il est donné par la formule II.8 :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum \sqrt{S_i(H_i - H_{i-1})} \quad (\text{II.8})$$

$S_i$  : surface partielle (%) comprise entre deux courbes de niveau consécutives  $H_i$ ,  $H_{i-1}$  (m).

$L$  : la longueur du rectangle équivalent (m).

$$\Rightarrow I_p = 0.638$$

c) Pente moyenne ( $I_{\text{moy}}$ )

Elle est donnée par la formule II.9 :

$$I_{\text{moy}} = D/L \quad (\text{II.9})$$

$D$  : Dénivelée entre  $H_{\text{max}}$  et  $H_{\text{min}}$

$D = 334$  m.

$L$  : la longueur du rectangle équivalent

$$\Rightarrow I_{\text{moy}} = 0.4985 \% = 4.985 \text{ m/km}$$

**10.1.4 Classes de relief et de perméabilité****a)- Classes de relief**

La valeur de  $I_g$  peut être utilisée directement comme paramètre de certains abaques. Ou bien on en déduit des classes de relief (Bonnard et Gardel, 1996)

**R2** : pentes faibles, de 2 à 5 m/km. Ce sont les bassins de plaine.  $I_{gc} \geq 3$  m/km.

**R3** : pentes modérées, comprises entre 5 et 10 m/km. Ce sont des terrains intermédiaires entre la plaine et la zone à ondulation de terrain.  $I_{gc} \geq 7$  m/km.

**R4** : pentes assez fortes: pentes longitudinales comprises entre 10 et 20 m/km. pentes transversales supérieures à 20m/km. Ondulation de terrain.  $I_{gc} \geq 15$  m/km.

**R5** : Pentas fortes longitudinales comprises entre 20 et 50 m/km; pentes transversales entre 80 et 200 m/km Régions de collines.  $I_{gc} \geq 25$ .

**R6** : pentes très fortes, longitudinales supérieure à 50 m/km, pentes transversales supérieures à 200 m/km. Région de montagnes.  $I_{gc} \geq 60$  m/km

Nous adoptons l'indice **R4** pour le bassin versant du M' Zab puisque  $I_{gc} \geq 15$  m/km

**b)- Classes de perméabilité**

Les perméabilités sont classées en plusieurs types, selon la méthode de Rodier et Auvray (1965):

**P1** : Bassins particulièrement imperméables sur plus de 90% de la surface. Ce sont des bassins entièrement rocheux ou argileux, sans forte rugosité.

**P2** ou **i** : Bassins imperméables avec quelques zones perméables de moins de 75% de la surface, ou bassins homogènes presque imperméables. Ces bassins sont parfois indicés aussi en « Imp ». Ils sont recouverts de reg et de glais, de colluvions argileuses et d'argile dans les bas-fonds, même avec fentes de retrait. Dans une certaine mesure, des sols sablo-argileux ou argilo-sableux et même parfois sableux, s'ils sont recouverts d'une pellicule superficielle imperméable, peuvent entrer dans cette catégorie.

**P3** ou **Ri**: Bassins assez imperméables comportant des zones perméables d'étendue notable ou bassins homogènes assez peu perméables. Ils portent aussi parfois l'indice « Rimp ». Un bassin relativement imperméable Rimp comprend en général un mélange en proportion à peu près égale de sol imperméable et de sol assez perméable.

**P4** ou **P** : Bassins perméables, pouvant contenir 5 à 10% de sols peu perméables. L'indice « Perm » leur est aussi attribué. Un bassin perméable comprend des sols perméables tels que des éboulis rocheux avec produits de décomposition assez perméables, des cuirasses complètement disloquées, des roches très diaclasées, certains sols sableux sans pellicule imperméable, des sables grossiers.

**P5** ou **TP** : Bassins très perméables.

Dans le M'Zab, comme en témoignent les photos aériennes obliques et verticales, le bassin est bien homogène. Les terrains dominants, sans couverture pédologique, permettent de classer les bassins en perméabilité **P2 (=I)**, les zones d'épandage détritique représentant moins de 15% de la surface. Toutefois certaines parties basses des hauts bassins de l'oued El Abiodh, tels que celui où se trouve la Daïet Belkhassem, devraient être classés en **P3** pour tenir compte de leur nature détritique.

### 10.1.5 Temps de concentration

N'ayant pas d'observations directes, ce paramètre sera déterminé en utilisant des formules empiriques (Rahai, 2007).

- *Formule de Giandotti*

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (\text{II.10})$$

Où, **T<sub>c</sub>** : temps de concentration (en heures)

**S** : superficie du bassin (1573 km<sup>2</sup>)

**L** : longueur du thalweg principal (54 km)

**H<sub>moy</sub>** : altitude moyenne (649.77 m)

**H<sub>min</sub>** : altitude minimale (445 m)

$$T_c = 21 \text{ heures}$$

- **Formule de Turraza**

$$T_c = 0.10813 * \sqrt[3]{\frac{S * L}{\sqrt{L}}} \quad (\text{II.11})$$

$$T_c = 2.44 \text{ heures}$$

- **Formule SCS (Soil Conservation Service)**

$$T_c = \left[ \frac{0.87 * L^3}{H_{MAX} - H_{MIN}} \right]^{0.385} \quad (\text{II.12})$$

$$T_c = 10.14 \text{ heures}$$

- **Formule de Ventura**

$$T_c = 0.1272 * (S / I_{moy})^{0.5} \quad (\text{II.13})$$

$$T_c = 71,45 \text{ heures}$$

Le temps de concentration évalués avec ces quatre formules sont sensiblement différents. En fait, les temps d'écoulement à travers le bassin, et notamment dans l'Oued même, varient en fonction de la hauteur d'eau dans celui-ci, c'est à dire de l'importance de la crue. La formule de Giandotti fournit des valeurs médianes, soit une vingtaine d'heures.

## 10.2 Etude du réseau Hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des canaux de drainages naturels permanent ou temporaire, par ou s'écoulent des eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines le long du lit du cours d'eau.

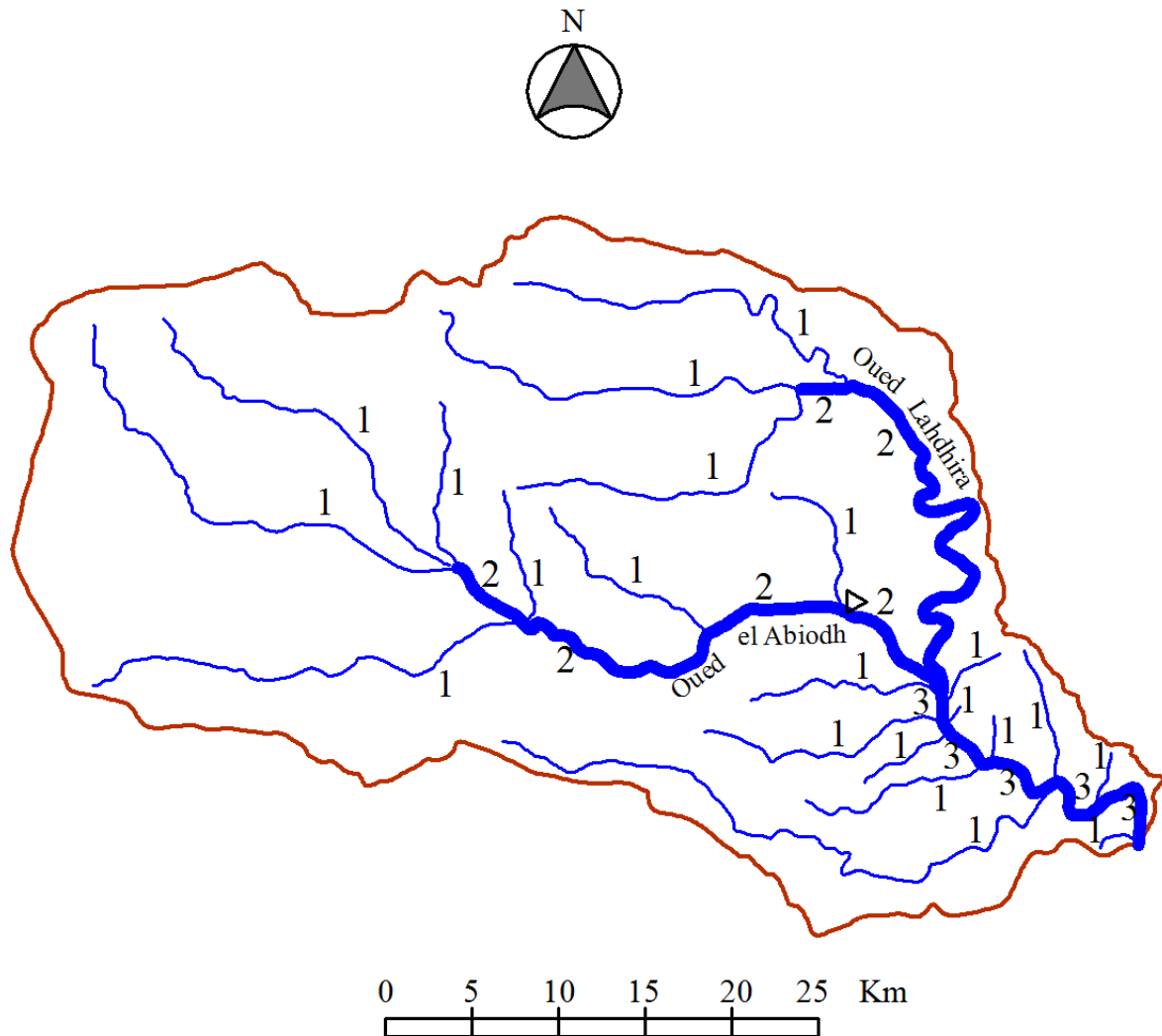
### 10.2.1 Ordre du bassin versant

A partir des cartes topographiques la carte du réseau hydrographique est établie. Le travail consiste à classer les cours d'eau en cours d'ordre **1; 2; 3** suivant la classification de **Schumm** (Fig. II.14), dont le principe est résumé de la façon suivante :

- tributaire qui ne reçoit l'apport d'aucun autre cours d'eau est d'ordre **1**.
- un cours d'eau dont les apports sont exclusivement des tributaire d'ordre **1** est d'ordre **2**...etc.
- l'ordre maximum des cours d'eau de notre bassin versant est de l'ordre **3**.

**Tableau II.6** : Nombre des talwegs

Ordre	1	2	3	Somme
Nombre Nn	21	6	5	32



**Figure II.14 :** Classification du Réseau hydrographique par Schumm

a) Densité de drainage ( $D_d$ )

Appeler aussi la densité de **THALWEGS** qui correspondent à la dissection du relief. La longueur de thalwegs (cour d'eau) est mesurée sur carte pour chaque ordre séparément, puis on fait la sommation des longueurs ; elle est donnée par la formule II.14 :

$$D_d = \sum_{i=1}^n \frac{L_c}{A} \tag{II.14}$$

$L_c$  : longueur cumulée des cours d'eau (336Km)

$A$  : surface (1573Km<sup>2</sup>)

$$\Rightarrow D_d = 0,213 \text{ Km/Km}^2$$

**Remarque :** il est à noter que quelque soit l'ordre des oueds, il y a toujours une incertitude due soit à la fidélité du cartographe, soit à la période (été ou hiver) à laquelle la carte a été faite. Car les travaux peuvent faire disparaître certains affluents d'ordre 1 et plus l'échelle devient trop petite, plus les cours d'eau risquent d'être séparés.

b) Fréquence des cours d'eau ( $F_s$ )

Représente le nombre de cours d'eau par unité de surface donné par la formule II.15:

$$F_s = \frac{N}{A} \quad (\text{II.15})$$

N : nombre total des cours d'eau=32

A : la surface (Km<sup>2</sup>)

$$\Rightarrow F_s = 0.0203$$

c) Rapport de confluence (Rc)

Il est donné par la relation II.16 :

$$R_c = \frac{N_n}{N_{n+1}} \quad (\text{II.16})$$

N<sub>n</sub> : nombre de talwegs d'ordre n

N<sub>n+1</sub> : nombre de talwegs d'ordre n+1

**Tableau II.7:** Rapport de confluence

L'ordre n/n+1	1/2	2/3
Rc	3,5	1,2

d) Coefficient de torrentialité (C<sub>T</sub>)

Il tient compte à la fois de la densité des THALWEGS élémentaires par la densité de drainage, il est donné par la formule II.17:

$$C_T = F_1 \cdot D_d \quad (\text{II.17})$$

D<sub>d</sub> : coefficient de drainage

F<sub>1</sub> : fréquence des talwegs élémentaires, donné par la relation II.18

$$F_1 = \frac{N_1}{A} \quad (\text{II.18})$$

N<sub>1</sub> : nombre de talwegs d'ordre 1 (N<sub>1</sub> =21)

A : surface cumulée (Km<sup>2</sup>)

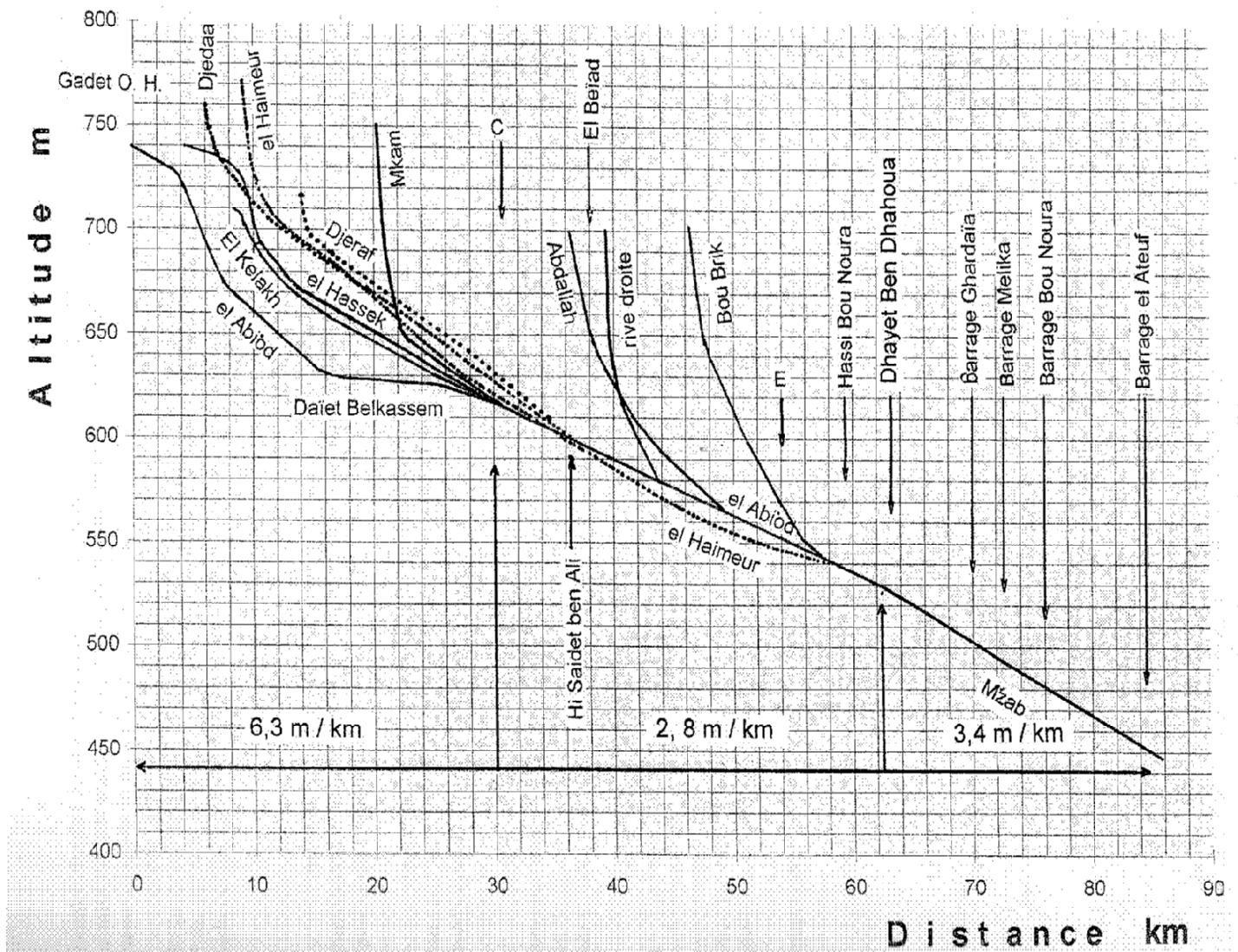
$$F_1 = 0.0134$$

$$\Rightarrow C_T = 0,285 \%$$

e) Profil en long de l'Oued M'Zab

Les profils en long de l'oued M'Zab et de ses grands formateurs jusqu'à El Atteuf ont été mesurés. La figure II.15 montre ces résultats. Les pentes, mises à part dans les quelques premiers kilomètres, sont relativement régulières et rectilignes de l'amont vers l'aval; C'est là une caractéristique des systèmes désertiques. Toutefois, on remarque aussi que la pente devient plus abrupte dès la confluence des oueds El Abïodh et Lahdhira. Ainsi, la pente moyenne de l'oued El Abïodh jusqu'à la confluence de l'oued El Kelakh, est de 6,3 m/km, puis elle passe à 2,8 m/km jusqu'à Dhayet Ben Dhahoua. L'oued M'Zab dans l'agglomération mozabite a une pente moyenne de 3,4 m/km.





**Figure II.15 :** Profils en long de l'oued M'Zab et de ses grands formateurs jusqu'à El Atteuf

### 11. ETUDE DES PRECIPITATIONS

Plus encore que les facteurs morphologiques, lithologiques et biogéographiques, les conditions climatiques d'un bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau et les précipitations constituent le facteur essentiel intervenant par :

- leur hauteur totale annuelle qui détermine l'abondance fluviale,
- leur répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques,
- leurs totaux journaliers et surtout les averses génératrices de crues.

Les précipitations constituent la principale «entrée» des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants.

### 11.1 Réseau d'observation et Acquisition des données

Le réseau d'observation est le réseau formé par l'ensemble des stations pluviométriques pour un bassin versant ou une région donnée. Il fournit des mesures ponctuelles publiées, généralement par les services publics, dans des annuaires hydrologiques.

Dans le cas de cette étude, les différentes caractéristiques des précipitations se rapportent essentiellement à Ghardaïa car aucune autre station pluviométrique n'a été observée sur le bassin versant. Les autres stations météorologiques de la région, situées en dehors du bassin versant, sont relativement plus éloignées de Ghardaïa. La climatologie de ces stations présente des similitudes avec celle de Ghardaïa. C'est pourquoi leurs caractéristiques peuvent être utilisées à titre de comparaison et vérification.

L'ensemble des données pluviométriques de base est mis à notre disposition par l'Agence Nationale des Ressources Hydraulique (A.N.R.H) et l'Office National de la Météorologie (O.N.M). Ces données sont des enregistrements durant 89 années de la station de Ghardaïa, connue en coordonnées.

Les principales caractéristiques de la station de Ghardaïa sont représentées dans le tableau II.8.

**Tableau II.8** : Caractéristiques principales de la station pluviométrique de Ghardaïa

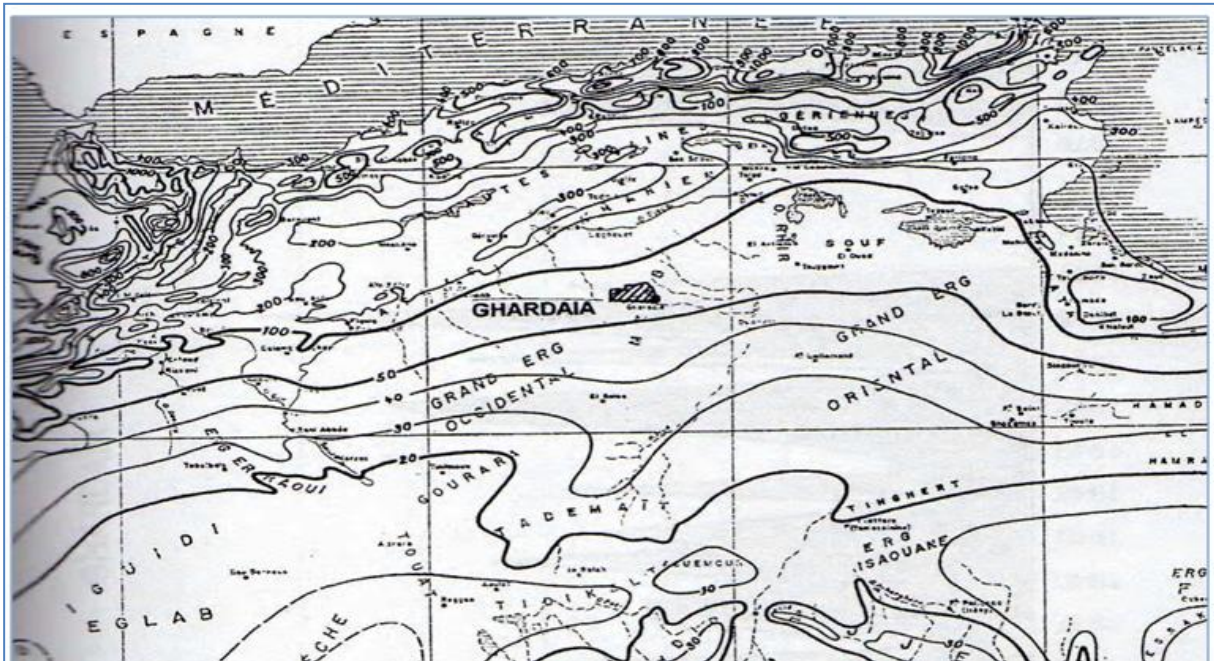
Code de la station	Coordonnées				Altitude (m)	Mise en service	Années d'observations
	géographique		Lambert				
13 04 27	X (degré)	Y (degré)	X(m)	Y(m)	493,00	Depuis 1914	89
	03° 41' 14"	32° 29' 30'	592 749	211 213			

### 11.2 Pluie annuelle

#### *Variabilité de la Pluie annuelle dans l'espace*

##### **a)-Selon la carte de pluviométrie moyenne de Dubief (1963)**

La carte de pluviométrie moyenne du nord d'Algérie et du Sahara (Fig. II.16), sur la période 1926-1950, permet de situer Ghardaïa et les sous bassins du M' Zab dans une pluviométrie moyenne annuelle qui varie de 50 à 100 mm. Selon cette carte, la variation de la pluviométrie moyenne annuelle à l'échelle du Bassin versant du M' Zab n'est pas importante.

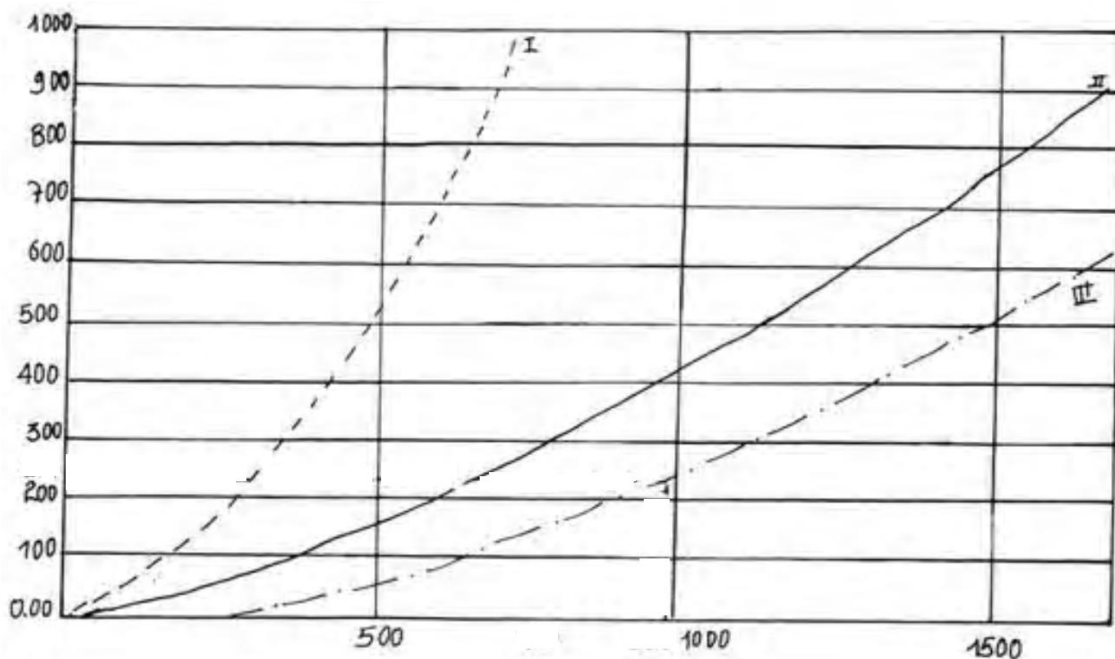


**Figure II.16 :** Carte de la pluviométrie moyenne annuelle du nord d'Algérie et du Sahara (Dubief, 1963)

**b)-Selon le Graphique des trois lois de l'Algérie**

Seltzer montre que la pluie en Algérie subit trois influences : celle de l'altitude, les conditions topographiques, de la longitude et enfin de l'éloignement des influences maritimes. Ainsi P.Seltzer a montré que la répartition des pluies en Algérie obéit au trois lois suivantes (Boumesseneh, 2007) (Fig. II.17) :

- La hauteur des pluies augmente de l'Ouest à l'Est.
- La pluie augmente avec l'altitude, celle-ci est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides que sur les versants sous les vents secs.
- La pluie diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral.



**Figure II.17 :** Graphique de "P.SELTZER" les trois lois de l'Algérie (Boumesseneh, 2007)

Courbe I : Littoral.

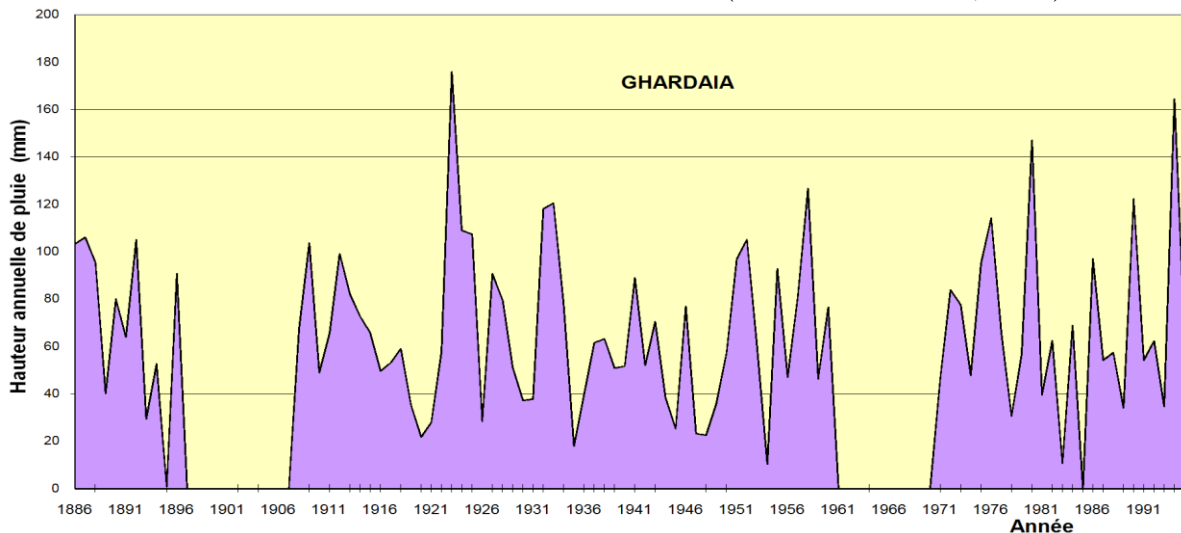
Courbe II : Atlas Tellien Algérois-constantinois.

Courbe III : Atlas Tellien oranais-hautes plaines. Atlas saharien, Sahara.

Pour le bassin versant du M'Zab (Courbe III), la différence d'altitude n'est pas importante (l'altitude varie de 445 m à 779 m). Cela veut dire que la variation de la pluie annuelle n'est pas importante.

### *Caractéristiques des pluies annuelles*

Pour 88 hauteurs de pluies annuelles sur la période de 1886 à 1995 (Fig. II.18) la moyenne annuelle est de 67,3mm, avec un écart type de 34 mm et une médiane de 62.4 mm. Les pluies annuelles extrêmes observées sont de 176 mm et 1mm (Bonnard et Gardel, 1996).



**Figure II.18 :** Variation de la Hauteur de pluie annuelle (Bonnard et Gardel, 1996)

Le tableau II.9 permet de comparer des valeurs caractéristiques des hauteurs de pluies annuelles à Ghardaïa et aux stations les plus proches.

**Tableau II.9 :** Pluie annuelle. Valeurs caractéristiques

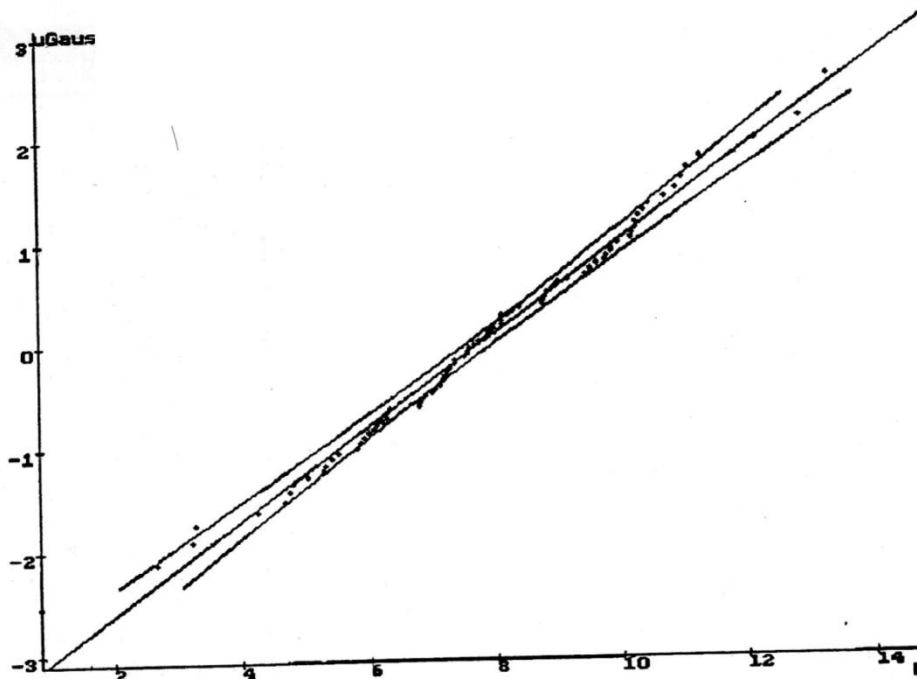
	Moy	Max	Min	Ecart type
<b>GHARDAÏA</b> 88 ans	<b>67,3</b>	<b>175,9</b>	<b>1</b>	<b>34</b>
OUARGLA 47 ans	38,1	89,9	0	22,7
EL OUED 1904-1954	76,4	159,9	19	37,2
TOUGGOURT 45 ans	58,1	119,6	7,9	29
LAGHOUAT 74 ans	180,2	378,7	31,1	75,1

Source : Bonnard et Gardel, 1996

La moyenne représente uniquement la quantité d'eau tombée effectivement pendant toute la période considérée. La médiane indique la hauteur de pluie qui ne sera pas dépassée une fois sur deux. Elle est plus intéressante à considérer pour beaucoup d'applications pratiques car elle associe les notions de quantité et de fréquence.

L'ajustement de la série de hauteurs de pluie annuelles à une douzaine de lois statistiques utilisées en climatologie et en hydrologie, a été entrepris. C'est la loi normale appliquée aux racines carrées des hauteurs qui a donné les meilleurs critères d'ajustement. La figure II.19 montre l'ajustement graphique.

Ajustement à une loi de Gauss  
sqrttmp.pa



**Figure II.19 :** Ajustement de la racine carrée des pluies annuelles à la loi normale (Bonnard et Gardel, 1996)

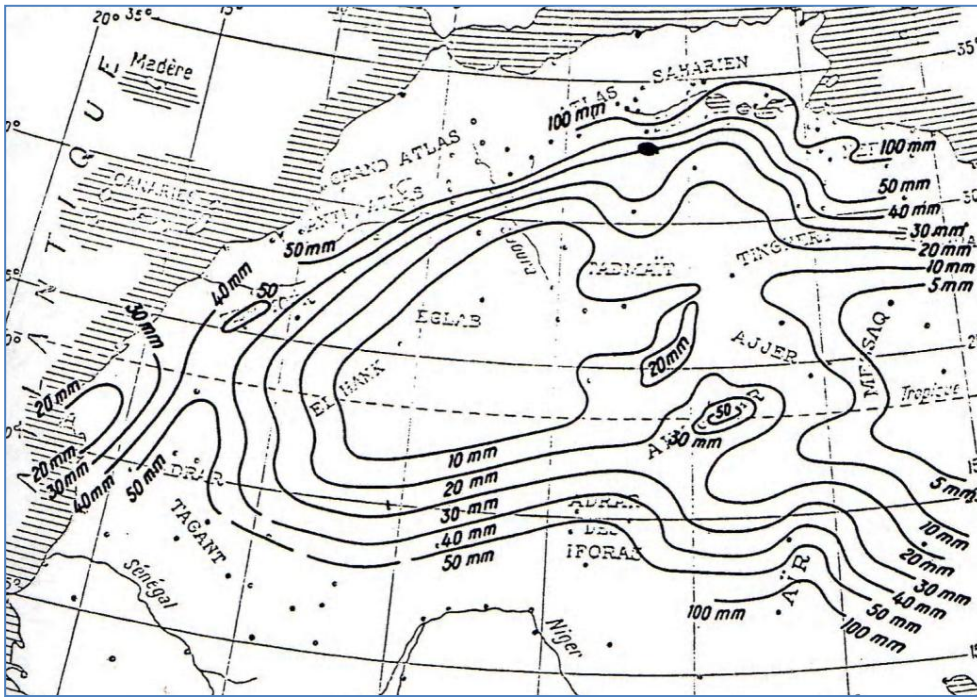
Le tableau II.10 montre les hauteurs de pluies annuelles de différentes fréquences.

**Tableau II.10 :** Fréquences des pluies annuelles (mm) ,88 ans

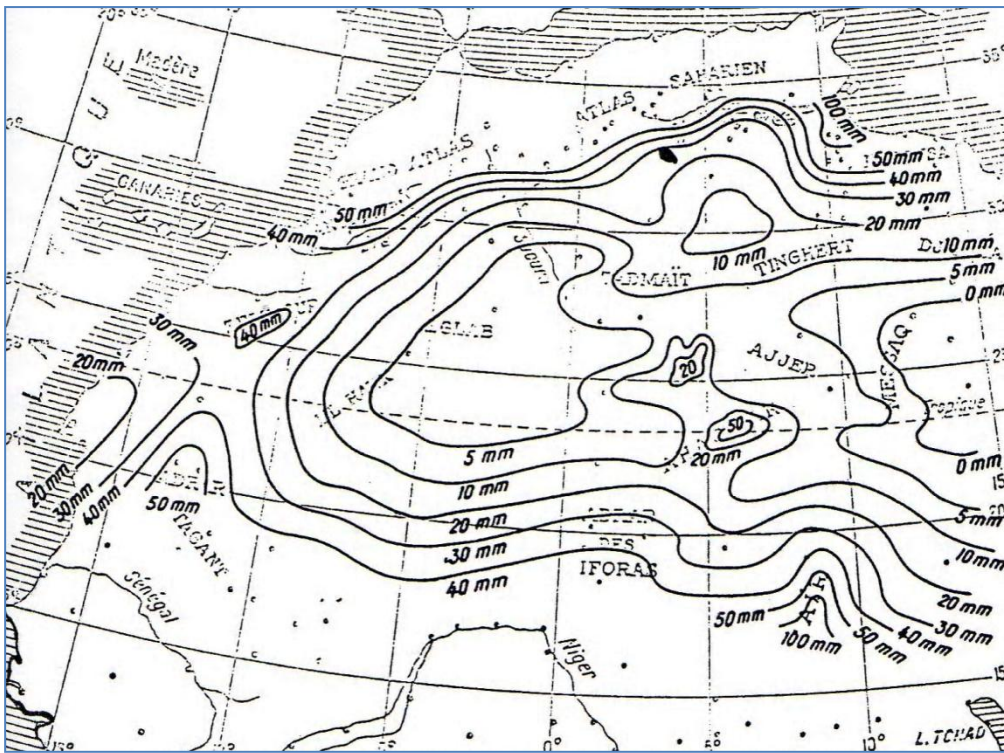
P. retour (ans)	Fréquence	Pan (mm)
2	0,5	<b>61,3</b>
5	0,8	<b>94,3</b>
10	0,9	<b>114</b>
20	0,95	<b>132</b>
50	0,98	<b>154</b>
100	0,99	<b>170</b>
400	0,9975	<b>200</b>
1000	0,999	<b>217</b>
10000	0,9999	<b>261</b>

Source : Bonnard et Gardel, 1996

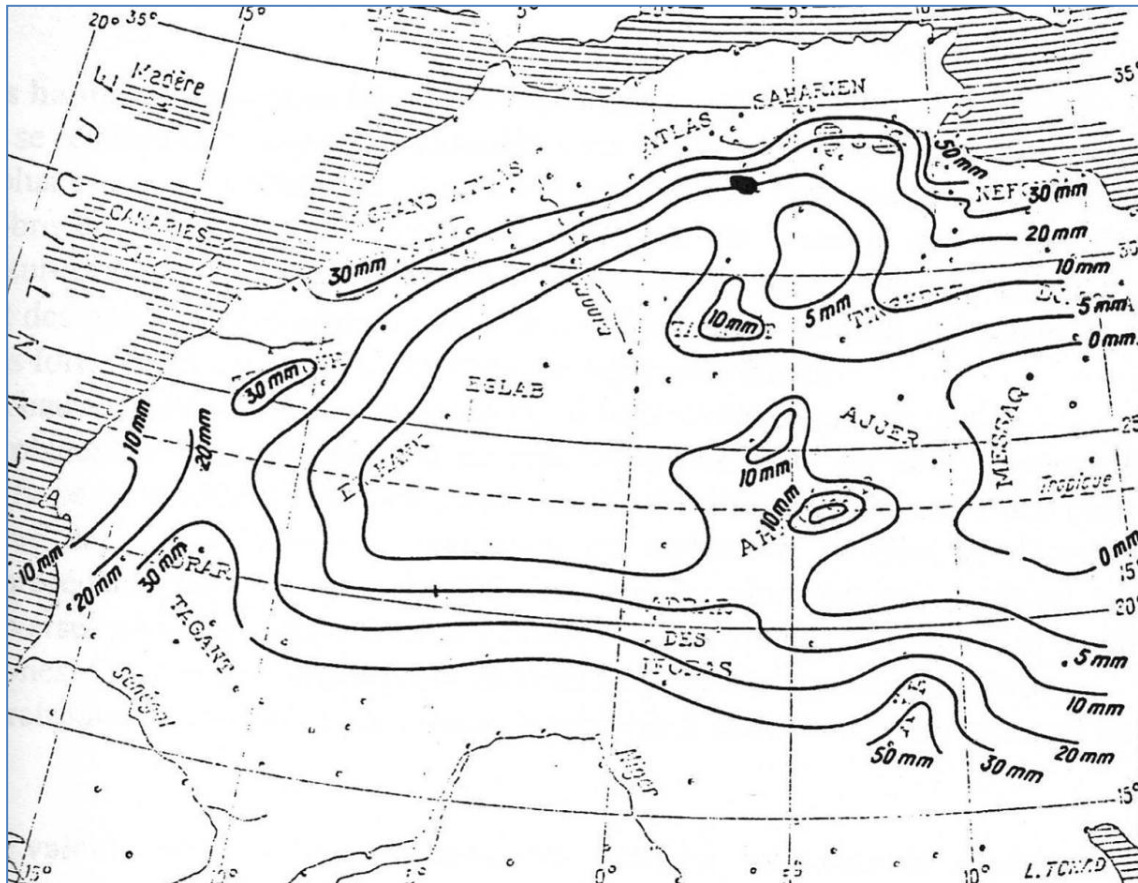
Les figures II.20, II.21 et II.22 présentent les cartes des totaux annuels des pluies supérieures à 5, 10 et 20 mm en 24 heures. D'après Dubief (1963), une hauteur de 5 mm correspond à la pluie capable de revivifier un pâturage, 10 mm est la hauteur à partir de laquelle le ruissellement devient assez notable, et 20 mm (25 mm selon Medejerab, 2009) le seuil à partir duquel on observe de forts écoulements. Notons que de telles précipitations sont généralement assez répandues dans la région.



**Figure II.20 :** Totaux annuels moyen des précipitations supérieures à 5 mm en 24 heures (Dubief, 1963)



**Figure II.21 :** Totaux annuels moyen des précipitations supérieures à 10 mm en 24 heures (Dubief, 1963)



**Figure II.22 :** Totaux annuels moyen des précipitations supérieures à 20 mm en 24 heures (Dubief, 1963)

### 11.3 Pluie mensuelle

Les hauteurs moyennes des pluies mensuelles sont indiquées dans le tableau II.11 et dans la figure II.23.

