

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et Technologie

قسم الري وهندسة المدينة

Département hydraulique et génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

***Étude de l'envasement du barrage d'El-Haimeur et
son impact sur la protection de la ville de GHARDAIA***

Presnté par

CHERIET Salah Eddine

NACER Slimane

Devant le jury composé de :

Dr. BOUBELLI SALIM

MCA - Université de Ghardaia

Examineur

Mr. MECHERI BACHIR

MAA - Université de Ghardaia

Examineur

Dr. BOULMAIZ TAYEB

MCA - Université de Ghardaia

Encadrant

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Nous commençons par remercier dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et l'amour du savoir pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nos plus vifs remerciements vont à Mr T. BOULMAIZ pour avoir accepté de nous encadrer et nous diriger dans la réalisation de ce projet, et pour tous les conseils instructifs et judicieux et sa disponibilité, non seulement durant ce projet mais tout au long de notre cursus universitaire.

Nos vifs remerciements aux responsables et personnel de :

- Le personnel et les responsables de la direction des ressources en eaux, surtout à Mr M. CHOUIREB

- Le personnel et les responsables de l'Office de Protection et de Promotion de la Vallée du M'zab (OPVM) notamment le directeur Mr K. RAMDANE

A tous les enseignants du département hydraulique et génie civil qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire.

Sans oublier Mr. Med Tahar FORTAS et Abdelfattah KOBLI pour leurs temps et leurs énormes aides et accompagnements durant notre travail

Dédicace

Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail en signe de respect

et de reconnaissance à

Mes chers parents

Ma chère femme

Pour tous leurs sacrifices et leurs soutiens moraux et matériels dont ils ont fait

preuve pour que je réussisse.

Je le dédie aussi à

Mes chers fils Farouk et Islam,

Ma sœur et mes frères, et toute ma grande famille

Pour l'amour qu'ils me portent, le soutien moral et les prières de réussite.

Tous mes amis (es) spécialement : La promo Hydraulique Urbaine 2022

Pour tous les moments de joie et de bonheur que nous avons partagé.

A mon binôme SALAHEDDINE CHERIET

Qui a donné le meilleur dans l'élaboration de ce travail.

Je le dédie à tous ceux que ma plume à oublier mais qui sont dans mon cœur.

Slimane NACER

Dédicace

Je rends grâce à Dieu qui a éclairé mon chemin et m'a donné la force, et je rends hommage à cet humble acte en signe de respect et de gratitude.

A mes chers parents, à l'âme de ma chère mère que

Dieu l'entoure par sa miséricorde.

A mes professeurs qui m'ont appris et m'ont orienté, en particulier les professeurs du Département hydraulique et génie civil.

Et à toute la famille pour les sacrifices qu'ils ont faits pour atteindre ce succès.

Et pour tous mes amis (amies) en particulier La Promotion Hydraulique Urbaine 2022 Pour tous les moments que nous avons partagés.

A mon binôme SLIMANE NACER

Qui m'a aidé du mieux qu'il a pu dans l'élaboration de ce travail.

Je le dédie à tous ceux qui ne sont pas mentionnés par ma plume, mais dans mon cœur.

SALAH EDDINE CHERIET

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : ENVASEMENT DES BARRAGES

I.1	Introduction	3
I.2	Processus de l'envasement d'un barrage.....	3
I.3	Erosion du sol.....	5
I.3.1	Définition de l'érosion hydrique	5
I.3.2	Les Facteurs de l'érosion hydrique	6
I.4	Transport solide.....	8
I.4.1	Définition :.....	8
I.4.2	Modes de transport solide	8
I.4.3	Mesure du transport solide dans les cours d'eau	10
I.5	Conséquences de l'envasement	11
I.5.1	Sur les volumes régularisés et les performances de barrage.....	11
I.5.2	Sur la capacité de laminage des crues.....	11
I.5.3	Sur la sécurité des barrages.....	11
I.5.4	Sur les ouvrages annexes des barrages	12
I.5.5	Sur les infrastructures aval.....	12
I.5.6	Sur la qualité de l'eau	13
I.6	Les modèles d'estimation de l'envasement.....	13
I.6.1	Bathymétrie par nivellement :.....	13
I.6.2	Bathymétries par sondeurs : « Echosondeur bathymétrique ».....	15
I.7	Conclusion.....	16

CHAPITRE II : MODELISATION HYDROLOGIQUE

II.1	Introduction	17
II.2	Définition de la modélisation hydrologique.....	17

II.3	But de la modélisation hydrologique	18
II.4	Classification des modèles	18
II.4.1	Modèles stochastiques	19
II.4.2	Le modèle déterministe :.....	20
II.5	Exemple de quelques modèles	22
II.5.1	TOPMODEL : les aires contributives saturées.....	22
II.5.2	HEC HMS.....	23
II.6	Choix du Modèle.....	24
II.7	Modèles hydrologiques de bassin versant.....	24
II.8	RRI (Rainfall-Runoff-Inundation)	25
II.8.1	Définition du Modèle.....	25
II.8.2	Vue d'ensemble de la structure du RRI.....	26
II.8.3	Principes de calcul du RRI.....	27
II.8.3.1	Les paramètres géométriques	27
II.8.3.2	Échange d'eau entre les rivières et les talus	28

Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

III.1	Introduction	30
III.2	Situation Géographique	30
III.3	CLIMATOLOGIE	32
III.3.1	Température	33
III.3.2	Précipitations	33
III.3.3	Humidité	34
III.3.4	Vents	35
III.4	Géologie et hydrogéologie	35
III.5	Ressources en eau.....	36
III.6	Aspect hydrologique.....	37
III.7	Bassin versant du M'zab	37

III.8	L'occupation du sol	39
III.9	Protection de la vallée contre les inondations	40
III.10	CRUES DE L'OUED M'ZAB	42
III.10.1	Sources de données	42
III.10.2	Historique des crues importantes de la vallée du M'Zab.....	42
III.10.3	La crue exceptionnelle du 1 ^{er} octobre 2008	44

Chapitre IV : Quantification de l'envasement du barrage El-Haimeur

III.1	INTRODUCTION	46
VI.2	Présentation du barrage d'El Haimeur	47
VI.2.1	L'accès au site de l'ouvrage.....	47
VI.2.2	Présentation du bassin versant de Laadhira	48
VI.2.3	Géométrie de l'ouvrage :	49
VI.2.4	Caractéristiques principales de l'ouvrage	50
VI.3	Volume théorique de la vase :	51
VI.4	Volume actuel (mesuré) de la vase :	52
VI.4.1	Matériel utilisé	52
VI.4.2	Procédure de mesure	53
VI.4.3	Chargement et calcul du MNT.....	54
VI.4.4	Calcul de cubatures entre les deux MNT	54
VI.5	Conclusion.....	55

Chapitre V : Impact du barrage El-Haimeur et son envasement sur la ville de GHARDAIA

V.1	Introduction	56
V.2	Installation Model RRI.....	56
V.3	Les données d'entrée	56
V.3.1	Données topographiques	56
V.3.1.1	Le projet HydroSHEDS.....	57
V.3.1.2	Télécharger les données géographiques	57

V.3.2	Données des précipitations	58
V.3.2.1	Définition du site GSMaP	58
V.3.2.2	Téléchargement des données des précipitations de GSMaP	59
V.4	Exécution de la simulation avec RRI_Builder	60
V.4.1	Ajout des barrages	62
V.5	Résultats et discussion.....	62
V.6	Conclusion.....	66
	Conclusion générale.....	67

Résumé

L'envasement est un problème hydraulique qui menace les barrages en réduisant leur capacité de stockage ainsi que leur durée de vie, et en menaçant la stabilité des ouvrages par conséquent leur pouvoir à contrôler les crues de grande ampleur.

Notre travail intitulé « étude de l'envasement du barrage de El-Haimeur et son impact sur la protection de la ville de GHARDAIA », a pour objectif de quantifier l'envasement dans le barrage en premier lieu, puis de déterminer son influence sur la protection contre les inondations tout en se référant à la crue du 01 Octobre 2008.

Nous avons suivi la méthode bathymétrique pour la quantification de l'envasement, cette méthode consiste à une mesure topographique du volume actuel du barrage, puis le comparer avec son volume initial.

L'étude de l'impact du barrage et de son envasement sur la protection de la ville de GHARDAIA est basée sur la simulation de la propagation de la crue pour connaître les hauteurs d'eau, les débits et autres paramètres, pour les différents instants de la crue et dans les différentes sections du cours d'eau situées à l'aval du barrage. Pour cela nous avons utilisé le model RRI de la simulation hydrologique et hydraulique.

Mots clés : Barrage, El-Haimeur, Laadhira, oued M'zab, envasement, transport solide, crue, inondation, RRI, modélisation.

ملخص

الطمي مشكلة تهدد السدود من خلال التقليل من قدرتها التخزينية وكذلك من عمرها ، ومن خلال تهديد استقرارها وبالتالي قدرتها على التحكم في الفيضانات القوية، يهدف عملنا المعنون بـ "دراسة الترسب في سد الحيمر وأثره على حماية مدينة غرداية" إلى تحديد كمية الطمي في السد في المقام الأول ، ثم تحديد تأثيره على سلوك هذا الهيكل مستندين على معطيات فيضان 01 أكتوبر 2008.

اتبعنا طريقة قياس الأعماق لتقدير كمية الطمي ، وتعتمد هذه الطريقة على القياس الطبوغرافي للحجم الحالي للسد ثم مقارنة بحجمه الأولي.

بالنسبة لدراسة تأثير السد وتراكم الطمي فيه على حماية مدينة غرداية اعتمدنا على محاكاة انتشار الفيضان لمعرفة ارتفاعات المياه والتدفقات والخصائص الأخرى في أوقات مختلفة وفي نقاط مختلفة من المجرى المائي الواقع بعد مجرى السد. استعملنا في هذا نموذج المحاكاة الهيدرولوجية والهيدروليكية RRI.

الكلمات المفتاحية: السد ، الحيمر ، لعديده ، وادي مزاب ، الترسب ، النقل الصلب ، الفيضانات ، RRI ، المحاكاة.

Abstract

Siltation is a hydraulic problem that threatens dams by reducing their storage capacity as well as their lifespan and their stability, therefore their ability to control flash floods.

Our work entitled "Study of the siltation of El-Haimeur dam and its impact on the protection of the city of GHARDAIA", aims to quantify the siltation in the dam in the first place, then to determine its influence on flash floods protection referring to the flood of October 2008.

We followed the bathymetric method to quantify the siltation, this method consists of a topographic measurement of the current dam volume, then comparing it with its initial volume.

The study of the impact of the dam and its siltation on the protection of the city of GHARDAIA is based on the simulation of the propagation of the flood to know the heights of water, the flows and other parameters, for the different moments, in different sections of the watercourse located downstream of the dam. For this we have used the RRI model of hydrological and hydraulic simulation.

Keywords: Dam, El-Haimeur, Laadhira, Wadi M'zab, siltation, solid transport, flood, RRI, modelling.