**Tableau II.11 :** Pluies intra-annuelles, 1926-1960

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	AN
<b>Ghardaïa</b>	<b>3,5</b>	<b>6,5</b>	<b>10,1</b>	<b>8,4</b>	<b>6,9</b>	<b>4,5</b>	<b>7,2</b>	<b>6,2</b>	<b>3,2</b>	<b>2,0</b>	<b>0,7</b>	<b>2,4</b>	<b>61,6</b>
El Goléa	1,4	7,0	5,7	8,9	5,5	4,7	3,7	1,8	0,6	0,6	0,0	0,4	<b>40,3</b>
Ouargla	0,6	5,5	6,8	7,6	5,7	2,8	4,8	6,2	1,5	0,7	0,0	1,0	<b>42,3</b>
El Oued	1,8	8,8	11,6	10,3	6,9	6,2	10,8	10,6	5,3	1,1	0,1	0,6	<b>74,1</b>
Touggourt	1,5	6,0	10,9	8,7	5,8	5,1	9,9	5,6	2,5	1,5	0,2	1,2	<b>58,9</b>

Source : Dubief, 1963

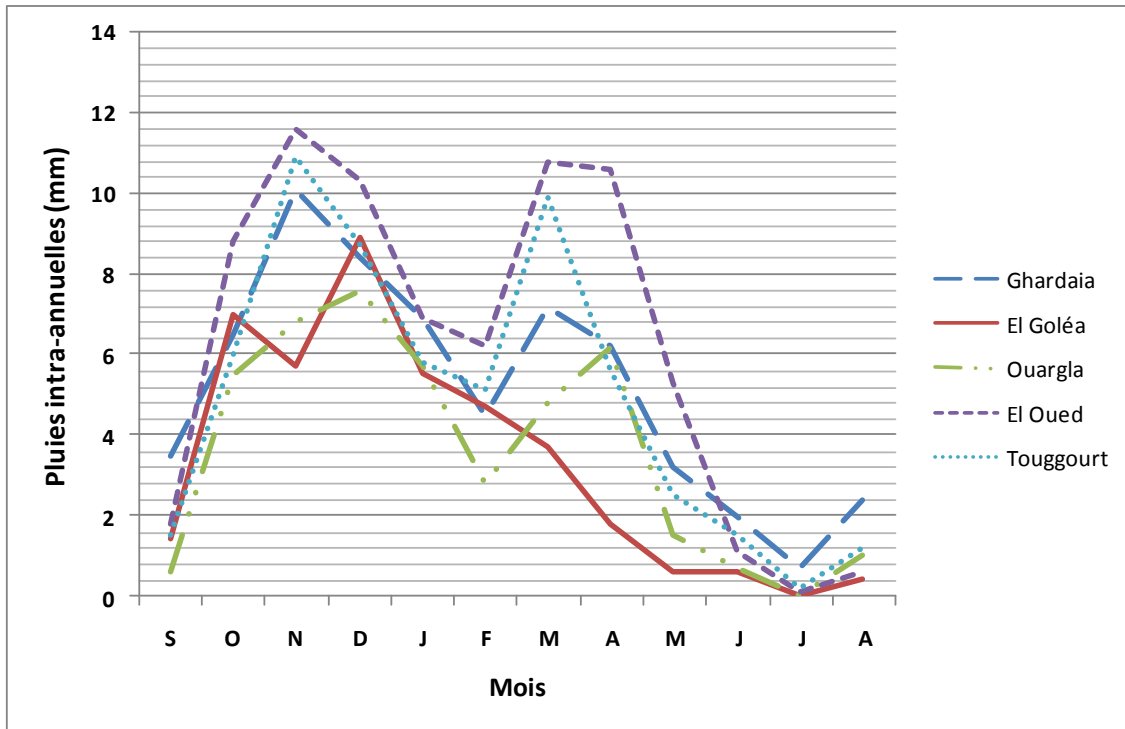


Figure II.23 : Pluies intra-annuelles, 1926-1960, d'après Dubief (1963)

En se référant aux moyennes mensuelles, les mois les plus pluvieux à Ghardaïa sont novembre avec 10,1 mm, mars, décembre, janvier, avril, octobre et septembre. Les hauteurs minimales se situent de mai à août, avec 0,7 mm en juillet.

La figure II.24 montre la carte de répartition des mois les plus pluvieux dans la région sur la période 1926-1950.

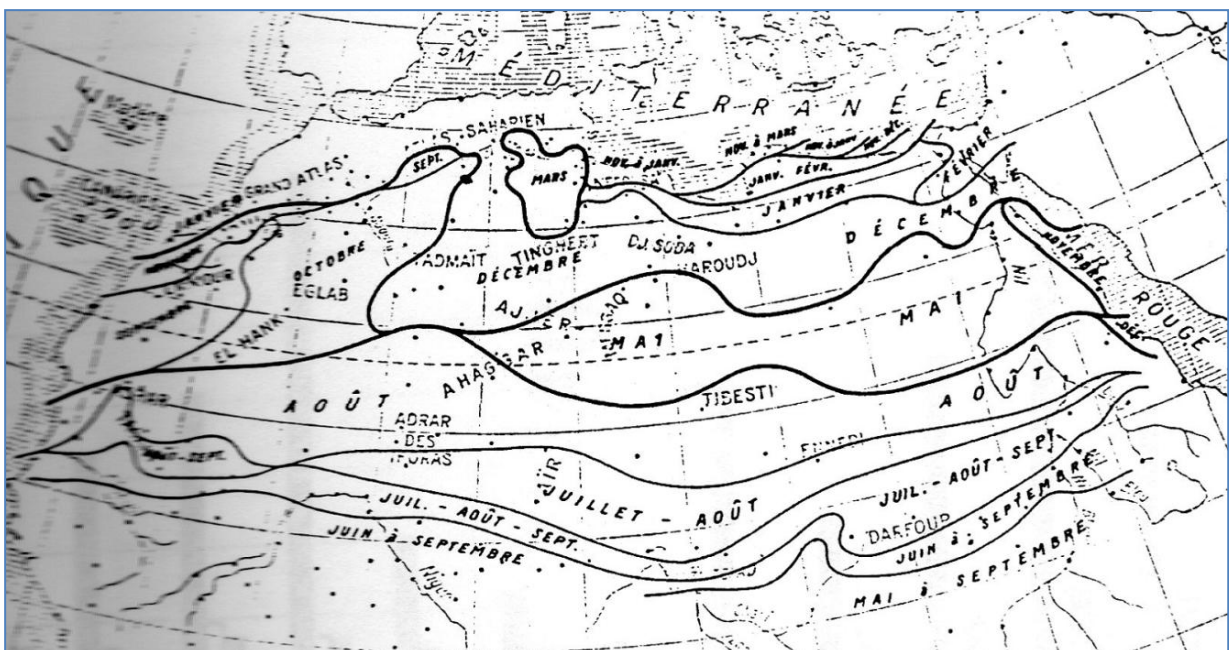


Figure II.24 : Carte de répartition des mois les plus pluvieux de l'année (Dubief, 1963)



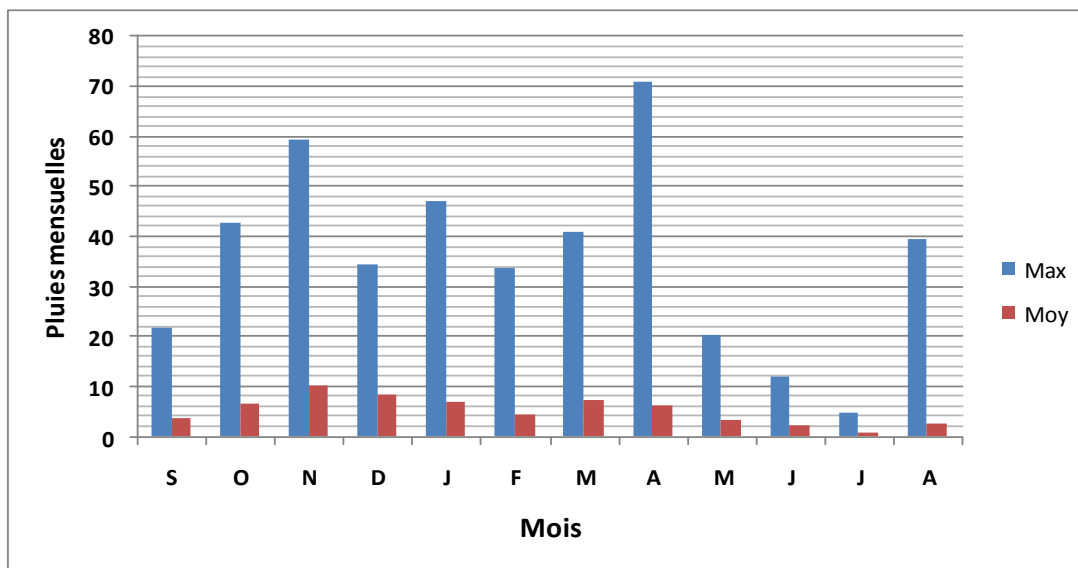
D'après cette carte, il est constaté qu'une forte variabilité existe aux alentours des bassins du M'Zab avec des zones voisines au maximum en septembre, octobre, et décembre.

Les valeurs mensuelles extrêmes sont reportées dans le tableau II.12 et leur répartitions dans la figure II.25.

**Tableau II.12 :** Valeurs caractéristiques des pluies mensuelles en mm (1926-1960),

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
<b>Max</b>	21,8	42,8	59,2	34,3	47,0	33,5	41,0	70,9	20,2	11,8	4,7	39,5
<b>Moy</b>	3,5	6,5	10,1	8,4	6,9	4,5	7,2	6,2	3,2	2,0	0,7	2,4

Source : Dubief ,1963



**Figure II.25 :** Valeurs caractéristiques des pluies mensuelles en mm (1926-1960), Dubief (1963).

La moyenne est supérieure à la médiane, Ceci se produit en été dans le nord du Sahara. Pour les maxima mensuels, une forte pointe d'été se distingue en août, en raison des orages. Ce sont cependant les mois d'avril, novembre, janvier, et octobre, puis août, qui arrivent en tête du classement.

Les hauteurs mensuelles de pluies supérieures à 5, 10, et 20 mm en 24 heures sont données dans le tableau II.13.

**Tableau II.13 :** Hauteurs mensuelles de pluies supérieures à 5, 10, et 20 mm en 24 heures 1926-1950 D'après Dubief (1963)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	An
<b>≥ 5 mm / 24 h</b>	1,8	4,4	7,4	4,1	4,0	3,1	3,6	4,0	1,2	0,9	0,0	0,8	35,3
<b>≥ 10 mm / 24 h</b>	1,2	2,3	4,8	1,7	3,0	1,4	3,1	2,7	0,6	0,0	0,0	0,8	21,6
<b>≥ 20 mm / 24 h</b>	0,0	1,4	3,2	0,0	1,1	0,9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8

A Ghardaïa, en se référant aux pluies supérieures ou égales à 20 mm, les mois pendant lesquelles tombent en moyenne les plus fortes pluies journalières sont ainsi novembre, octobre, et mars, puis janvier et février.

### 11.4 Précipitations extrêmes et Averses

L'analyse des précipitations journalières maximales et même des hauteurs de pluie horaire présente un intérêt particulier, pour les études de protection contre les crues.

Pour dégager une idée générale sur l'importance des pluies extrêmes, nous nous basons sur des données d'observations disponibles pour la station de Ghardaïa durant une période de Quatre Vingt neuf (89) ans.

D'après Dubief une pluie inférieure à 5 mm ne donne pas d'écoulement notable. Pour cette raison toutes les pluies qui ont des valeurs inférieures à 5 mm ont été éliminées de la série d'observations. Donc la taille de notre série a été diminuée (trois valeurs ont été écartées) et elle a passée de 89 à 86 valeurs.

Pour 86 hauteurs de pluies maximales journalières sur la période de 1914 à 2009 la moyenne est de 29,2 mm, avec un écart type de 18,3 mm et une médiane de 23,9 mm. les pluies maximales journalières extrêmes varient entre 5 et 101 mm.

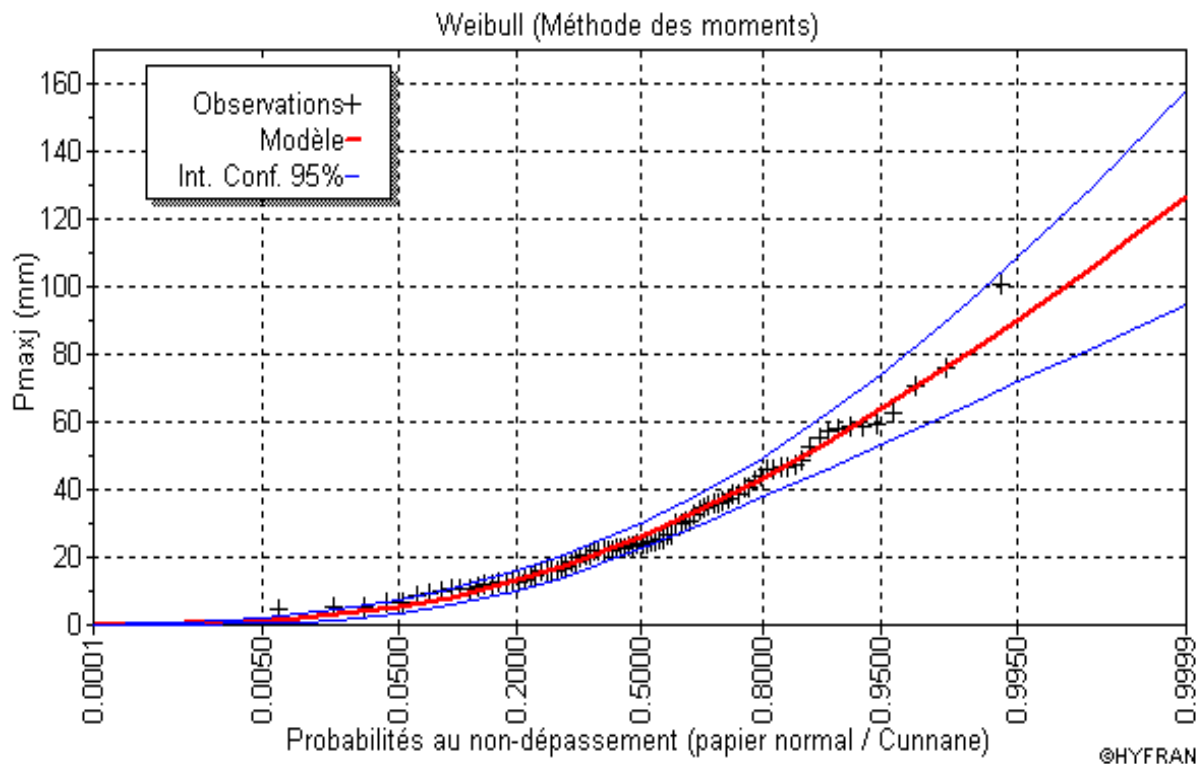
Afin de faire ressortir l'irrégularité temporelle des pluies extrêmes, une étude fréquentielle est entreprise permettant de caractériser et d'estimer les précipitations exceptionnelles, pour les différentes durées de récurrence.

Dans le cadre de cette étude fréquentielle, trois lois de probabilité ont été testées : la loi Normale, la loi Log-Normale et la loi de Weibull.

Les deux lois Normale et Log-Normale n'ont pas données de bons résultats, au vu du test d'adéquation.

La loi qui s'ajuste mieux aux valeurs extrêmes est celle de Weibull (Fig. II.26).

Les quantiles estimés pour les probabilités de retour retenues sont présentés dans le tableau II.14



**Figure II.26** : Ajustement des précipitations journalières maximales à la loi de Weibull, Station de Ghardaïa

**Tableau II.14** : Pluie maximale journalière fréquentielle, Station Ghardaïa

Période de retour T (ans)	10	20	50	100
P <sub>maxj</sub> (mm)	54.3	63.8	75	82.9

### 11.5 Pluies de courtes durées et courbes HDF-IDF

Pour mieux caractériser l'écoulement fluvial extrême ayant trait aux crues, il faut descendre à l'échelle des pluies horaires pour une analyse complète des phénomènes avers-crués, dans le bassin. L'estimation des pluies de courtes durées par dépouillement et calage de la pluviométrie locale n'est pas possible en raison d'insuffisance de données.

Donc en l'absence des données suffisantes, des formules empiriques pour l'estimation des pluies de courte durée sont utilisées.

Il a été procédé, dans cette section, à l'estimation des pluies de courtes durées pour une probabilité donnée par deux formules empiriques :

- La formule de Bennour (1993);
- La formule de Montanari.

#### *Pluies de courtes durées selon la formule de Bennour (1993)*

Bennour (1993) utilise une relation « développée pour les régions sahariennes », donnant la hauteur de pluie de fréquence donnée pour une durée donnée:

$$P_{t,p\%} = P_{\max j,p\%} * 0,55 * t^{0,25} \quad (\text{II.19})$$

Où  $P_{\max j,p\%}$  : Pluie maximale journalière de probabilité donnée ;  
 $P_{t,p\%}$  : Pluie de courte durée de probabilité donnée ;  
 t : est la durée en heure.

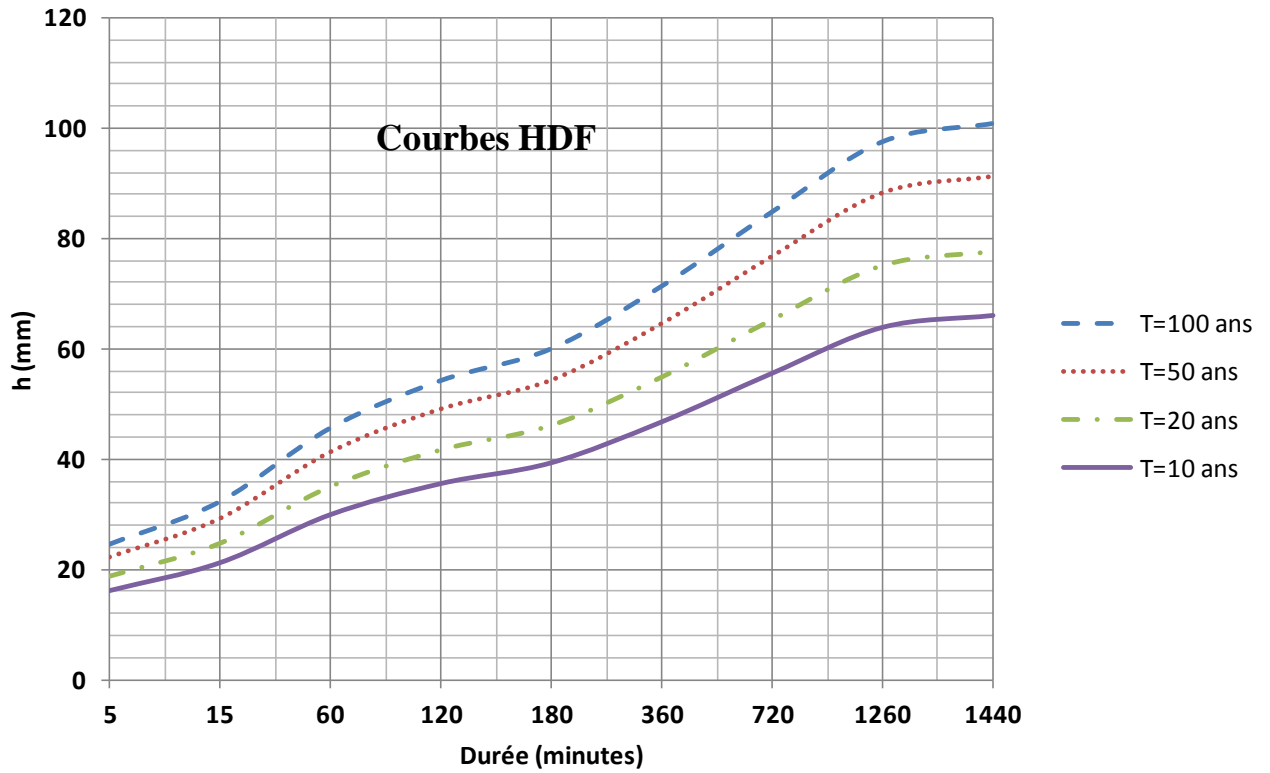
Les hauteurs et les intensités de pluies de courtes durées obtenues par application de la formule de Bennour sont données dans le tableau II.15.

Les courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence) sont représentées dans la figure II.27

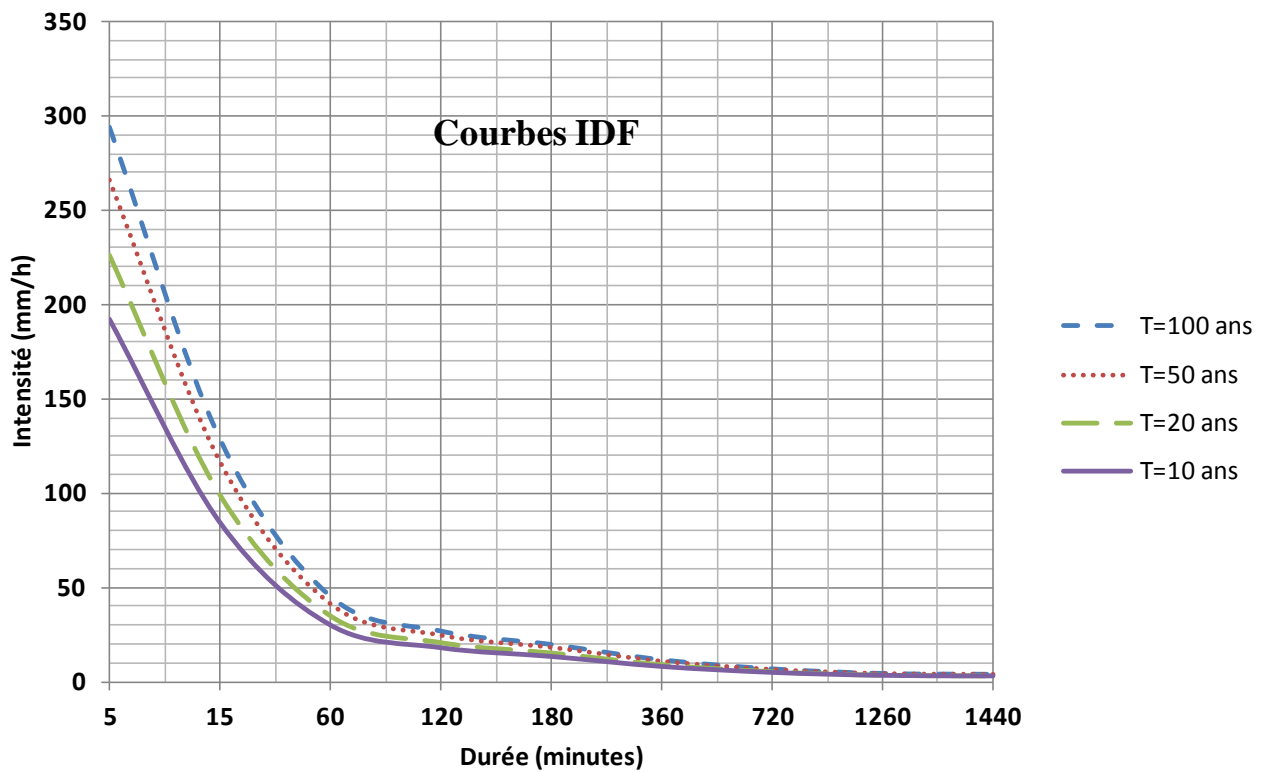
Les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) sont représentées dans la figure II.28

**Tableau II.15** : Hauteurs et intensités de pluies de courtes durées obtenues par l'application de la formule de Bennour -Station de Ghardaïa

Durée t (en heures)	Durée t (en minutes)	Période de retour T (ans)							
		10		20		50		100	
		h (mm)	Intensité (mm/h)	h (mm)	Intensité (mm/h)	h (mm)	Intensité (mm/h)	h (mm)	Intensité (mm/h)
0.083	5	16.05	192.55	18.85	226.24	22.16	265.96	24.50	293.97
0.25	15	21.12	84.47	24.81	99.25	29.17	116.67	32.24	128.96
1	60	29.87	29.87	35.09	35.09	41.25	41.25	45.60	45.60
2	120	35.52	17.76	41.73	20.86	49.05	24.53	54.22	27.11
3	180	39.30	13.10	46.18	15.39	54.29	18.10	60.01	20.00
6	360	46.74	7.79	54.92	9.15	64.56	10.76	71.36	11.89
12	720	55.59	4.63	65.31	5.44	76.77	6.40	84.86	7.07
21	1260	63.93	3.04	75.12	3.58	88.30	4.20	97.60	4.65
24	1440	66.10	2.75	77.67	3.24	91.30	3.80	100.92	4.20



**Figure II.27 :** Courbes Hauteur-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) obtenues par l'application de la formule de Bennour



**Figure II.28 :** Courbes Intensité-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) obtenues par l'application de la formule de Bennour

*Pluies de courtes durées par la formule de Montanari*

Pour déterminer les précipitations tombées pendant les averses de différentes durées (t), et pour une fréquence donnée, la formule de Montanari est utilisée dont la formulation est : (Touaibia, 2004)

$$P_{t,p\%} = P_{\max j,p\%} * \left[ \frac{t}{24} \right]^b \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$P_{\max j,p\%}$  : Pluie maximale journalière de probabilité donnée ;

$P_{t,p\%}$  : Pluie de courte durée de probabilité donnée ;

b : exposant climatique déterminé par la méthode de K.Body (Boumessenagh, 2007).

$$b = 1 + \frac{\ln\left(\frac{\bar{P}_{\max j}}{24}\right) - \ln(25)}{\ln(24) - \ln(0,5)} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$\bar{P}_{\max j}$  : Moyenne de la série de pluies maximales journalières observées.

Par l'application de cette formule on trouve un exposant climatique b égal à 0,216

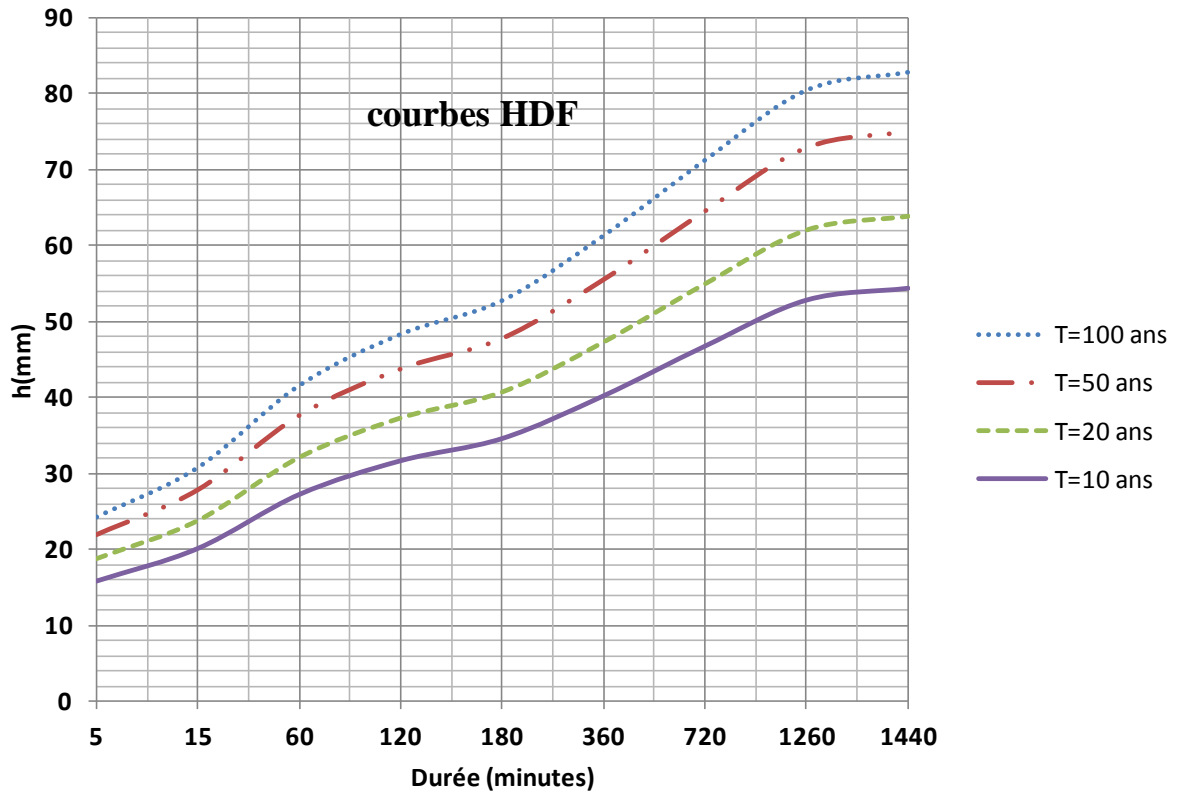
Les hauteurs et les intensités de pluies de courtes durées obtenues par application de la formule de Montanari sont données dans le tableau II.16.

Les courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence) sont représentées dans la figure II.29

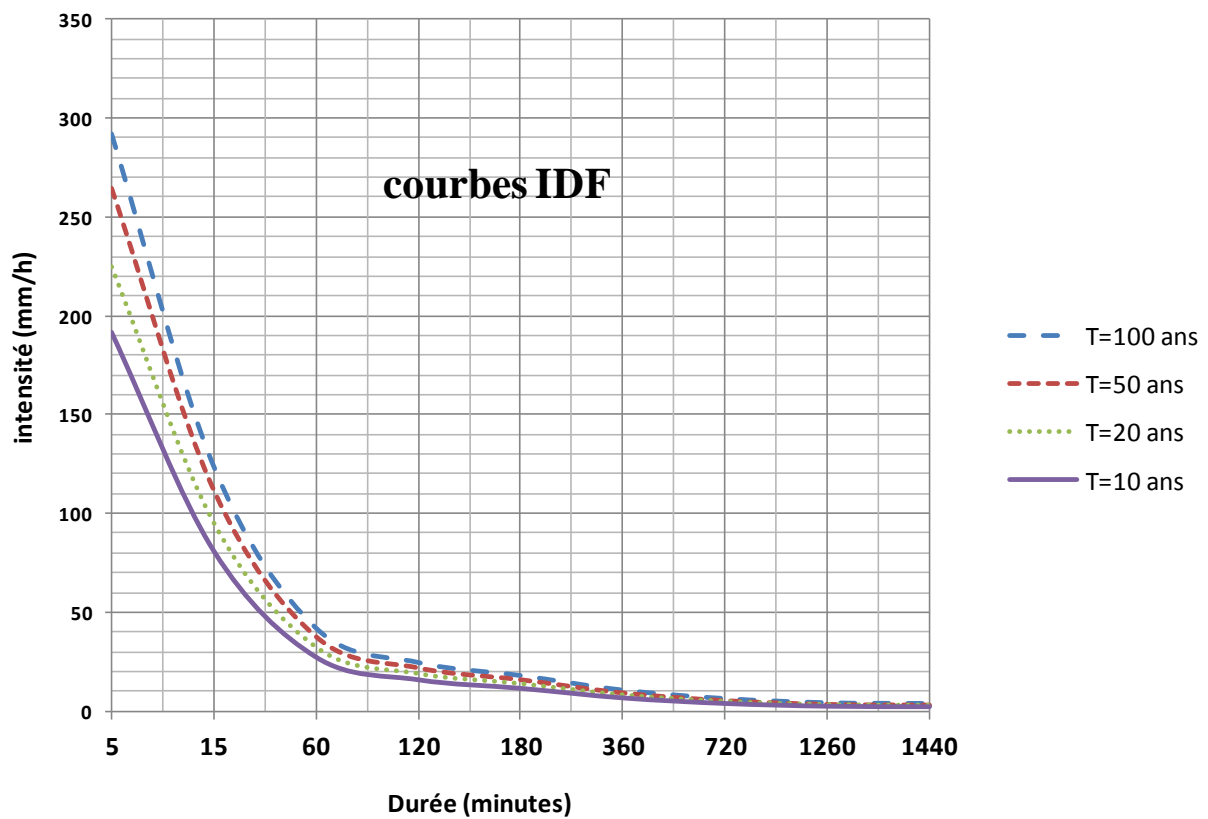
Les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) sont représentées dans la figure II.30

**Tableau II.16** : Hauteurs et intensités de pluies de courtes durées selon la formule de Montanari -Station de Ghardaïa

Durée t (en heures)	Durée t (en minutes)	Période de retour T (ans)							
		10		20		50		100	
		h (mm)	Intensité (mm/h)	h (mm)	Intensité (mm/h)	h (mm)	Intensité (mm/h)	h (mm)	Intensité (mm/h)
0.083	5	15,93	191,22	18,72	224,67	22,01	264,11	24,33	291,93
0.25	15	20,21	80,85	23,75	94,99	27,92	111,68	30,86	123,44
1	60	27,29	27,29	32,06	32,06	37,69	37,69	41,66	41,66
2	120	31,71	15,85	37,25	18,63	43,79	21,90	48,41	24,20
3	180	34,62	11,54	40,67	13,56	47,81	15,94	52,85	17,62
6	360	40,22	6,70	47,26	7,88	55,55	9,26	61,41	10,23
12	720	46,73	3,89	54,91	4,57	64,55	5,38	71,35	5,95
21	1260	52,75	2,51	61,98	2,95	72,86	3,47	80,54	3,84
24	1440	54,3	2,26	63,8	2,66	75	3,13	82,9	3,45



**Figure II.29 :** Courbes Hauteur-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) selon la formule de Montanari



**Figure II.30 :** Courbes Intensité-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) selon la formule de Montanari



### *Commentaires sur les deux méthodes*

- L'écart entre les résultats obtenus par l'application des deux formules n'est pas important.
- La méthode de Bennour a tendance à surestimer les pluies de courtes durées puisque elle considère que la pluie de 24 heures est supérieure à la pluie maximale journalière, ainsi le rapport entre la pluie de 24 heures et la pluie maximale journalière est estimé à 1,22.
- La méthode de Bennour considère que l'exposant climatique est constant pour les zones sahariennes mais en réalité l'exposant climatique n'est pas le même pour toutes les régions sahariennes d'Algérie.
- La méthode de Montanari est largement utilisée en Algérie surtout par l'ANRH, les expériences montrent qu'elle a donnée des résultats acceptables. Cette méthode tient compte de la variation de l'exposant climatique en fonction des particularités de chaque station pluviométrique.

Par la suite, et pour ces raisons, les résultats obtenus par la méthode de Montanari seront utilisés.

### **11.6 Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des pluies maximales journalières**

Il est à noter que les pluies sont rarement homogènes sur des bassins versants dès que les superficies dépassent quelques kilomètres carrés, généralement 10 à 25 kilomètres carrés (Touaibia, 2004). Les méthodes d'évaluation globale de crues, en l'absence de données pluviométriques en différents points, applique un coefficient de réduction de la pluie observée à la seule station de référence en fonction de la superficie (« coefficient d'abattement »).

Donc le coefficient d'abattement est très important pour connaître la lame d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin versant à partir d'une hauteur de pluie ponctuelle tout en tenant compte l'hétérogénéité spatiale des pluies maximales journalières .

#### ***-Définition***

Le coefficient d'abattement est le rapport de la pluie moyenne de fréquence donnée à la pluie ponctuelle de même fréquence (HACH):

$$K = \frac{P_m}{P} \quad (\text{II.22})$$

$K$  : coefficient d'abattement

$P_m$  : pluie moyenne sur la surface, de fréquence donnée

$P$  : pluie ponctuelle de même probabilité

#### ***-Estimation du coefficient d'abattement***

Il est assez clair que le coefficient d'abattement dépend de la corrélation entre les différentes stations. Puisque le bassin versant de l'Oued M'Zab est doté d'une seule station pluviométrique, les formules empiriques seront utilisées.

Différents auteurs ont effectué des études régionales de l'abattement en essayant le plus souvent de traduire en formules la variation du coefficient d'abattement en fonction de différents facteurs. Parmi ces formules:

**a)-Formule de Vuillaume (1974)**

Etablit en Afrique sahélienne et intertropicale sur de nombreux bassins et sous-bassins de 15 à 1500 km<sup>2</sup> avec 236 postes pluviométriques, l'auteur cale une « équation généralisée »

$$K = 1 - 0,001 (9 \log T - 0,042 P_{an} + 80) \log S \quad (\text{II.23})$$

T : période de retour en années

P<sub>an</sub> : précipitation moyenne inter-annuelle de bassin en mm

S : superficie en Km<sup>2</sup>

**b)-Formule de l'U.S Weather Bureau (Leclerc et Schaake , 1972)**

Etablit à l'Est du Mississipi pour lequel l'influence du pas de temps a également été étudiée :

$$K = 1 - e(-1,1 t^{0,25})(1 - e(-\frac{S}{256})) \quad (\text{II.24})$$

S : superficie en Km<sup>2</sup>

t : en heures

**c)-Formule de MICHEL et OBERLIN (1982) pour les petits bassins versants**

$$K = \exp(-S^{0,5} / (7,7 T_s^{-1} + 14,8 + 7,6 T_s^{-0,4} t)) \quad (\text{II.25})$$

1 ≤ S ≤ 200 km<sup>2</sup>

0.5 ≤ Ts ≤ 25 ans période de retour des événements supérieurs à un seuil

1 ≤ t ≤ 24 heures.

**d)-Formule des travaux publics belges (HACH)**

Pour des pluies sur des petits bassins versant les travaux publics belges utilisent le coefficient d'abattement suivant :

$$K = 1 - 0.005\sqrt{l} \quad (\text{II.26})$$

l est la longueur de la plus grande zone considérée exprimé en mètres

**e)-Formule de Bediot (Bediot et al.1980)**

Cette formule est utilisée pour les petits bassins versants:

$$K = S^{-0,044} \quad (\text{II.27})$$

1 ≤ S ≤ 100 km<sup>2</sup>

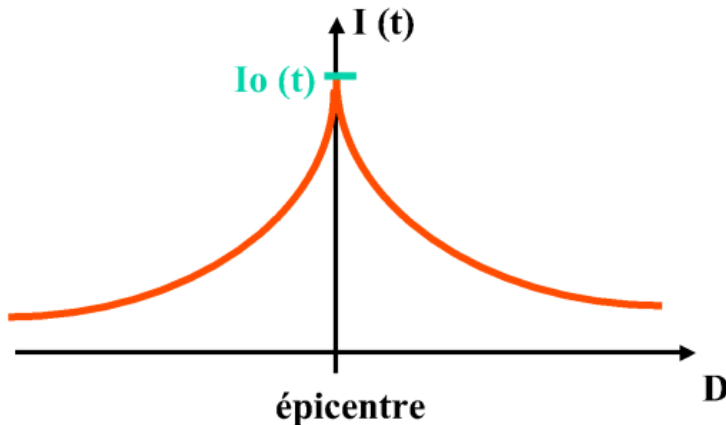
t = 1 jour

35 ≤ P ≤ 53 mm

**f)-Formule de Fruhling (pour les petits bassins versants)**

Le coefficient d'abattement est en fonction de la distance à l'épicentre (Fig.II.32)

$$I(t) = I_0(t) (1 - \alpha\sqrt{D}) \quad (\text{II.28})$$



**Figure II.31 :** Abattement de pluie en fonction de la distance à l'épicentre

$I_0(t)$  = intensité à l'épicentre

$D$  = distance à l'épicentre (m)

$\alpha$  = coefficient de décroissance (0.006)

**Commentaires**

Il est bien clair que la majorité des formules empiriques utilisées pour l'évaluation du coefficient d'abattement sont valables uniquement pour des petits bassins versants. C'est seulement les formules de l'U.S Weather Bureau et la formules de Villaume qui peuvent être appliquées pour des bassins versants de grandes superficies. Le choix d'application de l'un de ces deux formules dépend du modèle utilisé pour l'évaluation des débits. Donc il est possible d'utiliser une formule pour un modèle et une autre formule pour un autre modèle.

**En résumé**

La pluviométrie moyenne annuelle, à Ghardaïa, est de 67,3 mm, avec un écart-type de 34,0 mm. La médiane, susceptible d'être dépassée une année sur deux, est de 62,4 mm.

La pluie annuelle décennale a été évaluée à 114 mm, la centennale à 170 mm et la millennale à 217 mm.

Les mois les plus pluvieux à Ghardaïa s'échelonnent de septembre à avril avec une grande sensibilité dans leur classement selon les groupes d'années pris en considération. Les totaux mensuels généralement les plus élevés sont ceux de novembre et mars.

Les hauteurs de pluies maximales journalières de fréquence décennale et centennale ont été évaluées respectivement à 54,3 mm et 82,9 mm. La pluie maximale journalière millennale a une hauteur de 106 mm.

Les hauteurs et les intensités des pluies de courtes durées ont été évaluées par deux méthodes : la méthode de Montanari et la méthode de Bennour. Les deux méthodes donnent des résultats satisfaisants et l'écart entre ces résultats est faible.

La pluie ponctuelle est affectée d'un coefficient d'abattement pour tenir compte de la diminution de la hauteur moyenne sur le bassin lorsque la superficie augmente. Ce coefficient est déterminé par des formules empiriques en raison d'insuffisance de données.

### **Conclusion**

La région du M'Zab est confrontée aux phénomènes des crues qui engendrent des inondations et qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social.

Ces inondations sont dues à l'interaction complexe de plusieurs composantes. C'est le produit de la concomitance des facteurs géomorphologiques, lithologiques, topographiques, hydrographiques et climatiques sans oublier le facteur humain.

Suite à cette présentation monographique du bassin versant et de la zone d'étude, il est facile d'identifier certains de ces facteurs à savoir :

- Pluviométrie très forte et répartie sur une courte période de l'année : des millimètres d'eau qui tombent dans des régions arides en quelques jours et rien pour le reste de l'année ;
- Un sol aride ;
- Bassin versant imperméable ;
- Bassin versant allongé ;
- La végétation est très rare ;
- Une forte érosion hydrique ;
- Une Pente forte et irrégulière sur certains endroits ;
- Un ruissellement excessif ;
- Les pratiques agricoles intensives diminuent la capacité du terrain à retenir l'eau et augmente le ruissellement ;
- L'imperméabilisation du bassin versant par l'homme : Il est bien connu que l'imperméabilisation du sol par la construction des maisons et des infrastructures a pour effet d'accroître les coefficients de ruissellement et donc d'accélérer les écoulements des eaux et d'aggraver les débits reçus à l'aval; à ces conditions, l'incapacité des réseaux d'assainissement est considérée comme l'un des causes de ce phénomène.

La zone d'étude est menacée par les effets dévastateurs des crues qui sont aggravées par l'occupation des lits des Oueds.

Le but de ce chapitre est de définir la modélisation hydrologique, de la situer dans le contexte de l'hydrologie et de présenter les différentes classes de modèles pluie-débit.

## 1. LES MODELES HYDROLOGIQUES

Un modèle est une représentation qui décrit les relations entre les différents éléments d'un système. En particulier, un modèle hydrologique de bassin versant est une représentation simplifiée du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant, afin d'expliquer la réponse du bassin aux différentes conditions auxquelles il est soumis.

La représentation de tout ou partie du cycle de l'eau (démarche de modélisation) à des fins variées, se heurte à la difficulté d'appréhension, de description ou de compréhension des phénomènes et des systèmes étudiés. Par conséquent, les représentations de ces systèmes, c'est à dire des modèles, sont nécessairement simplificatrices, réductrices de la complexité naturelle, et donc grossièrement inexactes.

Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la moins inexacte possible.

Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments (Perrin, 2000) :

1. 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. Dans notre cas le système étudié est le bassin versant.
2. l'objectif de modélisation, pour lequel le modèle est développé.
3. 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. La formulation d'un modèle est conditionnée par la connaissance antérieure des processus ou des systèmes considérés, par les idées et l'imagination du modélisateur et par les hypothèses qui sont formulées.

## 2. UTILISATION DES MODELES EN HYDROLOGIE

Trois types d'utilisation des modèles en hydrologie existent (Gaume, 2000):

- **La modélisation comme outil de recherche** : La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.
- **La modélisation comme outil de prévision** : elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, 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.
- **La modélisation comme outil d'extrapolation** : reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un Plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié.

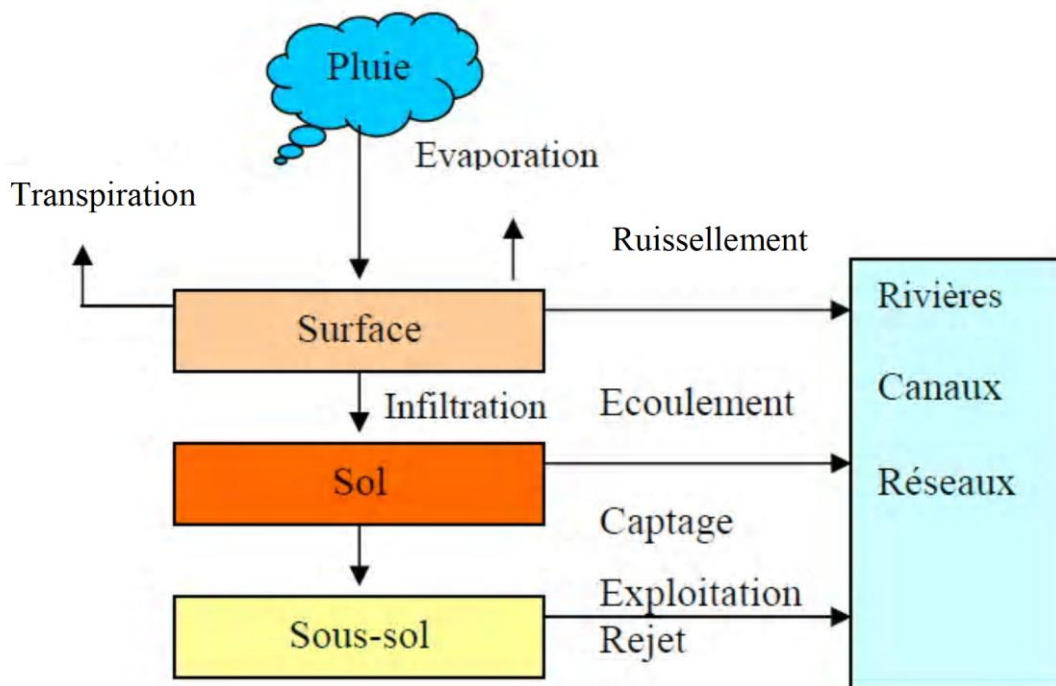
L'utilisation de longues séries de pluies - éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie - couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

La modélisation des phénomènes et comportements hydrologiques des bassins versants est sensée décrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. Elle est sensée fournir aussi des informations sur le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (Barrages, retenues...).

### 3. LA MODELISATION PLUIE-DEBIT

Un modèle pluie-débit est une représentation de la relation qui relie les pluies mesurées sur un bassin versant et le débit mesuré à l'exutoire de celui-ci. Un modèle pluie-débit est décomposé en deux sous modèles : un modèle de production qui permet de séparer la pluie nette (qui va ruisseler) de la pluie brute (on dit que c'est le modèle qui va produire la partie qui va ruisseler) et un modèle de transfert qui permet de transférer cette pluie nette vers l'exutoire du bassin versant.

La représentation de l'ensemble des phénomènes hydrologiques et des systèmes hydrauliques d'une manière simple et précise constitue une modélisation pouvant avoir une interprétation mathématique. En effet, l'ensemble du processus illustré dans la figure III.1 est une structure dynamique dans l'espace et dans une échelle de temps bien définie entre: une entrée: cause (précipitation) et une sortie: effet (écoulement) (Charifi, 2006).



**Figure III.1** : Cycle de l'eau (Charifi, 2006)

Considérons une pluie d'intensité  $P(t)$  tombant sur une surface  $S$  est désignés par  $E(t)$  et  $I(t)$  les intensités d'évaporation et d'infiltration :

Le volume  $W(t)$  d'eau entrée dans le cours d'eau ou le réseau à l'instant  $t$  vérifie l'équation:

$$W(t + \Delta t) - W(t) = S[P(t) - E(t) - I(t)]\Delta t \quad (\text{III.1})$$

Où, en notation différentielle:

$$\frac{dW}{dt} = S[P(t) - E(t) - I(t)] \quad (\text{III.2})$$

Ainsi, l'état initial  $t_0$  et les états successifs du système sont analytiquement traduisibles par une fonction dont les principaux paramètres sont: la transmissibilité, les coefficients des pertes, rétentions, etc. et la propagation des flux de l'écoulement.

### 3.1 Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit

L'objet d'étude des modèles pluie-débit est le bassin versant ; défini relativement à un point sur un cours d'eau, comme l'ensemble des terres drainées par le réseau hydrologique situé en amont de ce point. Le bassin versant est un système ouvert, avec des échanges d'eau et d'énergie avec l'atmosphère, le sous-sol et l'aval du cours d'eau ou la mer.

Les objectifs d'un modèle hydrologique peuvent être de connaître le fonctionnement d'un bassin versant, prévoir des débits en fonction des scénarii météorologiques ou d'aménagement, simuler des débits sur des cours d'eau où les mesures sont insuffisantes, modéliser le transport de polluants. L'applicabilité de la modélisation dépend de l'étalonnage (l'ajustement aux paramètres d'entrée), de la validation (qui permet d'évaluer les possibilités d'utilisation) et de la mesure de la sensibilité du modèle (l'étude de l'influence des variations des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie) (Charifi, 2006). Ceci dit, on peut distinguer les problématiques suivantes :

- Simulation de débits, pour le comblement de lacunes dans les séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques ;
- Prédétermination des débits de crue ou d'étiage qui peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagement dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau ;
- Prévision des crues et des étiages ; il s'agit d'évaluer par avance, connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiage pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource en eau ;
- Influence d'aménagement sur l'hydrologie : on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux.

Ces problématiques font ressortir deux aspects importants, celui de l'évaluation du risque et celui de la gestion de la ressource. La pertinence des réponses que l'on peut leur apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés (Perrin, 2000).

### 3.2 Classification des modèles Pluie-débit

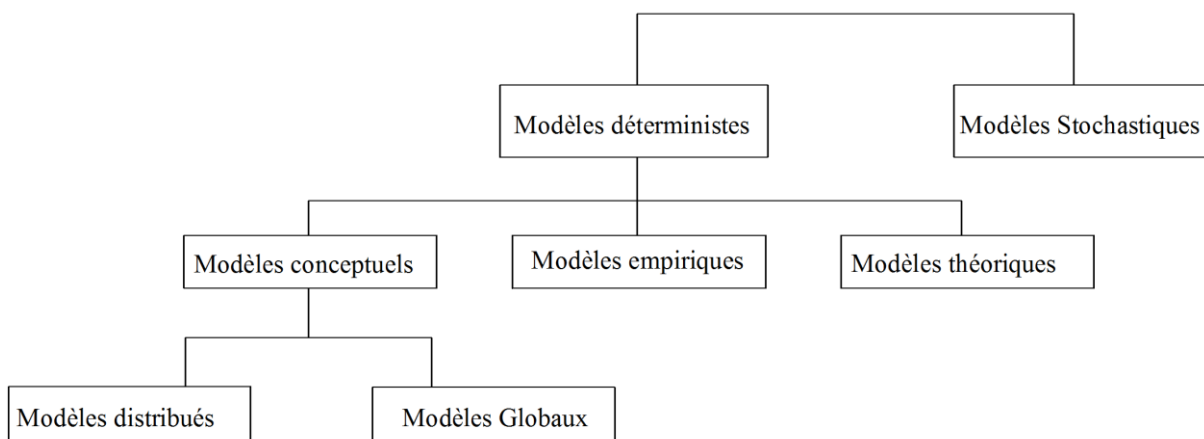
On trouve à travers la littérature de nombreuses classifications des modèles hydrologiques. La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait de la grande diversité des approches entraînant une non moins grande diversité des caractéristiques des modèles. Il est alors presque impossible de distinguer des catégories de modèles nettement distinctes (Perrin, 2000), et ce d'autant plus que la terminologie employée est encore fluctuante.

Dans cette section, les deux types de classifications qui semblent les plus importants sont présentés :

### 3.2.1 Classification de Clarke (1973) et Ambroise (1998)

Clarke (1973) et Ambroise (1998) ont proposé quelques clés de différenciation des modèles (Fig.III.2) :

- **Modèle déterministe ou stochastique** : Un modèle est qualifié de déterministe si c'est une valeur unique qui est associée aux variables d'entrée et aux paramètres. Un modèle est appelé stochastique lorsque ce sont des distributions de probabilité qui sont associées à ces grandeurs.
- **Modèle global ou distribué** : un modèle est dit global lorsqu'il traite le bassin versant comme un objet unidimensionnel. Au contraire, dans le modèle distribué, le bassin est fragmenté en sous unités qui seront prises en compte séparément. Il existe aussi parfois de modèles semi-distribués. Malgré quelques confusions sur cette dernière dénomination, on dira qu'elle caractérise le découpage du bassin en sous-bassins versants élémentaires sur lesquels une approche globale est envisagée.
- **Modèles Empiriques, conceptuels ou théoriques** (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation de système modélisé.
- **Modèles Cinématiques** (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause.
- **Modèle événementiel ou continu** : le mode événementiel, comme son nom l'indique, correspond à représenter le débit pour un événement pluvieux ponctuel. Dans ce cas, on s'intéresse aux phénomènes les plus importants, responsables du pic de crue. La modélisation continue consiste à reproduire la variation du débit dans le temps (une saison, une année). Elle tient compte de l'ensemble des processus hydrologiques.



**Figure III.2** : Classification des modèles Pluie-débit selon Clarke (1973), Ambroise (1998)



### 3.2.2 Classification de Perrin (2000)

Perrin (2000) a proposé une classification simplifiée où trois catégories de modèles, les modèles ‘boite-noire’, les modèles ‘à réservoirs’ conceptuels ou empiriques et les modèles fondés sur la physique sont identifiés.

#### ➤ Les modèles ‘boite-noire’ (blackbox)

Ces modèles ont en commun de ne faire appel qu’aux seules variables d’entrée et de sortie d’un bassin, sans faire intervenir de données sur sa nature physique : le bassin est considéré comme une boîte noire (blackbox). Ils s’appuient sur des fonctions et paramètres globaux sans grande signification physique ou non directement reliables à des propriétés mesurables (Ambroise, 1998), donnant une description purement mathématique du fonctionnement du bassin versant. Dans cette catégorie, les modèles ou sous-modèles qui établissent un pur lien mathématique entre les variables d’entrée et de sortie du système sont classés. Ces modèles sont globaux. Nous pouvons citer, à titre d’exemple, les Modèles ARMAX, Les modèles des réseaux de neurones artificiels et Les modèles de l’hydrogramme unitaire (HU).

L’Hydrogramme unitaire est un modèle mathématique qui se traduit par un hydrogramme de crue caractérisant un bassin versant qui répond à une pluie nette unitaire uniformément répartie sur tout le bassin. L’hydrogramme unitaire est invariant dans le temps et reflète l’ensemble des caractéristiques du BV. Pour construire un hydrogramme unitaire on a besoin de sélectionner des couples averse – crue (crue généralisée sur tout le bassin et averse ayant un corps central bien marqué).

Calcul des ordonnées de l’HU

- Séparer le ruissellement direct de l’écoulement de base;
- Calculer le volume de ruissellement direct  $V_r$
- Calculer la lame d’eau ruisselée :  $L_r = V_r/S$ ;
- Extraire les ordonnées de l’hydrogramme de ruissellement direct pour chaque pas de temps;
- Calculer pour chaque pas de temps les ordonnées de l’HU en multipliant les ordonnées de l’hydrogramme de ruissellement par le rapport  $1/L_r$

#### ➤ Les modèles ‘à réservoirs’, conceptuels ou empiriques

Ces modèles sont schématiquement constitués de réservoirs interconnectés qui assurent la transformation de la pluie en débit. Ils sont moins abstraits que les modèles ‘boîte noire’ dans leur représentation de la transformation pluie-débit, même si leur interprétation physique n’est généralement pas immédiate. Ces modèles sont structurés à partir de deux composants majeurs :

- Un module de production responsable de la détermination des bilans en eau, c’est-à-dire de la répartition de la pluie brute en pluie nette (alimentant le débit), en quantité évaporée et en quantité stockée. Parfois présentes dans les modèles, les fonctions d’échanges en eau, permettant de simuler des pertes et/ou des apports vers ou de l’extérieur, font généralement partie de ce module ;
- Un module de routage ou transfert permettant d’assurer la répartition temporelle de la quantité d’eau transitant dans le cours d’eau.

Les premiers modèles à réservoirs ont été proposés au début des années 60. Ils correspondaient en fait à une simplification des équations de la physique, alors trop complexes pour être utilisées telles qu’elles dans des modèles numériques.

Ils essayaient de représenter de façon assez exhaustive tous les processus pouvant influencer les débits et étaient donc très complexes, avec des structures faisant intervenir de nombreux réservoirs et de très nombreux paramètres : le modèle Stanford (Crawford et Linsley, 1963) comprenait plus de 30 paramètres optimisables, le modèle SSARR plus de 25 paramètres.

Devant les problèmes de calage et d'utilisation de tels modèles, ce sont ensuite des modèles moins complexes (moins de paramètres) qui ont été proposés, c'est le cas des modèles GR3 à 3 réservoirs et 3 paramètres (Edijatno et Michel, 1989) et de ses versions plus récentes et complexes GR4 ou GRHUM (Perrin et al, 2007).

Ces modèles sont la plupart du temps globaux, ou dans quelques cas semi-distribués ou distribué. Dans ces deux derniers cas, le modèle est appliqué sur chaque sous-bassin ou maille et une méthode de propagation permet d'assurer le transfert des flux entre sous-unités vers l'exutoire.

La différence entre les modèles 'à réservoirs' conceptuels et empiriques fait exclusivement référence à la manière dont les modèles ont été développés (Perrin, 2000) :

- La grande majorité des modèles 'à réservoirs' existants sont des modèles conceptuels mis au point à partir de concepts sur la manière dont se passe la transformation pluie-débit. On représente alors dans le modèle de façon simplifiée les processus jugés pertinents pour la modélisation. Le concepteur du modèle introduit des idées a priori, généralement fondées sur les connaissances physiques et l'observation du bassin.
- Beaucoup plus marginaux que les précédents, les modèles empiriques, eux, sont construits seulement à partir des observations hydro-météorologiques (correspondant aux entrées et sorties du modèle), sans avancer d'hypothèses a priori sur la nature des processus dominants ou d'idées préconçues sur la structuration du modèle.

Ces modèles globaux sont simples à utiliser et utiles pour synthétiser l'information climato-hydrologique disponible sur un bassin et simuler l'évolution conjointe des réserves dans chaque compartiment (Ambroise, 1998). Les limites de ces modèles sont cependant nombreuses :

1. L'analogie avec le fonctionnement de réservoirs interconnectés reste une représentation grossière du fonctionnement réel d'un bassin : les relations de vidange utilisées sont empiriques et le plus souvent arbitraires ;
2. Les paramètres utilisés sont généralement sans grande signification physique : n'étant ni mesurables, ni corrélables à des caractéristiques mesurables du bassin ; ils ne peuvent être estimés que par calage du modèle sur des débits mesurés ;
3. Ces modèles ne permettent pas de tenir compte de l'hétérogénéité du bassin et de sa structure, ni d'analyser leur influence sur son fonctionnement.

#### ➤ **Modèles fondés sur la physique**

Contrairement aux modèles précédents qui mettent l'accent sur la représentation du comportement hydrologique final (à l'exutoire), les modèles fondés sur la physique tentent d'utiliser des explications physiques à ce comportement.

Ils utilisent le cadre théorique des équations de la physique (équations aux dérivées partielles), avec par exemple les équations de Saint-Venant pour les écoulements en rivière ou celles de Boussinesq ou Richards pour les écoulements dans les sols saturés ou non saturés. Ils tiennent compte de la variabilité spatiale du bassin par une discrétisation fine à base de mailles sur lesquelles sont appliquées les lois concernées, ce qui permet de donner une représentation des flux et stocks au sein du bassin. Chacune est caractérisée par un ensemble de paramètres, ayant en principe une signification physique et donc mesurables sur le terrain.

### 3.3 Critères de sélection des modèles pluie-débit

Les critères de sélection d'un modèle hydrologique dépendent : Du type de l'approche qu'il utilise, de la qualité des résultats qu'il fournit, de son utilisation, comme par exemple les performances des interfaces graphiques utilisées (sa convivialité), de la portabilité du logiciel, la gestion et la structure des entrées/sorties, ainsi que de la facilité d'intégration et d'interconnexion avec d'autres outils de traitements et d'exploitation des résultats (pré et post-traitement).

Les principaux critères doivent répondre aux exigences suivantes (Henine, 2004):

- Le type d'approche utilisée : Le modèle choisi doit tenir compte des conditions climatologiques et topographiques des bassins à étudier ;
- L'importance des sorties du modèle : Il doit prédire les variables requises ;
- Les différents processus hydrologiques modélisés doivent estimer adéquatement les différentes variables ;
- Disponibilité des entrées du modèle ;
- La disponibilité du modèle dans le domaine public. Si non, on doit rajouter le critère du prix du modèle. Les prix des modèles hydrologiques varient très considérablement.

### 3.4 Présentation de quelques modèles pluie-débit

Dans cette section nous allons présenter une petite description des différents modèles disponibles dans le domaine public à analyser. L'objectif de cette analyse est de ressortir vers la fin avec un modèle hydrologique qui satisfait l'ensemble des critères de sélection.

#### 3.4.1 Modèle spatialisé fondé sur la physique : le modèle SHE (Système Hydrologique Européen)

Le SHE offre un cadre informatisé modulaire qui permet l'intégration d'ensembles de sous-modèles mis en oeuvre pour chacun des phénomènes physiques qui entrent en jeu. En 1995, il existait deux versions du SHE: une version universitaire de recherches et d'applications limitées, utilisée par University of Newcastle-upon-Tyne (GB), et un progiciel véritable commercialisé par DHI sous le nom de MIKE-SHE.

Le « coeur » comprend les modules suivants: fonte des neiges, interception-évapotranspiration par la couverture végétale, écoulement de surface traitant à la fois le ruissellement sur la surface et l'écoulement dans le réseau de cours d'eau par une approximation de l'onde diffusive, écoulement vertical dans la zone non saturée, écoulement quasi tridimensionnel dans la zone saturée (nappe) fondé sur la résolution numérique de l'équation non linéaire de Boussinesq, échanges entre nappe et réseau de cours d'eau tenant compte des variations spatiales d'imperméabilité du lit des rivières, convection-dispersion, simulant le transport, diffusion et dispersion des solutés conservatifs provenant de sources diffuses ou ponctuelles.

Tous les modules simulent des phénomènes non stationnaires, c'est-à-dire qu'ils reproduisent l'évolution des variables (niveaux, débits, pressions, concentrations...) dans le temps. Les équations sont fondées sur les lois de conservation (de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie) exprimées en général sous forme d'équations différentielles partielles non linéaires. Leur résolution numérique se fait à l'aide de la méthode des différences finies.

Pratiquement, un bassin versant à simuler est discrétisé en un réseau (maillage) horizontal de points de calcul, identique pour les modules de surface et pour la zone saturée (nappe). Les colonnes de sol non saturé, discrétisées à leur tour par un maillage vertical, lient les deux réseaux horizontaux. Les cours d'eau suivent conceptuellement les lignes de maillage sur la surface (Charifi, 2006). La structure du modèle composé des modules de mouvement de l'eau est reproduite sur la figure III.3.

Les applications typiques de MIKE-SHE sont: planification de l'aménagement de bassins hydrographiques; aide à la gestion et à l'exploitation des ressources en eau d'un bassin; irrigation, drainage et assainissement agricoles; études des pollutions agricoles et industrielles ; études d'impact des aménagements sur l'environnement. Les résultats fournis par le progiciel consistent en images instantanées en fonction des coordonnées spatiales ou en séries temporelles aux nœuds de maillages de toutes les variables dépendantes (teneur en eau, pressions, profondeurs, vitesses, débits, concentrations...) (Charifi, 2006). Une série des images typiques dont dispose l'utilisateur pour extraire les informations à l'aide du progiciel est montrée sur la figure III.3.

Cependant, ces modèles physiques dont les avantages théoriques sur des modèles plus simples, sont en pratique loin d'être vérifiés, voire inexistantes (Perrin, 2000). Du fait de la complexité des équations, chaque maille dépend d'une grande quantité de paramètres, dont la mesure est, économiquement et techniquement, souvent impossible à l'échelle de discrétisation.

L'utilisation de cette catégorie de modèles à l'échelle d'un bassin se heurte à des contraintes limitant sérieusement leurs avantages de principe (Beven, 1989) : il s'agit de modèles complexes à élaborer et lourds à exploiter, nécessitant des temps de calcul encore très importants, et faisant appel à un grand nombre de données ; ce qui fait réserver leur emploi à des objectifs de recherche. De plus, complexité du modèle n'est pas garantie de précision des résultats (Ambroise, 1998).

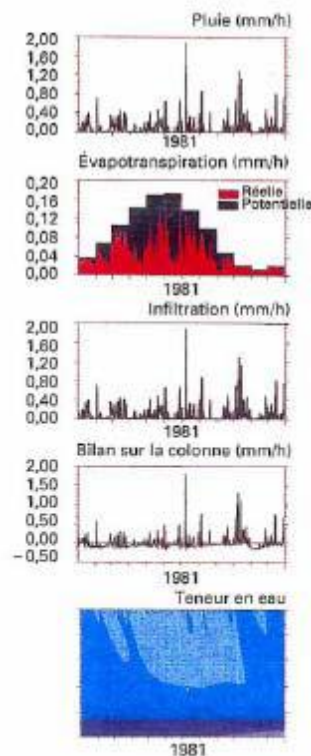
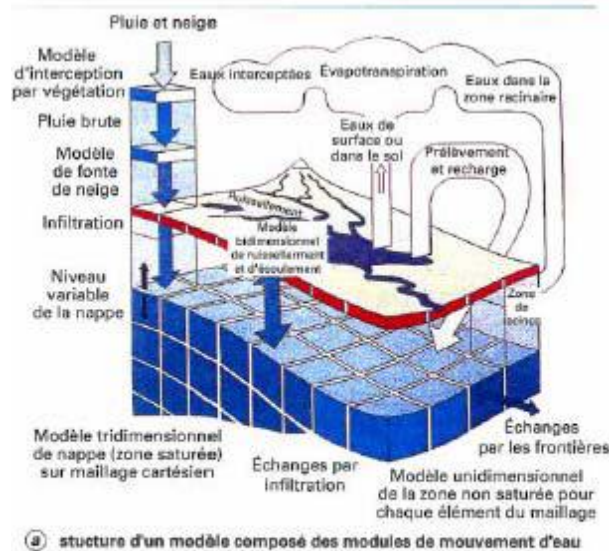


Figure III.3: Code MIKE-SHE (Charifi, 2006)

### 3.4.2 Modèles globaux (IHACRES, Orstom)

#### ➤ Modèle IHACRES

Le modèle IHACRES (Identification of unit Hydrographs and Component flow from Rainfalls, Evaporation and streamflow data) est le résultat d'une collaboration entre le CEH (Centre for Ecology and Hydrology) du Royaume-Uni et l'Université Nationale de l'Australie (ANU). Ce logiciel peut être appliqué pour des investigations dans des petits bassins versants équipés pour des études spéciales ou pour des études régionales dans des grands bassins.

Le modèle IHACRES utilise la fonction de transfert à partir de trois modules de calcul, en séries, comme indiqué sur la figure II.3. Il permet la simulation des écoulements continus ou instantanés pour n'importe quel bassin versant et n'importe quelle donnée temporelle supérieure ou égale à 1 min.

Des études publiées (Maftai, 2002) ont démontré qu'il est possible d'aller d'un intervalle de 6 min pour des bassins versants de 1 ha (0.01 km<sup>2</sup>) aux données mensuelles pour les bassins versants de 10000 km<sup>2</sup>.

Dans son mode de séparation des hydrogrammes, le logiciel IHACRES comporte trois modèles de stockages conceptuels : Le modèle non-linéaire qui détermine les précipitations effectives et deux modèles de stockage en parallèle (stockage de surface et souterrain) qui assure le transfert des précipitations effectives au cours d'eau (Fig.III.4).

Ce modèle demande peu de données : les précipitations, un hyétogramme (pour le calage), la température ou l'ETP, et les dimensions du bassin versant. En sortie du modèle on récupère : un hydrogramme de crue modélisé, l'humidité du bassin et les incertitudes indicatives associées aux paramètres d'hydrogramme unitaire (Henine, 2004).

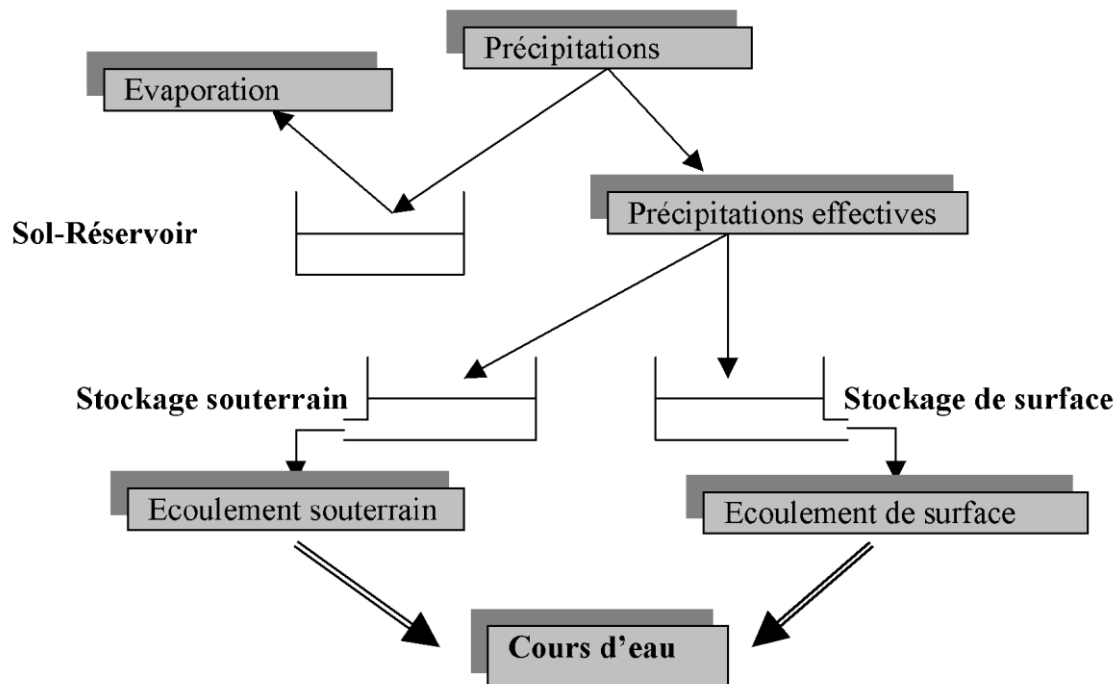


Figure III.4: Structure du modèle IHACRES (Maftai, 2002)

#### ➤ Modèle Orstom

Le Modèle ORSTOM est un modèle global basé sur l'application de la méthode de l'hydrogramme unitaire. Le Modèle ORSTOM permet le calcul des caractéristiques de forme de la crue. On applique au volume de la crue le diagramme de distribution moyen du bassin pour obtenir l'hydrogramme de crue résultant de l'averse considérée (CIEH et al, 1996).

**La fonction de production**, permet d'évaluer le volume de la crue à partir de la pluie ponctuelle mesurée à une station de référence :

$$V = P_j * K_a * K_r * S \quad (\text{III.3})$$

Avec:

Ka : le coefficient d'abattement

Pj: la hauteur de pluie journalière

Kr: le coefficient de ruissellement

S : la superficie du bassin versant

**La fonction de transfert** traduit l'amortissement de la crue vers l'aval.

Le coefficient de pointe  $\alpha = Q_{\max} / Q_{\text{moy}}$  est le rapport du débit maximum de la crue et du débit moyen de la crue. Ce dernier est égal au volume de la crue divisé par le temps de base Tb:

$$Q_{\text{moy}} = V / T_b \quad (\text{III.4})$$

D'où

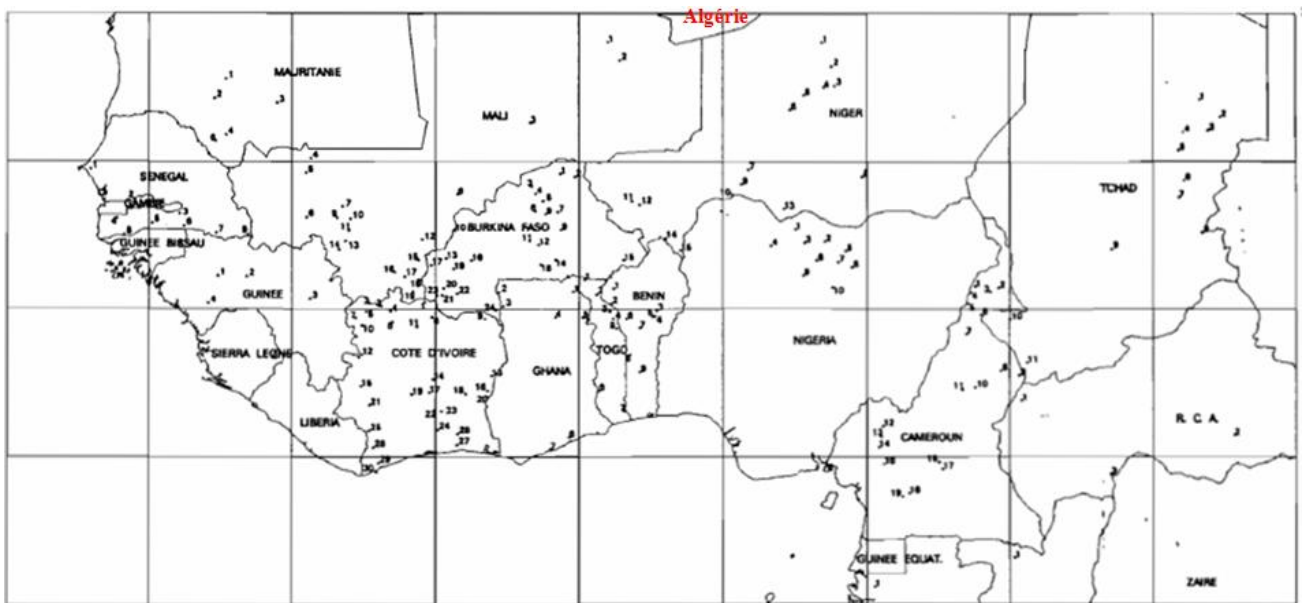
$$Q_{\max} = \alpha * V / T_b. \quad (\text{III.5})$$

On obtient finalement :

$$Q_{\max} = P_j * K_a * K_r * S * \alpha * T_b^{-1} \quad (\text{III.6})$$

- **Exemples de sites d'application du Modèle ORSTOM**

Ce modèle a été appliqué sur plusieurs bassins versants de la région sahélienne et subdésertique notamment dans les bassins versants des pays suivants: Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Centrafrique, Côte d'Ivoire, Ghana, Guinée, Mali, Mauritanie, Niger, Nigéria, Sénégal, Tchad et Togo (Fig.III.5) (CIEH et al, 1996).



**Figure III.5 :** Les sites d'application du Modèle ORSTOM (CIEH et al, 1996)

Les résultats obtenus par l'application de ce modèle dans ces régions sont satisfaisants. Ce modèle n'a pas été appliqué en Algérie.

### 3.4.3 Modèles empiriques : Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)

Le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

#### a)-Mode de développement

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies). Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet, 2005):

- représentation globale du bassin versant,
- approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements,
- augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles
- évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle.

#### b)-Principales caractéristiques

Comme tout modèle hydrologique, les modèles GR opèrent une triple globalisation (triple considération de moyenne) du système bassin versant:

- au niveau des processus : les modèles GR proposent des relations comportementales simples à l'échelle du bassin, mises au point empiriquement et sans liens directs avec la physique des processus à petite échelle et pouvant représenter une moyenne de plusieurs processus;
- au niveau de l'espace : les modèles GR sont globaux, c'est-à-dire que, tout en reconnaissant l'extraordinaire hétérogénéité de tout bassin versant, ils considèrent le bassin versant comme un tout. Les tentatives de distribution progressive n'ont, jusqu'à présent, pas abouti à des résultats intéressants. C'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité;
- au niveau du temps : les modèles GR ont été développés pour des pas de temps de fonctionnement spécifiques : annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR4J). Les différents modèles travaillent donc sur des moyennes temporelles. Notons que le développement d'un modèle au pas de temps horaire est en cours (Mathevet, 2005) et actuellement, le modèle journalier est appliqué au pas de temps horaire. Le modèle GR3H (horaire) utilisé dans certaines applications développées au Cemagref d'Aix-en-Provence (Fourmigué et Lavabre, 2005) correspond au modèle proposé par Edijatno (1991) au pas de temps journalier.



Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle. Les modèles GR ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse (Perrin et al, 2001).

- **Exemples de sites d'application des Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)**

Au cours de leur développement, les modèles GR ont tous été testés sur de larges échantillons de plusieurs centaines de bassins, particulièrement en France mais également aux Etats-Unis, en Australie, au Brésil, au Mexique, en Algérie et en Côte d'Ivoire (Perrin et al, 2007).

### En Algérie

#### ➤ *Cas de bassin de la Cheffia*

Ce modèle testé dans le bassin algérien de la Cheffia (situé dans le Nord-Est algérien) a donné des bons résultats pour les périodes sèche et humide, et a permis une bonne reconstitution des débits de pointes, nécessaire dans le cas de la prévision des crues (Benkaci & Dechemi, 2004).

#### ➤ *Cas de bassin versant d'Oued Ouahrane*

Ce modèle a été utilisé pour prédéterminer les débits de crue dans le bassin versant d'Oued Ouahrane. Les résultats obtenus par l'application de ce modèle sont satisfaisants (Zekouda, 2009).

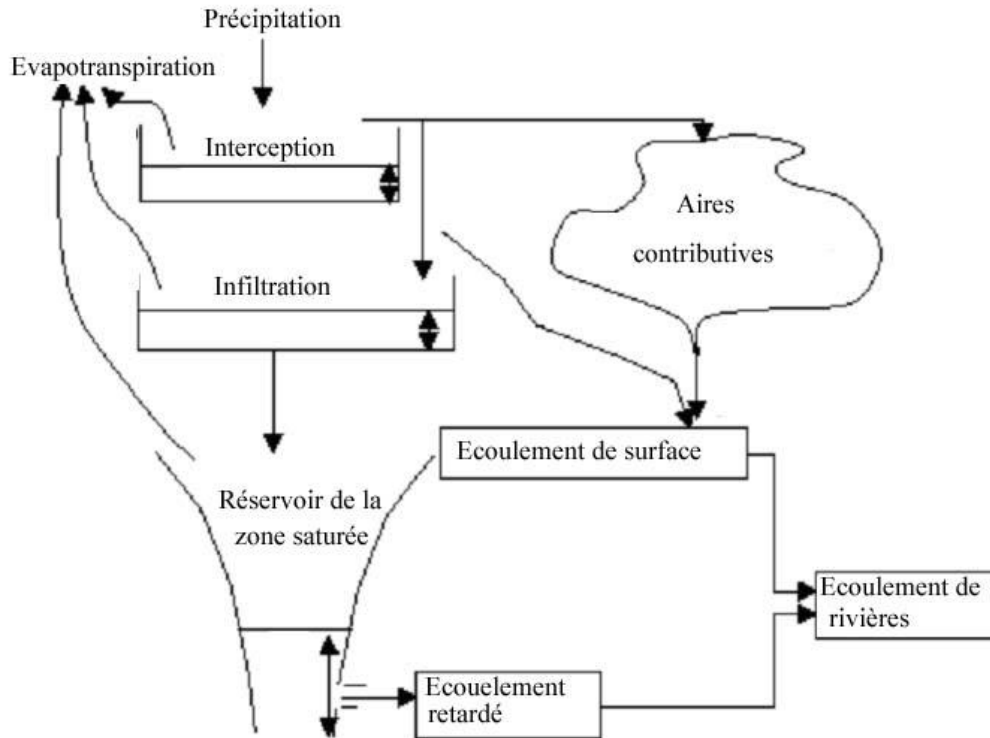
#### ➤ *Cas des bassins versants de la Soummam et de l'Isser*

Le modèle a été appliqué sur les bassins versants de la Soummam et de l'Isser pour la simulation de la transformation de la pluie en débit. Vu les résultats satisfaisants, l'information contenue dans les bassins versants étudiés a été utilisée pour expliquer les paramètres de calage du modèle par les régressions linéaires (Charifi, 2006).

### **3.4.4 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé : TOPMODEL**

TOPMODEL a été développé dans les années 70 par Beven and Kirkby (1979) à l'Université de Lancaster.

TOPMODEL est un modèle semi-distribué destiné à reproduire le comportement hydromorphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore utilisé et amélioré car sa relative simplicité et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement. Ce modèle prédit, à chaque pas du temps, la distribution spatiale du contenu en eau au sein des différentes mailles du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant considéré. Il est basé sur les concepts originaux de déficit en eau du sol par rapport à la saturation et à l'index topographique. Cette idée provient du fait que, depuis quelques années, la participation des écoulements souterrains aux variations des débits des rivières, même en période de fortes précipitations a été reconnue comme étant capitale (Maison, 2000). L'index topographique est utilisé pour déterminer, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau destinée au ruissellement et celle restant pour l'infiltration. La structure de ce modèle est illustrée sur la figure III.6.