Liste des figures

<i>Figure 1</i> : Processus d'envasement d'un barrage Réservoir	04
<i>Figure 2</i> : Impact du couvert végétal sur l'érosion hydrique.....	07
<i>Figure 3</i> : Modes de transport solide.....	10
<i>Figure 4</i> : Schématiquement de la bathymétrie par nivellement.....	14
<i>Figure 5</i> : Estimation de l'envasement par Ecosenseur.....	16
<i>Figure 6</i> : Les différentes approches de modélisation.....	19
<i>Figure 7</i> : Mécanismes de génération des débits développés dans TOPMODEL.....	23
<i>Figure 8</i> : Schéma du modèle (RRI)	26
<i>Figure 9</i> : Différentes conditions d'échange d'eau entre les rivières et les talus	28
<i>Figure 10</i> : Limites administrative de la wilaya de Ghardaïa.....	30
<i>Figure 11</i> : Limites du secteur sauvegardé de la vallée du M'Zab.....	31
<i>Figure 12</i> : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles	34
<i>Figure 13</i> : Humidité moyenne mensuelle -station de Ghardaïa	34
<i>Figure 14</i> : Coupe géologique schématique de la région du M'Zab.....	36
<i>Figure 15</i> : Réseau hydrographique de la région du M'Zab.....	37
<i>Figure 16</i> : Les sous-bassins versant qui forment le BV du M'Zab.....	38
<i>Figure 17</i> : Carte d'occupation du sol le long de oued M'Zab.....	39
<i>Figure 18</i> : Localisation des barrages en amont de la vallée du M'Zab.....	41
<i>Figure 19</i> : Mesures complémentaires de protection en aval de la vallée du M'Zab.....	41
<i>Figure 20</i> : inondations de 1920 -Oued Mssah Djember- « Décembre ».....	42
<i>Figure 21</i> : inondations de 1 octobre 2008 –vue du ciel.....	44
<i>Figure 22</i> : Photo de la digue détruite du barrage d'El Haimeur.....	45
<i>Figure 23</i> : Photo aérienne de la digue du barrage d'El Haimeur.....	46
<i>Figure 24</i> : L'accès au site du barrage d'El Haimeur.....	47
<i>Figure 25</i> : délimitation du bassin versant de Laadhira.....	48
<i>Figure 26</i> : Profil type de la digue d'El-Haimeur.....	49

Figure 27 : Profil en long de la digue d'El-Haimeur.....	50
Figure 28 : Matériel topographique utilisé.....	53
Figure 29 : Superposition du levé topographique sur le plan initial du barrage.....	54
Figure 30 : Interface de téléchargement HydroSHEDS.....	57
Figure 31 : Emplacement des fichiers téléchargés HydroSHEDS'	58
Figure 32 : Site des données des précipitations -GSMaP.....	59
Figure 33 : Le premier écran de RRI_BUILDER.....	60
Figure 34 : Sélection de la région (Afrique).....	60
Figure 35 : visualisation des paramètres du BV.....	61
Figure 36 : Interface des paramètres entés (RRI_INPUT).....	61
Figure 37 : Fichier txt pour l'ajout des barrages sur RRI.....	62
Figure 38 : Début de montée des débits.....	63
Figure 39 : Pic de la crue a la palmeraie de Ghardaïa -cas N°01.....	64
Figure 40 : Pic de la crue a la palmeraie de Ghardaïa -cas N°02 et N°03.....	65
Figure 41 : comparaison des Q et H des deux cas dans la palmeraie.....	66
Figure 42 : comparaison des Q et H des deux cas dans le point de confluence.....	66

Liste des tableaux

<i>Tableau 1</i> : Température moyenne mensuelle et annuelle de station de Ghardaïa.....	33
<i>Tableau 2</i> : Précipitations moyennes mensuelles -station de Ghardaïa (1995-2004).....	33
<i>Tableau 3</i> : Vitesses moyennes mensuelles de vents Ghardaïa (1995-2004).....	35
<i>Tableau 4</i> : Les crues importantes dans la région de M'Zab depuis 1920.....	43
<i>Tableau 5</i> : Les coordonnées du site d'El-Himeur.....	48
<i>Tableau 6</i> : Volumes selon les cotes dans le barrage d'El-Himeur.....	50
<i>Tableau 7</i> : volume théorique de la vase d'El-Himeur.....	52
<i>Tableau 8</i> : Récapitulatif de quantification de l'envasement.....	55

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les digues et barrages ont de tous temps été utilisés par l'homme, et participent aujourd'hui très largement à la dynamique des territoires, que ce soit pour la gestion des ressources en eau (barrages réservoirs, digues de canaux d'irrigations) ou pour la protection contre les inondations (barrages écrêteurs, digues de protection).

L'envasement des barrages constitue sans doute la conséquence la plus grave de l'érosion hydrique. Le potentiel hydraulique perd annuellement environ 30 millions de mètres cubes, selon les sources hydrauliques. Cette quantité est jugée énorme pour certains barrages. Les effets néfastes de ce phénomène sont nombreux, allant de la réduction considérable de la capacité d'emmagasinement et de stockage du barrage, son efficacité à la protection des villes en aval, et pouvant aller même jusqu'à la dégradation nette de la qualité de l'eau.

La ville de GHARDAIA qui s'étend le long de oued M'Zab est connue pour ces crues violentes, comme celle de d'octobre 2008 qui ont cause, dans le temps, des pertes humaines et des dégâts matériels inestimables.

Des mesures ont été prises par les autorités dans le but de la protection de la vallée du M'Zab contre les Inondations, et aussi la recharge de la nappe phréatique, parmi ces mesures la construction de trois grands barrages écrêteurs en amont de la partie de l'Oued qui traverse la ville : Oued El-Abiod et Oued El-haimeur (Laadhira) et Oued Boubrik.

Oued El-haimeur situé à environ 15 Km en amont de la vallée de M'zab était jugé la cause principale de la crue de 2008 par son apport important et l'absence du barrage,

L'objectif de notre projet de fin d'étude est d'évaluer le taux d'envasement de ce barrage après 11 ans de sa mise en service, et définir l'impact de ce dernier sur la protection de la ville avant et après son envasement.

Pour cela nous avons considéré la crue d'octobre 2008 comme référence, et nous avons utilisé le model RRI (Rinfall-Runoff-Inundation) pour la simulation et visualisation des résultats.

Notre travail est structuré suivant le plan méthodologique ci-dessous :

Une partie bibliographique, qui contient

- **Chapitre I** : Envasement Des Barrages
- **Chapitre II** : Modélisation Hydrologique
- **Chapitre III** : Présentation de la zone d'étude

Une partie pratique, qui contient

- **Chapitre IV** : Evaluation de l'envasement du barrage El-Haimeur
- **Chapitre V** : Impact du barrage El-Haimeur et son envasement sur la ville de GHARDAIA

CHAPITRE 01

ENVASEMENT DES BARRAGES

I.1 Introduction

Le phénomène de l'envasement des barrages est l'un des grands problèmes hydrauliques qui menace l'existence de l'infrastructure hydrotechnique.

Ce phénomène est l'aboutissement d'un processus naturel d'érosion des bassins versants et du sapement des berges des cours d'eau, des quantités considérables des sédiments sont drainées directement dans les retenues de barrages. Ces quantités enregistrent les valeurs les plus élevées dans les régions arides et semi arides comme le Maghreb et plus particulièrement l'Algérie.

Ces dépôts posent des problèmes aux barrages, tel que la déstabilisation de la digue, la diminution du volume utile d'eau, l'obturation des pertuis de vidange et le colmatage des canaux d'irrigation.

Dans ce chapitre on va présenter les différents facteurs et processus qui sont reliés à l'envasement des barrages.

I.2 Processus de l'envasement d'un barrage

L'envasement est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et barrages, réduisant leurs capacités de stockage, donc la construction d'un barrage change les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement et la capacité de transport des sédiments.

Le processus de l'envasement d'un barrage débute dans la première phase par l'arrachage des particules fines de leurs positions initiales par le ruissèlement.

Dans la seconde phase, la matière solide transportée par l'écoulement tend à se déposer à l'approche des plans d'eau, car en réduisant sa vitesse, l'écoulement perd petit à petit sa capacité de transport quand le cour d'eau s'approche et se jette dans le lac du réservoir, les particules grossières se déposent en premier ensuite les plus fines jusqu'à atteindre la digue, n'ayant pas où s'échapper le dépôt se tasse et se consolide en réduisant ainsi la capacité de

stockage du réservoir, sachant qu'en moyenne 90% des sédiments transportés par le cours d'eau sont piégés . (Fig. 1).

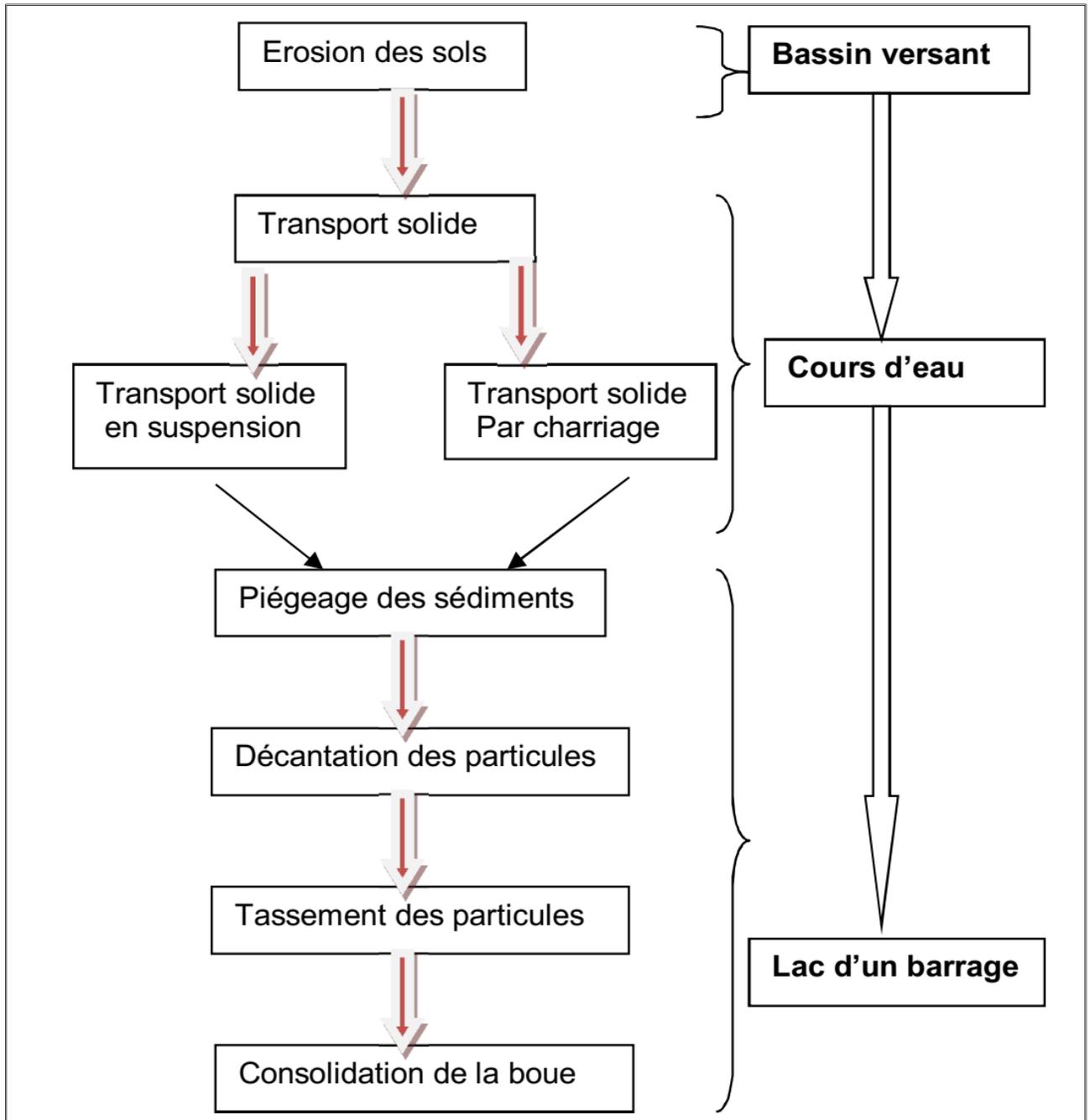


Figure 1 : Processus d'envasement d'un barrage Réservoir (Remini, 1990)

I.3 Erosion du sol

Le terme érosion vient du latin « ERODERE » qui signifie « Ronger », donc l'érosion est le détachement des particules du sol de leur emplacement initial pour les transportés en aval. Malgré que l'érosion ait un effet néfaste sur les zones amont, sauf qu'elle enrichit les plaines qui constituent les principaux terrains agricoles. L'érosion apparaît sous plusieurs formes :

- *L'érosion hydrique.*
- *L'érosion éolienne.*
- *L'érosion aratoire ou mécanique sèche* : C'est le travail du sol qui arrache les particules, les transporte et les dépose.
- *L'érosion thermique* : La différence de température peut dégrader le sol et effriter les roches.
- *L'érosion chimique* : l'attaque chimique est un facteur essentiel d'érosion, comme c'est le cas pour les roches calcaires.
- *L'érosion causée par les êtres vivants* : parmi les êtres vivants qui causent le plus de dégâts c'est bien l'homme, en dégradant directement le sol ou en favorisant d'autres facteurs.

I.3.1 Définition de l'érosion hydrique :

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules du sol. Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt.

La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine de l'arrachage, du transport et du dépôt de la terre enlevée. Les premières gouttes s'infiltrent dans le sol d'autant plus aisément qu'il est meuble et que sa porosité est élevée, puis le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol.

L'arrachage est dû à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et aux eaux de ruissellement, dont le transport est assuré par elles.

1.3.2 Les Facteurs de l'érosion hydrique :

1.3.2.1 Facteur topographique

La topographie du sol joue un rôle important dans le transport érosif, (GEORGES, 2008) admet que l'érosion moyenne par unité de surface croît avec la longueur de la pente et l'explique par le fait que les pentes les plus longues permettent une plus forte accumulation du ruissellement, ce qui accroît l'énergie globale de celui-ci et favorise le détachement et le transport des particules du sol.

1.3.2.2 La nature du substrat

La nature du sol et du sous-sol est aussi un facteur prépondérant. Sa participation au phénomène d'érosion est fonction de sa perméabilité et de l'aptitude au détachement et au transport de ses particules. Chaque type de sol va réagir différemment à l'attaque de la pluie et au cisaillement du ruissellement selon sa texture, sa structure et sa porosité.

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grés, calcaires, dolomies, ...).

1.3.2.3 Facteur climatique

La pluie est un facteur majeur provoquant l'érosion, l'érosivité dépend surtout de l'intensité de pluie ou de l'énergie cinétique qui en résulte directement (GEORGES, 2008).

La cause principale de l'érosion hydrique c'est la pluie torrentielle. L'efficacité de la pluie vis-à-vis des processus d'érosion est liée aux rôles qu'elle a dans l'arrachement des particules et leurs ruissellements. La lame d'eau en mouvement le long des versants se divise progressivement, et les filets d'eau se regroupent dans les petites dénivellations du sol.

Lors de son passage, la lame d'eau transporte avec elle des particules du sol, sa capacité de transport et d'arrachement de ces particules augmente avec l'intensité de la pluie qui détermine l'épaisseur de la lame d'eau.

I.3.2.4 Couvert végétal (fig. 2).

Le couvert végétal agit comme un obstacle non seulement il maintient le sol en le protégeant contre l'érosion, mais aussi il bloque le passage des particules du sol transportées par le courant torrentiel.

L'efficacité du couvert végétal dans la réduction de l'érosion dépend du type de l'étendue et de la densité du couvert lui-même. La végétation et les résidus combinés, couvrant complètement le sol, interceptent la pluie et constitue le moyen le plus efficace pour réduire les pertes de sol. Les résidus partiellement incorporés et leurs racines ont aussi leur importance, parce qu'ils facilitent l'infiltration.

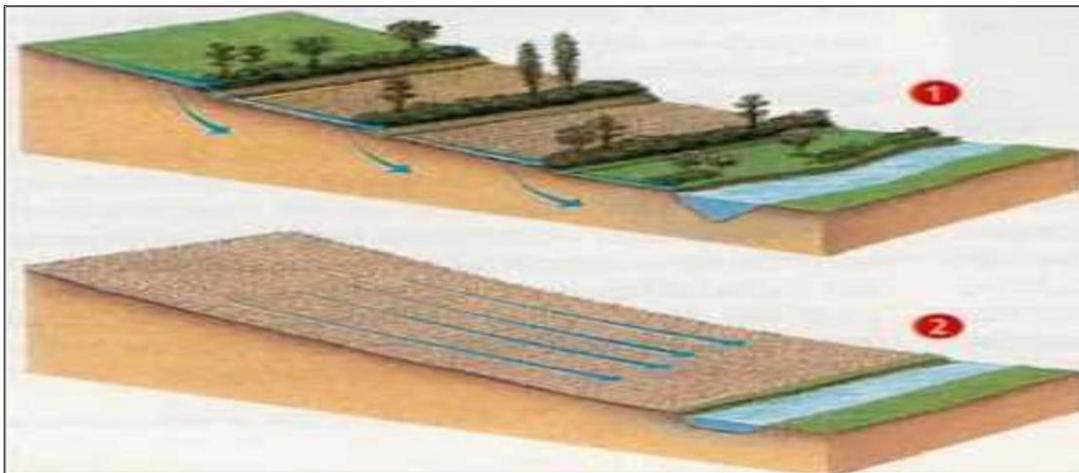


Figure 2 : Impact du couvert végétal sur l'érosion hydrique

I.3.2.5 Facteurs anthropiques

L'activité de l'homme a un rôle important dans l'érosion et ceci par plusieurs moyens dont on cite l'abatage d'arbre des forêts, l'aménagement urbain qui favorise le ruissellement ainsi le transport, le labour du sol, ...etc.

I.3.2.6 Facteurs liés aux activités agricoles

Les cultures

Si on garde à l'esprit qu'il est important de maintenir le sol couvert le mieux et le plus longtemps possible, il devient aisé en principe de classer les types de cultures et les rotations

culturelles en catégories favorables ou défavorables. On pourra apprécier aussi l'intérêt de mesures agissant dans le sens d'une couverture maximale des sols.

Les machines agricoles

Les traces de roues inhérentes au passage des machines agricoles peuvent favoriser la concentration des rigoles d'eau de ruissellement et accentuer ainsi le problème de l'érosion et des boues.

I.4 Transport solide

I.4.1 Définition :

Le transport solide dans les cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, il relève essentiellement du ruissellement et met en jeu diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature. Les matériaux alluvionnaires constituant le lit des cours d'eau proviennent de l'élaboration des éléments de surface.

Le transport solide des particules du sol dépend de deux critères essentiels qui sont la vitesse de l'écoulement et la granulométrie. Ainsi l'entraînement des particules solides par un écoulement liquide est essentiellement en fonction de la dimension des particules.

I.4.2 Modes de transport solide : (Fig 03)

Il existe différents modes de transport solide dans les cours d'eau, ils dépendent essentiellement de la morphologie du cours d'eau et des terrains traversés. Il s'agit de trois types de mouvements dans les cours d'eaux :

Transport en charriage au fond du lit, transport par saltation, transport en suspension.

I.4.2.1 Transport solide en suspension

Le transport en suspension concerne principalement les matériaux produits par l'abrasion des sols. Aussi sa détermination est très utile en agronomie, car ce sont les éléments les plus

fertilisants qui sont ainsi transportés : particules fines, éléments chimiques et matières organiques (Gestion intégrée des crues). Le transport solide en suspension est un phénomène assez continu dans l'espace. Les sédiments sont transportés sur de longues distances, à la vitesse du courant, mais il est très discontinu dans le temps puisqu'il est conditionné par le phénomène d'abrasion.

1.4.2.2 Transport solide par charriage

Le transport par charriage est l'un des principaux types de transport solide dans un cours d'eau, il s'alimente surtout par érosion du lit et des berges du cours d'eau. Il contribue pour une large part à la formation et à l'équilibre du lit, modelant ainsi le profil en long du cours d'eau. Les grains charriés se déplacent par à-coups à une vitesse moyenne très nettement inférieure à celle de l'eau (moins d'un mètre par heure).

Lorsque la turbulence de l'écoulement est importante, les grains sont susceptibles d'être emportés par suspension malgré leur poids. Ils peuvent alors se déplacer sur de longues distances sans rejoindre le fond, avec une vitesse égale à celle de l'eau.

Le transport par charriage est très discontinu à la fois dans le temps et dans l'espace. C'est un phénomène très localisé puisqu'il est conditionné entre autres, par la pente et la constitution du lit, qui peuvent varier d'un tronçon de cours d'eau à l'autre. Par contre, pour une même section de cours d'eau, il peut être lié au débit liquide, donc, dans certaines conditions il se prête mieux à l'étude théorique et à l'élaboration de formules.

1.4.2.3 La saltation

C'est le mode de transport des éléments plus fins que les galets, c'est-à-dire les graviers et les sables grossiers, les graviers sautent, progressent par bonds au fond de la rivière et occupent donc, dans la section, une certaine hauteur dépendant de la vitesse et des caractéristiques des grains.

On explique la progression par saltation de la façon suivante : un grain glisse sur le fond du lit, puis rencontre un obstacle, il se bute alors sur cet obstacle. La différence de pression entre l'amont et l'aval du grain augmente, il bascule, puis est arraché, entraîné par le courant et, par gravité, retombe au fond où le processus recommence.