**Figure III.6 :** Structure du modèle TOPMODEL (Henine, 2004)

TOPMODEL repose sur un découpage du bassin versant en sous-bassins homogènes (mailles carrées). Le sol et le sous-sol sont représentés par des réservoirs successifs, d'où le caractère conceptuel de ce modèle. Ce modèle, relativement puissant nécessite toutefois, bien évidemment, un certain nombre de données pour fonctionner, parmi lesquelles, nous notons les pluies horaires, l'évapotranspiration potentielle une cartographie de la transmissivité  $T_0$  et de la conductivité hydraulique verticale mesurée en surface,  $K_0$ . En effet, le modèle utilise une loi de décroissance de la conductivité avec la profondeur du type :

$$K_s(z) = K_0 e^{-fz} \quad (\text{III.7})$$

Où,

- L'axe Z est orienté positivement vers le bas ;
- $f$  est un facteur de décroissance.

### 3.4.5 Modèles semi-spatialisés (HEC, CEQUEAU, MIKE BASSIN et SWAT)

Il existe plusieurs modèles semi-distribués (ou semi-spatialisés), l'ensemble des modèles sélectionnés peut être utilisé avec succès dans le cadre du projet, l'avantage que présentent les modèles semi-distribués est qu'ils disposent d'une structure à base physique et ils demandent moins de données que les modèles distribués. Le modèle HEC-HMS est un exemple de ce type de modèles connu par ses performances de calcul et par la qualité de ses résultats ; il est disponible gratuitement dans le domaine public.

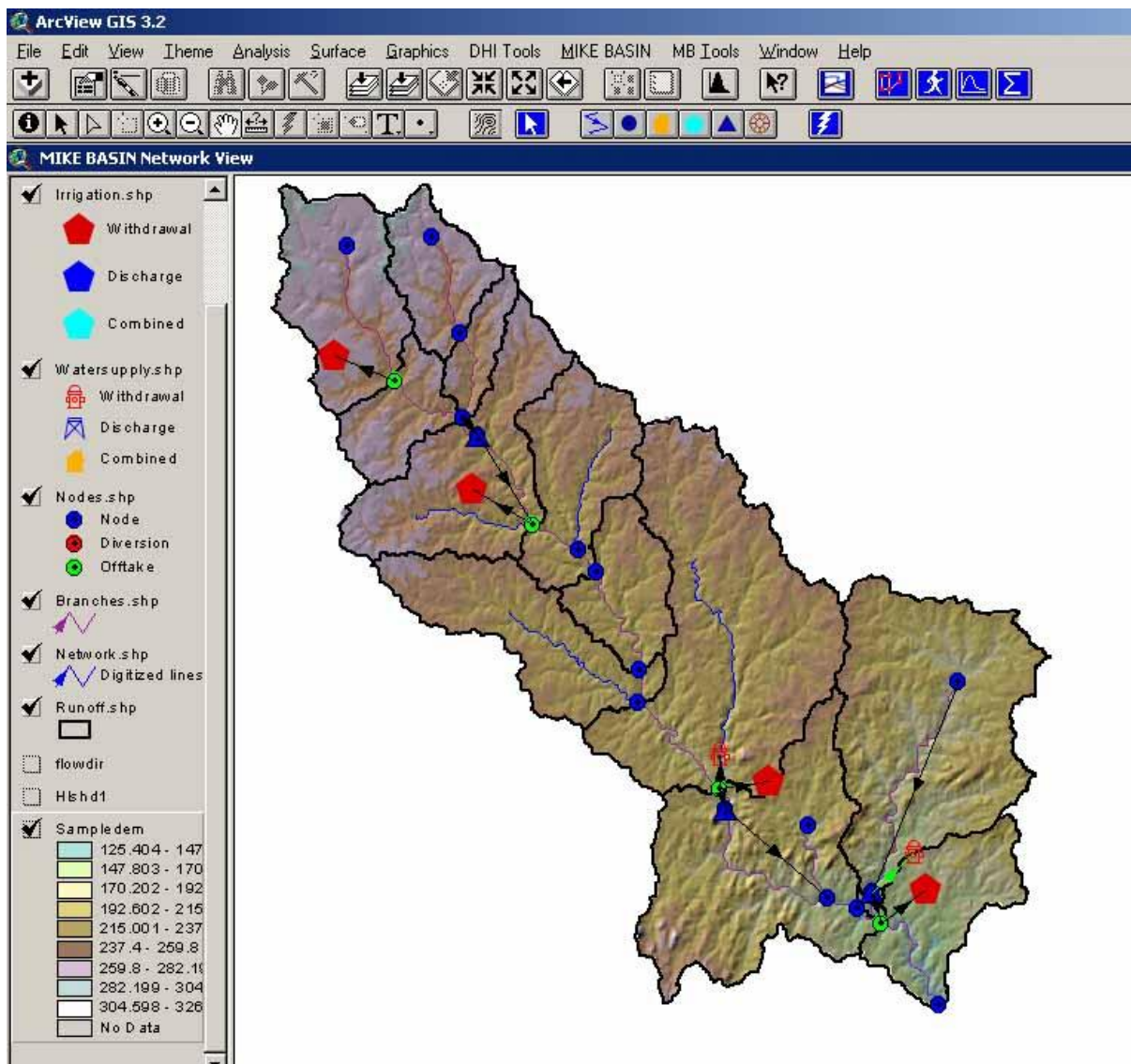
#### ➤ Le modèle MIKE BASSIN

Le modèle MIKE BASSIN a été élaboré au Danisch Hydraulic Institute. C'est un instrument de gestion des ressources en eau fondé sur une forte représentation par bassin versant des points d'eau et des utilisateurs d'eau potentiels (DHI WATER AND ENVIRONMENT, 2003).

Ce logiciel permet d'optimiser la gestion de l'utilisation des ressources en eau disponibles en relation avec les contraintes environnementales liées au sol, à la terre, à l'agriculture, à l'ingénierie et à la société. MIKE BASSIN permet d'effectuer une modélisation simple et intuitive des processus hydrologiques et hydrauliques à l'échelle du bassin versant. La modélisation hydrologique est basée sur une transformation pluie-débit. La modélisation hydraulique prend en compte le réseau fluvial (rivière, barrage, réservoirs) ainsi que la ressource souterraine (nappes). L'outil permet de décrire les demandes multisectorielles (domestique, industrielle, agriculture, production d'électricité, navigation, environnementale...) ainsi que les règles de priorité entre chacune de ces différentes utilisations (Henine, 2004).

### a)-L'interface sous Système d'Information Géographique

MIKE BASSIN fonctionne sur la base d'un réseau fluvial digitalisé généré directement sur l'écran dans le logiciel Arcview. Toutes les informations relatives à la configuration du réseau fluvial, des barrages, de la position des utilisateurs d'eau, des prises d'eau ainsi que les prises de retour sont également données à l'écran (Fig.III.7).



**Figure III.7** : Interface du modèle MIKE BASSIN sous le SIG Arcview (Henine, 2004)

### b- Les données de base

Les données de base du modèle consistent en des séries chronologiques du ruissellement en chaque branche (rivière) générée par le sous-bassin drainant. Les autres données relatives aux caractéristiques de barrage et aux règles de fonctionnement de chaque réservoir, aux séries chronologiques des données météorologiques et aux données pertinentes à chaque schéma d'approvisionnement en eau ou de périmètre d'irrigation telles que les exigences de dérivation et autres informations sur les débits de retour sont fournies par des fichiers complémentaires. Sachant que le modèle MIKE BASIN est une extension de Arcview, les informations géographiques du bassin peuvent être incluses dans la simulation des ressources en eau, la structure du modèle du bassin est éditée par Arcview.

#### ➤ Le modèle CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU, développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau (INRS-Eau) depuis 1971, est un modèle déterministe distribué à bilan, qui prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant par le découpage de celui-ci en éléments de même dimension. Cette discrétisation spatiale du bassin versant permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes, de prévoir l'effet de toute modification physique du bassin versant et de prendre en compte des réservoirs réels ou fictifs.

Le découpage dans l'espace d'un bassin versant peut être très varié dans sa forme et sa densité. Pour le modèle CEQUEAU, le bassin versant est découpé en surfaces carrées de dimensions semblables appelées « carreaux entiers » c'est le premier découpage. Un deuxième est ensuite nécessaire pour reproduire le cheminement de l'eau entre les carreaux entiers et vers la rivière. Ceci se fait en subdivisant chaque carreau entier en « carreaux partiels » à l'aide des lignes de partage des eaux (Morin):

- **Le premier découpage** délimite le bassin versant en surfaces élémentaires que nous appellerons "carreaux entiers". La dimension à donner aux "carreaux entiers" dépend principalement de la superficie du bassin versant étudié, des données météorologiques disponibles, de la topographie du terrain, etc. Les données physiographiques nécessaires pour chaque "carreau entier" sont l'altitude, les pourcentages de forêts, de lacs et de marais. Ces données sont déterminées à partir des cartes topographiques du bassin versant étudié ou à l'aide d'un système d'information géographique.

- **Le deuxième découpage** consiste à subdiviser les carreaux entiers en carreaux partiels. Ces éléments sont le résultat de la subdivision des "carreaux entiers" en fonction des lignes de partage des eaux. On compte jusqu'à quatre "carreaux partiels" par "carreau entier". Les données nécessaires pour ces éléments partiels sont : Le sens d'écoulement de l'eau et son pourcentage de superficie par rapport au "carreau entier" qu'il subdivise.

Le modèle compte deux parties principales visant à décrire le mieux possible l'écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant. La première partie concerne l'écoulement vertical de l'eau appelée **fonction de production** qui transforme les précipitations réelles en précipitations utiles sur chaque carreau entier et à chaque pas du temps. La schématisation de ce processus est représentée par un ensemble de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle du pas de temps de la simulation, les différents transferts de masse (Fig.III.8). Et la deuxième partie concerne le transfert de l'écoulement dans le réseau de drainage appelé **fonction de transfert** qui assure le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels (Fig.III.9).

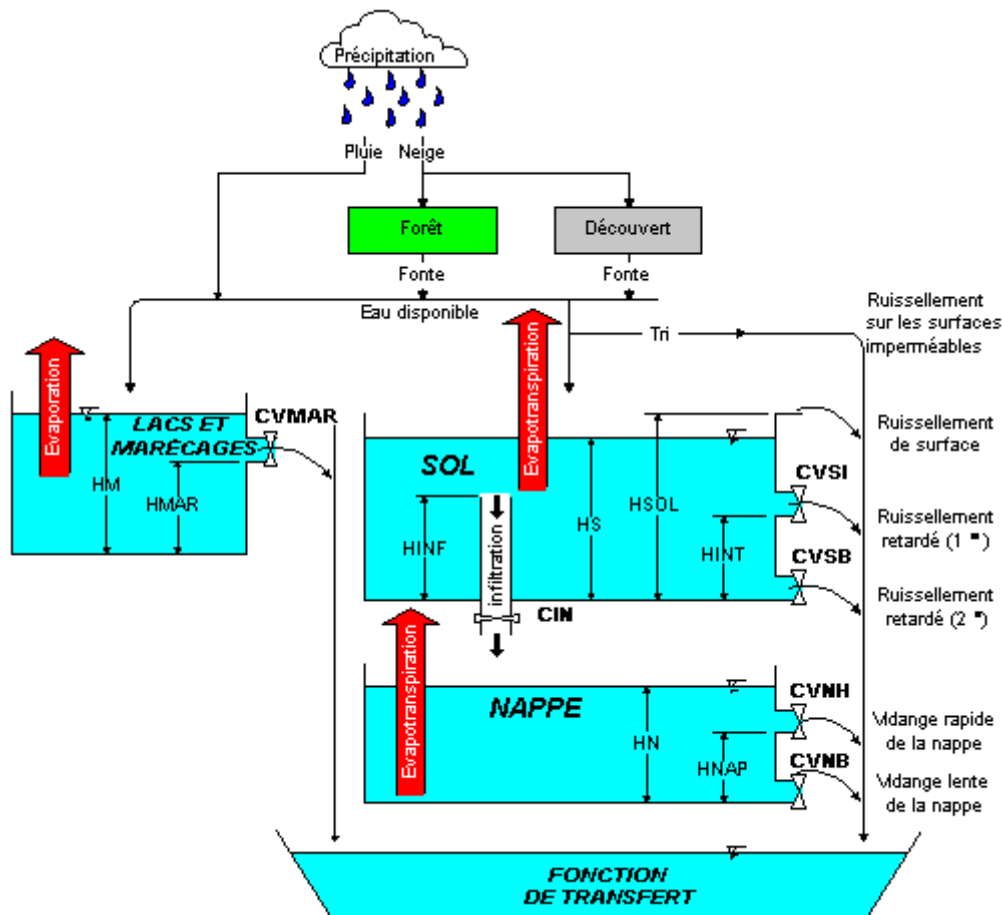


Figure III.8 : Fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU (Morin)

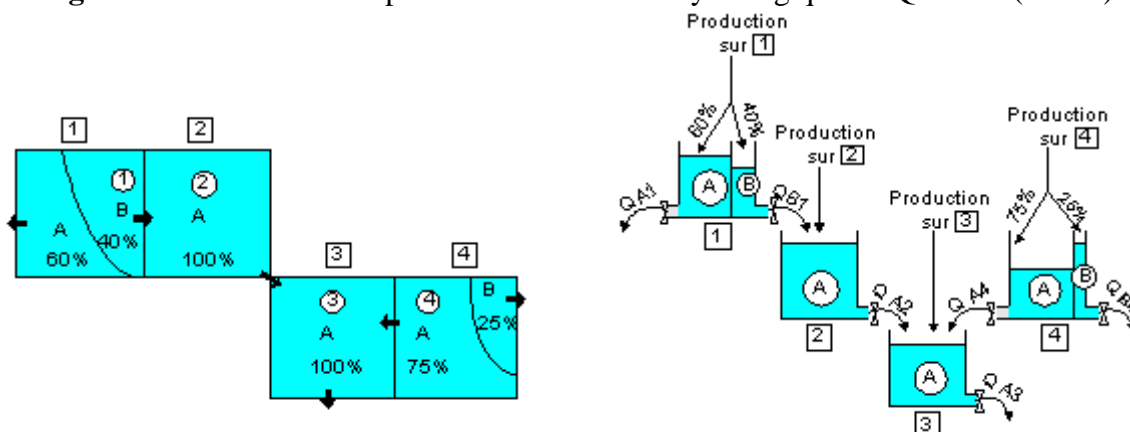


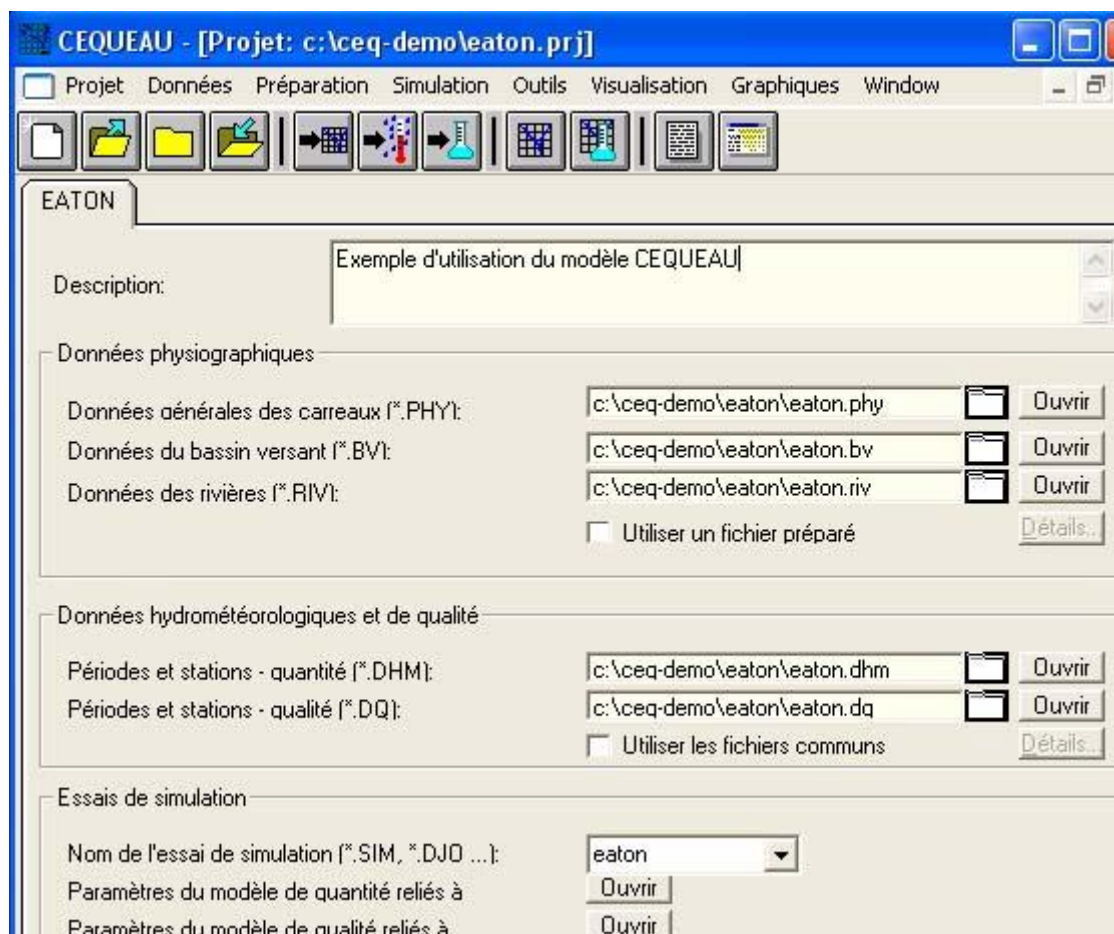
Figure III.9 : Fonction de transfert du modèle CEQUEAU (Morin)

Le modèle CEQUEAU dispose d'une interface graphique conviviale (Fig.III.10). Les informations nécessaires à la simulation (données physiographiques et hydrométéorologiques ainsi que tous les paramètres liés à la simulation) y sont structurées sous la forme de projets pouvant être sauvegardés sur le disque. Chaque projet réfère à un ou plusieurs bassins versants et peut comprendre plusieurs essais de simulation. Ce concept permet une gestion aisée des données d'entrée du modèle ainsi que des résultats de simulation que l'utilisateur désire conserver.

Les dernières modifications apportées pour la version 4.0 ont permis de faciliter et d'améliorer grandement l'utilisation de ce logiciel, cette version permet de :

- Choisir la langue d'affichage ;

- De simuler pour des pas du temps de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12 heures ou journaliers ;
- Prévoir des débits en temps réel avec mise à jours ;
- Traiter plusieurs bassins versants simultanément ;
- Offrir un nombre accru de types de graphiques permettant une analyse et une visualisation plus éclaircies des résultats et par conséquent une meilleure prise de décisions ;
- Introduire la variation spatiale des principaux paramètres de la fonction de production.



**Figure III.10 :** Interface graphique du modèle CEQUEAU

### a-Données météorologiques

En plus des données physiographiques des carreaux entiers, le modèle requiert sur chacun de ces carreaux, à chaque pas de temps, les données suivantes : les précipitations liquide et/ou solide ainsi que les températures maximales et minimales de l'air.

Ces données n'étant disponibles qu'à un nombre limité de stations, le modèle permet l'utilisation de différentes méthodes d'interpolation de données et combler ainsi les lacunes. Les méthodes d'interpolation utilisées avec le logiciel CEQUEAU sont : la régression, la pondération et la méthode des polygones de Thiessen.

En général, les données nécessaires sont :

#### Pour la simulation :

- Les températures maximales et minimales de l'air ;
- Les précipitations liquides ou solides ;
- Débits observés pour les besoins de calibrage du modèle.

Pour la prévision à court terme :

- Les prévisions de la température de l'air aux stations météorologiques ou en des points de grille ou moyennes sur le bassin versant ;
- Les prévisions des précipitations aux stations météorologiques ou en des points de grille ou moyennes sur le bassin versant.

Pour la prévision à moyen terme :

- Données météorologiques (température de l'air et précipitation) historiques moyennes du bassin versant.

- **Exemples de sites d'application du modèle CEQUEAU**

Durant la dernière décennie, plusieurs applications sur des rivières du Québec, de la France et de l'Algérie ont été faites. Ces applications ont concernés des bassins versants variant de 5 km<sup>2</sup> à 100 000 km<sup>2</sup>. Le modèle CEQUEAU a été l'un des onze modèles testés sur six rivières de six pays différents dans le cadre de l'inter-comparaison des modèles hydrologiques parrainée par l'Organisation Météorologique Mondiale, (WMO, 1986).

Dans cette section nous allons présenter quelques sites dans le monde où le modèle CEQUEAU a été appliqué.

**En Tunisie**

➤ *Cas de bassin versant de l'oued Miliane*

Le modèle CEQUEAU a été appliqué pour la reconstitution des débits moyens journaliers et mensuels de quatre stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Miliane ainsi que les niveaux moyens journaliers dans le barrage Bir Mcherga. Le modèle a donné de bons résultats (Ayadi et Bargaoui, 1999).

**A Burkina Faso**

➤ *Cas de la rivière Nakambé*

Au Burkina Faso, pour faire face à la construction incontrôlée de petits réservoirs superficiels et leurs conséquences sur l'alimentation en eau des populations et l'agriculture, une politique de gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des grands bassins hydrographiques a été mise en oeuvre. Dans ce cadre, une approche intégrée et quantitative, visant à évaluer et prévoir l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau de surface en fonction des aménagements existants et projetés, a été menée. Elle avait, entre autre, pour objet la mise en oeuvre du modèle CEQUEAU sur le bassin versant du Nakambé (35 000 km<sup>2</sup>) avec la modélisation des écoulements et du bilan hydrologique des principales retenues, soit 27 au total. L'application du modèle a été présentée sur la partie Nord du bassin versant du Nakambé, à la station de Wayen (20 800 km). Le modèle offre la possibilité de quantifier avec une précision suffisante, et à des échelles de temps pertinentes, l'impact des aménagements sur les écoulements en aval du bassin (Desconnets et al. 1998).

**AU CANADA**

➤ *Cas du bassin versant de la rivière Moisie*

La rivière Moisie située sur la basse Côte-Nord du Saint-Laurent a un bassin versant d'une superficie de 19 248 km<sup>2</sup> orienté nord-sud (Québec) (Morin et Slivitzky, 1992).

Des « carreaux » de 20 km par 20 km ont été utilisés pour la discrétisation du bassin versant qui s'étend sur une longueur de 320 km et qui a largeur moyenne d'environ 70 km. Les données météorologiques des stations Sept-Iles, située au sud du bassin versant, et de Wabush, située au nord du bassin versant, ont été utilisées. La calibration du modèle a été faite pour la période 1966 à 1989 en utilisant les débits mesurés à l'aval de la rivière Moisie près de Septlles.

L'analyse de ces résultats montre que le modèle hydrologique tel qu'ajusté permet de reproduire adéquatement les débits de la rivière Moisie, à partir des données météorologiques des stations Sept-Iles et Wabush.

### ➤ Le Modèle SWAT

#### a) Généralités

Développé par Jeff Arnold pour l'USDA Agriculture research service en 1999, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle conceptuel physique semi-empirique distribué permettant de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques. La version 99.2 du modèle reste couplée pour l'instant avec la version Arcview 3.2 anglophone (affublée de l'extension Spatial Analyst 1.1), bien que des efforts de développement tentent de l'adapter à la plate-forme Arcgis (Renaud, 2004).

Il a été conçu pour de grands bassins versants allant de quelques centaines de km<sup>2</sup> à plusieurs milliers de km<sup>2</sup>. Il est largement utilisé aux Etats-Unis et dans certains pays européens (Renaud, 2004).

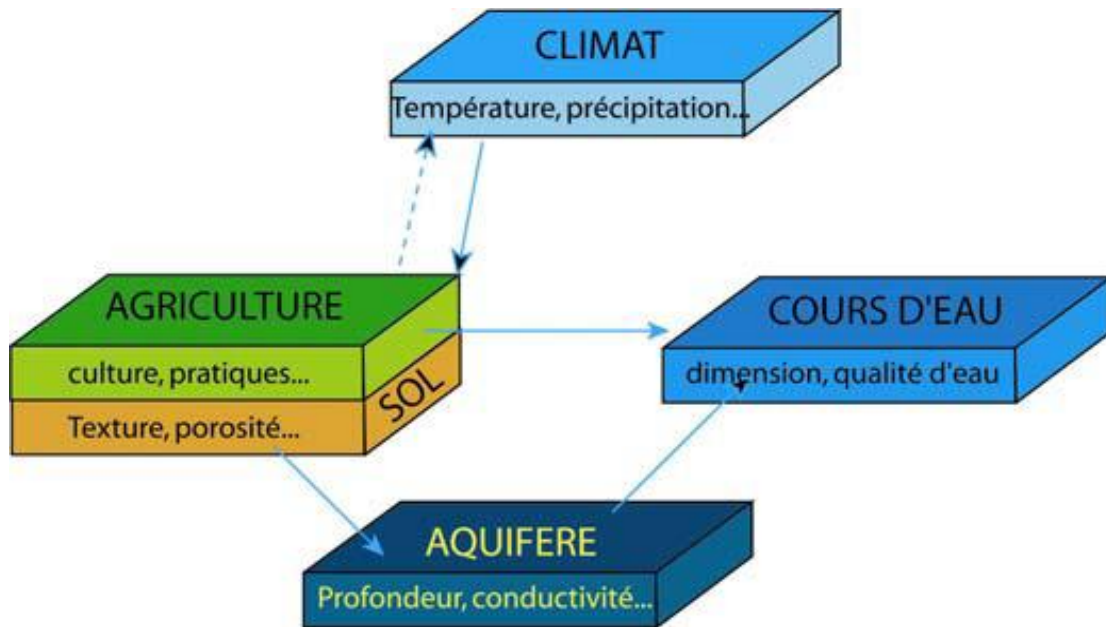
Le couplage avec le SIG permet de gérer des données de type raster, vecteur et alphanumériques. Il facilite et automatise la préparation des données d'entrées, il rend plus convivial la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation. Le paramétrage des données numériques par l'utilisateur et la visualisation des résultats s'effectuent par le biais des formats « .Dbase ». Cependant, les fichiers de sorties sont convertis par SWAT en format ASCII possédant leurs propres structures. Plus d'une centaine de fichiers sont requis pour le bon fonctionnement du modèle : modèle numérique de terrain, pédologie, réseau hydrographique, données climatiques de températures et précipitations, occupation du sol, pratiques agricoles, etc... De nombreuses valeurs sont définies par défaut pour des conditions américaines, mais un grand nombre d'entre elles devront être adaptées au contexte français et local (Renaud, 2004).

La partie paramétrage du bassin versant est assez longue, au vu du nombre conséquent de données d'entrées nécessaires. La visualisation des résultats se fait essentiellement sous forme graphique à partir de bases de données, mais aussi sous forme cartographique à l'échelle du sous bassin versant (Renaud, 2004).

#### b) Principes

Comme tout modèle hydrologique, SWAT reproduit le cycle de l'eau sur le bassin versant de manière simplifiée. Le fonctionnement du modèle est schématisé par trois gros modules principaux qui communiquent entre eux par la circulation d'eau (Fig. III.11).





**Figure III.11:** Fonctionnement schématisé de SWAT (d'après Duros, 2001)

Le bilan hydrique contrôle les différents processus hydrologiques se déroulant sur le bassin :

$$SW^t = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - E_{ti} - P_i - Q_{ri}) \quad (\text{III.8})$$

$SW^t$  = contenu final en eau du sol (mm)

$SW$  = eau disponible pour les plantes (mm)

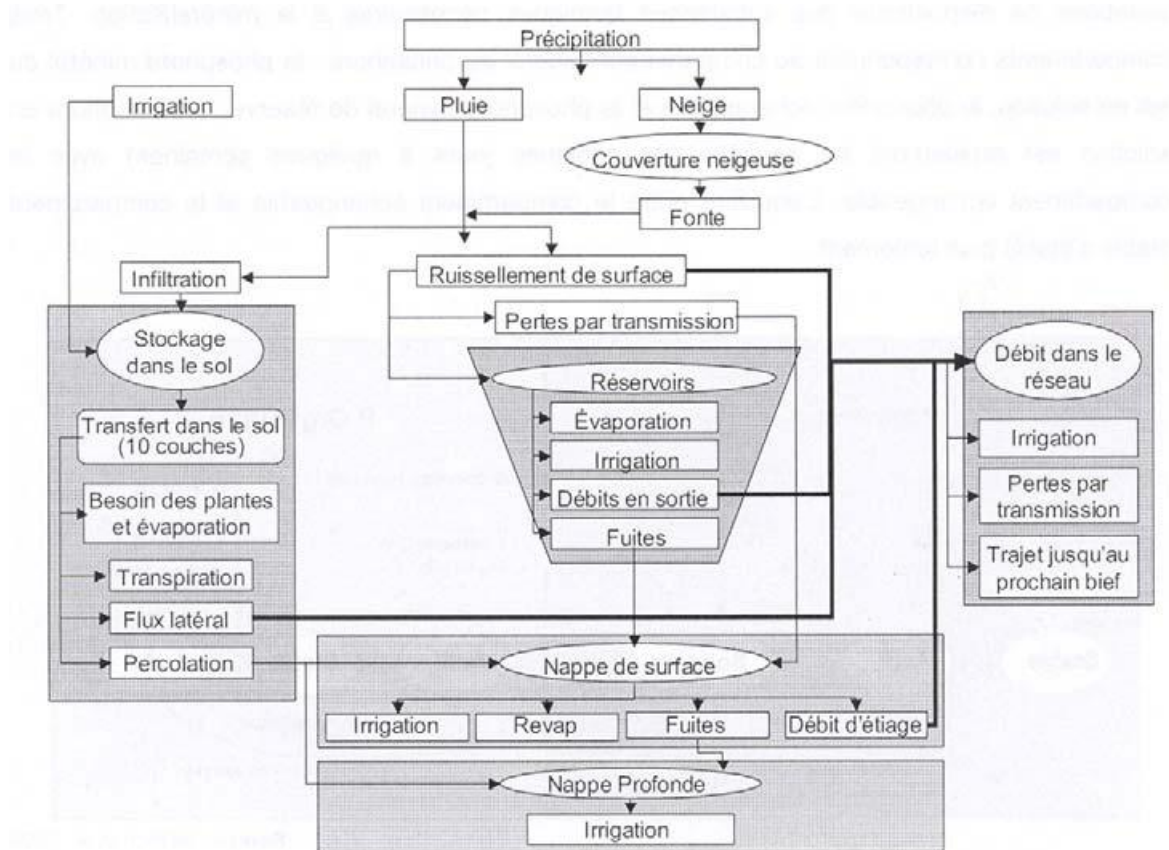
$R_i$  = précipitation (mm)

$Q_i$  = ruissellement de surface (mm)

$P_i$  = percolation (mm)

$Q_{ri}$  = débit d'étiage (mm)

$E_{ti}$  = évapotranspiration (mm)



**Figure III.12:** structure hydrologique de SWAT (Renaud, 2004).

La figure III.12 présente la structure hydrologique de SWAT et montre les différents processus intrinsèques du bilan hydrique. Ainsi, il est possible de voir que l'hydrologie est modélisée en deux phases :

Une première phase terrestre qui simule le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration (plusieurs algorithmes au choix selon les données disponibles) l'exportation et le transport de sédiments et d'éléments nutritifs vers le réseau hydrographique.

La seconde phase est une phase de transport en rivière qui caractérise le déplacement de ces éléments depuis leur entrée dans le réseau jusqu'à l'exutoire du bassin.

#### - Calibration et validation du modèle

La phase finale de modélisation consiste ensuite à calibrer le modèle, c'est à dire à modifier certains paramètres pour obtenir, dans un premier temps la meilleure corrélation possible entre les débits simulés et les débits observés dans le cas d'un modèle hydrologique, puis selon la problématique tenter de faire concorder les valeurs d'érosion, ou dans le cas du projet les valeurs de phosphore au niveau de l'exutoire du bassin. La détermination des paramètres du modèle s'effectue par itération (tâtonnement par essais et erreurs), bien que les différentes réponses données par le modèle donnent toujours une idée des paramètres sur lesquels il faut influencer.

- **Exemples de sites d'application du Modèle SWAT**

SWAT a été appliqué sur de nombreux bassins dans le monde, par exemple :

**En Inde**

Ce Modèle a été utilisé avec succès pour modéliser les déplacements de pesticides dans un bassin de 250 km<sup>2</sup> (Renaud, 2004).

**En Europe**

Il est actuellement utilisé en Allemagne sur le bassin de Dietzhöle ou encore en France, par le CEMAGREF qui évaluent grâce au modèle SWAT les risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole dans deux bassins versants des pays de la Loire (Renaud, 2004).

**Au Maroc**

➤ *Cas du bassin versant de Bouregreg*

Le Modèle SWAT a été utilisé dans le but d'étudier le régime hydrologique du bassin versant de Bouregreg (situé au centre nord du Maroc). Ce modèle a été appliqué sur un sous-bassin pilote de Bouregreg (appelé Tsalat situé en amont du bassin de Bouregreg d'une superficie de 690 km<sup>2</sup>). L'objectif été de mesurer le degré d'adaptabilité de ce modèle à cette zone d'étude dans l'optique d'adoption du modèle qui sera généralisé sur tout le bassin. Les résultats obtenus montrent que le modèle SWAT arrive à représenter le régime hydrologique du bassin pilote et qu'il apparaît très approprié en tenant en compte ses capacités de modélisation d'autres paramètres ciblées au niveau de Bouregreg comme la pollution et l'érosion (Fadil et al, 2011).

➤ **Le Modèle HEC-HMS**

Le HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un Bassin Versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs. Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, la réduction des effets des inondations. Le programme présente une interface graphique, des composantes hydrologiques intégrées, un système spécifique de stockage de données (DSS) et des outils de gestion, etc.

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

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

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.

#### **• Exemples de sites d'application du Modèle HEC-HMS**

Ce modèle est largement utilisé dans le monde. On peut citer comme exemple de sites d'application de ce modèle :

#### **En France**

##### **➤ *Cas des bassins versants de la Nère et du ruisseau de Sarremezan***

L'objectif est d'évaluer les apports en eau qui serviront à alimenter le lac inhérent à la construction du barrage de Charlas. Cette quantification nécessite une étude hydrologique des bassins versants en amont de la retenue : ceux de la Nère et du ruisseau de Sarremezan (CACG, 1989).

Pour ce faire, le modèle pluie/débit sous HEC-HMS a été appliqué au bassin versant global de la retenue. La simulation sur le logiciel HEC-HMS a permis de voir que les apports de l'ensemble du bassin versant de la Nère ne peuvent suffire pour le remplissage du barrage en projet.

#### **Au Maroc**

##### **➤ *Cas du bassin versant de Bouregreg***

Le Modèle HEC-HMS a été appliqué, avec le Modèle SWAT, dans le bassin versant de Bouregreg pour étudier le régime hydrologique de ce dernier. Ce modèle a donné de bons résultats. (Fadil et al, 2011).

### En Algérie

#### ➤ *Cas de bassin versant de SEBAOU*

Ce Modèle a été appliqué pour la prévision des crues sur le bassin versant de SEBAOU

#### ➤ *Cas du bassin versant de l'oued MEKERRA (Wilaya de Sidi Bel Abbas)*

Le but de cette étude été la détermination des débits des crues du projet qui est un outil précieux pour le dimensionnement des ouvrages de protections contre les inondations de la ville de Sidi Bel Abbas. Pour cela le modèle HEC-HMS a été appliqué dans le bassin versant de l'oued MEKERRA (d'une superficie de 2663.64 Km<sup>2</sup>) pour mieux modéliser les débits des crues extrêmes, ce modèle à donné des résultats satisfaisants (Merabet, 2008).

### **Conclusion**

La modélisation pluie-débit, discipline de l'hydrologie, s'intéresse à la compréhension et la représentation de la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. Transcriptions mathématiques de cette transformation, les modèles qui ont été développés depuis une quarantaine d'années sont très variés, faisant appel à différentes perceptions du monde réel et répondant à différents objectifs.

En Algérie, plusieurs tentatives de modélisations hydrologiques ont été faites au moyen de différents modèles. Les applications sur des bassins versants de différentes tailles et en contextes divers (subhumide, semi-aride ou aride) ont donné des résultats variés, parfois bons, ou satisfaisants, et parfois ça marche selon le contexte.

Après avoir fait un peu le tour sur les modèles pluie-débit appliqués dans le monde et en Algérie, nous pouvons dire que les modèles appliqués en Algérie sont inspirés des modèles appliqués dans les autres régions du monde.

Compte tenu de cette étude des modèles analysés, notre choix s'est porté sur deux modèles hydrologiques. Il s'agit du modèle HEC-HMS et du modèle ORSTOM. Notre choix de simuler le comportement de notre bassin versant avec ces deux modèles, est justifié par les raisons suivantes :

Pour le modèle HEC-HMS :

- Le modèle HEC-HMS est un modèle complet, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat et notamment à celui des zones arides et semi-arides. 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 ;
- La fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des bassins versants américains nous a encouragé à appliquer ce modèle dans le bassin versant du M' Zab;
- 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 ;
- Malgré qu'il soit conçu au départ pour la modélisation des événements, les dernières versions du modèle permettent aussi de l'utiliser en processus continu (Fadil et al, 2011).

Pour le modèle ORSTOM :

- Le modèle est classique et simple ;
- Il est facile à mettre en œuvre du fait qu'il nécessite peu de données ;
- Il offre une représentation globale du bassin versant ;
- Ce modèle a donné des résultats très satisfaisants sur les bassins versant de la zone sahélienne et subdésertique, où les conditions y intervenant sont relativement proches de celles du bassin versant du M' Zab ;
- Il permet de déterminer toute les caractéristiques de la crue (débit de pointe, temps de base, temps de montée, volume de la crue,....etc.) ;
- La valeur de débit de pointe déterminée par le modèle de l'ORSTOM est reliée aux autres caractéristiques de la crue centennale évaluées par ce même modèle ;
- Ce modèle s'applique principalement dans les bassins versant non jaugés ;
- Il n'a pas été encore testé sur le contexte Algérien.

Cependant, l'une des difficultés de la modélisation hydrologique avec ces deux modèles est la préparation des données d'entrée. Cette étape nécessite l'utilisation du SIG (Système d'Information Géographique) afin de générer le modèle du bassin.

Par la suite, une comparaison entre les résultats obtenus par l'application de ces deux modèles sera faite.

Les modèles utilisés pour évaluer les crues de fréquences rares et les autres caractéristiques des crues se fondent principalement sur la connaissance et l'analyse des écoulements observés, d'une part, et des pluies d'autre part.

Pour le M'Zab, aucune mesure hydrométrique n'a jamais été faite, mise à part l'observation sommaire et qualitative.

En cas de manque d'observations hydrométriques, et notamment d'observations de grandes crues, et c'est le cas du bassin versant du M'Zab, Il est important d'utiliser deux modèles ou plus, afin de pouvoir comparer les valeurs hydrologiques obtenues. Pour le cas de notre étude, deux modèles hydrologiques ont été choisis : le modèle HEC-HMS et le modèle ORSTOM. Ce chapitre est consacré à l'application de ces deux modèles hydrologiques dans le bassin versant de l'Oued M'Zab.

Dans ce chapitre, un modèle hydrodynamique qui résout l'équation de l'énergie unidimensionnelle pour obtenir l'évolution de la surface d'eau et les vitesses moyennes a été appliqué sur un tronçon de l'oued M'Zab.

## **1. MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE MODELE HEC-HMS**

Le HEC-HMS est un logiciel très flexible employé pour modeler le processus pluie-débit dans un bassin versant ou une région. Ce code 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.

À l'aide de son interface fonctionnant sous l'environnement Windows le modèle HEC-HMS est d'usage très souple. Les informations nécessaires pour les simulations sont groupées sous forme de projet qui peut-être sauvé sur disque. Néanmoins, ce logiciel nécessite une étape de préparation des données, qui consiste en une schématisation du bassin versant en dehors de ce logiciel, ce schéma s'appelle modèle du bassin.

La préparation des données (modèle du bassin, données pluviométriques) est une partie incontournable pour toute modélisation hydrologique avec HEC-HMS; elle nécessite l'utilisation de plusieurs outils et logiciels à savoir: le SIG Arcview, Mapinfo, Arcinfo, etc.

### **1.1Préparation des entrées du modèle HEC-HMS**

La modélisation de la réponse d'un bassin versant soumis à un phénomène pluvieux sous le logiciel HEC-HMS est découpée en deux parties :

- ✓ La modélisation du bassin versant
- ✓ La modélisation des précipitations

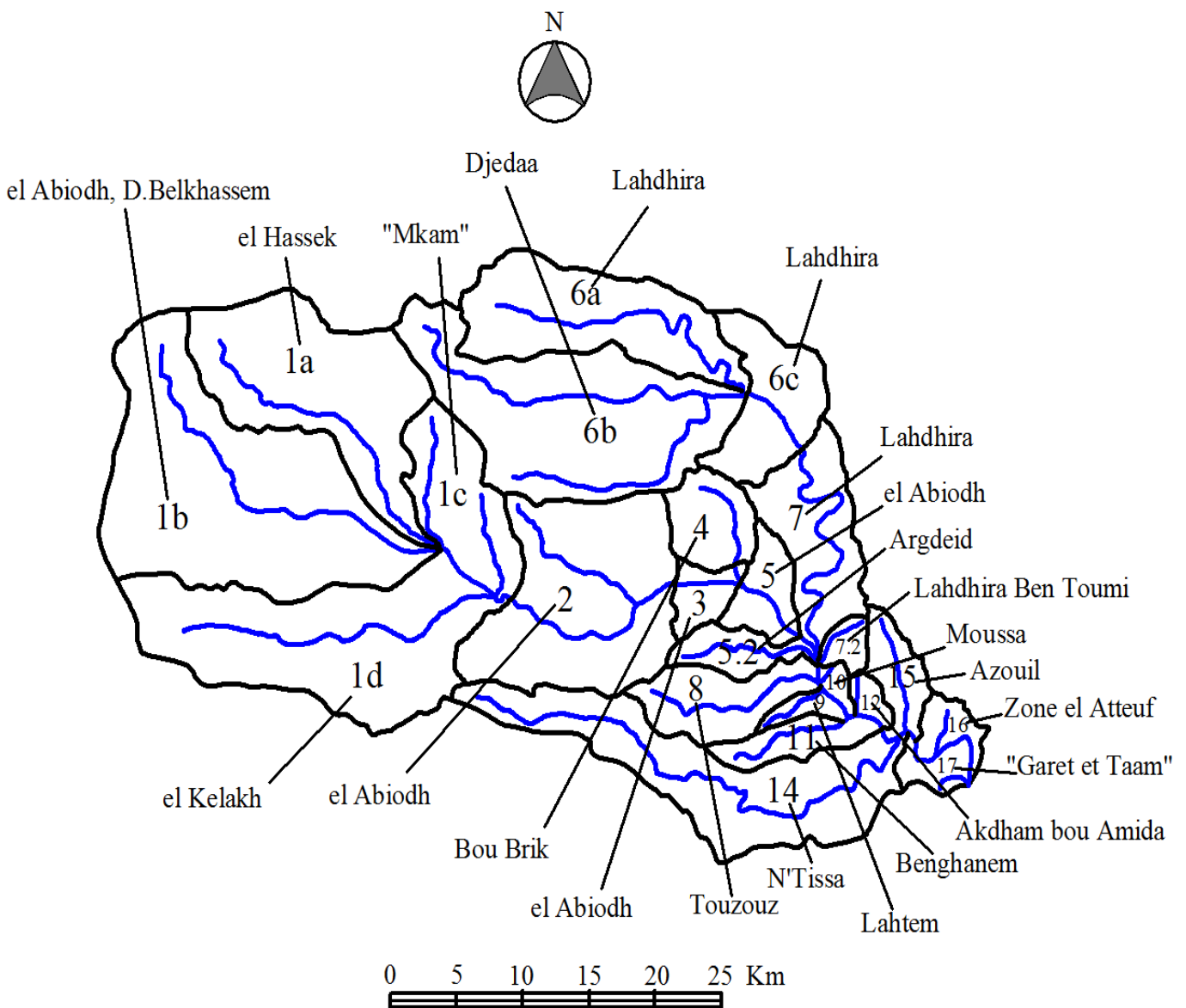
Ce logiciel autorise ainsi d'utiliser différents types de méthodes pour la modélisation du bassin versant et de la pluviométrie.

#### **1.1.1Modélisation du bassin versant**

La modélisation d'un bassin versant consiste, en premier lieu, en un découpage de celui-ci en plusieurs sous-bassins versants élémentaires, ensuite, spécifier les méthodes utilisées pour le calcul des pertes (fonction de production) et de ruissellement (fonction de transfert).

*a)-Découpage des bassins versants*

Pour le bassin du M'zab jusqu'à El Atteuf, il a été distingué 23 sous-bassins élémentaires (Fig. V.1), pouvant être combinés en de nombreux ensembles (Tab. V.1), dont les grands bassins suivants: L'oued El Abiodh à Dhayet Ben Dhahoua, l'oued Lahdhira à Dhayet Ben Dhahoua, regroupés à leur confluence en l'oued M'Zab à Dhayet Ben Dhahoua, les bassins aux alentours de Ghardaïa depuis Dhayet Ben Dhahoua jusqu'à El Atteuf, et l'ensemble de l'oued M'Zab à El Atteuf.



**Figure V.1 :** Découpage du bassin versant en sous-bassins versants



**Tableau V.1 : Morphologie des bassins versants des oueds formateurs du M'Zab**

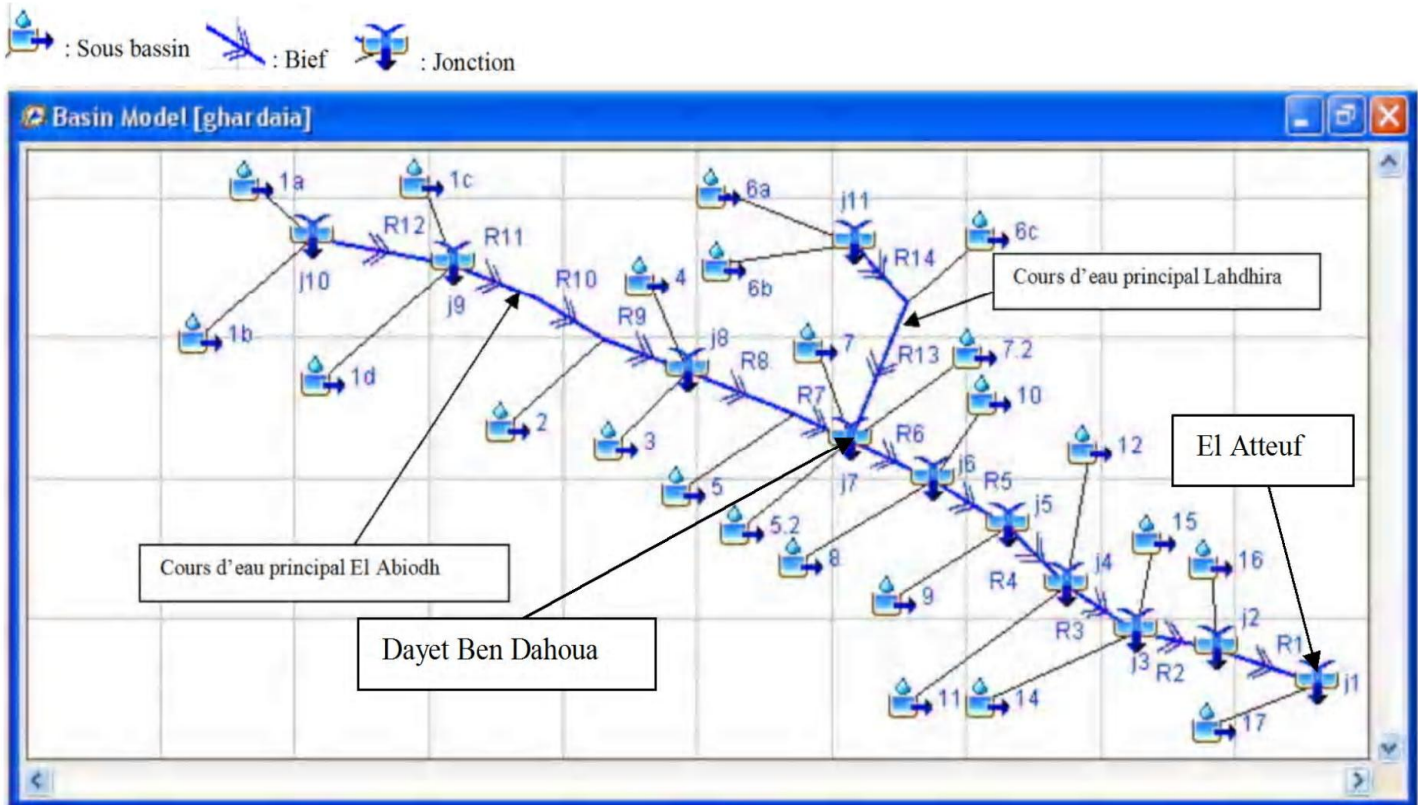
n° sous bv	Nom du sous bassin	Limite de sous bassin	Longueur du Talweg Km	Superficie Km <sup>2</sup>	Périmètre Km	Alt Max m	Altitudes						Alt Min m
							750	700	650	600	550	500	
							Surfaces cumulées						
km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>								
1a	el Hassek	C	26.3	142	64.3	779	11.7	83.9	125	142			616
1b	el Abiodh, D. Belkhassem	C	30.8	234	76.0	758	0.4	87.0	177	234			616
1c	"Mkam"	C-El Beiad	10.5	64.0	35.7	757	0.4	14.0	34.8	63.3			597
-1b à c	el Abiodh	C	30.8	440	93	779	12.5	185	337	440			597
1d	el Kelakh	El Beiab	29.6	174	71.6	740	0.0	36.3	117	174			597
-1	Total el Abiodh	El Beiab	38.1	615	100	779	12.5	221	454	613			597
2	el Abiodh	El Beiab - E	14.4	152	56.1	706	0	7.4	61.7	118			553
-2	Total el Abiodh	E	52.5	766	123	779	12.5	229	516	731			553
4	Bou Brik	Hassi Bou Noura	9.2	33.2	23.1	702	0.0	0.1	11.6	24.7	32.6		548
3	el Abiodh	E-Hassi bou Noura	4.5	16.7	19.4	655	0	0.0	1.0	6.0	13.1		539
-4	Total el Abiodh	Hassi Bou Noura	57.0	816	133	779	12.5	229	528	762	813		539
5	el Abiod	Hassi Bou Noura - B	8.6	26.3	23.5	685	0.0	0.0	0.1	8.6	15.5		519
-5	Total el Abiodh	B	65.6	843	141	779	12.5	229	528	771	828		519
5.2	Argdeid	B		22.6	25.0	670	0.0	0	3.3	13.2	20.0		520
-5.2	Total el Abiodh+Argdeid	B	65.6	866	143	779	12.5	229	531	784	848		519
6a	Lahdhira	Hassi Saidet ben Ali	27.5	106	53.0	773	4.27	46.1	87	106			597
6b	Djedaa	Hassi Saidet ben Ali	30.4	180	67.0	771	4.17	68	158	180			597
6a + 6b	Lahdhira + Djedaa	Hassi Saidet ben Ali	30.4	286	70.0	773	8.44	114	245	285			597
6c	Lahdhira	Hi Saidet ben Ali - A	5.5	57.9	37.0	703	0	0.1	10.3	48.7			578
-6	Lahdhira	A	35.9	344	80.0	773	8.44	114	255	334			578
7	Lahdhira	A-B	23.5	69.2	42.0	690	0	0	1.53	19.5	58.3		519
-7	Total Lahdhira	B	59.4	413	106	773	8.44	114	257	354	402		519
7.2	Lahdhira Ben Toumi	B		9.8	12.0	610	0	0	0.31	6.2			519
-7.2	Total Lahdhira + BT	B	59.4	423.072	108	773	8.44	114	257	354	408		519
-7 - 5.2	el Abiodh+Lahdhira	B	65.6	1289	157	779	21.0	343	788	1138	1256		519
8	Touzouz	Ghardaia	16.3	47.0	33.0	701	0	0	12.9	30.4	40.9	45.5	494
9	Lahtem	Ghardaia		9.1	15.5	615	0	0	0.0	2.8	5.1	8.0	494
10	Zone "Moussa"	Ghardaia		5.7	10.0	585	0	0	0.0	0.0	2.3	4.0	494
8+9+10	Touzouz+Lahtem+Moussa	Ghardaia	16.3	61.7	39.0	701	0	0	12.9	33.3	48.3	58.0	494
-10	Total oued M'Zab	Ghardaia		135.0	160	779	21	343	801	1171	1304	1348	494
11	Benghanem	b. Melika	13.1	24.6	27.0	660	0	0	0	8.4	18.1	21.8	487
12	Akdham bou Amida	b. Melika		7.0	11.0	585	0	0	0	0	3.4	6.0	487
11+12	Lahtem+Akdham	b. Melika	13.1	31.6	33.0	660	0.0	0.0	0.0	8.4	21.5	27.8	487
8 à 12	bassins sud	b. Melika	4.9	93.4	45.0	701	0.0	0.0	12.9	41.7	69.8	85.8	487
-12	Total oued M'Zab	b. Melika	70.5	1382	164	779	21.0	343	801	1180	1326	1375	487
14	N'Tissa	b. Bou Noura	43.2	141	79	708	0	5.5	46.3	84.9	124	134	474
15	Azouil	b. Bou Noura	9.6	24.0	24.0	622	0	0.0	0.0	0.5	14.9	18.0	474
14+15	N'Tissa + Azouil	b. Bou Noura	43.2	165	97	708	0.0	5.5	46.3	85.4	139	152	474
8 à 15	bassins sud	b. Bou Noura	43.2	258	92	701	0.0	5.5	59.2	127	209	238	474
-15	Total oued M'Zab	b. Bou Noura	76.3	1547	170	779	21	348	847	1265	1465	1527	474
16	Zone el Ateuf	b. El Ateuf		15.1	20.0	614	0	0	0	0.6	7.1	13.6	445
17	zone "Garet et Taam"	b. El Ateuf		10.9	16.0	575	0	0	0	0.0	4.5	7.0	445
16+17	El Ateuf + G. et Taam	b. El Ateuf	8.5	26.0	22.0	614	0	0	0	0.6	11.6	20.6	445
8 à 17	Total bassins sud	b. El Ateuf	19.2	284	97.0	708	0	5.49	59.2	128	219	259	445
-17	TOTAL oued M'Zab	b. El Ateuf	84.8	1573	181	779	21	348	847	1266	1475	1547	445

Ces bassins versants sont connectés par un ensemble de fonctions hydrauliques :

- **Jonctions**
- **Biefs**
- **Bifurcations**

**Le schéma du modèle de bassin:** Le schéma du modèle de bassin est la représentation du modèle hydrologique du bassin et de ses éléments (biefs, jonctions, sous bassins....) et leurs connectivités (Fig.V.2).

Le schéma du modèle de bassin figure dans la copie d'écran (Fig.V.2).



**Figure V.2 :** Schéma du modèle de bassin par HEC-HMS

**b)- Modélisation des pertes par le modèle SCS Curve Number (CN) (Fonction de production)**

HEC-HMS calcule les volumes d'écoulements en soustrayant aux précipitations les quantités d'eau qui sont stockées, infiltrées ou évaporées sur le bassin versant. L'interception, l'infiltration, le stockage et l'évaporation sont représentés par le HEC comme étant des «pertes ».

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 suivante (HEC-HMS, 2000):

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

OÙ,  $P_e$  : L'excès de précipitation :  $P$  : est le total des précipitations accumulées au temps  $t$ :

$I_a$ : Les pertes initiales et  $S$ : est le potentiel maximum de rétention.

" $I_a$ " et " $S$ " sont liés par la formule empirique V.2 :

$$I_a = 0,2S \quad (\text{V.2})$$

D'où:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (\text{V.3})$$

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

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (\text{V.4})$$

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 (Impervious) (Tab.V.2) (SCS, 1986)

**Tableau V.2** : CN en fonction de groupe de sol et 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

La méthode SCS définit ces groupes de sol comme suit (SCS, 1986):

**Groupe A** : Ce groupe est caractérisé par des sols qui ont un faible potentiel de ruissellement. Il comprend des sols sableux contenant une faible fraction de limon et d'argile. la vitesse d'infiltration varie de 7,5 à 12 mm/h.

**Groupe B** : Ce groupe est caractérisé par des sols ayant un potentiel de ruissellement relativement faible. Il comprend les sols sablo-limoneux de texture moyennement grossière à moyennement fine (donc moins bien structurés que le groupe A). la vitesse d'infiltration de base est modérée (de 4 à 7,5 mm/h).

**Groupe C** : Les sols de ce groupe sont caractérisés par un potentiel de ruissellement assez élevé. La vitesse d'infiltration de base est relativement faible (de 1 à 4 mm/h).

Pour un bassin versant composé de différents types de sols, on peut établir un CN moyen par la relation V.5 :

$$CN_{moy} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i} \quad (\text{V.5})$$

Où, j : L'indice associé à la subdivision du bassin de type de sol uniforme;  $a_{ij}$  : l'aire de la subdivision j dans le sous-bassin i et  $A_i$  : l'aire du sous-bassin i.

Pour le cas de notre étude, le pourcentage des surfaces construites est estimé à 20% car le taux d'urbanisation n'est pas important à l'échelle du bassin versant du M'Zab et c'est le cas des zones sahariennes du sud d'Algérie.

Les sols du groupe C couvrent 75 % de la surface totale du bassin versant (vitesse d'infiltration estimée à 2,5 mm/h). Les sols de type B couvrent 15 % de la surface. Le reste de la surface (10%) est couverte par des sols du groupe A. Le Curve Number moyen obtenu est égal à 74.

Les pertes initiales (Initial abstraction) sont calculées par la formule V.2

Les pertes initiales, le curve number et le pourcentage des surfaces construites sont introduits dans le logiciel HEC-HMS comme le montre le tableau V.3.

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

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
10	17,849	74	20
11	17,849	74	20
12	17,849	74	20
14	17,849	74	20
15	17,849	74	20
16	17,849	74	20
17	17,849	74	20
1a	17,849	74	20
1b	17,849	74	20
1c	17,849	74	20
1d	17,849	74	20
2	17,849	74	20
3	17,849	74	20
4	17,849	74	20
5	17,849	74	20
5.2	17,849	74	20
6a	17,849	74	20
6b	17,849	74	20
6c	17,849	74	20
7	17,849	74	20
7.2	17,849	74	20
8	17,849	74	20
9	17,849	74	20

### **Avantages et inconvénients du modèle SCS Curve Number (CN)**

#### **Avantages**

- La méthode est simple, prévisible et stable.
- Compte seulement sur un paramètre, qui change en fonction du type de sol, de l'occupation et l'utilisation de la terre.
- Méthode bien établie, largement admise pour l'usage aux USA et à l'étranger (Henine, 2004).

**Inconvénients**

- La méthode ne tient pas compte de la théorie des écoulements non saturés.
- L'abstraction initiale par défaut (0.2S) ne dépend pas des caractéristiques de la pluie, donc si elle est utilisée, elle sera la même pour des averses à des périodes de retour différentes.
- La méthode ne tient pas compte de l'intensité des précipitations (Henine, 2004)

***c)- Modélisation de ruissèlement (Fonction de transfert)***

- **Les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)**

Ces modèles donnent une relation entre l'excès de précipitations et le ruissèlement sans considération détaillée des processus internes. En conséquence les équations et les paramètres introduits ont une signification physique limitée.

L'hydrogramme unitaire donne le débit de ruissèlement 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 ruissèlement. On a donc l'équation de convolution V.6 (HEC-HMS, 2000):

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq m} P_m U_{n-m+1} \quad (\text{V.6})$$

Avec :

$Q_n$  est le débit de ruissèlement au temps  $n \cdot \Delta t$ ,

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

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

Cette méthode repose sur l'ensemble des hypothèses suivantes

- La distribution spatiale de l'excès de précipitations doit être uniforme et son intensité reste constante durant l'intervalle de temps  $\Delta t$  ;
- La linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissèlement 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.

- **Modèles de l'hydrogramme unitaire: Hydrogrammes unitaires paramétriques et synthétiques**

- Un hydrogramme unitaire paramétrique est obtenu par calcul à partir de plusieurs paramètres. Par exemple, l'amplitude et l'instant du pic suffisent à calculer entièrement un hydrogramme unitaire triangulaire (Henine, 2004).
- Un hydrogramme unitaire synthétique met en relation les paramètres d'un hydrogramme unitaire paramétrique et les caractéristiques du bassin versant. Cette méthode permet d'adapter l'hydrogramme unitaire obtenu dans certaines conditions pour un bassin versant à d'autres conditions et d'autres bassins versants. Par exemple on peut relier l'amplitude du pic d'un hydrogramme unitaire triangulaire à l'aire drainée par le bassin (Henine, 2004).

La méthode de transformation choisie pour la simulation dans le logiciel HEC-HMS est celle de l'hydrogramme unitaire synthétique de CLARK.

- **Modèle de CLARK (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 (en heure) a été calculé pour les sous bassins à l'aide de la formule Soil Conservation Service « SCS » (Rahai, 2007). Cette formule est recommandée pour une simulation avec HEC-HMS.

$$T_c = \left[ \frac{0.87 * L^3}{H_{MAX} - H_{MIN}} \right]^{0.385} \quad (\text{V.7})$$

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

$$C_s = 0,5 * T_c \quad (\text{V.8})$$

Le tableau V.4 donne les résultats de calcul du temps de concentration et du coefficient de stockage pour les différents sous bassins.

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

Subbasin	Time of Concentration (HR)	Storage Coefficient (HR)
10	1	0,5
11	2,5440	1,2720
12	1	0,5
14	8,9857	4,4928
15	1,8866	0,94332
16	1	0,5
17	1	0,5
1a	5,8220	2,9110
1b	7,3682	3,6841
1c	2,0305	1,0152
1d	7,0186	3,5093
2	2,9752	1,4876
3	1	0,5
4	1,7689	0,88443
5	1,5897	0,79486
5.2	1	0,5
6a	5,9514	2,9757
6b	6,7115	3,3558
6c	1,0581	0,52905
7	5,0187	2,5094
7.2	1	0,5
8	3,0559	1,5280
9	1	0,5

Les valeurs minimales et maximales des paramètres du modèle de CLARK acceptées par le logiciel HEC-HMS figurant dans le tableau V.5 (HEC-HMS, 2000).

**Tableau V.5 :** Valeurs minimales et maximales des paramètres du modèle de CLARK acceptées par le logiciel HEC-HMS

Modèle	Paramètre	Minimum	Maximum
Hydrogramme unitaire de CLARK	Temps de concentration	1 h	500 h
	Coefficient de stockage	0,5 h	150 h

Source :HEC-HMS, 2000



### 1.1.2 Modélisation des précipitations par la méthode pluie hypothétique basée sur la fréquence

L'objectif de cette méthode est de définir un événement pour lequel la hauteur et la durée des précipitations sont déterminées pour une probabilité donnée. Pour définir cet événement avec HEC-HMS on doit Spécifier la hauteur de précipitation en chaque pas de temps pour une probabilité choisi. Les hauteurs des précipitations peuvent être déduites à partir des courbes HDF (Hauteur-Durée-Fréquence). HEC-HMS applique un coefficient de correction de surface aux hauteurs données par les courbes HDF. 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 définit 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, 2004).

### 1.2 Simulation hydrologique et visualisation des résultats

A présent toutes les parties indispensables à une simulation hydrologique sous HEC-HMS sont prêtes, il ne nous reste que le lancement de la simulation.

L'outil principal de cette partie est le gestionnaire d'exécution que l'on obtient à partir de l'écran «Basin Model ». L'exécution est lancée après avoir sélectionné un «Run ». Un Run est défini par le modèle de bassin et le modèle de précipitation.

Les résultats peuvent être visualisés En utilisant l'écran du modèle de bassin en chaque élément de bassin (les jonctions et les sous-bassins) sous forme :

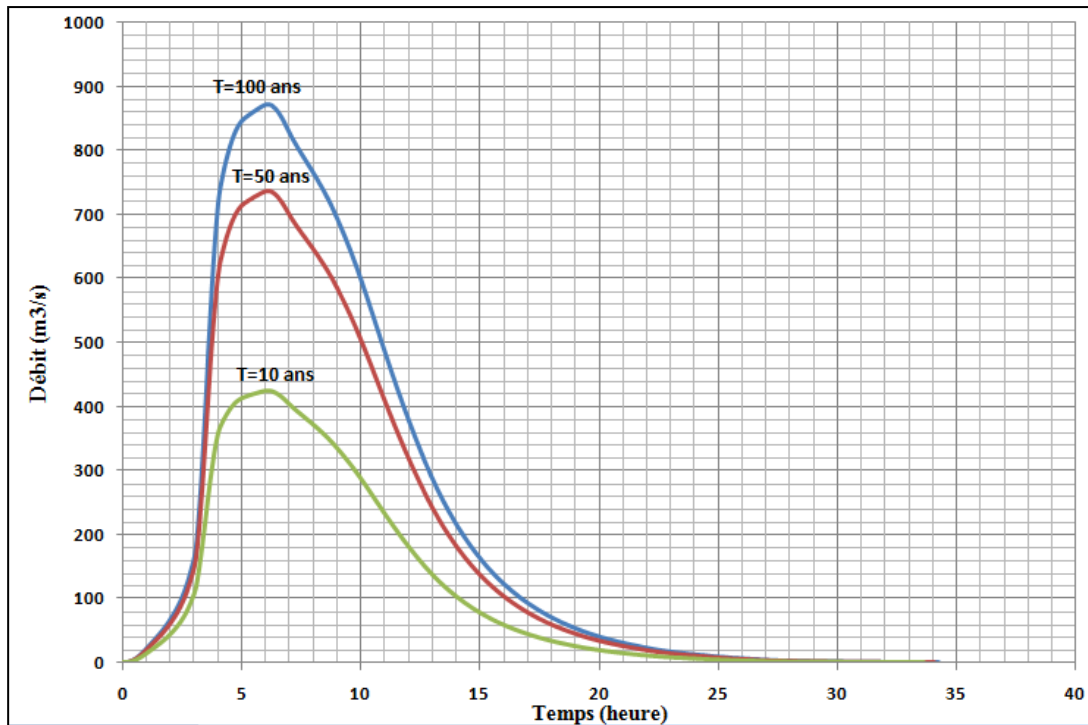
- De graphe (graph);
- De tableau récapitulatif des résultats (Summary table);
- De tableau relatif aux résultats calculés à chaque pas de temps (Time Series Table).

Dans cette section, les résultats ont été visualisés surtout sous forme de graphes.

Une attention particulière a été accordée à la jonction « j1 » située en bas du bassin versant, et la jonction « j7 ».

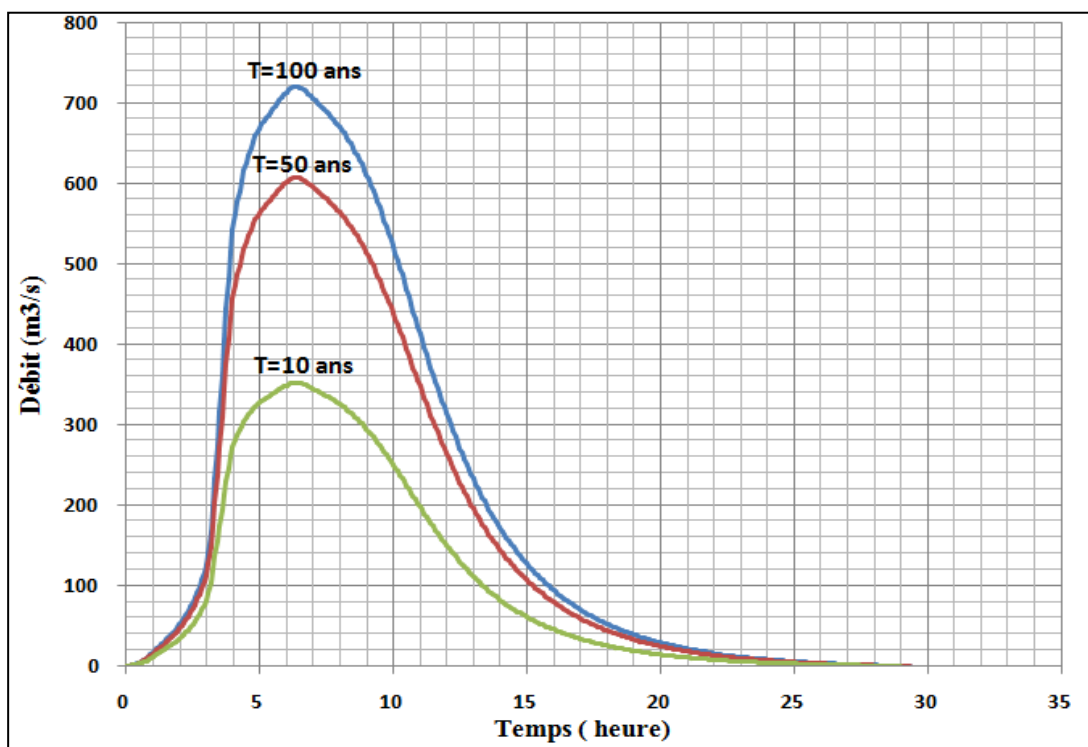
La jonction « j1 » représente l'exutoire du bassin versant du M' Zab (situé à El Atteuf).

Au niveau de l'exutoire, l'hydrogramme de crue produit par le bassin versant entier a été récupéré (Fig.V.3).



**Figure V.3 :** Hydrogramme Synthétique de CLARCK à El Atteuf pour les différentes périodes de retour

La jonction « j7 » représente le confluent des cours d’eau El Abiodh et Lahdhira (situé à Dayet Ben Dahoua). L’hydrogramme de crue obtenu à Dayet Ben Dahoua est illustré dans la figure V.4.



**Figure V.4 :** Hydrogramme Synthétique de CLARCK à Dayet Ben Dahoua pour les différentes périodes de retour

Le tableau V.6 représente le résumé des résultats (Summary table) donnés par HEC-HMS.

**Tableau V.6 :** Résumé des résultats (Summary table) donnés par HEC-HMS

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	Période de retour	Temps de montée (h)	Temps de base (h)	Débit max (m <sup>3</sup> /s)	Volume de crue (Mm <sup>3</sup> )
<b>Dayet Ben Dahoua</b>	1289	10 ans	06,42	29,00	351	10,98
		50 ans	06,42	29,33	607	18,90
		100 ans	06,42	29,33	720	22,39
<b>El Atteuf</b>	1573	10 ans	06,08	33,67	425	13,41
		50 ans	06,08	34,08	736	23,07
		100 ans	06,08	34,25	873	27,33

#### ❖ Hydrogramme synthétique type Maxwell

Une forme d'hydrogramme du type distribution de Maxwell convient généralement bien. Elle s'exprime par la formule V.9 (Merabet, 2008):

$$Q(t) = Q_p \cdot \left( \frac{t}{T_m} \cdot e^{1-\frac{t}{T_m}} \right)^n \quad (\text{V.9})$$

Le volume total de crue  $V_t$  en m<sup>3</sup> est donné par la formule V.10 :

$$V_t = Q_p \cdot T_m \cdot 2.687 \cdot n^{-0.5252} \quad (\text{V.10})$$

Avec :

$Q_p$  : Débit de pointe ;

$T_m$  : Temps de montée en seconde ;

$n$  : Facteur de forme.

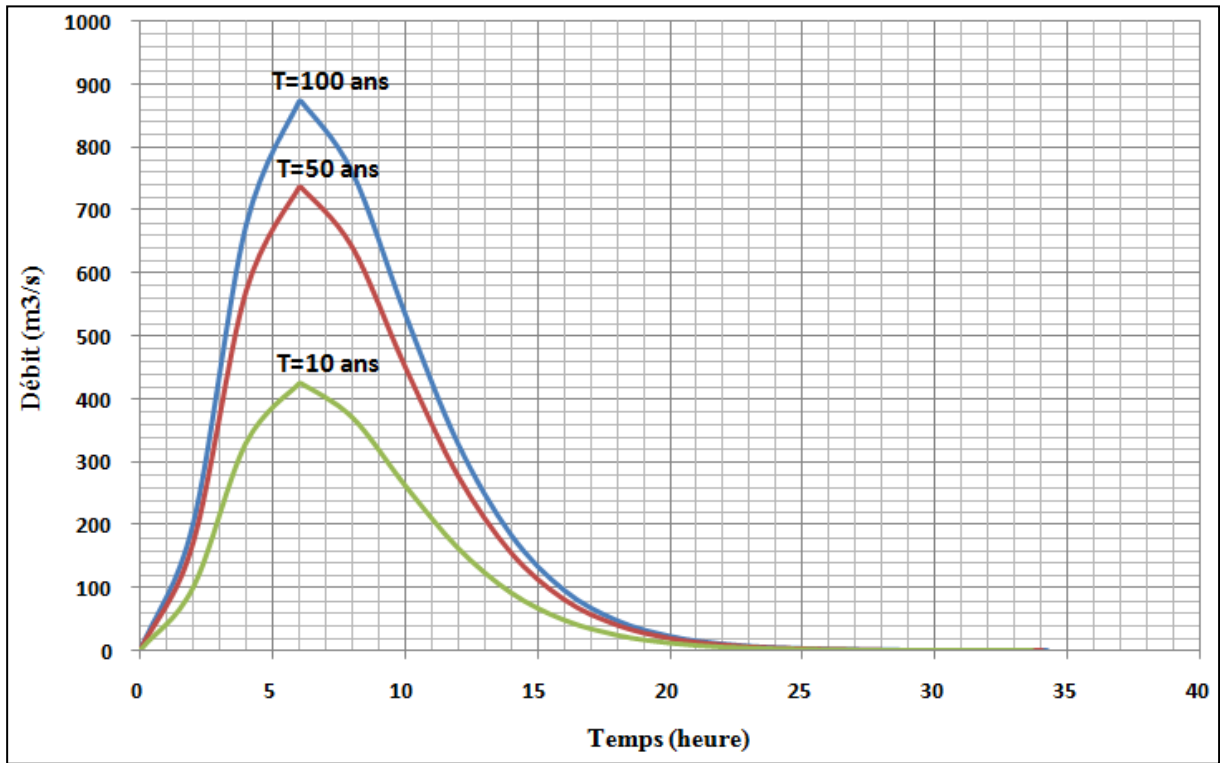
Le facteur de forme «  $n$  » est calculé par ces équations connaissant  $Q_p$ ,  $T_m$  et  $V_t$ .

Les valeurs de  $n$  calculées sont données dans le tableau V.7.

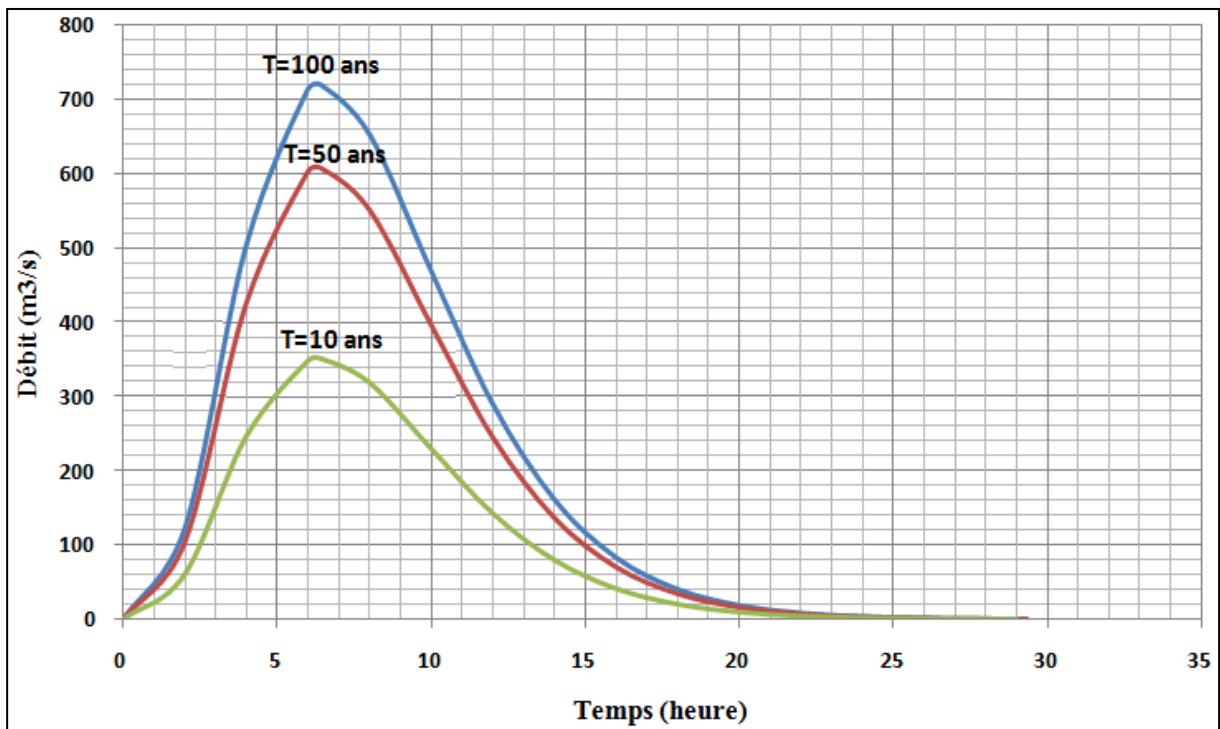
**Tableau V.7 :** Les valeurs de  $n$  calculées pour les différentes périodes de retour à El Atteuf et à Dayet Ben Dahoua

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	Période de retour	$n$
<b>Dayet Ben Dahoua</b>	1289	10 ans	3,694
		50 ans	3,720
		100 ans	3,725
<b>El Atteuf</b>	1573	10 ans	3,275
		50 ans	3,319
		100 ans	3,328

Les figures V.5 et V.6 montrent les hydrogrammes de crue du type distribution de Maxwell à El Atteuf et Dayet Ben Dahoua.



**Figure V.5 :** Hydrogramme unitaire pour les différentes périodes de retour à El Atteuf et son ajustement à une structure analytique type Maxwell



**Figure V.6 :** Hydrogramme unitaire pour les différentes périodes de retour à Dayet Ben-Dahoua et son ajustement à une structure analytique type Maxwell

## 2. MODELISATION PLUIE-DEBIT PAR LE MODELE ORSTOM

Nous procédons, dans cette section, par analogies avec les résultats acquis dans d'autres régions du monde aussi semblables que possible à la région mozabite. Pour cela il faut prendre en considération la similitude de la pluviométrie d'une part et les caractéristiques physiques (superficie, perméabilité, et relief) d'autre part. Les zones de similitudes sont : La marge méridionale du Sahara et du Sahel (zone sahélienne et subdésertique au sud du Sahara).

### 2.1 Présentation du modèle

L'approche proposée, résolument déterministe, est celle d'un modèle global pluie-débit fondé sur la théorie de l'hydrogramme unitaire. Le bassin versant constitue une entité homogène, tant en ce qui concerne les apports pluviométriques que ses caractéristiques physiques. Les nombreuses études hydrologiques effectuées en région sahélienne ont permis de dégager les principaux facteurs explicatifs des crues: la hauteur et la forme de l'averse génératrice, la superficie du bassin versant, l'infiltrabilité du sol et le relief (CIEH et al, 1996).

Dans la méthode, le débit de pointe est défini par la relation V.11 (CIEH et al, 1996) :

$$Q_{\max} = P_j * K_a * K_r * S * \alpha * T_b^{-1} \quad (\text{V.11})$$

Avec,  $K_a$  : le coefficient d'abattement

$T_b$ : le temps de base

$P_j$ : la hauteur de pluie journalière

$K_r$ : le coefficient de ruissellement

$S$  : la superficie du bassin versant

$\alpha$  : Le coefficient de pointe

La méthode proposée permet d'estimer, on plus de débit maximum, le volume de crue ainsi que les temps de montée et de base, paramètres indispensables à la conception de certains aménagements.

Le Modèle Orstom s'applique à des bassins dont la superficie se situe entre quelques dizaines d'hectares et plus de 1500 km<sup>2</sup>

### 2.2 Etapes à suivre

- 1)-Déterminer les caractéristiques physiques du bassin versant : superficie, indice de pente global .....etc.
- 2)-Estimer la hauteur de l'averse ponctuelle de fréquence donnée
- 3)-Calculer la hauteur de précipitation moyenne sur le bassin de fréquence donnée
- 4)-Déduire les caractéristiques suivantes :
  - le coefficient de ruissellement  $K_r$
  - le temps de base  $T_b$ .
  - le débit moyen durant le temps  $T_b$
  - le coefficient de pointe  $\alpha$
  - le débit de pointe  $Q_{\max}$
- 5)- Estimer le volume total de crue  $V_c$
- 6)- Préciser la forme de l'hydrogramme de crue en déterminant également le temps de montée  $T_m$ .