Il est évident que les composantes multiples de la vitesse, qui caractérisent la turbulence, jouent un rôle important dans la saltation (M.Henri PELLERAY)

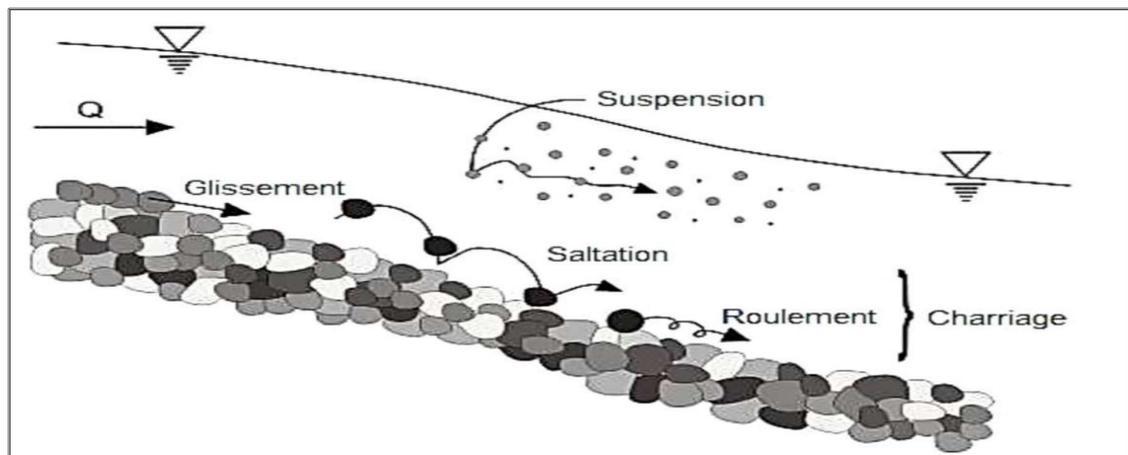


Figure 3 : Modes de transport solide

1.4.3 Mesure du transport solide dans les cours d'eau

La quantité de sédiments transportée par un cours d'eau à une surface donnée pendant un temps (1 jour, 1 mois, 1 année) est composée de la charge en suspension et du transport du fond (glissement ou roulement sur le fond et saltation)

Différentes méthodes de mesures sont possibles :

- Collectes d'échantillons à hauteur d'une section de mesure pour suivre dans le temps les variations du transport solide, puis mesures par filtration au laboratoire.
- Levers topographiques et bathymétriques de lacs ou de retenue artificielle pour évaluer l'apport global de sédiments pendant une période déterminée (entre deux instants connus).
- Utilisation de traceurs de sédiments ou d'éléments dont les signatures permettent d'étudier surtout les taux de sédimentation (Pb218, Cs137).

I.5 Conséquences de l'envasement

I.5.1 Sur les volumes régularisés et les performances de barrage

L'envasement de la retenue d'un barrage affecte sa capacité de stockage et par suite réduit son volume utile disponible, ce qui se traduit par une diminution des niveaux des services rendus par la retenue. L'impact de la diminution annuelle du volume régularisé, faible au début de la mise en service d'un ouvrage, devient de plus en plus important au fur et à mesure de l'augmentation des besoins en eau à satisfaire à partir du barrage.

I.5.2 Sur la capacité de laminage des crues

Du fait de l'envasement de la retenue d'un barrage, le volume de la tranche réservée au laminage des crues subit une réduction progressive. Cette réduction se traduit par une augmentation du risque de déversement ce qui constitue une menace pour la sécurité de l'ouvrage et les zones inondables à l'aval et se traduit par des pertes d'eau pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et la production énergétique.

I.5.3 Sur la sécurité des barrages

L'envasement des retenues affecte la sécurité des barrages par :

- La mise en danger de la stabilité de l'ouvrage du fait de l'augmentation de la poussée hydrostatique causée par le remplacement progressif des volumes par les sédiments et l'accroissement de la densité des eaux stockées du fait de la suspension.
- L'opposition à l'ouverture de des vannes en cas de nécessité de diminution du plan d'eau dans la retenue dans certaines situations d'urgence.
- L'altération des caractéristiques de résistance des ouvrages due aux réactions chimiques au sein des dépôts et particulièrement celles liées au cycle du soufre et aux caractéristiques d'agressivité de l'eau.

- La gêne de l'auscultation de l'ouvrage. En effet, les sédiments déposés peuvent empêcher la mise en œuvre de moyens d'inspection subaquatiques et contrarient également les inspections visuelles après vidange en masquant le parement amont et en y interdisant l'accès depuis la cuvette.

1.5.4 Sur les ouvrages annexes des barrages

Les dimensions des matériaux qui sont transportés par la rivière dans la retenue et dont une partie vient en contact avec les organes de restitution constituent un danger permanent pour la sécurité du barrage. Ces dangers sont de deux types en fonction de la taille des sédiments transportés.

Le premier danger, dû essentiellement aux matériaux fins, provient de l'effet statique de ces matériaux qui en s'accumulant devant l'entonnement des prises d'eau et de vidanges de fond parfois même les évacuateurs de crues (situés dans la partie basse du barrage) risquent de créer un bouchon de vase qui devient problématique avec sa consolidation. Le risque est de se priver des services de l'organe en question, surtout quand c'est le seul moyen disponible d'abaisser le plan d'eau en cas de nécessité.

Le second danger est dû aux matériaux grossiers qui peuvent :

- Arracher les blindages aménagés dans les conduites aux endroits où l'eau circule à grande vitesse.
- Endommager l'étanchéité des vannes.
- Endommager les vannes elles-mêmes.
- S'opposer à la fermeture des vannes par conséquent le risque de perte de volumes d'eau importants.

L'envasement accélère donc le vieillissement des ouvrages hydrauliques et rend plus délicat et plus coûteux leur entretien et leur maintenance.

1.5.5 Sur les infrastructures aval

Les problèmes posés par les sédiments ne se limitent pas au niveau du barrage mais ils s'étendent bien en aval. Ainsi, les sédiments en suspension dans l'eau distribuée par des canaux à partir des barrages se déposent dans ces ouvrages et favorisent le développement

de plantes aquatiques. Ceci réduit la débitance de ces canaux et rend difficile leur exploitation et augmente considérablement les coûts d'irrigation et la probabilité de déversement.

L'envasement des canaux d'irrigation impose leur entretien et leur curage d'une manière régulière. Le chômage de ces canaux, pour entretien et curage perturbe de manière sérieuse le bon fonctionnement de ces ouvrages particulièrement quand le canal est également utilisé pour l'alimentation en eau potable.

1.5.6 Sur la qualité de l'eau

Un des plus importants effets de l'envasement sur la qualité des eaux des retenues de barrages est la dégradation très sérieuse de cette qualité due au phénomène d'eutrophisation.

Ce phénomène est lié à un aspect particulier du transport solide dans les bassins versant, à savoir, sa charge en phosphore, en manganèse et en azote et à l'effet des sédiments sur la modification du chimisme de l'eau et la stratification thermique de la retenue. La nature des formations lithologiques du bassin versant contrôlé par le barrage est le facteur déterminant dans ce processus ; l'eutrophisation d'une retenue peut provenir de l'érosion des sols non couverts par une végétation.

Un autre effet, non moins important de l'envasement sur la qualité de l'eau, est la difficulté d'éliminer les quantités importantes de matières en suspension au niveau des oueds où existent des prises d'alimentation en eau potable au fil de l'eau.

1.6 Les modèles d'estimation de l'envasement

L'accumulation des sédiments véhiculés par les eaux pluviales et venantes se déposer dans la cuvette des barrages, constitue une préoccupation essentielle pour les méthodes d'évaluation du volume des vases. On distingue deux méthodes de mesures.

1.6.1 Bathymétrie par nivellement :

Cette méthode présente l'avantage de tenir compte de toute la hauteur de sédiment et est intéressante à mettre en œuvre dans les projets où le toit du substrat n'est pas connu.

Il y a plusieurs méthodes utilisées pour le levé bathymétrique par nivellement, on prend quelques exemples :

a) *La première méthode* : est réalisée à l'aide d'un instrument de mesure gradué, à partir du bord et préférentiellement à partir d'une embarcation si les conditions le permettent.

Elle permet soit de mesurer simplement la hauteur totale de vase par enfoncement, soit de mesurer la hauteur d'eau avant et après les travaux, une résistance plus soutenue permet d'apprécier le haut du substrat, les mesures sont composées de profils en travers qui pour être représentatif, doivent être judicieusement localisées et dénombrées. La définition du volume extrait ou à retirer est établie par exploitation entre deux profils à partir du produit entre la section envasée et la distance.

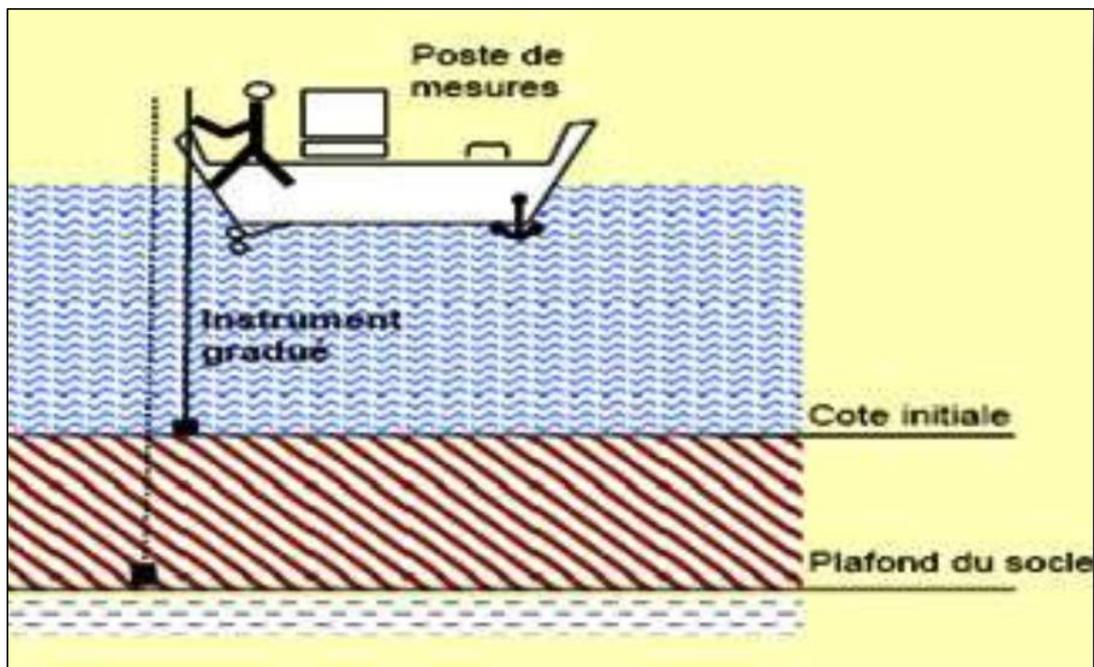


Figure 4 : Schématiquement de la bathymétrie par nivellement.

b) *La deuxième méthode de nivellement* : est à l'aide d'une mire sur une embarcation et d'une lunette de visée ou d'un tachéomètre (lunette de visée laser), la hauteur d'eau, le niveau supérieur de la couche de vase et le fond dur sont obtenus (Figure I.11). Le relèvement s'effectue point par point selon un profil transversal au cours d'eau. Le nombre de points sera forcément fonction de la largeur du cours d'eau. La carte

globale se fait alors par extrapolation des profils transversaux. Il est nécessaire de prendre en compte la cote de l'eau, d'avoir un positionnement précis des profils pour tenir compte des particularités du terrain.

Le nivellement n'est généralement pas précis et admet une erreur de 20 %. Le volume de sédiment se fait ensuite par extrapolation entre deux profils.

$$V = S \times L$$

Où : V : volume de sédiments en mètres cubes.