### 2.2.1 Estimation de la précipitation moyenne sur le bassin P<sub>m</sub>

La précipitation moyenne sur le bassin P<sub>m</sub> est obtenue en multipliant la hauteur de précipitation ponctuelle P<sub>ponc</sub> (P<sub>maxj</sub> de fréquence centennale) par le coefficient d'abattement K<sub>a</sub>, déterminé par l'équation simplifiée de Vuillaume (1974) :

$$P_m = P_{ponc} * K_a \quad (\text{V.12})$$

Avec:

$$K_a = 1 - 0,001 (9 \log T - 0,042 P_{an} + 80) \log S ; \quad (\text{V.13})$$

S : la superficie du bassin, en km<sup>2</sup>;

T : période de retour (100 ans) ;

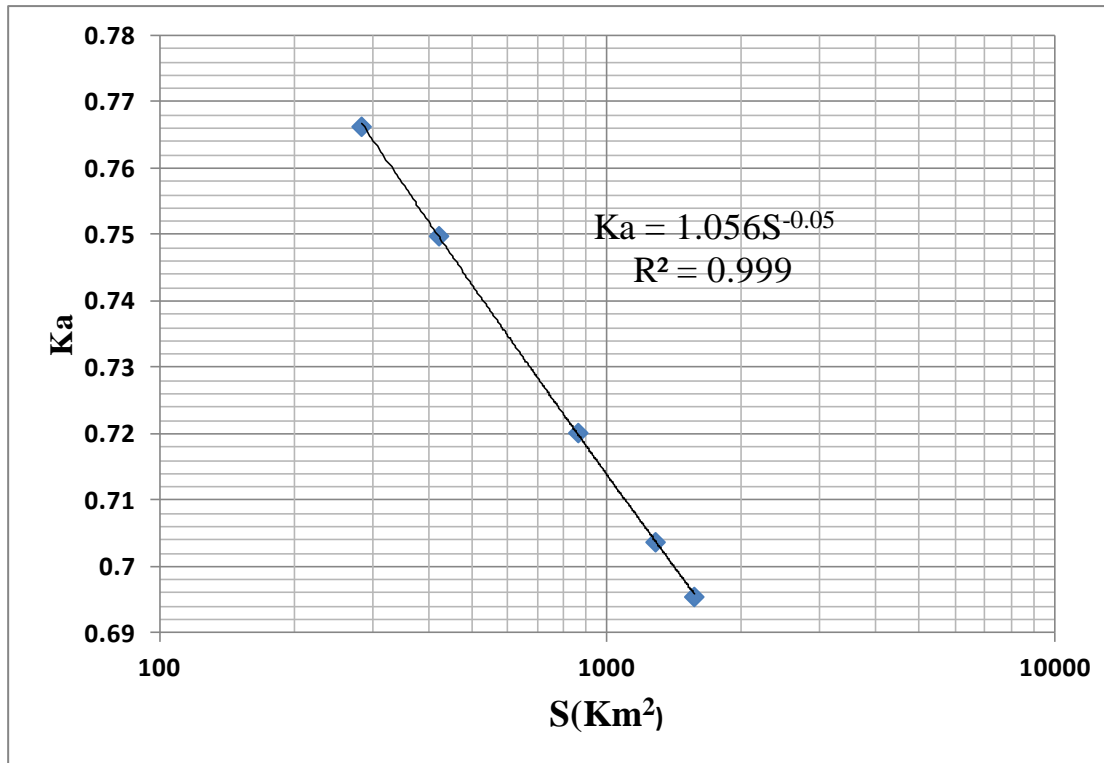
P<sub>an</sub> : hauteur moyenne de précipitation annuelle (65 mm).

Le tableau V.8 donne les coefficients d'abattement ainsi que les pluies moyennes pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab on utilisant la formule de Vuillaume.

**Tableau V.8** : Les coefficients d'abattement et les pluies moyennes pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	P <sub>maxj</sub> (mm)	P <sub>an</sub> (mm)	T (ans)	K <sub>a</sub>	P <sub>m</sub> (mm)
BV Ghardaïa	284	83	65	100	0,77	63,52
El Haïmeur dbd	423	83	65	100	0,75	62,16
El Abiodh dbd	866	83	65	100	0,72	59,70
<b>M'Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>83</b>	<b>65</b>	<b>100</b>	<b>0,70</b>	<b>58,34</b>
<b>M'Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>83</b>	<b>65</b>	<b>100</b>	<b>0,70</b>	<b>57,65</b>

Sur la figure V.7, le tableau à été transformé en diagramme .Ce diagramme donne les coefficients d'abattement en fonction des différentes superficies du bassin versant.



**Figure V.7 :** Variation du coefficient d’abattement en fonction de la superficie

Le diagramme a été traduit en une équation, dont la formulation est en V.14

$$Ka = 1,056 * S^{-0,05} \tag{V.14}$$

### 2.2.2 Estimation du coefficient de ruissellement

Rodier et Auvray (1965) ont établi des tableaux (Tab.V.9) qui donnent les coefficients de ruissellement pour les bassins sahélien et subdésertiques au sud du Sahara en fonction de la superficie S du bassin, et en tenant compte des indices de relief et de perméabilité. Dans ces régions, la hauteur de l’averse décennale varie entre 60 et 85 mm pour la zone subdésertique et entre 85 et 110 mm pour la zone sahélienne. A Ghardaïa, de telles pluies journalières (60, 85 et 110 mm) ont des périodes de retour différentes, respectivement 20, 100 et 1000 ans.

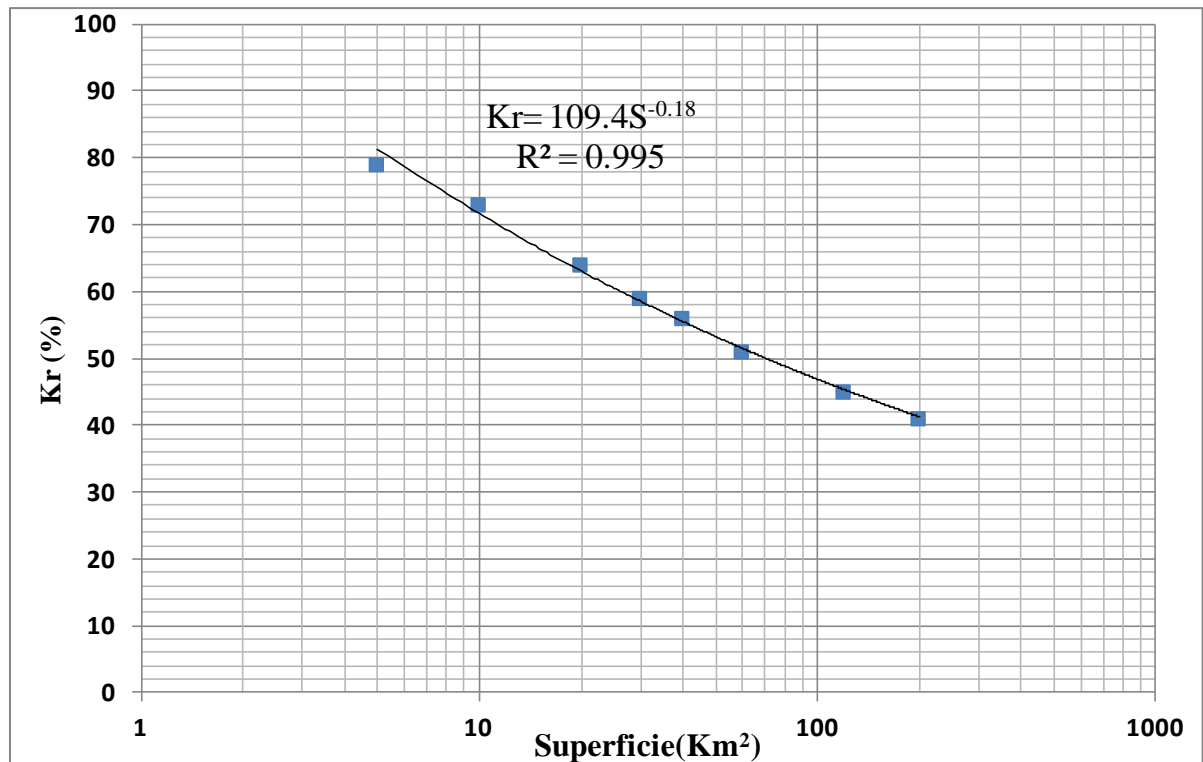
**Tableau V.9:** Coefficient de ruissellement Kr applicable à une pluie journalière centennale (en %)

S (Km²)	5	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120	200
R4P1	91	87	78	74	70	67	64	62	60	58	55	50
<b>R4P2</b>	<b>79</b>	<b>73</b>	<b>64</b>	<b>59</b>	<b>56</b>	<b>53</b>	<b>51</b>	<b>49</b>	<b>48</b>	<b>47</b>	<b>45</b>	<b>41</b>
R5P3	49	44	39	37	36	35	35	35	34	34	33	33
R4P3	42	37	32	30	28	28	28	27	27	26	25	24

Source : Rodier et Auvray ,1965

Compte tenu du calage de ces coefficients de ruissellement sur une pluie décennale dans la Sahel et la zone subdésertique, on considère que ces valeurs sont valables pour une pluie journalière de même hauteur mais de fréquence centennale à Ghardaïa.

Sur la figure V.8, le tableau V.9 a été transformé en diagramme pour l’indice de relief et de perméabilité R4P2 :



**Figure V.8 :** Coefficient de ruissellement Kr en fonction de la superficie pour R4P2

Le diagramme a été traduit en une équation, dont la formulation est en V.15

$$Kr = 109,4 * S^{-0,18} \quad (\text{V.15})$$

Le tableau V.10 donne les coefficients de ruissellement pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab on utilisant la relation :  $Kr = 109,4 * S^{-0,18}$

**Tableau V.10 :** les coefficients de ruissellement pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	Kr (%) pour R4 P2
BV Ghardaïa	284	39,57
El Haïmeur dbd	423	36,84
El Abiodh dbd	866	32,38
<b>M'Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>30,14</b>
<b>M'Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>29,08</b>

### 2.2.3 Caractéristiques de l'hydrogramme de crue

Pour une averse centennale de hauteur et de forme déterminées, l'hydrogramme résultant sera plus ou moins proche de l'hydrogramme unitaire, suivant les caractéristiques physiques du bassin.



La superficie, la pente et les conditions d'infiltrabilité se sont révélées les facteurs les plus pertinents pour expliquer la forme de l'hydrogramme si, toutefois, les autres facteurs (aspect du réseau hydrographique, forme du bassin, couverture végétale, etc.) restent proches de la moyenne par rapport à l'ampleur des variations possibles.

Des relations empiriques tenant compte de ces trois principaux paramètres permettent d'estimer les caractéristiques de l'hydrogramme centennale (unitaire ou non, suivant les cas) : temps de base, débit de pointe, temps de montée et volume de crue.

#### a)-Temps de base $T_b$

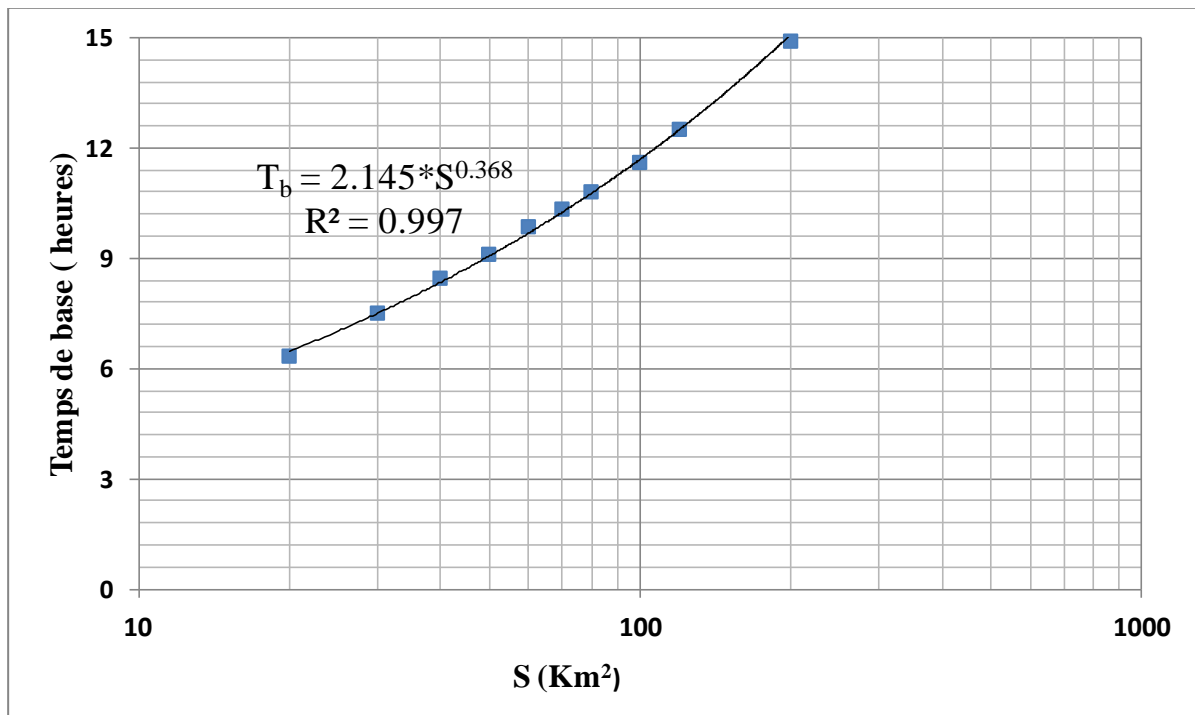
Rodier et Auvray (1965) ont établi des tableaux (Tab.V.11) qui donnent le temps de base pour les bassins sahélien et subdésertiques au sud du Sahara en fonction de la superficie  $S$  du bassin, et en tenant compte des indices de relief.

**Tableau V.11** : Temps de base de la crue centennale en fonction de la superficie  $S$  (en  $\text{Km}^2$ ) et la classe de relief  $R$

$S$ ( $\text{Km}^2$ )	20	30	40	50	60	70	80	100	120	200
R5	3,50	4,15	4,75	5,15	5,55	5,80	6,15	6,70	7,10	9,60
<b>R4</b>	<b>6,33</b>	<b>7,50</b>	<b>8,45</b>	<b>9,10</b>	<b>9,85</b>	<b>10,33</b>	<b>10,80</b>	<b>11,60</b>	<b>12,50</b>	<b>14,90</b>
R3	12,33	15,25	17,66	19,80	22,00	23,50	25,00	28,00	30,80	40,70

Source : Rodier et Auvray, 1965

Sur la figure V.9, le tableau a été transformé en diagramme pour l'indice de relief R4 :



**Figure V.9:** Temps de base  $T_b$  en fonction de la superficie pour l'indice de relief R4

Le diagramme a été traduit en une équation, dont la formulation est en V.16

$$T_b = 2,145 * S^{0,368} \quad (\text{V.16})$$

Le tableau V.12 donne le temps de base pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab on utilisant la relation :  $T_b = 2,145 * S^{0,368}$

**Tableau V.12 :** Temps de base pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	T <sub>b</sub> pour R4 (en heures)
BV Ghardaïa	284	17,15
El Haïmeur dbd	423	19,86
El Abiodh dbd	866	25,85
<b>M'Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>29,92</b>
<b>M'Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>32,20</b>

#### b)-Temps de montée T<sub>m</sub>

La connaissance du temps de montée T<sub>m</sub> n'est pas nécessaire à la détermination du débit de pointe. Mais elle permet de déterminer la forme de l'hydrogramme de crue.

Pour la région sahélienne, T<sub>m</sub> a été estimé à partir des facteurs explicatifs caractérisant le milieu physique.

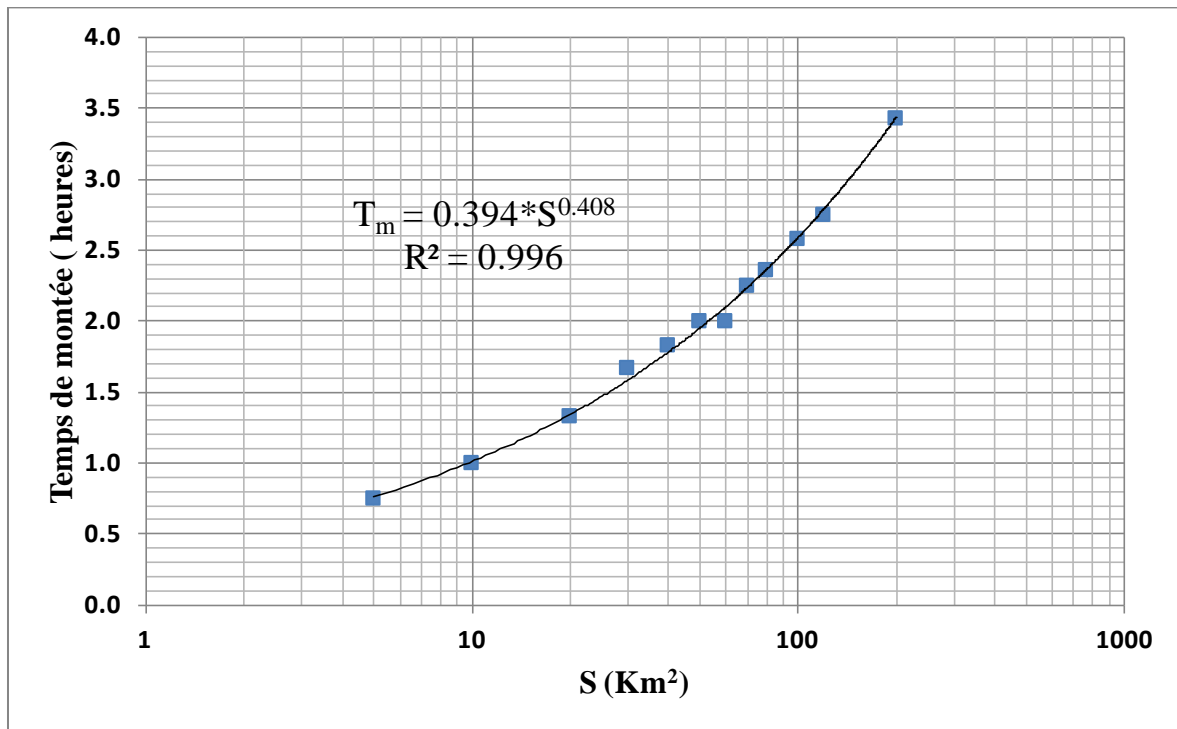
Rodier et Auvray (1965) ont établi des tableaux (Tab.V.13) qui donnent le temps de montée pour les bassins sahélien et subdésertiques au sud du Sahara en fonction de la superficie S du bassin, et en tenant compte des indices de relief.

**Tableau V.13:** Temps de montée de la crue centennale en fonction de la superficie S (en Km<sup>2</sup>) et la classe de relief R

S (Km <sup>2</sup> )	5	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120	200
R5	0,33	0,5	0,75	0,83	1,08	1,17	1,25	1,33	1,42	1,58	1,68	2,10
<b>R4</b>	<b>0,75</b>	<b>1</b>	<b>1,33</b>	<b>1,67</b>	<b>1,83</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2,25</b>	<b>2,36</b>	<b>2,58</b>	<b>2,75</b>	<b>3,43</b>
R3	1,33	2	2,92	3,58	4,17	4,67	5,17	5,58	5,92	6,58	7,17	9,5

Source : Rodier et Auvray, 1965

Sur la figure V.10, le tableau V.13 a été transformé en diagramme pour l'indice de relief R4 :



**Figure V.10:** Temps de montée  $T_m$  en fonction de la superficie pour l'indice de relief R4

Le diagramme a été traduit en une équation, dont la formulation est en V.17

$$T_m = 0,394 * S^{0,408} \quad (\text{V.17})$$

Le tableau V.14 donne le temps de montée pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab on utilisant la relation :  $T_m = 0,394 * S^{0,408}$

**Tableau V.14:** Temps de montée pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	T <sub>m</sub> pour R4 (en heures)
BV Ghardaïa	284	3,95
El Haïmeur dbd	423	4,65
El Abiodh dbd	866	6,22
<b>M'Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>7,32</b>
<b>M'Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>7,94</b>

**c)-Débit moyen de la crue**

Le débit moyen de la crue  $Q_{moy}$  est donné par l'expression (CIEH et al, 1996) :

$$Q_{moy} = (P_j * K_a * K_r * S) / T_b \quad (V.18)$$

$P_j$ : exprimé en mm ;

$S$ : exprimé en  $Km^2$  ;

$T_b$ : en Minutes ;

$K_r$ : sans dimension;

$K_a$ : sans dimension.

Le tableau V.15 donne les débits moyens calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M' Zab :

**Tableau V.15:** Débits moyens calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M' Zab

ID BV	S ( $Km^2$ )	$P_j$ (mm) (T=100 ans)	$K_r$ (%)	$K_a$	$T_b$ (h)	$Q_{moy}$ ( $m^3/s$ )
BV Ghardaïa	284	83	39,57	0,77	17,15	116
El Haïmeur dbd	423	83	36,84	0,75	19,86	136
El Abiodh dbd	866	83	32,38	0,72	25,85	180
<b>M' Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>83</b>	<b>30,14</b>	<b>0,70</b>	<b>29,92</b>	<b>209</b>
<b>M' Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>83</b>	<b>29,08</b>	<b>0,70</b>	<b>32,20</b>	<b>229</b>

**d)-Coefficient de pointe**

Le coefficient de pointe, rapport du débit maximum au débit moyen, est défini par la relation V.19 (CIEH et al, 1996) :

$$\alpha = \frac{Q_{max}}{Q_{moy}} \quad (V.19)$$

On admet que  $\alpha$  est égal à 2,6 pour les petits bassins versants couvrant une superficie de 1 à 25  $km^2$  (CIEH et al, 1996).

Pour les bassins du M' Zab de superficie supérieure à 75  $km^2$ , on a la formule (BG, 1996):

$$\alpha = 0,24 \ln(S) + 2 \quad (V.20)$$

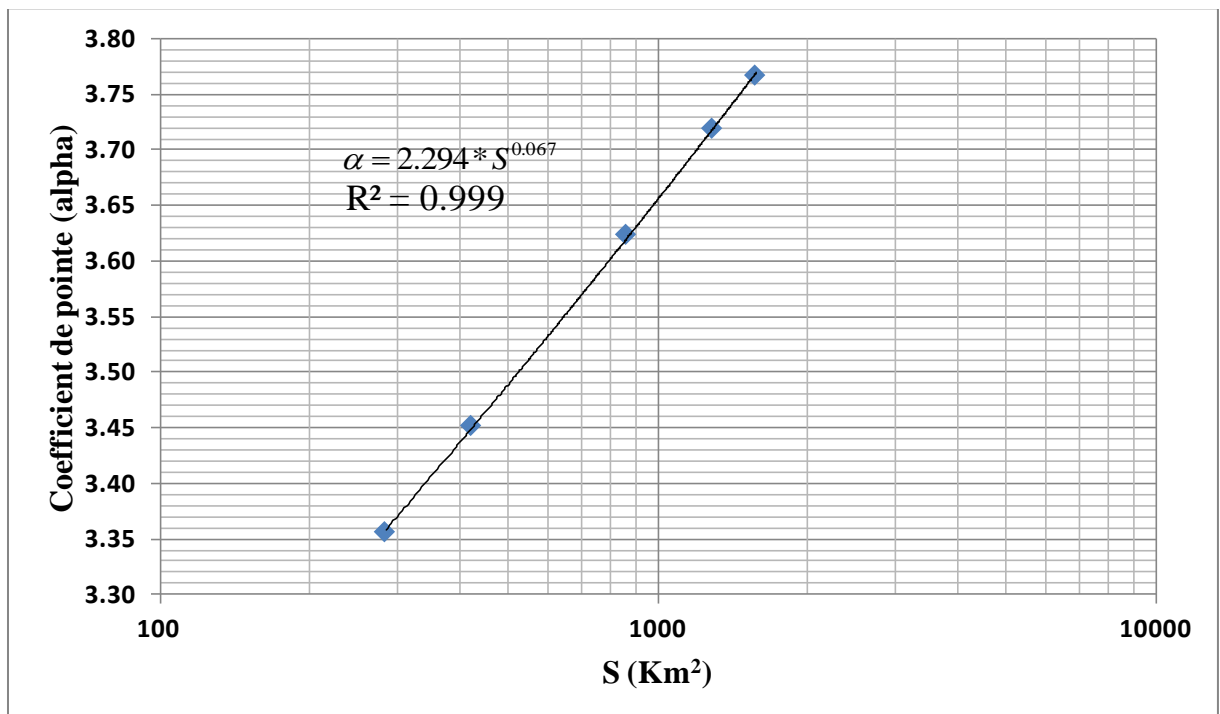
Entre 25 et 75 km<sup>2</sup>, les valeurs de  $\alpha$  sont intermédiaires. Ainsi  $\alpha = 2,75$  pour 50 km<sup>2</sup>.

Le tableau V.16 suivant donne les coefficients de pointe pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab :

**Tableau V.16 :** Coefficients de pointe calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	$\alpha$
BV Ghardaïa	284	3,36
El Haïmeur dbd	423	3,45
El Abiodh dbd	866	3,62
<b>M'Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>3,72</b>
<b>M'Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>3,77</b>

Sur la figure V.11, le tableau V.16 a été transformé en diagramme. Ce diagramme donne les coefficients de pointe en fonction des différentes superficies du bassin versant:



**Figure V.11:** Variation du coefficient de pointe en fonction de la superficie

Le diagramme a été traduit en une équation, dont la formulation est en V.21

$$\alpha = 2,294 * S^{0,067} \quad (\text{V.21})$$

## e)-Débit de pointe

Le tableau V.17 donne les débits de pointe pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab :

**Tableau V.17** : Débits de pointe calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	Pj (mm) (T=100 ans)	Kr (%)	Ka	Tb (h)	Qmoy (m <sup>3</sup> /s)	$\alpha$	Qmax (m <sup>3</sup> /s)
BV Ghardaïa	284	83	39,57	0,77	17,15	116	3,36	390
El Haïmeur dbd	423	83	36,84	0,75	19,86	136	3,45	468
El Abiodh dbd	866	83	32,38	0,72	25,85	180	3,62	651
<b>M'Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>83</b>	<b>30,14</b>	<b>0,70</b>	<b>29,92</b>	<b>209</b>	<b>3,72</b>	<b>779</b>
<b>M'Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>83</b>	<b>29,08</b>	<b>0,70</b>	<b>32,20</b>	<b>229</b>	<b>3,77</b>	<b>863</b>

## f)- Volume de crue

Le volume de crue,  $V_t$ , d'occurrence centennial est estimé, en millions de m<sup>3</sup>, par: (BG, 1996)

$$V_t = P_j \cdot K_a \cdot K_r \cdot \frac{S}{1000} [10^6 m^3] \quad (\text{V.22})$$

Ka étant un coefficient d'abattement et Kr le coefficient de ruissellement. Pj est la pluie maximale journalière d'occurrence centennale égale à 82,9 mm

Le tableau V.18 donne le Volume de crue calculé pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab :

**Tableau V.18** : le Volume de crue  $V_t$  calculé pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	Pj (mm) (T=100 ans)	Kr (%)	Ka	V <sub>t</sub> (Mm3)
BV Ghardaïa	284	83	39,57	0,77	7,139
El Haïmeur dbd	423	83	36,84	0,75	9,686
El Abiodh dbd	866	83	32,38	0,72	16,739
<b>M'Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>83</b>	<b>30,14</b>	<b>0,70</b>	<b>22,654</b>
<b>M'Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>83</b>	<b>29,08</b>	<b>0,70</b>	<b>26,370</b>

**g)- Hydrogramme de crue*****Volume de crue***

Les variations de  $K_a$  peuvent être choisies comme :

$$K_a = 1,056 \cdot S^{-0,05} \quad (\text{V.14})$$

Le coefficient de ruissellement vaut pour la crue centennale:

$$K_r = 1,094 \cdot S^{-0,18} \quad (\text{V.15})$$

La combinaison des équations (V.14), (V.15) et (V.22) conduit à la formule V.23

$$V_t = \frac{S^{0,77}}{10,44} [10^6 m^3] \quad (\text{V.23})$$

***Débit de pointe***

Le temps de montée de l'hydrogramme de crue vaut, en secondes :

$$T_m = 1418,4 \cdot S^{0,408} [s] \quad (\text{V.17})$$

Le temps de base (durée d'écoulement) est estimé par la formule V.16

$$T_b = 7722 \cdot S^{0,368} [s] \quad (\text{V.16})$$

Le débit de pointe est évalué par le biais d'un coefficient de pointe:

$$\alpha = \frac{Q_p}{Q_{moy}} = \frac{Q_p \cdot T_b}{V_t} \quad (\text{V.19})$$

Lequel est admis valoir :

$$\alpha = 2.294 \cdot S^{0,067} \quad (\text{V.21})$$

Le débit de pointe de la crue centennale (formule V.24) s'obtient en combinant les équations (V.16), (V.21) et (V.23):

$$Q_{p,100} = 28.455 \cdot S^{0,469} \quad (\text{V.24})$$

### Hydrogramme Synthétique de Maxwell

On a :

$$Q(t) = Q_p \cdot \left( \frac{t}{T_m} \cdot e^{1 - \frac{t}{T_m}} \right)^n \quad (\text{V.9})$$

Le volume total  $V_t$  en  $\text{m}^3$  est :

$$V_t = Q_p \cdot T_m \cdot 2.687 \cdot n^{-0.5252} \quad (\text{V.10})$$

Le facteur de forme peut être obtenu en égalant les volumes de crue :

$$V_t = 28,455 * S^{0.469} * 1418,4 * S^{0.408} * 2,687 \cdot n^{-0.5252} = \frac{10^6}{10,44} * S^{0.77}$$

D'où la formule V.25 est obtenue :

$$n \approx 1,067 \cdot S^{0.204} \quad (\text{V.25})$$

Le tableau V.19 donne les facteurs de forme pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab :

**Tableau V.19** : Facteurs de forme calculés pour les différentes superficies du bassin versant du M'Zab

ID BV	S (Km <sup>2</sup> )	n
BV Ghardaïa	284	3,38
El Haïmeur dbd	423	3,66
El Abiodh dbd	866	4,24
<b>M'Zab dbd</b>	<b>1289</b>	<b>4,60</b>
<b>M'Zab El Atteuf</b>	<b>1573</b>	<b>4,79</b>

La figure V.12 représente l'hydrogramme de crue obtenu par l'application de la méthode de Maxwell et cela pour une période de retour de 100 ans.



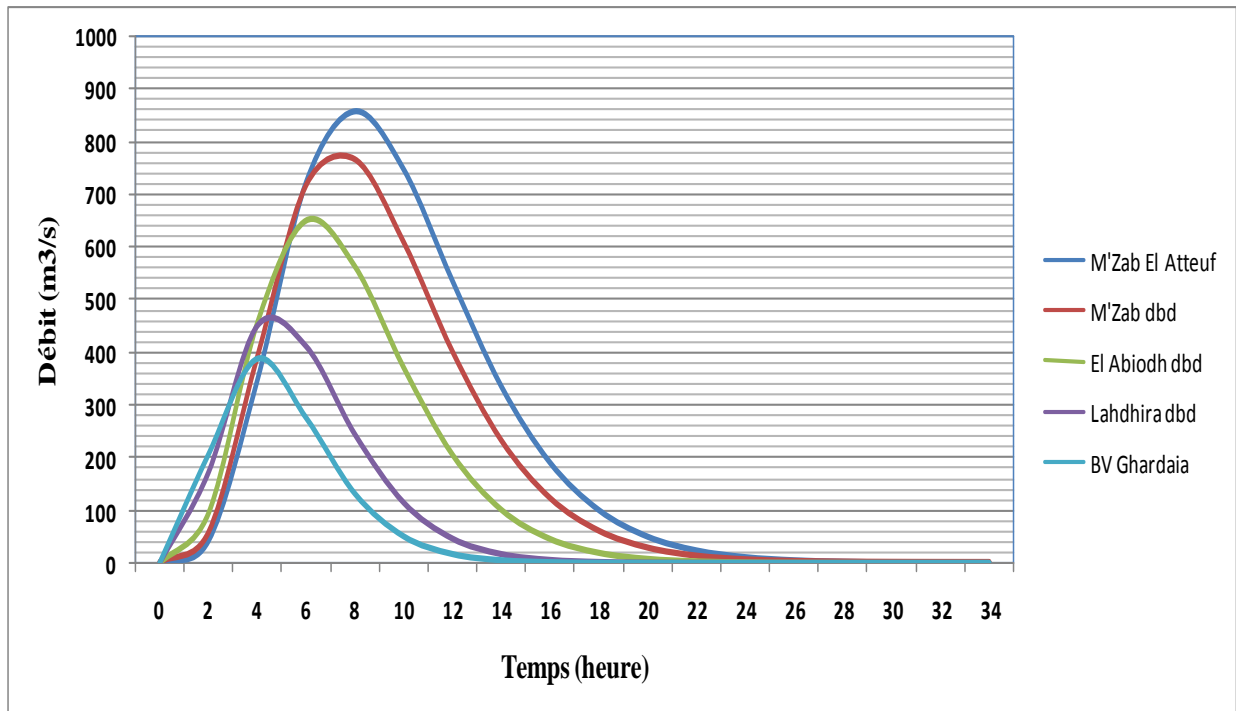


Figure V.12 : Hydrogramme Synthétique (Maxwell) pour une période de retour de 100 ans

### 2.3 Application à d'autres périodes de retour

La crue centennale correspondrait à une pluie journalière de 82,9 mm, la crue millennale à une pluie journalière de 106 mm. Compte tenu des incertitudes sur l'augmentation du coefficient de ruissellement et la diminution concomitante du coefficient d'abattement, on attribuera un accroissement du débit max et du volume de la crue proportionnel à celui de la pluie, soit un coefficient "C" de 1,28. Le même principe s'applique pour les autres périodes de retour. Les résultats sont donnés dans le tableau V.20 pour El Atteuf et dans le tableau V.21 pour Dayet Ben Dahoua.

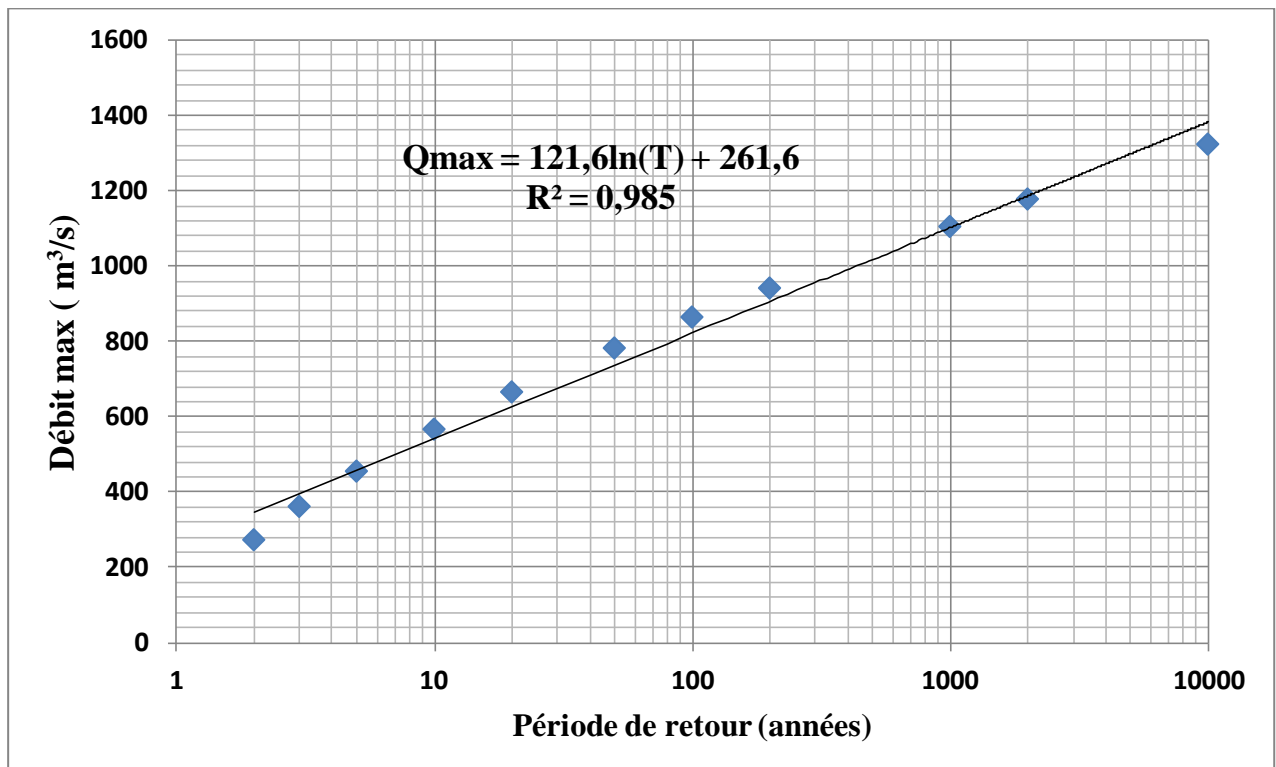
Tableau V.20 : Débit max et Volume de crue pour les différentes périodes de retour à El Atteuf

T(en années)	Pmaxj (mm)	C	Qmax (m3/s)	Vt (Mm3)
10000,00	127	1,53	1323	40,40
2000,00	113	1,36	1177	35,94
1000,00	106	1,28	1104	33,72
200,00	90	1,09	940	28,72
100,00	83	1,00	863	26,37
50,00	75	0,90	781	23,86
20,00	64	0,77	664	20,29
10,00	54	0,66	565	17,27
5,00	44	0,53	454	13,87
3,00	35	0,42	360	11,01
2,00	26	0,31	272	8,30

**Tableau V.21** : Débit max et Volume de crue pour les différentes périodes de retour à Dayet Ben Dahoua

T(en années)	Pmaxj (mm)	C	Qmax (m3/s)	Vt(Mm3)
10000,00	127	1,53	1193	34,71
2000,00	113	1,36	1061	30,88
1000,00	106	1,28	996	28,97
200,00	90	1,09	848	24,68
100,00	83	1,00	779	22,65
50,00	75	0,90	704	20,50
20,00	64	0,77	599	17,43
10,00	54	0,66	510	14,84
5,00	44	0,53	410	11,91
3,00	35	0,42	325	9,46
2,00	26	0,31	245	7,13

Sur les figures V.13, V.14, V.15 et V.16, les tableaux V.20 et V.21 ont été transformés en diagrammes. Ces diagrammes donnent la variation du débit de pointe et du volume de crue en fonction des différentes périodes de retour.



**Figure V.13** : Variation du débit de pointe en fonction de la période de retour à El Atteuf

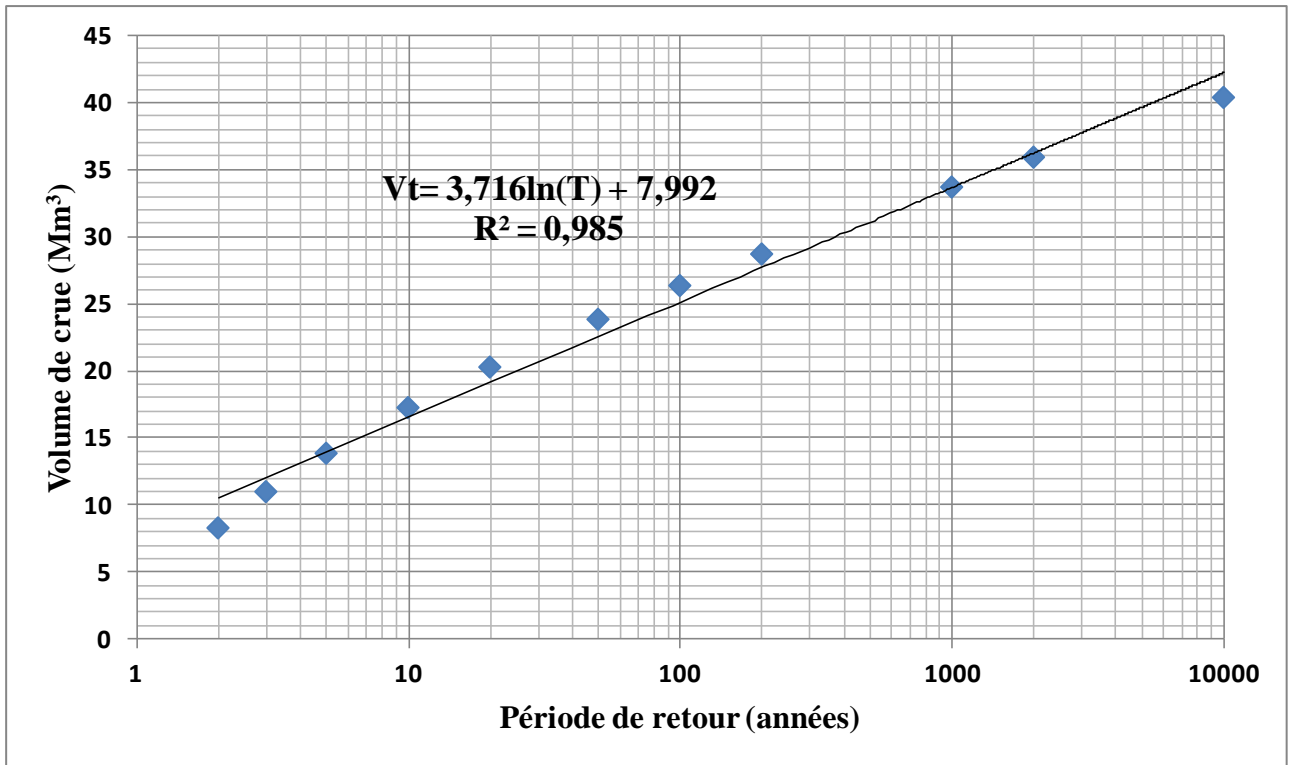


Figure V.14 : Variation du volume de crue en fonction de la période de retour à El Atteuf

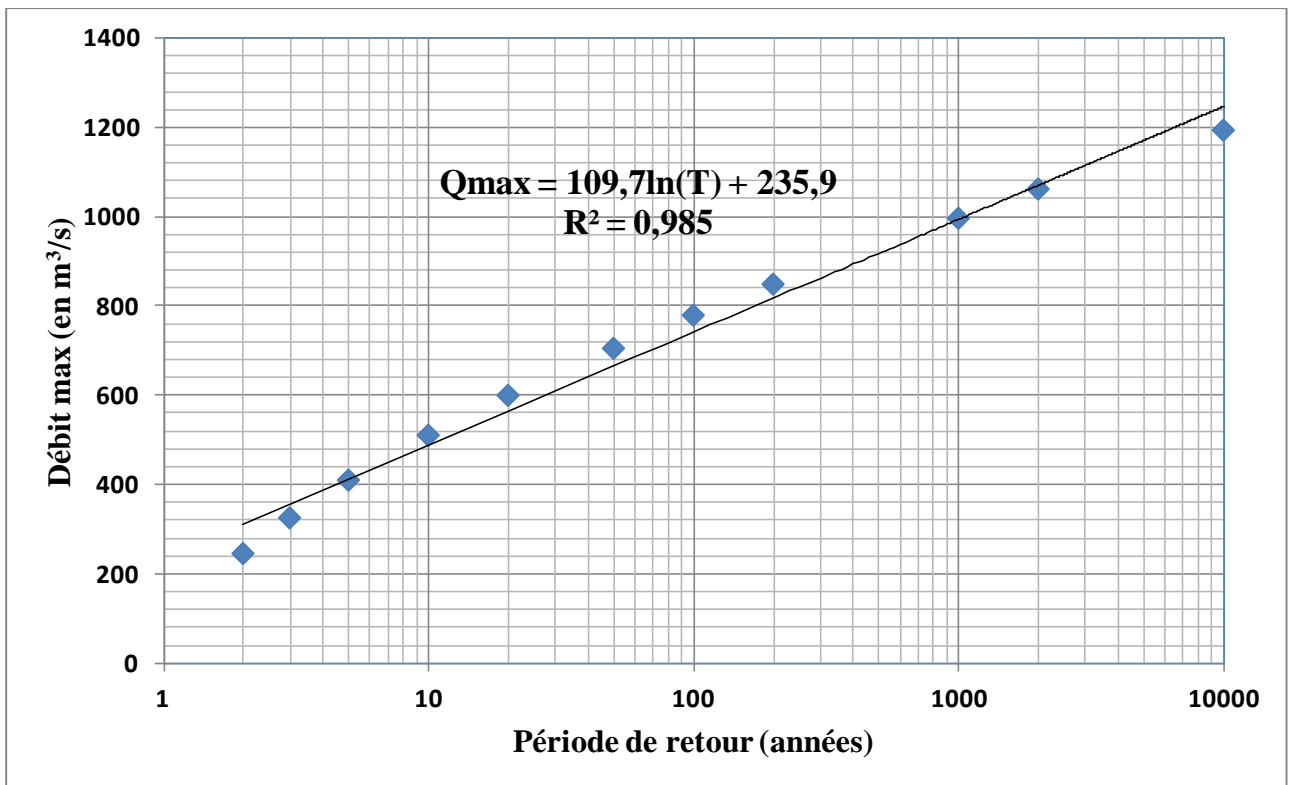
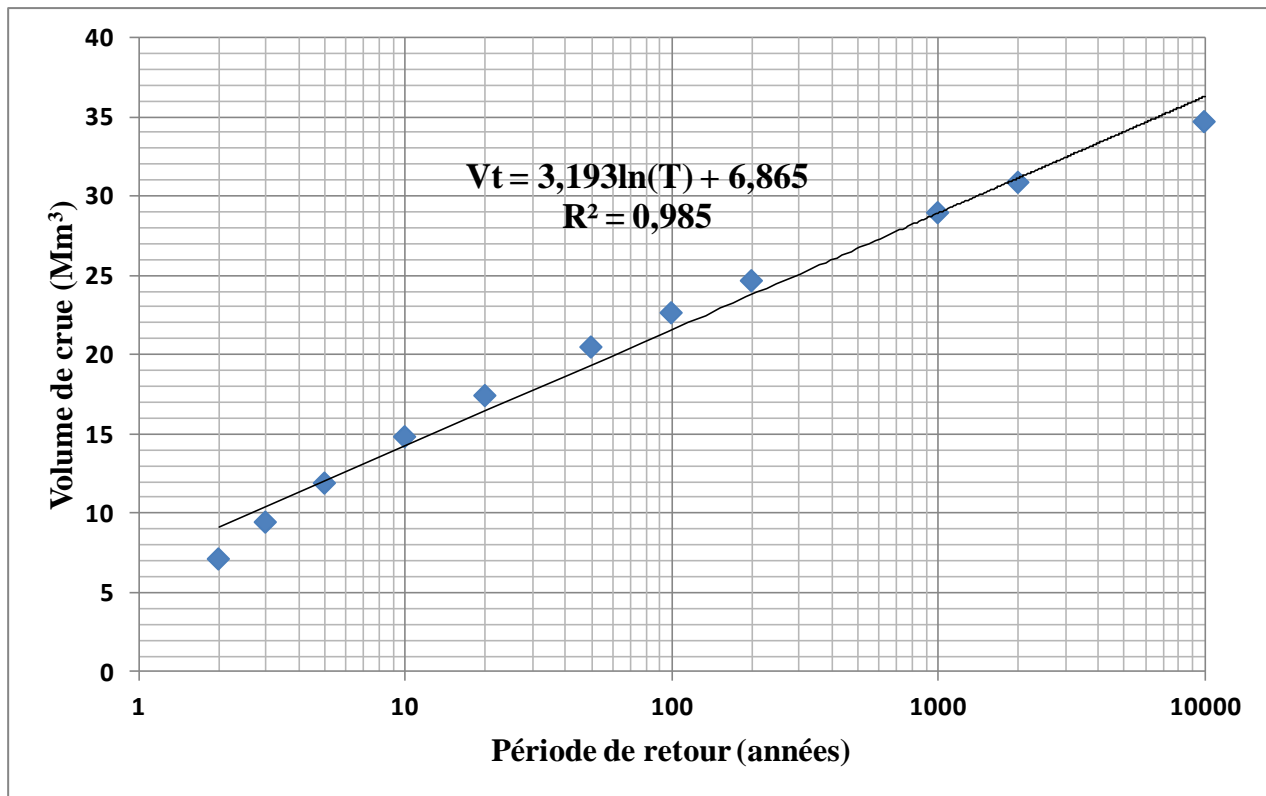


Figure V.15 : Variation du débit de pointe en fonction de la période de retour à Dayet Ben – Dahoua



**Figure V.16:** Variation du volume de crue en fonction de la période de retour à Dayet Ben-Dahoua

### 3. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE PAR HEC-RAS

La protection de la vallée du M'Zab contre les inondations nécessite la connaissance, en plus des débits de crue, des hauteurs d'eau dans l'Oued M'Zab pendant les différentes périodes et plus particulièrement pendant les périodes de fortes crue.

Le calcul de la ligne d'eau permet d'établir des cartes de zones inondables, de recalibrer la vallée du M'Zab le long du tronçon choisi et de faire le choix des différents aménagements à mettre en place afin d'augmenter la capacité hydraulique du cours d'eau.

La présente section est consacrée à la modélisation Hydrodynamique du tronçon situé dans la zone Ahbas, à l'aval immédiat de la digue d'El Atteuf (exutoire du bassin versant étudié) d'une longueur de 3286 m.

Dans ce travail, les simulations numériques ont été exécutées pour une période de retour de 100 ans.

#### 3.1 Modèles hydrodynamiques

Le calcul de la ligne d'eau se fait par des modèles hydrodynamiques. Ces modèles sont basés généralement sur la résolution des équations de Saint –Venant. Ces modèles donnent comme résultats de calcul les hauteurs d'eau et les vitesses dans tous les points du cours d'eau. D'autres résultats peuvent être obtenus à l'aide de ces modèles. Quelques logiciels de modélisation hydrodynamique sont présentés dans le tableau V.22.

Parmi les programmes présentés dans ce tableau, le programme HEC-RAS, répond parfaitement à notre objectif.

**Tableau V.22** : Logiciels de modélisation hydrodynamique

	Description	Equation	Nom du logiciel	Atouts	Limites
Modélisations 1D dites filaires	Onde cinématique	Barré Saint-Venant simplifié (BSV 1D)	LISFLOOD-FP (Bates et De Roo 2000)	Permet d'utiliser des données topographiques précises	Equations simplifiées
	SCM (Single Channel Method)	Barré Saint-Venant (BSV 1D)	Thalweg-Fluvia (CEMAGREF)		
Modélisations 1D à casiers (pseudo 2D)	Modélisation 1D à casiers (pseudo 2D)	BSV 1D	LIDO (CETMEF)	Conçu pour les grandes plaines inondables	
	DCM (Divided Channel Method)	BSV 1D	HEC-RAS (USACE), Mike 11 (DHI)	Robustesse et fiabilité	Peu adapté aux reliefs complexes
	DCM + échange turbulent	BSV 1D	Mascaret (EDF), Mage5 (CEMAGREF)	Tient compte des échanges turbulents entre lits	
	EDM (Exchange Discharge Method)	BSV 1D	Axeriv (Université Louvain)	Tient compte des échanges turbulents et des transferts de masse entre lits	Peu diffusé, reste du domaine de la recherche
Modélisations 2D		BSV 2D	DECAMETRE Telemac 2D (LNH-EDF), Mike 21 (DHI), RUBAR (CEMAGREF)	Adapté aux reliefs et aux champs de vitesse complexes	Temps de calculs longs
Modélisations 3D		Navier-Stokes	Mike 3 (DHI)	Equations complètes	Temps de calculs très longs

Source : Goudjil et Kaci, 2009

Ce logiciel, développé par le US Hydrologic Engineering Center, permet, sur la base de la géométrie du cours d'eau, de la rugosité des sections, de la répartition spatiale des débits, de calculer les hauteurs d'eau atteintes en tout point du réseau. Ce modèle, monodimensionnel en régime permanent est le successeur du bien connu HEC-2 et bénéficie donc de la robustesse et de la fiabilité du moteur de calcul de ce dernier. Il présente de nombreuses améliorations, tant dans la saisie des données et l'exploitation des résultats, que dans les fonctionnalités de modélisation. HEC-RAS résout « l'équation de l'énergie unidimensionnelle » en régime graduellement varié. Les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les cas des régimes rapidement variés tels que les ressauts hydrauliques, les écoulements à proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement. Pour les écoulements débordants, la section totale est divisée en sous sections homogènes en terme de forme et de rugosité, et chaque débit partiel "Qi" est calculé selon la "Divided Channel Method" à l'aide de la formule de Manning-Strickler.

### 3.2 Formulations utilisées par HEC-RAS

Considérant deux sections 1 et 2 séparées d'un pas d'espace  $\Delta x$ ,  $E_1$  et  $E_2$  étant les énergies spécifiques de l'écoulement à ces mêmes points, d'où :

$$E_2 - E_1 = (\sin(\alpha) - J) \cdot \Delta x \quad (\text{V.26})$$

Qui se réduit au modèle de Bernoulli utilisé dans le programme HEC-RAS pour calculer les hauteurs d'eau lorsque la pente du canal est faible ( $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha) \approx I$  et  $\cos(\alpha) \approx 1$ ).

Concernant le calcul de la ligne d'eau, il s'effectue suivant la "Standard Step Method" qui est une procédure itérative de résolution de l'équation donnant la pente d'énergie  $J$ .

Cette dernière est supposée égale à la somme de pertes de charge par frottement  $J_f$ , et la perte par contraction ou expansion de la section, soit (Goudjil et Kaci, 2009) :

$$J = J_f + \frac{C}{\Delta x} \left| \beta_2 \frac{U_2^2}{2g} - \beta_1 \frac{U_1^2}{2g} \right| \quad (\text{V.27})$$

Le programme divise la section mouillée en trois sous sections. Le coefficient de forme  $\beta$  sur la section totale est calculé par la formule V.28 :

$$\beta = \frac{S_t^2}{D_t^3} \cdot \left( \frac{D_{lob}^3}{S_{lob}^2} + \frac{D_{ch}^3}{S_{ch}^2} + \frac{D_{rob}^3}{S_{rob}^2} \right) \quad (\text{V.28})$$

Où les indices **lob**, **ch**, **rob** et **t** désignent les lits gauche, mineur, droit, et total respectivement;  $D_i$  est la débitance de la sous section  $i$ .

Dans le calcul, les coefficients  $\beta$  par sous-section étant supposés égaux à **1**. D'autre part, le pas d'espace  $\Delta x$  est calculé par la formule V.29 :

$$\Delta x = \frac{\Delta x_{lob} \cdot Q_{lob} + \Delta x_{ch} \cdot Q_{ch} + \Delta x_{rob} \cdot Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (\text{V.29})$$

Enfin, la pente de frottement entre les sections **1** et **2** ( $J_f$ ) est calculée dans le HEC-RAS par la formule V.30:

$$J_f = \frac{\lambda}{D_h} \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (\text{V.30})$$

$$\lambda = \frac{\text{Re}^{\frac{1}{3}}}{8gn^2} \quad (\text{V.31})$$

La méthode utilisée par le logiciel pour calculer le coefficient de Manning équivalent est montrée dans la formule V.32 :

$$n_c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N P_i n_i^{\frac{1}{5}}}{P} \right]^{\frac{2}{3}} \tag{V.32}$$

Avec N= 3 puisque le logiciel nécessite l'entrée des trois coefficients de Manning, pour le lit mineur et pour chaque rive.

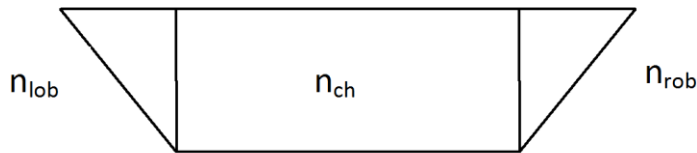


Figure V.17: Coefficients de rugosité

### 3.3 Terminologie utilisée par HEC-RAS

HEC-RAS utilise le concept de Projet afin de réaliser une simulation du comportement hydraulique d'un cours d'eau. Tel que défini par HEC-RAS, un projet est un ensemble de fichiers permettant de simuler le comportement hydraulique d'un cours d'eau pour diverses conditions. La notion de Projet comprend également un ensemble d'autres termes qui lui sont associés et ceux-ci sont expliqués dans cette section. La figure V.18 illustre la hiérarchie des fichiers d'un projet (HEC-RAS, 2009).

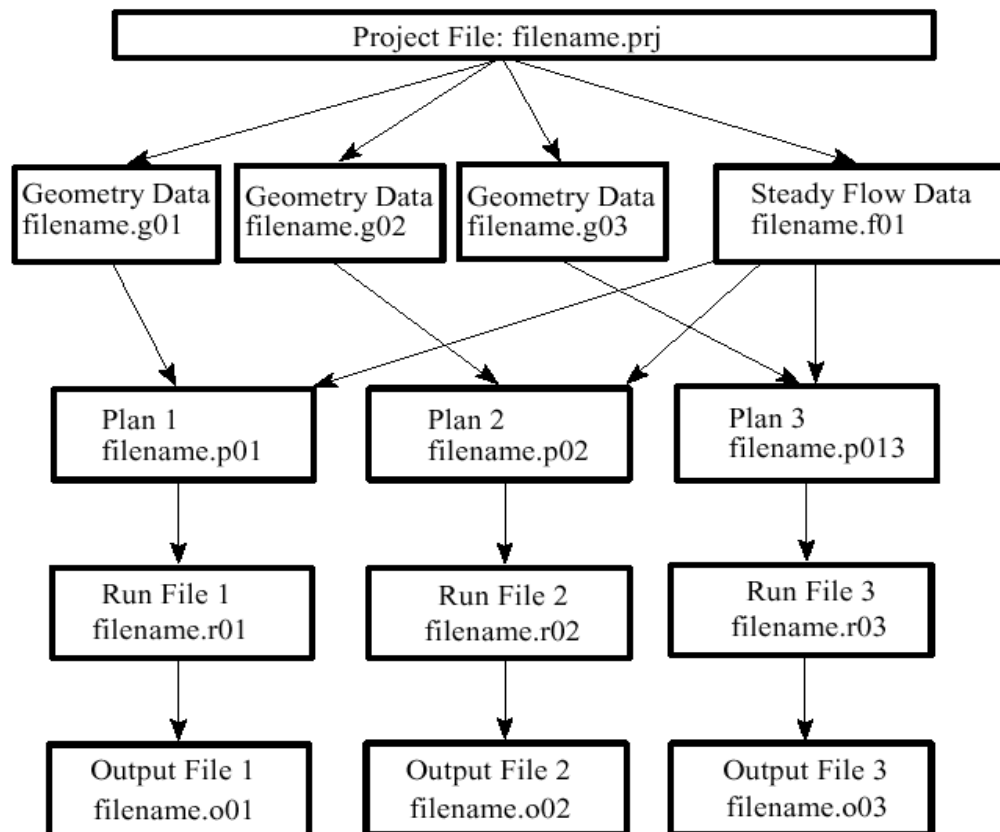


Figure V.18 : Schéma des fichiers d'un projet (HEC-RAS, 2009)

**Projet (Project) :** Le fichier Projet contient le titre et la description du projet, le système d'unité utilisé et les liens vers tous les fichiers qui lui sont associés. Il contient aussi les variables par défaut qui peuvent être définies par l'utilisateur et une référence au dernier Plan utilisé (voir la description d'un Plan plus bas). Il comporte l'extension .PRJ.

**Géométrie (Geometry) :** Ce fichier contient toutes les informations géométriques sur le cours d'eau analysé, soit le schéma arborescent, les sections transversales, la distance entre chaque section, les coefficients de Manning et s'il y a lieu, les structures présentes (ponts, ponceaux). Un projet peut comporter plusieurs géométries afin d'analyser différentes variantes (par exemple avec ou sans obstruction dans la rivière). Les fichiers peuvent ainsi comporter l'extension .G01 à G.99.

**Débit (Flow) :** Le fichier Débit est utilisé pour simuler les écoulements permanents. Il contient le nombre de Profile devant être calculés, les données de débit pour chacun d'eux et les conditions limites pour chaque tronçon. Un Profile désigne l'ensemble des niveaux d'eau calculés pour des conditions particulières de débit. De la même façon que précédemment, l'extension du fichier peut être de .F01 à .F99.

**Plan (Plan) :** Un fichier Plan contient un titre et une description du plan, de façon similaire aux informations d'un Projet. Il contient de plus la référence aux fichiers Géométrie et Débit associés à ce Plan. Le concept de Plan permet ainsi de simuler différentes combinaisons de Géométrie et de débit qui peuvent être nécessaires dans le cadre d'une étude hydraulique. Il y a un fichier .P\*\* pour chaque Plan et ceux-ci peuvent comporter l'extension .P01 à .P99.

**Simulation (Run) :** Le fichier simulation contient toutes les données nécessaires à l'exécution d'une simulation, définie à l'intérieur d'un Plan. Ce fichier est automatiquement créé par HEC-RAS lorsqu'une simulation est lancée. Son extension peut être .R01 à .R99. Par exemple, le fichier .R01 correspond au Plan .P01

**Résultats (Output) :** Tous les résultats d'une simulation sont contenus dans le fichier Output. Les fichiers de résultats possèdent l'extension .O01 à .O99 et leur numérotation est également associée à celle des fichiers Plan.

Tous les fichiers créés à l'intérieur d'un même projet comportent le même nom, soit celui défini au départ par l'utilisateur. Seule l'extension diffère et les différentes extensions des fichiers sont automatiquement créées par HEC-RAS et ne doivent pas être modifiées. Pour les fichiers dont l'extension inclut un nombre, celui-ci correspond à l'ordre dans lequel les fichiers ont été sauvegardés. La numérotation des fichiers Plan, Run et Output est également liée entre eux.

### 3.4 Modélisation du tronçon de l'Oued M'Zab

La modélisation du tronçon de l'Oued M'Zab débute par la définition de la géométrie de ce tronçon.

#### 3.4.1 Définition de la géométrie du tronçon de l'Oued

La définition de la géométrie du tronçon est la première étape de la modélisation hydraulique. Elle consiste à reproduire le plus précisément possible la topographie de ce tronçon dans le logiciel utilisé et d'intégrer les ouvrages hydrauliques qui ont un rôle sur l'écoulement.



La définition physique du cours d'eau est fondamentale dans la modélisation puisque la topographie a un impact très important sur les lignes d'eau simulées et sur tous les calculs hydrauliques. Il faut donc être très vigilant pour prendre en compte tous les reliefs ayant un impact sur les écoulements simulés.

Dans le modèle HEC-RAS, la topographie du tronçon de l'Oued est définie par des profils en travers qui, dans le cadre d'une modélisation hydraulique doivent respecter six règles simples :

- Être perpendiculaires aux écoulements
- Ne jamais se croiser
- Considérer toute la largeur du lit majeur
- Décrire le profil en long
- Permettre la modélisation des ouvrages hydrauliques
- Prendre en compte les contractions et les élargissements des écoulements

La construction du modèle nécessite une bonne connaissance du terrain et des écoulements.

Les données topographiques nécessaires à la construction des profils en travers sont obtenues par des levés sur le terrain et à partir d'un MNT. Les profils en travers sont ensuite importés dans Hec-Ras. Ces profils ont été étendus afin de recouvrir l'intégralité des zones inondables.

Une fois les profils en travers sont entrés dans le logiciel de modélisation, des retouches sont établies pour améliorer la précision des profils en travers. Puisque le nombre de profil est faible pour définir convenablement le tronçon de l'Oued, de nouveaux profils sont créés par des interpolations.

La figure V.19 présente les profils en travers construits et importés dans Hec-Ras pour l'établissement de la topographie du tronçon considéré.

La précision de la topographie dépend du nombre de profils en travers, de la distance séparant chaque point sur la largeur des profils en travers mais également de la distance séparant les profils issus d'interpolation.

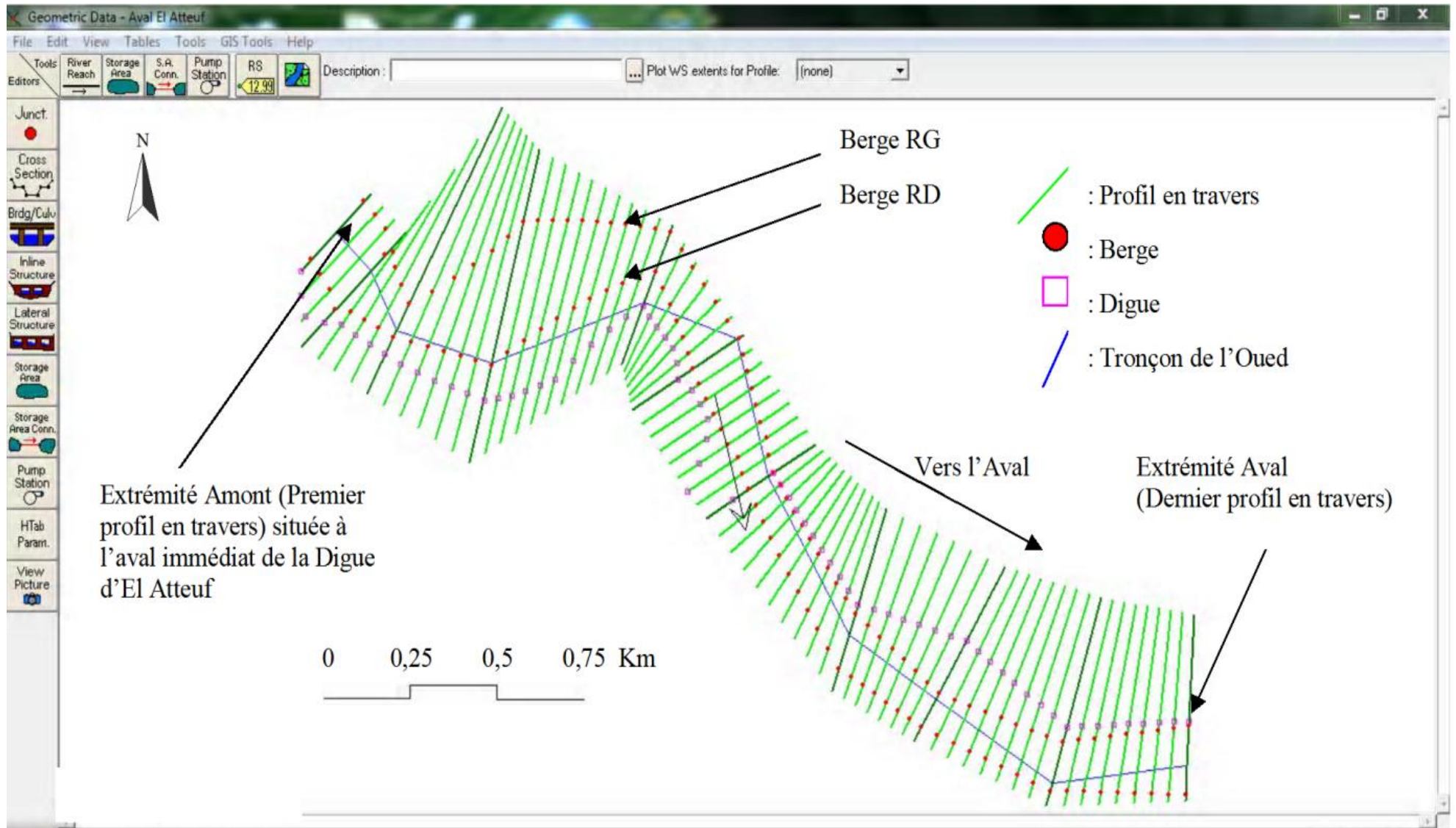
Les profils en travers permettent de définir le lit mineur du cours d'eau de façon très précise. Mais en ce qui concerne le lit majeur, la définition de la topographie est beaucoup moins efficace puisque le positionnement des profils en travers ainsi que les interpolations entre les profils ne permettent pas de prendre en compte toutes les aspérités du relief.

La définition physique du tronçon étant terminée, la modélisation se poursuit maintenant par l'introduction des données de base nécessaires à la simulation.

### **3.4.2 Données de base**

#### **Conditions aux limites**

Dans tous modèles hydrauliques, il est nécessaire de connaître et de définir les conditions aux limites, c'est-à-dire les conditions hydrauliques du cours d'eau à l'amont et à l'aval des limites du modèle. Elles sont utilisées pour résoudre les équations qui permettent de réaliser les simulations et sont donc très importantes. Les conditions aux limites peuvent être définies par une hauteur d'eau ou par un débit constant ou variable au cours du temps.



**Figure V.19** : Profils en travers construits et importés dans "HEC-RAS"

La définition des conditions aux limites dans le logiciel HEC-RAS (à une dimension) est très simple. Il suffit simplement de renseigner le premier profil en travers du tronçon par une condition limite amont et le dernier profil par la condition limite aval. La principale contrainte du logiciel HEC-RAS est l'homogénéité du paramètre hydraulique considéré pour définir les conditions aux limites. En effet, le paramètre hydraulique utilisé pour définir la condition limite sera considéré comme constant sur toute la largeur du profil en travers. Aux extrémités amont et aval du tronçon considéré de l'oued M'Zab, la hauteur normale des écoulements a été choisie comme condition.

### **Régime hydraulique : Le choix du régime permanent**

Le régime hydraulique est déterminant sur les résultats d'une simulation. Le choix du régime hydraulique dépend surtout de l'usage des résultats et des applications des simulations.

Il existe deux grands types de simulations : les simulations en régime permanent et celles en régime transitoire. Le régime permanent ne dépend pas du temps, c'est-à-dire que les différentes variables hydrauliques sont constantes (hauteur d'eau, vitesse...). Par contre, le régime transitoire dépend du temps. A chaque pas de temps, un calcul hydraulique est effectué pour simuler un écoulement. Ce type de régime est très intéressant pour observer les phénomènes d'écrêtement des crues. Mais l'utilisation du régime transitoire est assez lourde et instable ce qui limite son utilisation à des modèles de petite taille ou de résolution peu précise (exemple : rupture de barrage ou de digue) (Marant, 2009).

L'utilisation du régime permanent se justifie parfaitement pour répondre aux objectifs de la modélisation hydrodynamique dans l'Oued M'Zab. Le débit utilisé dans les simulations sera le débit centennal, observé sur le tronçon étudié. L'injection de ce débit constant permettra de simuler la pointe de la crue et de produire ainsi des cartes d'inondation. Dans le modèle HEC-RAS, l'utilisation du régime permanent est très simple et surtout très rapide puisque le logiciel fournit un seul résultat à chaque point.

### **Rugosité**

La rugosité a un impact considérable sur les résultats des simulations hydrauliques. Elle est couramment définie par le coefficient de rugosité de Manning ( $n$ ) ou par le coefficient de rugosité de Strickler ( $K$ ). Le coefficient de rugosité varie selon la nature des matériaux constituant le lit, les obstacles dans le lit, les changements de section et la sinuosité du cours d'eau. En d'autres termes, ce coefficient global représente l'état actuel d'alluvionnement, d'utilisation et d'entretien du lit de l'Oued M'Zab. Selon Crétenet et Martignago (1998), un coefficient de rugosité de Manning de l'ordre de 0.033 (soit un coefficient "K" égal à 30) décrit correctement les pertes de charge réparties dans le lit de l'Oued M'Zab. Le coefficient de Manning peut être déduit du tableau V.23

### **Coefficients de contraction et d'expansion**

Le code HEC-RAS recommande d'utiliser les valeurs suivantes des coefficients de contraction et d'expansion (HEC-RAS, 2009):

- S'il n'y a pas de transition, C est nul.
- Pour une transition graduelle (le cas du tronçon étudié), la valeur est de 0.1 pour le coefficient de contraction et 0.3 pour le coefficient d'expansion.
- Au niveau d'un pont, la valeur est de 0.3 pour le coefficient de contraction et 0.5 pour le coefficient d'expansion.

□ Pour une brusque variation, la valeur est de 0.5 pour le coefficient de contraction et 0.8 pour le coefficient d'expansion.

**Tableau V.23:** Valeurs du coefficient "n" de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfaits	Bon	Assez bon	Mauvais
<b>A) Canaux artificiels</b>				
Ciment lissé	0,010	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,010	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,020	0,025	0,030
Pierres sèches	0,025	0,030	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisses	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
<b>B) Cours d'eau naturels</b>				
1) propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Source : Goudjil et Kaci, 2009

### Le Débit de projet

À l'aval immédiat de la digue El Atteuf, le débit à considérer est montré dans le Tableau V.24 .Ce débit est obtenu par l'application du modèle HEC-HMS.

**Tableau V.24 :** Débit de projet

Période de retour	Débit (m <sup>3</sup> /s)
T = 100 ans	873

Après avoir construit le modèle hydraulique, défini les conditions aux limites, le régime d'écoulement et les données de base, les simulations peuvent débuter.

### 3.4.3 Simulation et visualisation des résultats

La simulation est la dernière étape de la modélisation hydraulique avec HEC-RAS. À la suite cette simulation, les résultats sont automatiquement sauvegardés dans un fichier. Un des résultats intéressant à consulter est le profil surfacique en long du tronçon simulé (Fig. V.20).

L'extrémité Amont du tronçon représente le premier profil en travers. À partir de cette extrémité il y a 71 profils en travers répartis sur une longueur de 3286.57 m. Cette longueur est la longueur du tronçon étudié.

D'après la figure V.20, un débordement du niveau d'eau le long du tronçon est observé. Le niveau d'eau dépasse le niveau des berges (à l'exception de l'extrémité Amont où les Berges n'ont pas été touchées) et même, dans certaines sections, le niveau de la digue. Certaines sections donc ont été touchées plus que d'autres. Cela est du essentiellement aux propriétés géométriques des sections en travers et du tronçon ainsi qu'aux conditions aux limites.

La section en travers à l'extrémité amont du tronçon est illustrée dans la figure V.21. Cette figure montre clairement que le niveau d'eau n'atteint pas le niveau des berges.

Pour connaître avec exactitude l'étendue des zones inondables et l'emplacement de ces zones par rapport à l'extrémité amont du tronçon étudié, il est nécessaire de présenter la courbe de variation de la largeur au miroir (largeur maximale occupée par l'eau) en fonction des distances cumulées (Fig. V.22).

Dans la figure V.22, le point de départ ( le point "0") de l'axe des abscisses représente le premier profil en travers. D'après cette figure, la zone la plus étendue se trouve à 741 m de l'extrémité amont avec une largeur au miroir de 551 m. La zone la moins étendue se trouve à une distance de 1489 m avec une largeur au miroir de 166 m.

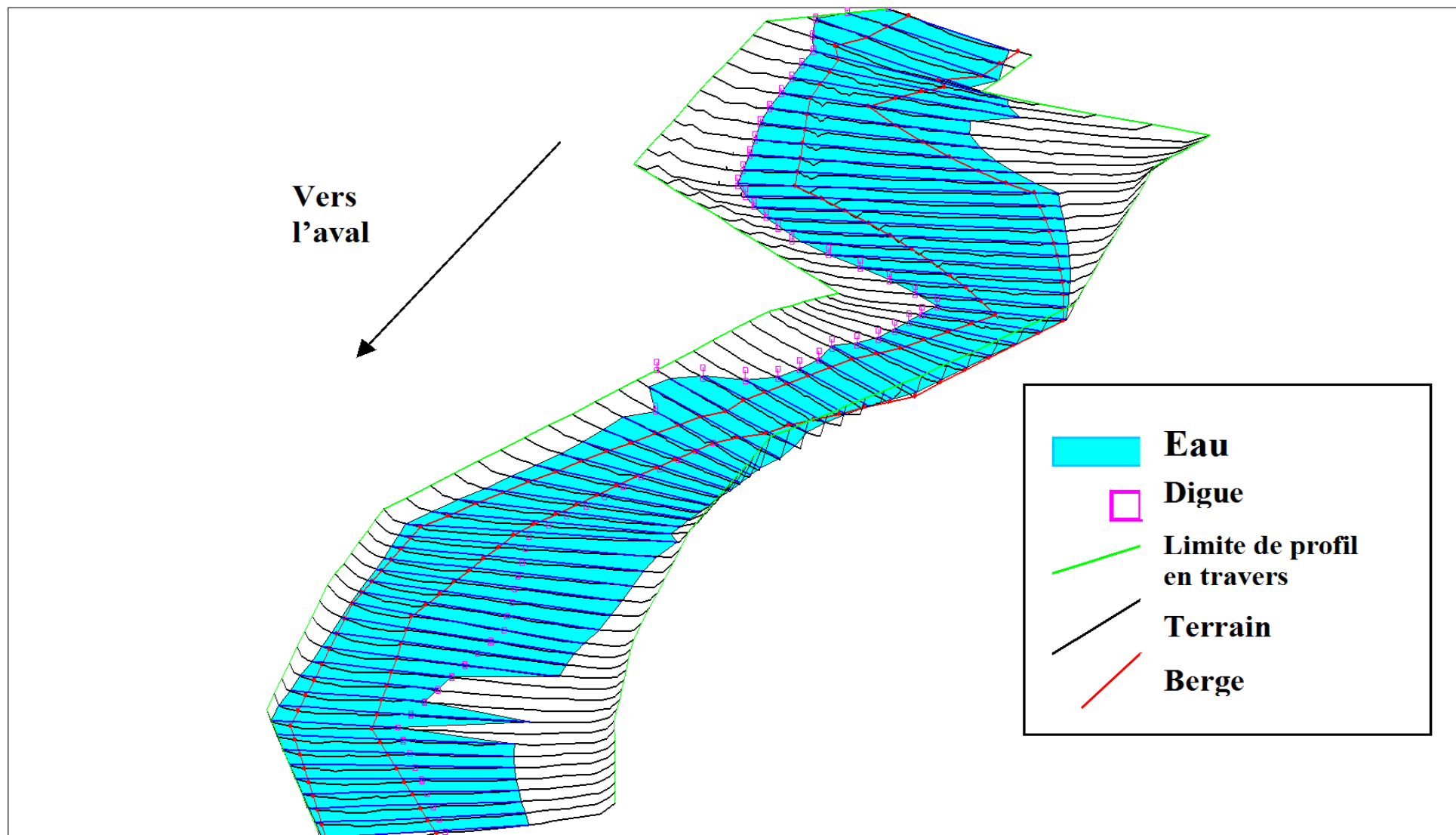


Figure V.20 : Profil obtenu sous "HEC-RAS"

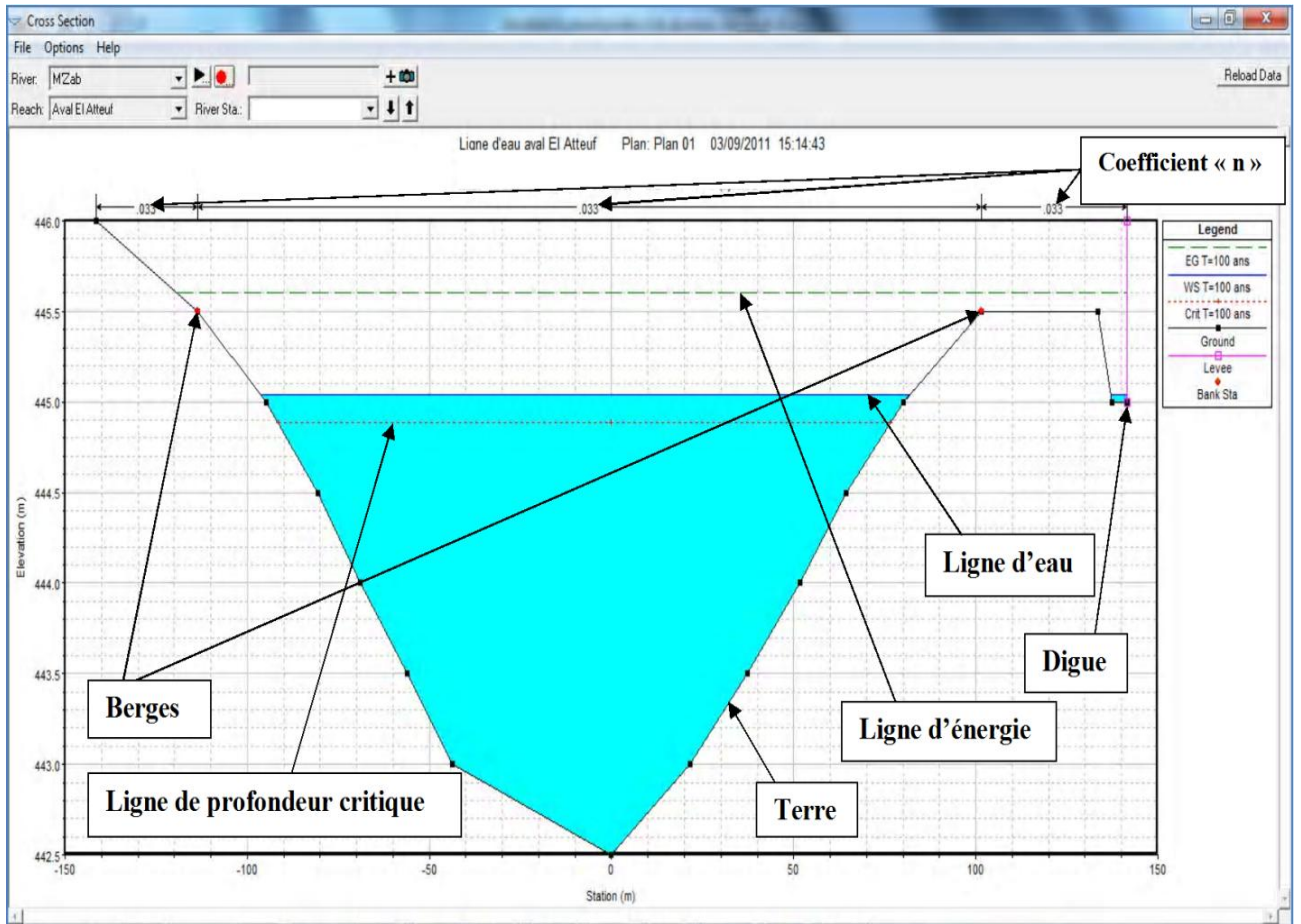


Figure V.21 : Section en travers à l'extrémité amont

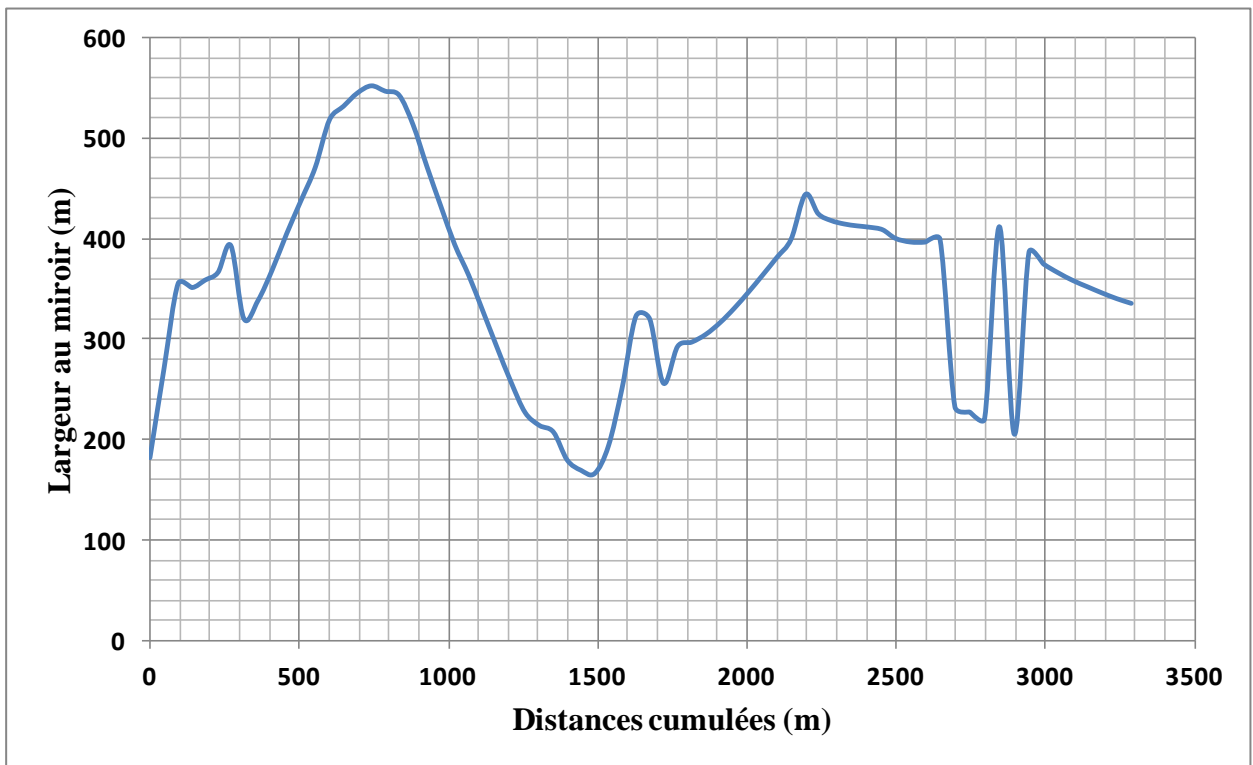
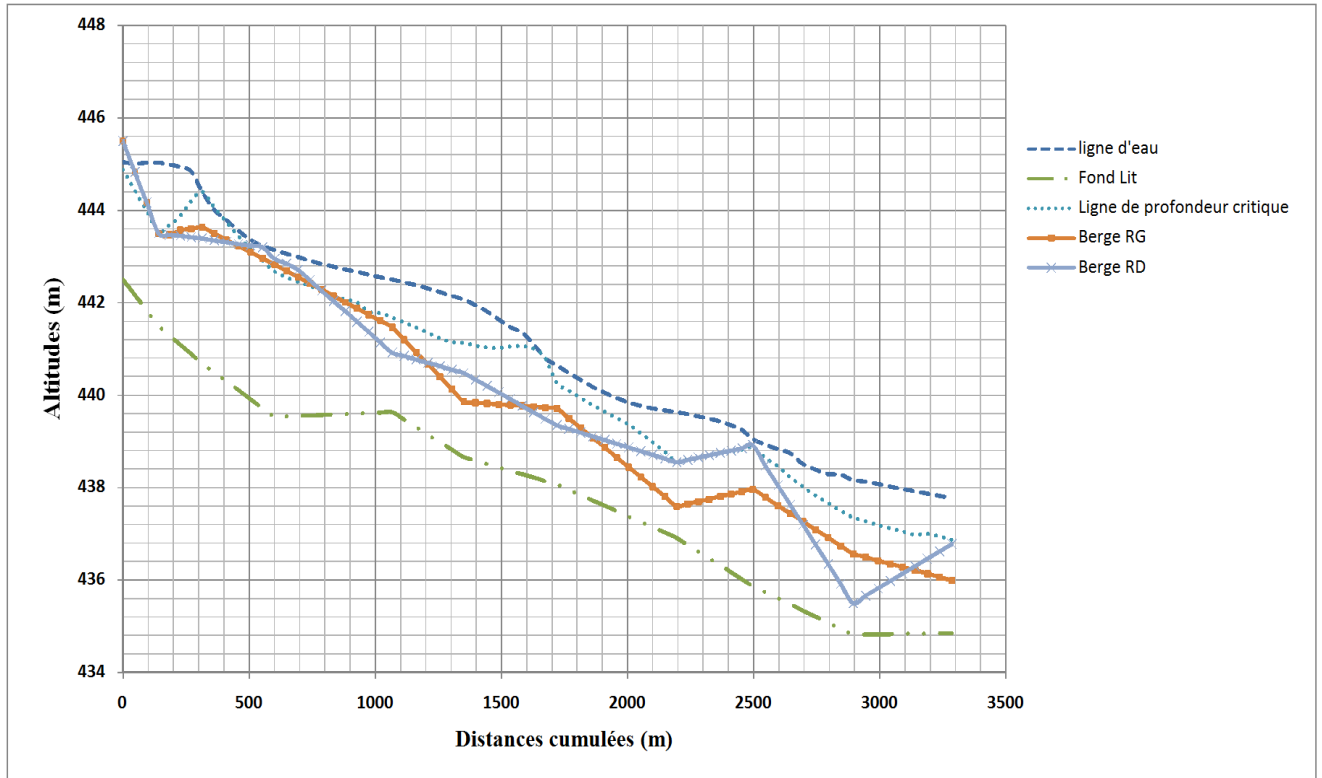


Figure V.22 : Variation de la largeur au miroir en fonction des distances cumulées

La figure V.23 permet de visualiser le profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de profondeur critique.