S : section envasée en mètres carrés.

L : distance entre deux points de mesure en mètre.

1.6.2 Bathymétries par sondeurs : « Echosondeur bathymétrique »

Le dernier appareil à mesurer la profondeur par échosondeur, une véritable révolution dans la mesure de l'eau profonde. Cette sonde de l'écho, le type moderne a été inventé pour la première fois dans les années de la première guerre mondiale sur les sites physicien français angevin. Les mesures bathymétriques permettent de suivre l'évolution du volume des sédiments accumulés. Bathymétrie par sondeurs (figure 5) le volume des sédiments est calculé par informatique avec, comme hypothèse de départ, la cote du projet à atteindre, (un point de sonde = couple (distance, angle) pratiquement mesure (t, θ) et exploitation (y, z). Deux approches pour estimer (t, θ) : mesure de l'instant d'arrivée à angle fixe, mesure de l'angle en fonction du temps d'arrivée. À l'aide des nouvelles technologies de sondeurs, cette technique peut être utilisable dans une hauteur d'eau restreinte. Cette technique s'applique à partir de sondeurs mono ou multi-faisceau. (Xavier luron, Jean Marie Augustin).

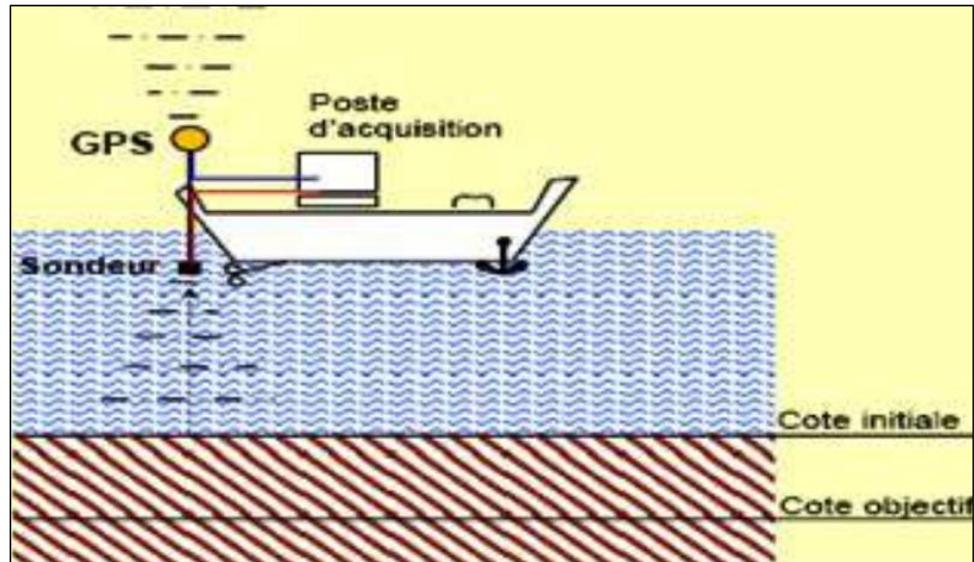


Figure 5 : Estimation de l'envasement par Ecosondeur

I.7 Conclusion

A la fin de ce chapitre, on peut dire que l'envasement des barrages est un phénomène très complexe dont on doit étudier pour minimiser ses effets indésirables. Les conséquences de ce phénomène sont extrêmement gênantes. L'envasement a un impact direct au niveau du réservoir lui-même, mais aussi cet impact s'étend aux ouvrages annexes du barrage. La maîtrise de ce phénomène aboutira directement à la proposition des méthodes de lutte adéquates.

Vu que le barrage de El-Haimeur a été sec pendant la période du travail. Nous n'avons pas à utiliser la bathymétrie mais plutôt une campagne topographique.

CHAPITRE 02

MODELISATION HYDROLOGIQUE

II.1 Introduction

La modélisation hydrologique est une activité en Hydrologie. Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de ce bassin et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues. Grâce aux progrès importants réalisés dans le domaine de l'informatique et des Systèmes d'Informations Géographiques les modèles hydrologiques distribués utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique. L'apparition et l'essor des modèles pluie-débit a commencé dans les années soixante. (Nascimento, 1995). Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des aménageurs ou bien des ingénieurs un outil « simple » permettant l'estimation ou la prévision des débits pour une étude d'aménagement désirée (barrages, lacs, ponts, etc....).

II.2 Définition de la modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique est la représentation simplifiée partielle ou totale du cycle hydrologique (Marchandise, 2007). Cette représentation se fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques qui sont appelées à reproduire le système. Elle doit pouvoir décrire les différentes étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Elle est censée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique et écologique du bassin versant étudié. (Gnouma, 2006)

II.3 But de la modélisation hydrologique

La modélisation pluie-débit a pour but de rendre compte de la transformation des précipitations sur une aire donnée (le bassin versant) en débit qui en résulte à l'exutoire de ce bassin, Il s'agit au départ d'un exercice de simulation répondant à un objectif de compréhension scientifique c'est-à-dire expliciter les différents flux et phénomènes associés, voire les réduire à des phénomènes physiques plus fondamentaux. La simulation hydrologique peut également être motivée par un objectif pratique : rendre compte des séries temporelles de débits.

II.4 Classification des modèles

Depuis leur première conception, plusieurs modèles pluie-débit sont apparus, et vu les différents objectifs des modélisateurs, ceux-ci se sont diversifiés, et leur classification peut se baser sur les critères suivants :

- Système à modéliser ;
- Degrés de causalité ;
- Discrétisation spatio-temporelle.

Les classifications de modèles que l'on trouve dans la littérature sont nombreuses et peuvent être fonction de plusieurs caractéristiques.

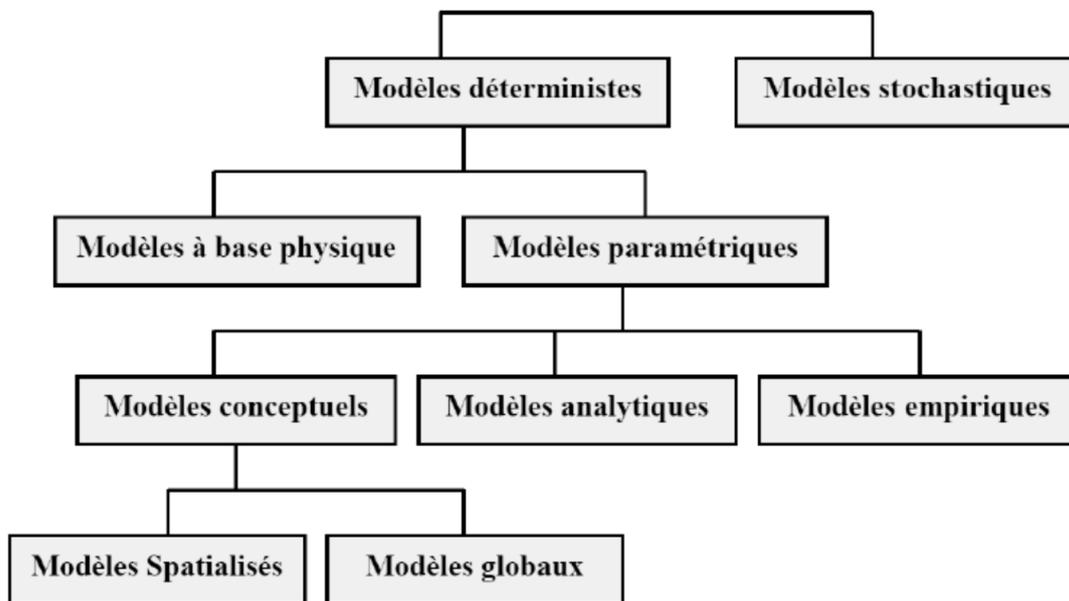


Figure 6 : Les différentes approches de modélisation. (Perrin et al, 2009)

II.4.1 Modèles stochastiques

La modélisation stochastique peut être envisagée dans le cas où il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu. Les modèles stochastiques utilisent des variables aléatoires pour représenter l'incertitude de processus et génèrent des résultats différents à partir d'un ensemble de données d'entrée et de valeurs de paramètres lorsqu'elles s'exécutent dans des conditions identiques.

Au sein des modèles probabilistes, on distingue :

Les modèles statistiques ajustements de lois statistiques, méthode du Gradex.

II.4.2 Le modèle déterministe :

Il s'appuie sur la description du bassin versant et prend en compte une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques (pente, superficie, type de sol, occupation du sol, ...).

Les modèles déterministes ont pour application la prévision hydrologique pour la gestion des ouvrages hydrauliques ou pour la prévision des crues, la délimitation des zones inondables, la gestion du territoire, la quantification des impacts potentiels des changements climatiques.

Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit de grandeurs reconstituées.

II.4.2.1 Modèles à base physique

Un modèle physique peut être défini comme un modèle dont les relations fonctionnelles sont des équations phénoménologiques basées sur des principes physiques fondamentaux tels que les lois de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Dans cette catégorie on trouve le modèle SHE et encore HEC-HMS.

II.4.2.2 Modèles paramétriques

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

- *Modèle empirique*

Les modèles empiriques consistent à établir une loi mathématique qui relie la variable de sortie à des variables d'entrée, dont la forme et les coefficients sont fixés à l'aide d'observations et de mesures sur le terrain. Ceci est effectué de façon expérimentale en ajustant les valeurs calculées par le modèle à celles mesurées sur le terrain. Ces modèles ont

été créés pour jouer un rôle opérationnel, c'est-à-dire comme outil de conservation des sols et de contrôle de l'érosion hydrique (Company-Redmond, 1996.)

Ce modèle empirique s'exprime selon la formule suivante :

$$A = k \times r \times l \times s \times c \times p$$

Avec : a représente la perte moyenne annuelle en sol en t/ha/an, r est le facteur d'érosive des précipitations exprimé en unités, k est le facteur d'crédibilité du sol, l'est le facteur de longueur de pente, s est l'indice de pente, c'est le facteur lié au couvert végétal et à son taux de recouvrement (compris entre 0 et 1), et p est le facteur lié aux pratiques antiérosives

- *Les Modèles Conceptuels Ou « Boite Noire »*

Propose un schéma sans lien direct avec la réalité. Elle ne fait appel qu'aux seuls variables d'entrée et de sortie d'un bassin sans faire intervenir de données sur sa nature physique. Elle fournit une description purement mathématique et globale de la transformation pluie-débit sans chercher à la décomposer en processus. Son objectif est uniquement d'obtenir des sorties les plus proches possibles des débits d'un bassin versant réel. Elle est représentée principalement par les modèles linéaires d'analyse de séries temporelles (Box et Jenkins, 1976) et les réseaux de neurones (Ancil, et al., 2004).

- *Modèles analytiques*

Ce sont des modèles pour lesquels les relations entre les variables d'entée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre variables. (Clarke, 1973)

- *Modèle distribué - global*

Cette différence est importante sur le plan pratique, car certains modèles abordent la représentation de certains mécanismes dans leur diversité spatiale. Cette modélisation est motivée par le développement et l'exploitation de nouveaux outils tels que la télédétection

et les systèmes d'informations géographiques. Dans ce cas, le modèle permet d'étudier l'impact des changements éco-physiologiques (déforestation), et de prévoir certains phénomènes hydrologiques (tels que les débits), dans un endroit bien précis du bassin. Par opposition à ce type de modèles, les modèles (globaux) qui considèrent le bassin versant comme une entité mathématique, ont été plus exploités, de par leur conception simple, et leur parcimonie, en matière de variables et de paramètres à introduire dans le modèle.