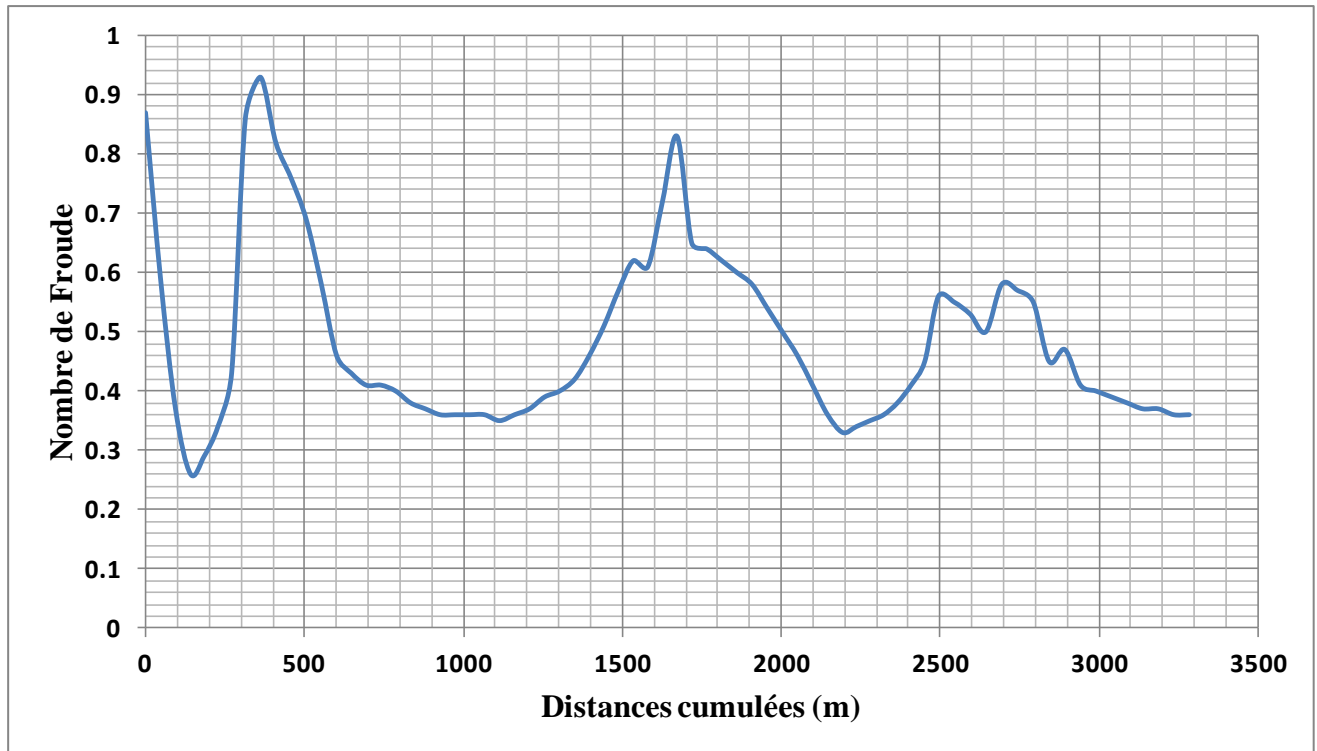


**Figure V.23 :** Profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de profondeur critique

La figure V.23 montre des niveaux d'eau élevés. Les hauteurs d'eau varient de 2,44 m (à une distance de 1910 m par rapport à l'extrémité amont) à 3,95 m (à une distance de 271 m par rapport à l'extrémité amont) au-dessus du fond. Une surélévation du plan d'eau est due essentiellement à la diminution de la largeur du lit de l'oued et au flanc rocheux en rive qui constitue un étranglement.

La figure V.23 a montré aussi que les niveaux d'eau se situent au-dessus des niveaux critiques presque dans tous les points le long du tronçon. Le régime d'écoulement est alors fluvial. Cependant, en certains points du profil en long, des hauteurs critiques semblent très proches des hauteurs d'eau. Le régime d'écoulement est peut-être critique au niveau de ces points. La figure V.24, qui représente la variation du nombre de Froude en fonction des distances cumulées, permet de vérifier si le régime critique est atteint au niveau de ces points.

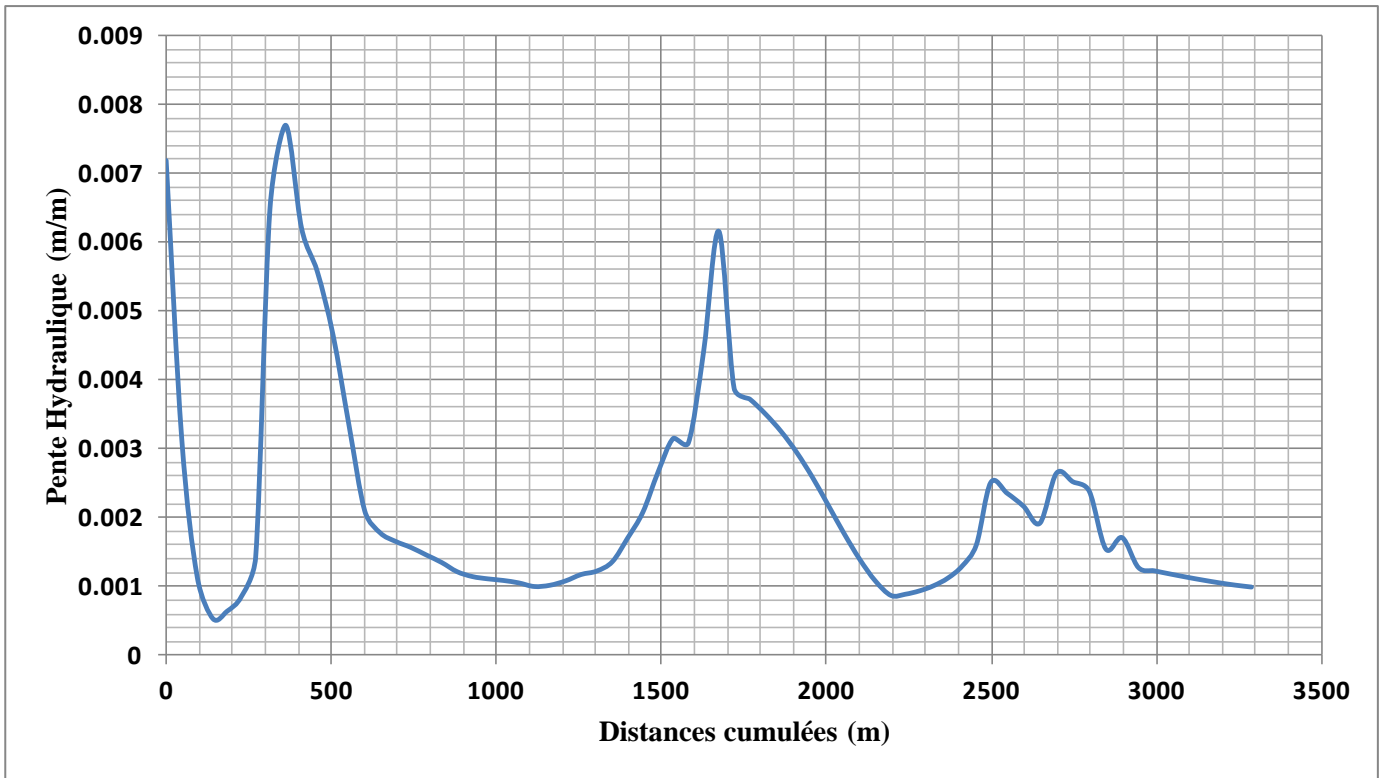




**Figure V.24 :** Variation du nombre de Froude en fonction des distances cumulées

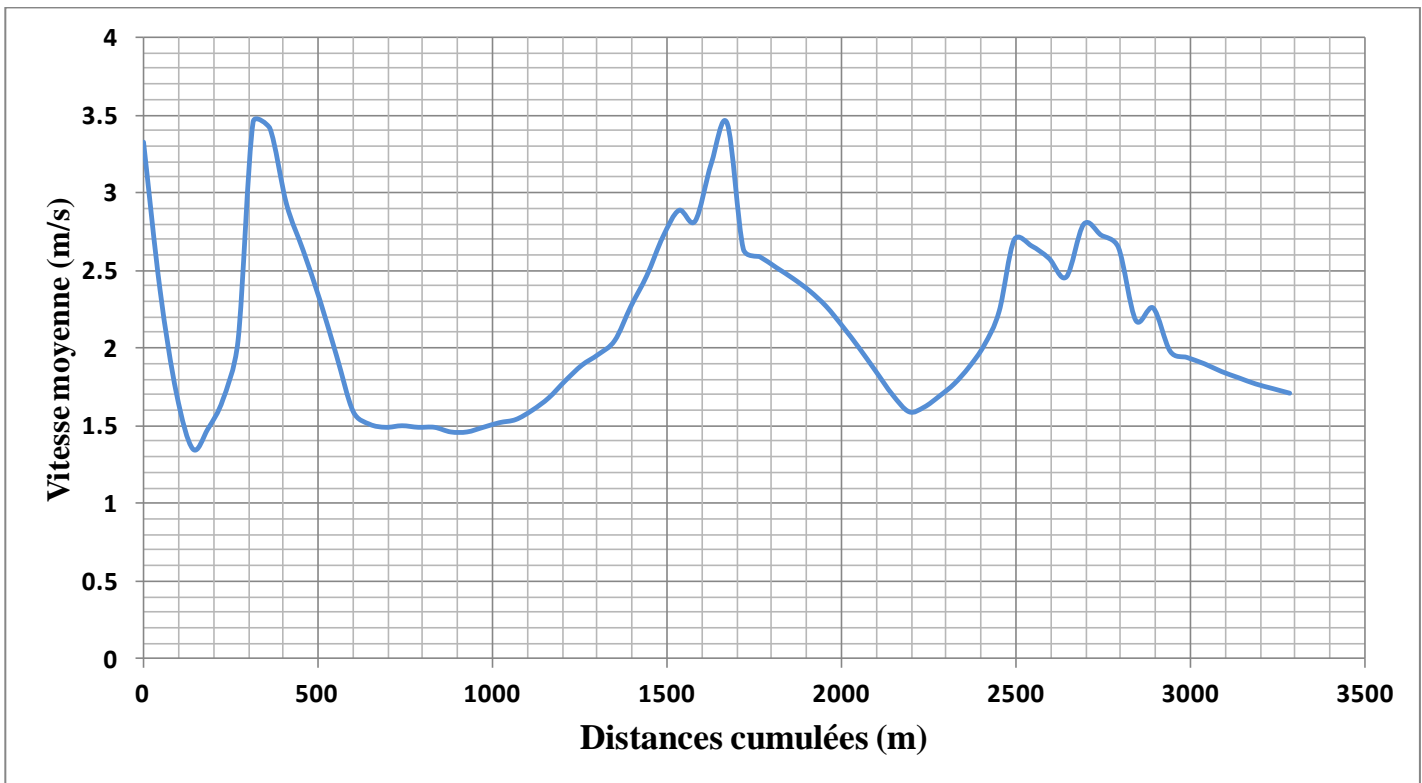
D'après la figure V.24, le nombre de Froude est inférieur à 1 dans tous les points du tronçon. Donc le régime critique n'est pas atteint. Néanmoins il y a deux points où le régime d'écoulement est proche du régime critique, le premier point est à 362 m de l'extrémité amont avec un nombre de Froude égal à 0,93 et le deuxième point est à 1674 m avec un nombre de Froude égal à 0,83.

L'allure de la courbe présentée dans la figure V.24 est parfaitement identique à l'allure de la courbe présentée dans la figure V.25. Ces deux courbes présentent deux maxima aux mêmes points. Cette ressemblance est justifiée par une relation physique qui lie la pente hydraulique avec le nombre de Froude. En effet, le nombre de Froude dépend de la pente hydraulique.



**Figure V.25 :** Variation de la pente hydraulique en fonction des distances cumulées

La figure V.26 présente la courbe de variation de la vitesse moyenne en fonction des distances cumulées.



**Figure V.26 :** Variation de la vitesse moyenne en fonction des distances cumulées

Suite à l'analyse de la figure V.26, les points suivants ont été observés :

- L'allure de la courbe présentée dans la figure V.26 est presque identique à celles présentées dans les figures V.24 et V.25.
- Les vitesses moyennes observées sont relativement importantes. Deux points présentent des valeurs maximales de vitesse ont été observés : le premier point à une valeur de 3,46 m/s (situé à une distance de 314m par rapport à l'extrémité amont) et le deuxième à une valeur de 3,45 m/s (situé à une distance de 1674 m par rapport à l'extrémité amont). La valeur minimale observée est égale à 1,46 m/s (située à une distance de 881 m par rapport à l'extrémité amont).

### Conclusion

Les débits des crues de fréquences rares ont été évalués par deux modèles :

Le Modèle Orstom, par analogie avec le Sahel et la zone subdésertique au sud du Sahara, donne à Dhayet Ben Dhahoua un débit maximum centennal de 779 m<sup>3</sup>/s et un débit décennal de 510 m<sup>3</sup>/s. les débits maxima de fréquences centennale et décennale à El Atteuf sont respectivement 863m<sup>3</sup>/s et 565m<sup>3</sup>/s.

Le Modèle HEC-HMS donne, à Dhayet Ben Dhahoua, un débit de pointe centennal de 720 m<sup>3</sup>/s et un débit décennal de 351 m<sup>3</sup>/s. les débits maxima de fréquences centennale et décennale donnés par ce modèle à El Atteuf sont respectivement 873 m<sup>3</sup>/s et 425 m<sup>3</sup>/s.

Ces résultats montrent que les deux modèles donnent des résultats satisfaisants et proches. En fait, le modèle HEC-HMS fonctionnant avec un découpage par sous-bassins se montre plus facile à configurer et à mettre en œuvre. Néanmoins le débit obtenu par le modèle Orstom, à l'avantage d'être relié aux autres caractéristiques de la crue qui sont évaluées par ce même modèle.

Selon les sources locales de la région de Ghardaïa, le débit enregistré lors des inondations du 1<sup>er</sup> octobre 2008 était de 900 m<sup>3</sup>/s. Selon ces mêmes sources, ce débit correspond à une période de retour de 70 ans (Medejerab, 2008). Malgré le doute sur cette valeur, elle n'est pas loin des résultats obtenus par les deux modèles hydrologiques.

Les caractéristiques de la crue centennale provoquée par la pluie ponctuelle centennale à Dhayet Ben Dahoua et à El Atteuf ont été également évaluées et présentées :

A Dhayet Ben Dhahoua (Amont de la ville de Ghardaïa), le temps de montée est de 7,32 h et le temps de base de 29,92 h. C'est à dire que le temps de montée occupe le quart du temps de passage de la crue. Le volume de crue centennale atteint 22,65 millions de m<sup>3</sup>, avec un coefficient de pointe de 3,72, et un débit maximum à 779 m<sup>3</sup>/s.

A El Atteuf (Exutoire du Bassin versant-Aval de la ville de Ghardaïa), le temps de montée est de 7,94 h et le temps de base est de 32,20 h. Le volume de crue centennale atteint 26,37 millions de m<sup>3</sup>, avec un coefficient de pointe de 3,77, et un débit maximum à 863 m<sup>3</sup>/s.

Un modèle numérique de tracé de l'hydrogramme type de la crue centennale a été établi (modèle de Maxwell).

Les relations suivantes ont été établies pour tous les oueds à l'aide du modèle de l'ORSTOM:

**Le coefficient d'abattement** en fonction de la superficie S (km<sup>2</sup>) :

$$K_a = 1,056 * S^{-0,05}$$

**Le coefficient de ruissellement** en fonction de la superficie S (km<sup>2</sup>) :

$$K_r = 1,094 * S^{-0,18}$$

**Le temps de base (heure)** en fonction de la superficie S (km<sup>2</sup>) :

$$T_b = 2,145 * S^{0,368}$$

**Le temps de montée (heure)** en fonction de la superficie S (km<sup>2</sup>) :

$$T_m = 0,394 * S^{0,408}$$

**Le coefficient de pointe** en fonction de la superficie S (km<sup>2</sup>) :

$$\alpha = 2,294 * S^{0,067}$$

**Le volume de la crue centennale V<sub>t,100</sub>** (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) en fonction de la superficie S (km<sup>2</sup>) :

$$V_{t,100} = \frac{S^{0,77}}{10,44}$$

**Le débit de pointe centennial Q<sub>p,100</sub>** (m<sup>3</sup>/s) en fonction de la superficie S (km<sup>2</sup>) :

$$Q_{p,100} = 28.455 \cdot S^{0,469}$$

Des modèles analytiques permettent de déterminer les débits et les volumes de la crue pour n'importe quelle période de retour en cas d'utilisation du Modèle ORSTOM ont été développés :

**Le volume de la crue V<sub>t</sub>** (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) en fonction de la période de retour T (années) à El Atteuf:

$$V_t = 3,72 \ln T + 7,99$$

**Le débit de pointe Q<sub>p</sub>** (m<sup>3</sup>/s) en fonction de la période de retour T (années) à El Atteuf:

$$Q_p = 121,6 \ln T + 261,6$$

**Le volume de la crue V<sub>t</sub>** (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) en fonction de la période de retour T (années) à Dhayet Ben Dhahoua:

$$V_t = 3,19 \ln T + 6,86$$

**Le débit de pointe Q<sub>p</sub>** (m<sup>3</sup>/s) en fonction de la période de retour T (années) à Dhayet Ben- Dhahoua:

$$Q_p = 109,7 \ln T + 235,9$$

Au cours de ce chapitre, un logiciel de modélisation hydrodynamique a été testé (Hec-Ras) sur un tronçon de l'Oued M'Zab situé dans la zone Ahbas, à l'aval immédiat d'El Atteuf .

La modélisation de ce tronçon a permis de faire l'analyse des écoulements dans cette zone et d'estimer les lignes d'eau et les vitesses moyennes dans tous les points du profil en long de ce tronçon.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail était de développer des modèles hydrologiques "pluie-débit" efficaces pour l'estimation des débits des crues de fréquences rares ainsi que pour l'estimation des autres caractéristiques de la crue dans un bassin versant saharien. Ce contexte nous a confronté à la problématique des bassins non jaugés dans lequel les modèles hydrologiques classiques ne trouvent que difficilement leur place. Il ne s'agit pas d'exposer ce qu'il aurait été possible de faire avec suffisamment d'observations, mais de développer une méthodologie de modélisation en absence d'observations. La recherche de modèles plus satisfaisants a en effet des enjeux importants. Elle permet tout d'abord une meilleure compréhension du comportement hydrologique du bassin versant. Elle garantit ensuite une meilleure fiabilité aux applications qui utilisent les simulations du modèle dans un contexte opérationnel. Pour atteindre l'objectif escompté, il était nécessaire de:

- Définir les différents termes qui interviennent lors des études des inondations.

- Analyser les différents facteurs générateurs de crue. Cette analyse a montré que les précipitations représentent le principal facteur responsable de la genèse des crues (il n'y a pas de crue sans précipitations).

- Inventorier les inondations à travers le pays pour montrer leur ampleur au niveau national. Cet inventaire révèle l'existence de régions soumises à ce risque et que ces événements spatio-temporelles sont imprévisibles.

- Analyser les pluies dans la région d'étude. Celle-ci a montré un nombre de jours de pluie très limité et des épisodes de sécheresses périodiques et fréquents (Pluviométrie très forte et répartie sur une courte période de l'année). Les hauteurs et les intensités des pluies de courtes durées ont été évaluées par deux méthodes : la méthode de Montanari et la méthode de Bennour. Les deux méthodes donnent des résultats satisfaisants et l'écart entre ces résultats est faible.

- Faire une étude géomorphologique, lithologique, topographique, climatique et hydrographique du bassin versant du M'Zab pour caractériser l'écoulement dans le cours d'eau. Le bassin versant a été traité à l'aide des différents outils de dessin assisté par informatique et de SIG. Cette étude a montré que le bassin versant du M'Zab, de part ses caractéristiques, favorise la torrencialité de l'écoulement et la formation des crues (pluies irrégulières, violentes et de courte durée, sols imperméables et de faible couvert végétal, ... etc.). Cette étude a montré aussi que le facteur humain a aggravé les inondations (l'imperméabilisation du bassin versant et les pratiques agricoles).

- Faire un historique des crues. Cet historique a montré que la région d'étude est très vulnérable face aux risques d'inondations. Ainsi, il se produit en moyenne près de 2 crues par an, d'importance très contrastée.

- Présenter les différentes classes des modèles pluie-débit. Cette présentation a permis d'identifier trois grandes catégories de modèles pluie-débit, à savoir les modèles 'boîte noire', les modèles 'à réservoirs' et ceux fondés sur la physique.

- Faire une étude sur les principaux modèles hydrologiques pluie-débit existants dans la bibliographie et qui ont été utilisés pour l'estimation des débits des crues en Algérie et dans le monde. Dans cette étude, une description détaillée de fonctionnement et de besoins en information de chaque modèle a été présentée. Cette étude a permis de constater que les modèles appliqués en Algérie sont inspirés des modèles qui ont été appliqués dans les autres régions du monde.

Après avoir énuméré les principaux modèles hydrologiques pluie-débit, le choix est porté sur l'utilisation de deux modèles qui ont montré leur robustesse et leur performance à l'échelle internationale: le Modèle semi-distribué HEC-HMS, un modèle simple reposant sur un fonctionnement de type SCS, et le modèle globale de l'ORSTOM qui est un modèle classique purement déterministe. Le choix de ces deux modèles est justifié par plusieurs critères.

L'application de ces deux modèles dans la région d'étude a porté sur la création, l'organisation et la génération des données d'entrée en utilisant un SIG puis l'évaluation des résultats.

L'étude montre que les deux modèles donnent des résultats satisfaisants et proches et ils permettent d'aboutir au tracé de l'hydrogramme type de la crue. En fait, le modèle HEC-HMS fonctionnant avec un découpage en sous-bassins se montre plus facile à configurer et à mettre en œuvre. Néanmoins le débit obtenu par le modèle Orstom, a l'avantage d'être relié aux autres caractéristiques de la crue qui sont évaluées par ce même modèle.

Le Modèle HEC-HMS permet le calcul des débits des crues pour n'importe quelle période de retour tandis que le modèle ORSTOM estime les débits des crues pour une seule période de retour qui est de cent ans. Pour résoudre ce problème, des modèles analytiques ont été développés dans cette étude pour l'estimation des débits des crues pour d'autres périodes de retour en cas d'utilisation du Modèle ORSTOM.

Des modèles analytiques qui donnent les caractéristiques de la crue en fonction de la superficie ont été établies pour tous les oueds à l'aide du modèle ORSTOM :

-Des modèles analytiques "Coefficients d'abattement – Surfaces" et "Coefficients de ruissèlement – Surfaces", basés sur les caractéristiques physiques du bassin ;

-Des modèles analytiques: "Caractéristiques de la crue (temps de base, débit de pointe, temps de montée et volume de crue) – Surfaces", basés sur une approche statistique de corrélations simples et sur les caractéristiques physiques du bassin ;

Les résultats obtenus par les deux modèles peuvent être améliorés par l'intégration des données plus précises et plus spatialisées notamment les précipitations et les caractéristiques physiques du bassin versant (La pluie moyenne sur le bassin versant et les pluies de courtes durées ont été évaluées par des formules empiriques à cause de la faible densité du réseau d'observation dans le bassin versant de l'Oued M'Zab).

Le débit centennal obtenu par le modèle HEC-HMS a été utilisé comme donnée de base du modèle HEC-RAS, modèle hydrodynamique unidimensionnel basé sur la résolution de l'équation d'énergie, afin de simuler les écoulements en période de crue. Ce modèle a été appliqué sur un tronçon de l'Oued M'Zab situé dans la zone Ahbas, à l'aval immédiat d'El Atteuf. La modélisation hydrodynamique de ce tronçon a permis d'étudier le comportement de la ligne d'eau et d'estimer les vitesses moyennes dans tous les points du profil en long.

Enfin, nous espérons, que cette étude fera l'objet d'autres travaux qui vont servir à :

-Chercher un autre paramètre qui peut être nécessaire pour estimer les caractéristiques de la crue plus exactement, puisque l'analyse et l'évaluation actuelles sont basées sur seulement la Surface « S » du bassin versant ;

-Examiner la praticabilité des modèles analytiques trouvés dans la pratique ;

-Appliquer les modèles HEC-HMS et ORSTOM sur des bassins versants jaugés et dotés d'un réseau d'observation dense, particulièrement en sud d'Algérie, où les conditions climatiques et géomorphologiques se rapprochent du bassin versant de l'Oued M'Zab ;

-Appliquer d'autres modèles dans le bassin versant de l'Oued M'Zab comme le modèle GR4J ou le modèle SWAT et comparer les résultats obtenus par ces modèles avec celle obtenus par HEC-HMS et ORSTOM.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

### A

**ABHS (Agence de Bassin Hydrographique Sahara), Ministère des ressources en eau (Algérie).** Informations sur l'Agence et le Bassin Hydrographique : pour une gestion rationnelle et durable des ressources en eau au Sahara, 30p, disponible sur le site de l'ABHS, <http://www.ABHS.dz>

**Ambroise, B., 1998.** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : Modélisation systémique et dynamique, Revue des sciences de l'eau, n°12/1, p. 123-153.

**Ayadi, M., Bargaoui, Z., 1999.** Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUEAU. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 43(5) October 1999, p.741-758.

### B

**Bédier, G., Bellostas, J.M., Masson, M., et Bocquillon, C., 1980.** Pluies orageuses en région parisienne-la météorologie VI-20, pp.281-294.

**Behlouli, L., 2009.** Crues et inondations en Algérie. Présentation de l'ANRH, Ministère des ressources en eau (Algérie), 43p.

**Benkaci, A.T. & Dechemi, N., 2004.** Modélisation pluie -débit journalière par des modèles conceptuels et "boîte noire"; test d'un modèle neuroflou. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 49(5) octobre 2004, p.919-930.

**Bennour, M., 1993.** Etude des crues de l'Oued M'Zab. ANRH, 13p.

**Beven, K.J., Kirkby, M., 1979.** A physically variable contributing area model of catchment hydrology. Hydrolo. Sci. Bull., (24):p. 43-69.

**Beven, K.J., 1989.** Changing ideas in hydrology- the case of physically-based models, Journal of Hydrology, vol.105, p. 157-172.

**Boumesseneh, A., 2007.** Les inondations dans la ville de BISKRA Causes et Impacts .Mémoire de Magister. Univ. de Batna Algérie.

**Bonnard et Gardel (BG), 1996.** Etude hydrologique de l'Oued M'Zab. Editeur : R. Kerbachi, R. Joumard, M. Boughedaoui, T. Goger. 194pages.

**Bousdira, K., 2007.** Contribution à la connaissance de la biodiversité du palmier dattier pour une meilleur gestion et une valorisation de la biomasse :caractérisation morphologique et biochimique des dattes des cultivars les plus connus de la région du M' Zab, classification et évaluation de la qualité. Mémoire de Magister. Université de Boumerdes Algérie.

**BRL-BNEDER ingénierie.** Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes, Les ressources en sols.



## C

**CACG (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne), 1989.** Barrage de Charlas : Etude de faisabilité.

**Charbonneau, R., Morin, G., Villeneuve, J.P., Ledoux, E. & Levasseur, A., 1976.** Simulation des débits: l'Orne, la Dives, la Seulles. INRS-Eau, Rapport Scientifique no.72 (coopération franco-québécoise).

**Charef, N., 1998.** Etude et conception d'un barrage sur l'oued BOUZINAW. BATNA, mémoire de d'ingénieur, ENP.

**Charifi, S., 2006.** Application du modèle hydrologique GR2M sur les bassins versants de la Soummam et de l'Isser . Mémoire de Magister. ENP Algérie.

**Charlet, L., 1905.** Les palmiers du M'Zab .Bull.Soc.Géogr ., Alger ,2ème trimestre, p.11-87

**CIEH, ORSTOM, LCT-CEMAGREF-ENGREF., 1996.** Crues et apports : Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n°54, 231p.

**Clarke, R.T., 1973.** A review of some mathematical models used in hydrology with observations on their calibration and use, Journal of hydrology, vol.19, p.1-20.

**Crawford, N. H., Linsley, R.K., 1963.** A conceptual model of the hydrologic cycle. IAHS publication, n°63, p.573-587.

**Crétenet, J.N et Martignago, Y., 1998.** Simulation hydrauliques des crues de l'Oued M'Zab. Editeur : R. Kerbachi, R. Joumard, M. Boughedaoui, T. Goger.

## D

**Desconnets, J.C., Diallo, A., Traore, O., Chene J.M., Morin, G., 1998.** Exemple d'application du modèle CEQUEAU : évaluation de l'impacte des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé -Burkina Faso. Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998). IAHS Publ. no. 252, 1998.

**DHI WATER AND ENVIRONMENT., 2003.** MIKE BASIN, A Versatile Decision Support Tool For Integrated Water Resources Management Planning, Tutorial, DHI Denmark

**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>

**Djellouli .T, Y. & Sioussiou, R., 2009.** Le bassin versant du M'zab, région méditerranéenne hyperaride (Algérie) : ressources en eau, risques et gestion

**Djemane, A., 1990.** Constat de situation des zones Sud des oasis algériennes, CIHEAM - Options Méditerranéennes, Les systèmes agricoles oasiens, Sér. A / n °11, p.29-40.

**Dubief, J., 1953.** Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Thèse de doctorat d'Etat, Université d'Alger. 453 p.

**Dubief, J., 1963.** Le climat du Sahara. Tome II, fascicule I, Troisième partie : L'eau atmosphérique au Sahara. Institut de recherches Sahariennes, Univ.d'Alger .CNRS Paris .275p.

**Duros, V., 2001.** Adaptation d'un modèle agri-environnemental au contexte de deux bassins versants Bretons. Mémoire de DESS. Université Jean Monnet de St-Etienne. Cemagref Rennes 57 pp.

## E

**Edijatno, C., Michel, 1989.** Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La houille blanche n°2, p. 113-121.

**Edijatno., 1991.** Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEES, Strasbourg, 242 pp.

## F

**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.

**Fourmigué, P., Lavabre, J., 2005.** Prédiction de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. Revue des Sciences de l'Eau 18(1), p. 87-102.

**Francou, J. & Rodier, J.-A., 1967.** Essai de classification des crues maximales observées dans le monde. Cah. ORSTOM sér Hydrol, Vol. IV, n°3 1967

## G

**Gaume, E., 2000 .**Hydrologie : cycle de l'eau et modélisation pluie débit, ENPC-GEREVE, Novembre 2000.

**Goudjil, S et Kaci, D., 2009.** Recalibrage d'un tronçon de l'Oued M'Zab. Mémoire d'ingénieur.ENP Algérie.

## H

**HACH (Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques).** Notions d'hydrologie. ARGENCo, MS<sup>2</sup>F, 55p, disponible sur le site HACH, <http://www.hach.ulg.ac.be>

**HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modelling System), 2000.** Technical Reference Manual.

**HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System), 2009.** User's Manual

**Henine, H., 2004.** Interfaçage entre un modèle hydrologique / modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG. Mémoire de Magister. ENP Algérie.

## K

**Kadi, A., 1997.** La gestion de l'eau en Algérie, Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 42, n° 2, p. 191-197.

**Kasbadji, M.N., 1999.** Carte des Vents de l'Algérie (Résultats Préliminaires), Rev. Energ. Ren, p.209-214.

## L

**Leclerc, G., Schaake, J.C., 1972.** Dérivation of hydrologic frequency curves. Rep 142, 151 pp-Mass. Inst. of Technol. Cambridge.

## M

**Maftai, C.P., 2002.** Etudes concernant les écoulements superficiels modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti-Roumanie, Mai 2002

**Maison, P., 2000.** Un modèle hydrologique de suivi de la pollution diffuse en bassin versant (approche mécaniste simplifiée de la zone saturée). Thèse INP Toulouse-France.

**Mathevet, T., 2005.** Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.

**Medejerab, A., 2009.** Les inondations catastrophiques du mois d'octobre 2008 à Ghardaïa, Geographia Technica, Numéro spécial, p.311-316.

**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.

**Marant, L., 2009.** Comparaison entre la modélisation de rivière unidimensionnelle (1D) et bidimensionnelle (2D) en vue d'une modélisation de la Basse Vallée de la Doller. Mémoire d'ingénieur. Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.

**Michel, C., Oberlin, G., 1982.** Pluies de basins. Abattement sur une surface des averses de 1h à 24h. Etude n°54-CEMAGREF ANTONY

**Michel, C., 1983.** Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? La Houille Blanche (1), p. 39-44.

**MEDD (Ministère de l'écologie et du développement durable) « France », direction de la Prévention des pollutions et des risques, sous-direction de la Prévention des risques majeurs., 2004.** Risques naturels majeurs : Les inondations, Août 2004, 20 p, disponible sur les sites,

<http://www.ecologie.gouv.fr>

<http://www.prim.net>

**Morin, G., Charbonneau, R., Fortin, J.P., Lardeau, J.P., Potvin, L. & Sochanska, W., 1979.** Etude hydrologique de la Grande rivière de la Baleine et de la Petite rivière de la Baleine. INRS-Eau, Rapport Scientifique no.99 (pour Hydro-Québec).

**Morin, G., Fortin, J.P. & Sochanska, W., 1980.** Evaluation des crues maximales probables des rivières Nottaway, Broadback et Rupert. INRS-Eau, Rapport Scientifique no.133 (pour la Société d'Énergie de la Baie James).

**Morin, G., Slivitzky, M., 1992.** Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 5, n° 2, 1992, p. 179-195.

## P

**Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2001.** Does a large number of parameters enhance model performance ? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. Journal of Hydrology 242(3-4), p. 275-301.

**Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2007.** Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR), Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Juin 2007, 16p.

**Perrin, C., 2000.** Vers une amélioration d'un modèle pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPGrenoble, 530p.

## R

**Rahai, A., 2007.** DELIMITATION DES ZONES INONDABLES– APPLICATION A L'OUED ALLALAH– Bassin Versant de Ténès. Mémoire de Magister. ENP. Algérie.

**Ravereau.** Le M<sup>z</sup> Zab, une leçon d'architecture. Ed. Sindab.

**Remenieras, G., 1999.** L'hydrologie de l'ingénieur. Collect. Div. Rech. Dev. Electr. France. Ed., Eyrolles. 269 p.

**Renaud, J., 2004.** Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie) : Vers une modélisation des transferts de phosphore. Rapport de Stage. Université de Savoie. INRA 75pp.

**Roche., 1973.** Le M<sup>z</sup> Zab, architecture ibadite en Algérie, Manuelle, Arthaud.

**Rodier et Auvray., 1965.** Estimation des débits des crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique occidentale. Publ. ORSTOM, CIEH 1965 30p.

## S

**SCS (Soil Conservation Service), 1986.** Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds. USDA (U.S. Department of Agriculture). June 1986.

## T

**Touaibia, B., 2004.** Manuel pratique d'hydrologie. Ed/Madani frères. Blida, Algérie, 166p.

## V

**Versini, P., 2007.** Surveillance du risque hydrologique diffus le long des itinéraires routiers. Thèse de Doctorat. École Nationale des Ponts et Chaussées. France.

**Villaume, G., 1974.** L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale - variabilité et précision de calcul. Cah. ORSTOM ser. Hydrol. vol XI-n°3 - pp. 205-240.

## W

**WMO., 1986.** Intercomparison of Models of Snow melt Runoff. WMO Operational Hydrology Report no.23; WMO Publ. no.646; WMO, Geneva, Switzerland.

## Z

**Zahour, G., 2010.** Stratégie de gestion des risques d'inondations au Maroc. Faculté des Sciences Ben M'Sik, Casablanca, disponible sur le site internet réseau arabe des experts en environnement,

<http://environnement-arabe.net/images/Inondations-Maroc.pdf>

**Zekouda, N., 2009.** Modélisation des crues de oued Ouahrane pour la gestion intégrée des risques d'inondation. Mémoire de Magister. UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI. CHLEF. Algérie.