II.5 Exemple de quelques modèles

II.5.1 TOPMODEL : les aires contributives saturées

TOPMODEL (topography based hydrological MODEL) est un modèle hydrologique initialement développé par (Beven & Kirkby, 1979), (Beven, 1989), (Beven, 1992) à l'Université de Lancaster. Il s'agit d'un modèle pluie-débit qui suit une approche articulée autour de deux idées centrales :

- Le ruissellement se produit sur des zones contributives variables,
- La topographie influence la manière dont se produit le ruissellement.

L'originalité de TOPMODEL réside dans la définition de l'indice topographique. Cet indice est un paramètre dynamique qui traduit la propension qu'a un pixel à se saturer plus ou moins vite. TOPMODEL modélise le sol à l'échelle du versant de la façon suivante :

- La surface du sol donne lieu au ruissellement superficiel (Horton ou Aires contributives saturées),
- La zone racinaire retient l'eau de pluie en début d'événement,
- La zone insaturée transfère la pluie infiltrée vers la zone saturée selon l'équation de Darcy,
- La zone saturée s'écoule vers l'exutoire.

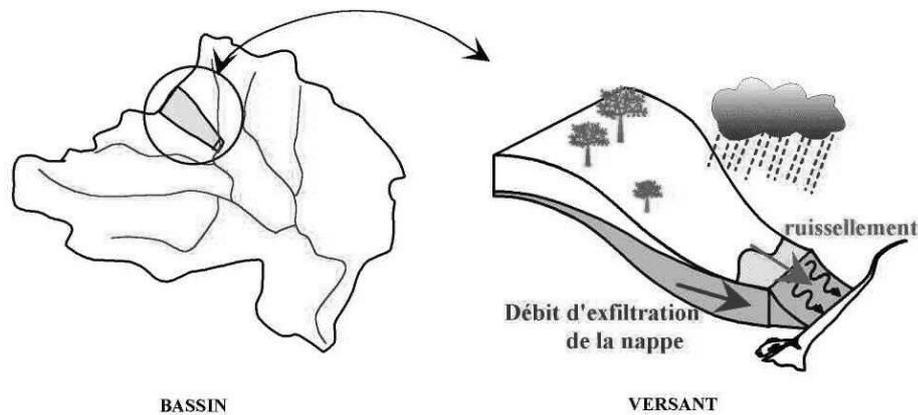


Figure 7 : Mécanismes de génération des débits développés dans TOPMODEL

II.5.2 HEC HMS

Ce logiciel a été développé par le HEC (Hydrologic Engineer Center) de US Army corps of Engineers. La première version de ce logiciel est apparue en 1995. Il s'agit d'un modèle pluie-débit, constitué par un ensemble de modèles hydrologiques qui permettent de décrire le fonctionnement d'un bassin versant de manière spatialisée. La géométrie du bassin versant peut-être conceptualisée par un ensemble de sous unités hydrologiques liées entre elles par des éléments hydrauliques. Cette description se fait à l'aide d'outils géométriques prédéfinis. La description des pluies se fait par l'introduction d'observations faites sur des pluviographes ou bien de pluies synthétiques.

Chacune des unités hydrologiques ainsi que chacun de ces éléments de liaison sont caractérisés par de multiples modèles de simulation hydrologiques et hydrauliques. Parmi ces modèles, on trouve :

- les modèles de pertes par infiltration, retenue ou évapotranspiration qui permettent d'évaluer le ruissellement : modèle de perte initiale et à taux constant, modèle à déficit et à taux de perte constant, modèle basée sur le Curve Number (CN), modèle de Green et Ampt.

- les modèles de ruissellement direct sur les versants : les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire, le modèle de l'onde cinématique.
- les modèles des écoulements souterrains : le modèle constant, le modèle à récession exponentielle, le modèle à réservoir linéaire.
- les modèles d'hydrologie fluviale dont les équations de base sont celles des écoulements à surface libre : le modèle Muskingum, le modèle du décalage (lag model), le modèle de l'onde cinématique, le modèle de Muskingum-Cunge ; ces modèles prennent en compte la géométrie des tronçons (bifurcations, confluences).

II.6 Choix du Modèle

Le choix d' un modèle hydrologique se fait en fonction des éléments suivants :

- La nécessité de l' étude hydrologique : les objectifs de l' étude hydrologique sont multiples selon lesquels on peut négliger ou simplifier certain paramètre dans la modélisation ;
- Disponibilité de données : en dépit des incertitudes que présentent des modèles par rapport à d' autres, le manque de données nous contraint à les utiliser ;
- Nature de modèle, la robustesse et la simplicité de modèle influencent le choix en particulier dans le cas où le temps où le coût présente une contrainte.

(GUENDOZ.M' Hamed, 2018)

II.7 Modelés hydrologiques de bassin versant

La modélisation hydrologique de bassin versant s'intéresse au cycle de l'eau sur un bassin ; elle inclut donc des fonctions de production (liées aux transferts verticaux) et des fonctions de transfert (liées aux redistributions latérales). Un modèle est construit afin de répondre à une question posée dans un milieu donné et suivant une formulation de la réalité choisie. Il

doit aussi tenir compte des données de forçage et de validation disponibles ainsi que de la résolution spatio-temporelle de ces données.

Il existe une très grande variété de modèles hydrologiques, car les processus pris en compte et l'approche adoptée pour les conceptualiser diffèrent selon les auteurs. Les modèles les plus complets prennent en compte les processus verticaux et latéraux.

II.8 RRI (Rainfall-Runoff-Inundation)

II.8.1 Définition du Modèle

Le modèle Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) simule divers processus hydrologiques y compris les précipitations-ruissellement, la propagation du débit des cours d'eau et les inondations dans une manière intégrée à l'échelle d'un bassin versant. Le modèle résout les équations d'ondes diffusives appliquées aux écoulements à la surface du sol et au sous-sol sur une base bidimensionnelle. RRI est conçu pour être applicable même aux grands bassins fluviaux avec des données limitées en utilisant des informations satellitaires. L'application du modèle comprend les prévisions des inondations et évaluation des risques, en particulier dans un bassin avec de grandes plaines inondables.

Dans une cellule du réseau, le modèle suppose que la pente et la rivière sont situées dans la même grille. Les cellules de la grille de pente du modèle reçoivent la pluie et flux basé sur des équations d'ondes diffusives 2D, alors que le débit est calculé avec des équations diffusives 1D (Fig7). Pour mieux représentation des processus de pluie-ruissellement-inondation réels, le RRI tient compte l'écoulement souterrain latéral, l'infiltration verticale débit et débit de surface. L'écoulement sous-surface latéral est considéré sous-surface et de surface, tandis que là l'infiltration est évaluée par la méthode Green-Ampt. Le débit l'interaction entre le canal et la pente est calculée à chaque pas de temps basé sur différentes formules de débordement, selon les conditions de niveau d'eau et de hauteur des digues

(Sayama et al., 2012). Les codes sources du modèle RRI ont été construits avec le Langage de programmation Fortran 90.

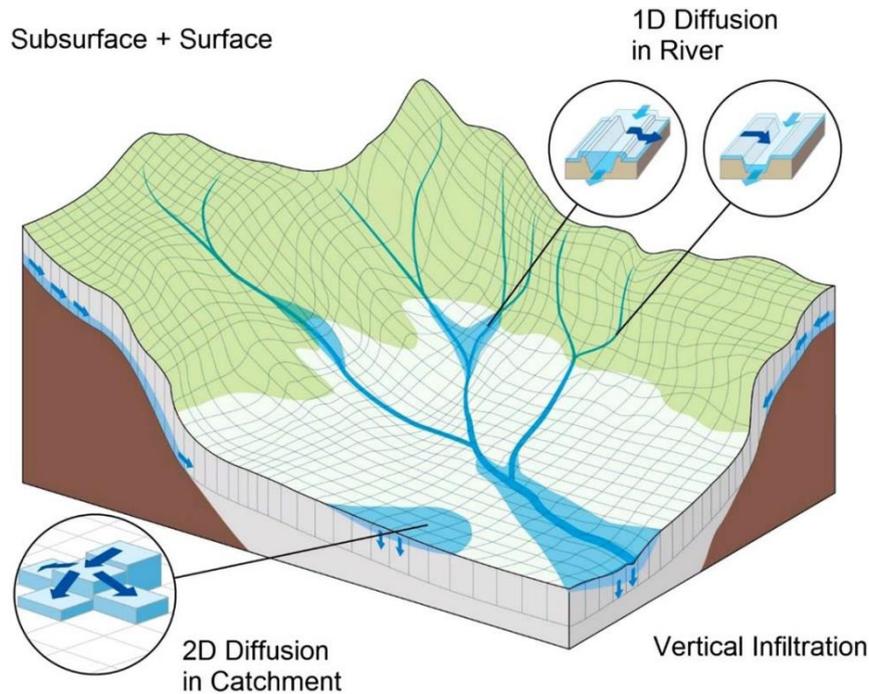


Figure 7 : Schéma du modèle (RRI)

II.8.2 Vue d'ensemble de la structure du RRI

Le modèle RRI est capable de simuler les précipitations en 2D, le ruissellement et les inondations simultanément. La figure 8 montre un schéma diagramme du modèle RRI. Le modèle traite les pentes et les canaux de rivière séparément. À une cellule de grille dont un canal fluvial est situé, le modèle suppose que la pente et la rivière sont sur la même cellule de grille. Un canal est discrétisé comme un seul vecteur le long de l'axe de la pente sus-jacente la cellule de grille. Le canal représente un circuit d'écoulement supplémentaire entre les cellules de la grille qui recouvrent le cours de la rivière. Les flux latéraux sont simulés sur des cellules de pente sur une base 2D. Les cellules de la grille de pente sur le canal de la rivière ont deux profondeurs d'eau : une pour le canal et l'autre pour la pente (ou la plaine inondable) elle-même. Le flux d'entrée-sortie, l'interaction entre la pente et la rivière est

calculé en basant sur différentes formules de débordement selon le niveau de l'eau et la hauteur des digues.

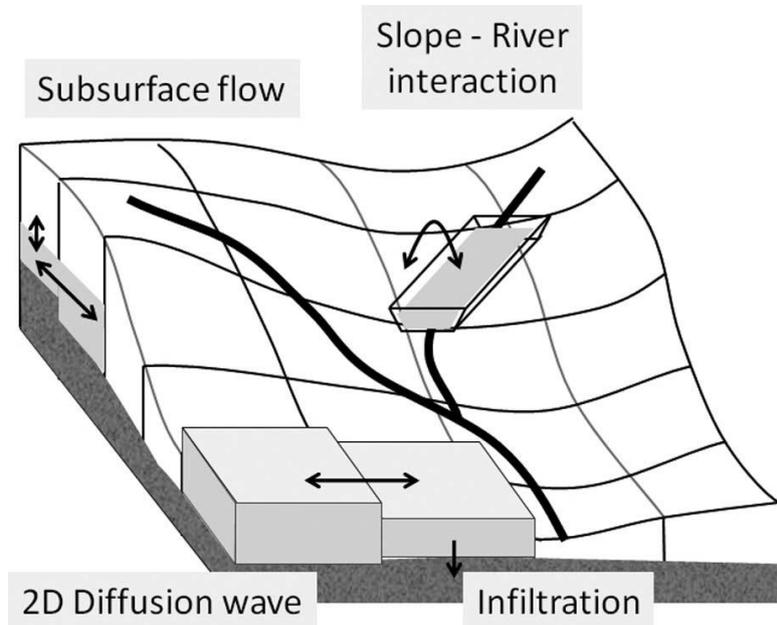


Figure 8 : Diagramme schématique de modèle (RRI).

II.8.3 Principes de calcul du RRI

II.8.3.1 Les paramètres géométriques

Un modèle d'onde diffusive unidimensionnelle est appliqué aux cellules de grille fluviale. La géométrie est supposée être rectangle, dont les formes sont définies par largeur W , profondeur D et hauteur de remblai H_e . Lorsqu'on ne dispose pas de données géométriques détaillées, la largeur et la profondeur sont estimées par la fonction suivante de la zone contributive en amont A [km^2].

$$W = C_w A^{S_w}$$

$$D = C_D A^{S_D}$$

Où C_w , S_w , C_D et S_D sont des paramètres de géométrie. D et W sont en mètre

II.8.3.2 Échange d'eau entre les rivières et les talus

L'échange d'eau entre une cellule de grille de pente et une cellule de grille de rivière sus-jacente est calculé à chaque étape de temps en fonction de la relation entre les niveaux d'eau de pente, l'eau de rivière, la hauteur de remblai et le sol. La figure ci-dessous montre quatre conditions différentes. Pour chaque condition, différentes formules de dépassement sont appliquées pour calculer la longueur unitaire du rejet d'une pente à une rivière (q_{sr}) ou d'une rivière à une pente (q_{rs}), qui est ensuite multipliée par la longueur du vecteur fluvial à chaque cellule de la grille pour calculer le débit d'échange total. (Iwasa et Inoue, 1982).

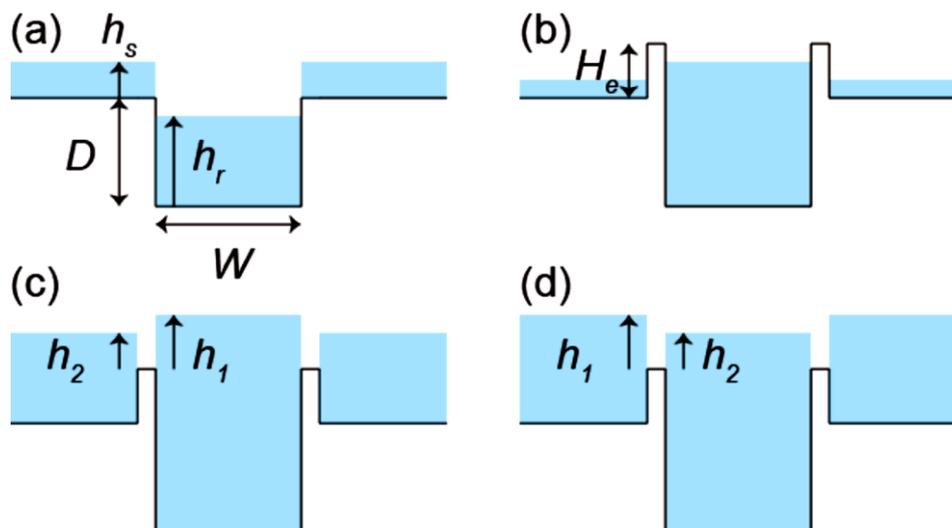


Figure 9 : Différentes conditions d'échange d'eau entre les rivières et les talus

- a) Lorsque le niveau d'eau de la rivière est inférieur au niveau du sol, q_{sr} est calculé par le Formule d'automne étape suivante :

$$q_{sr} = \mu_1 h_s \sqrt{gh_s}$$

Où μ_1 est un coefficient constant ($= (2/3)^{3/2}$), et h_s est la profondeur de l'eau sur une cellule de pente. Comme dans la mesure où le niveau d'eau de la rivière est inférieur

au niveau du sol, la même équation est utilisée même pour le cas avec des digues pour que l'eau de la pente puisse s'écouler dans la rivière.

- b) Lorsque le niveau d'eau de la rivière est supérieur au niveau du sol et que la rivière et la pente les niveaux d'eau sont inférieurs à la hauteur du remblai, aucun échange d'eau n'est supposé entre la pente et la rivière.
- c) Lorsque le niveau d'eau de la rivière est supérieur au sommet du remblai et au niveau de la pente, la formule suivante est utilisée pour calculer le débit excédentaire d'une rivière à une pente.

$$q_{rs} = \begin{cases} \mu_2 h_1 \sqrt{2gh_1} & h_2 / h_1 \leq 2/3 \\ \mu_3 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & h_2 / h_1 > 2/3 \end{cases}$$

Où μ_2 et μ_3 sont les coefficients constants ($=0,35, 0,91$), et h_1 est la différence entre le niveau de la rivière et le top du remblai.

- d) Lorsque le niveau d'eau de la pente est supérieur à la hauteur de la digue et au niveau de la rivière, la même formule précédente est utilisée pour calculer le débit de débordement q_{sr} d'une pente à une rivière. Dans ce cas, h_1 est la différence d'élévation entre la pente et la rivière, et h_2 est l'élévation la différence entre la rivière et le top du remblai.

CHAPITRE 03

Présentation de la zone d'étude

III.1 Introduction

Avant d'entamer l'étude de l'envasement dans le barrage d'El-Haimeur, il est indispensable en premier lieu de connaître la région. Donc l'étude des potentialités naturelles est importante, puisqu'elle va nous donner l'image du site, dont lequel la vallée du M'Zab est enracinée. Dans ce chapitre, nous allons englober les différentes informations descriptives de notre zone d'étude, en mettant le point sur ses potentialités naturelles, pour enfin faire ressortir ses atouts et ses contraintes au développement de l'espace urbain.

III.2 Situation Géographique

Située au centre de la partie Nord du Sahara, à 632 km au Sud d'Alger sur une altitude moyenne de 600 m la wilaya de Ghardaïa couvre une superficie totale de 24,395 km², sa population totale est estimée à 301,598 habitants. Elle est située à l'ouest du bassin secondaire du bas-Sahara, sur un plateau subhorizontal (entre 33° et 31°15' de latitude Nord - 2°30' et 5° de longitude Est), composé de calcaire dolomitique ; appelé couramment "dorsale du M'zab". Il est jalonné par un réseau ramifié d'oueds de direction générale Ouest Est., telles que l'Oued M'zab, Metlili, Sebseb, Mansourah, N'saa (Berriane) et Oued Zegrir (Guerrara), (EL-GAROUÏ et ZEGAIT, 2015). Les altitudes varient de 650 à 550 m au Nord et le Nord-Ouest, et de 450 - 330 m au Sud et le Sud-Est.

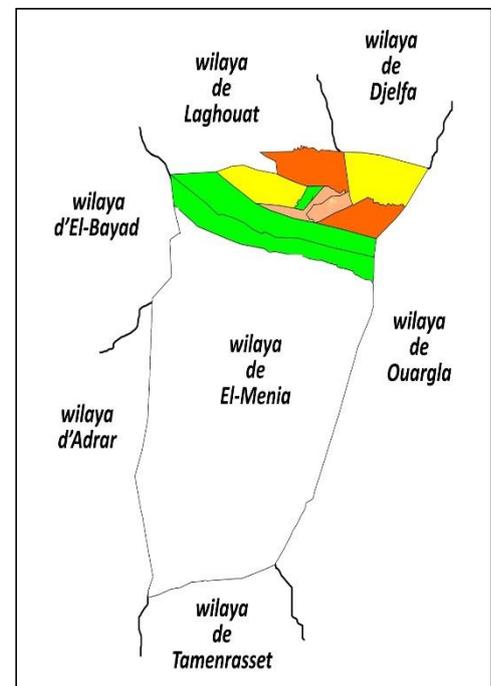


Figure 10 : Limites administrative de la wilaya de Ghardaïa

La wilaya de Ghardaïa est limitée :

- Au nord par la wilaya de Laghouat (200Km),
- Au nord-est par la wilaya de Djelfa (300Km),
- A l'est par la wilaya d'Ouargla (200 Km),
- Au sud par la jeune wilaya d'El-Menia (270 Km),
- Au sud-ouest par la wilaya d'Adrar (400Km)
- A l'ouest par la wilaya d'El-Bayad (350Km).

Au Nord de la wilaya de Ghardaïa, la vallée du M'Zab qui entaille profondément le paysage, abrite la célèbre palmeraie et les cinq villes de la Pentapole, toutes situées sur le cours de l'Oued M'Zab, à savoir : Ghardaïa, Mélika, Béni Izguen, Bounoura et El Atteuf et dont chacune de ces cinq cités est entourée par des collines ravlinées par l'érosion pluviale.

La vallée du M'Zab est classée comme patrimoine national en 1971 et patrimoine de l'humanité par l'UNESCO depuis 1982.

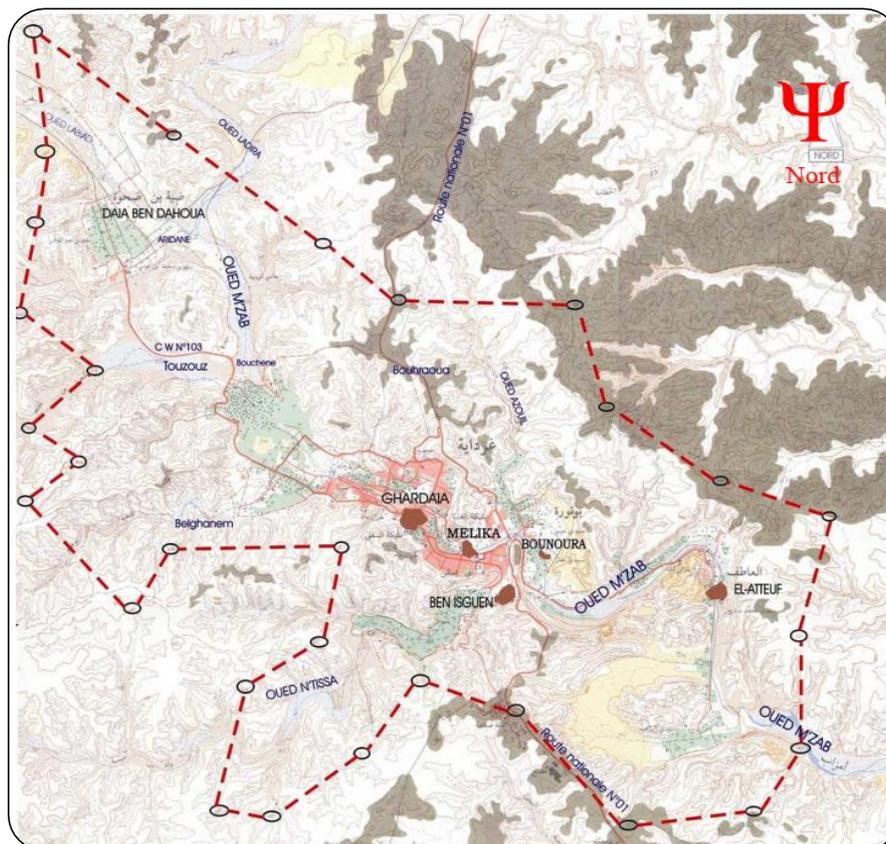


Figure 11 : Limites du secteur sauvegardé de la vallée du M'Zab

Oued M'Zab est composé de plusieurs affluents dont les principaux sont Oued El Abiodh et Oued Lahdhira à Dhayet Ben Dhahoua. Le bassin versant draine une surface de 1573 km², il culmine à 779 m et son exutoire est à 445m.

III.3 CLIMATOLOGIE

Le climat de la wilaya est de type saharien, Il se distingue par de grandes amplitudes entre les températures du jour et de nuit, d'été et d'hiver. Il se caractérise par des étés aux chaleurs torrides et des hivers doux, surtout pendant la journée.

Le caractère fondamental du climat Saharien est la sécheresse de l'air, mais l'existence des micros-climats jouent un rôle considérable dans les milieux désertiques. Le relief, la présence d'une végétation abondante peuvent modifier localement les conditions climatiques (microclimat). Au sein d'une palmeraie on peut relever un degré hygrométrique élevé, le degré hygrométrie modifie les effets de la température pour l'homme.

Les éléments qui viennent modifier considérablement les effets de la température par les êtres humains et sur la végétation :

- L'Humidité
- Le Rayonnement
- La composition des sols
- Le relief,

Il faut tenir compte également du fait que les moyennes de températures sont relevées à l'ombre .et celle-ci est rare au Sahara où la température au sol peut dépasser 60 °C. Le climat Saharien se caractérise par des étés aux chaleurs torrides et des hivers doux, surtout pendant la journée (Dubief, 1953).

III.3.1 Température

Elle est marquée par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver. 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 maximum 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 minimum absolu de cette période a atteint -1 °C. (Tableau -1)

L'analyse d'une série d'observations statistiques enregistrée au niveau de la Wilaya de Ghardaïa, sur une période d'observations de 25 ans, a fait ressortir que la température moyenne mensuelle enregistrée, est de 22,3 °C.

Tableau 1 : Température moyenne mensuelle et annuelle de station de Ghardaïa

(1990-2014) Source ONM

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Ans
T moy (c°)	28.8	22.9	16.2	11.7	10.7	13.1	16.8	20.6	25.9	31.0	34.4	33.9	22.3

III.3.2 Précipitations

Selon des données statistiques, sur une période d'observation de 10 ans, on a constaté que la pluviométrie était très faible. La moyenne annuelle est de 81.1 mm et le nombre de jours de pluie ne dépasse pas onze (11) jours (entre les mois de janvier et mars).

Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles -station de Ghardaïa (1995-2004)

Source ONM

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Ans
Précipitations	11.0	8.7	8.2	10.8	10.5	2.8	9.9	12.6	1.4	1.0	1.0	6.2	81.1

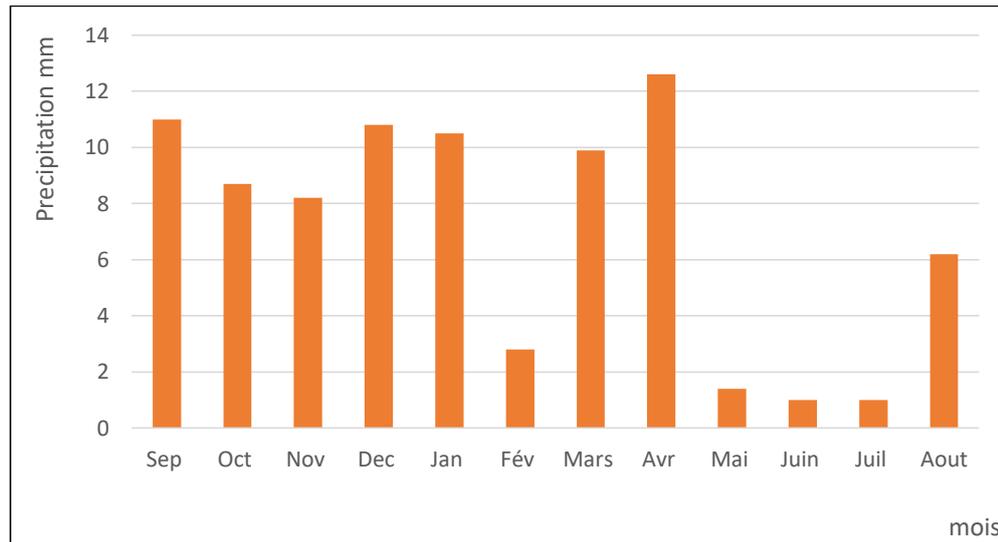


Figure 12: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles -station de Ghardaïa (1995-2004)

III.3.3 Humidité

L'humidité relative représente le rapport de la tension de vapeur à la tension maximum correspondant à la même température.

Des données de la station météorologique de Ghardaïa montrent qu'il y a une période de sécheresse de mois de juin au mois de juillet et il y a une période humide qui est en automne et en hiver.

Les données recueillies de la station de Ghardaïa donnent une moyenne annuelle de l'ordre de 39,2%. (O.N.M, 2014).

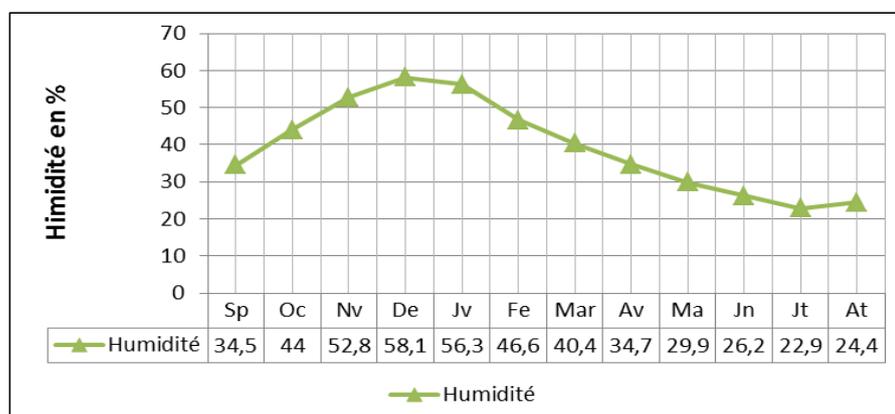


Figure 13: Humidité moyenne mensuelle -station de Ghardaïa

III.3.4 Vents

Les vents dominants d'été sont forts et chauds tandis que ceux d'hiver sont froids et humides. Les vents de sable sont très fréquents dans la région d'El-Ménéa surtout pendant le printemps, les mois d'avril, mai et juin.

Tableau 3: Vitesses moyennes mensuelles de vents station de Ghardaïa
(1995-2004) - Source ONM

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Ans
Vitesse de vents (m/s)	3.6	3.1	3.5	3.7	3.7	3.7	4.0	4.6	4.4	3.9	3.7	3.5	3.8

III.4 Géologie et hydrogéologie

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 crétacé 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 km² 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. C'est dans le creux de l'oued M'Zab, sur des pitons rocheux, que s'est érigée la pentapole.

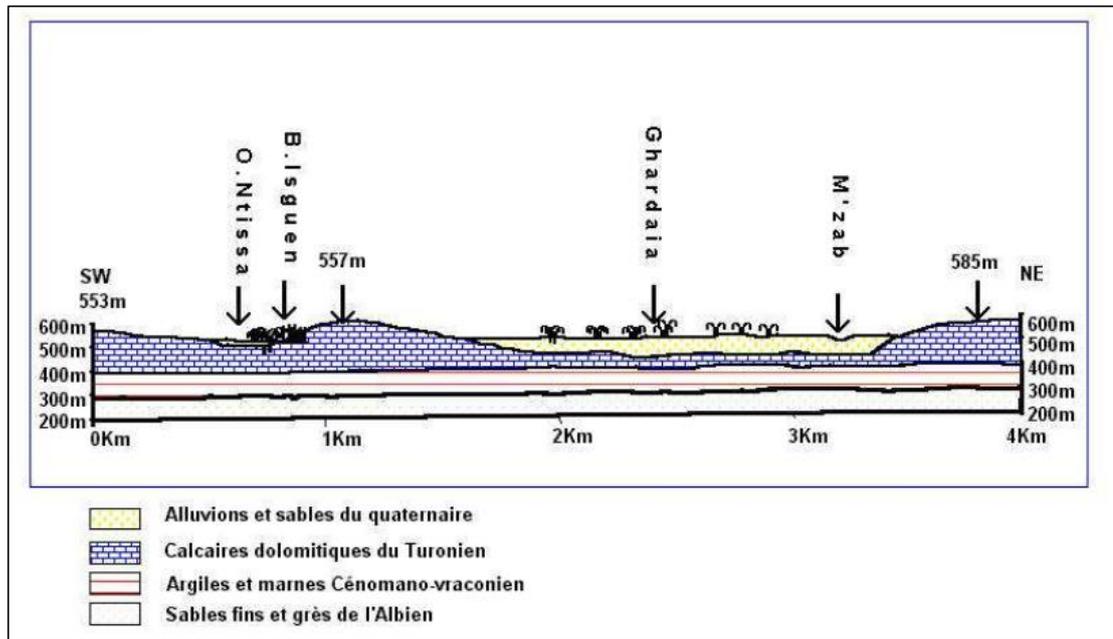


Figure 14 : Coupe géologique schématisée de la région du M'Zab - Source ANRH

III.5 Ressources en eau

Les ressources hydrauliques de la Wilaya sont essentiellement souterraines. Les ressources en eaux de surface proviennent généralement des crues importantes de l'Oued M'Zab inondant ainsi que la région de Ghardaïa. Ces crues sont générées par les averses sur la région de Laghouat – Ghardaïa

L'exploitation de l'eau dans la vallée du M'Zab s'était opéré par le creusement progressif de quelques milliers de puits traditionnels atteignant la nappe phréatique et par un système ingénieux qui assure la retenue la canalisation et le partage des eaux de crues. Actuellement, l'alimentation en eau s'effectue par des forages, d'une profondeur variant de 350 à 500 mètres, puisant l'eau fossile de la nappe albienne (continental intercalaire), dont les réserves sont estimées à 1500 milliards de m³.

III.6 Aspect hydrologique

La région de Ghardaïa est jalonnée par un grand réseau d'oueds dont les principaux sont : oued Sebseb, oued Metlili, oued M'Zab, oued N'sa et oued Zegrir.

L'ensemble de ces oueds constitue le bassin versant de la dorsale du M'zab (figure I.2), ils drainent en grande partie les eaux de la dorsale de l'Ouest vers l'Est, leur écoulement est sporadique, il se manifeste à la suite des averses orageuses que connaît la région

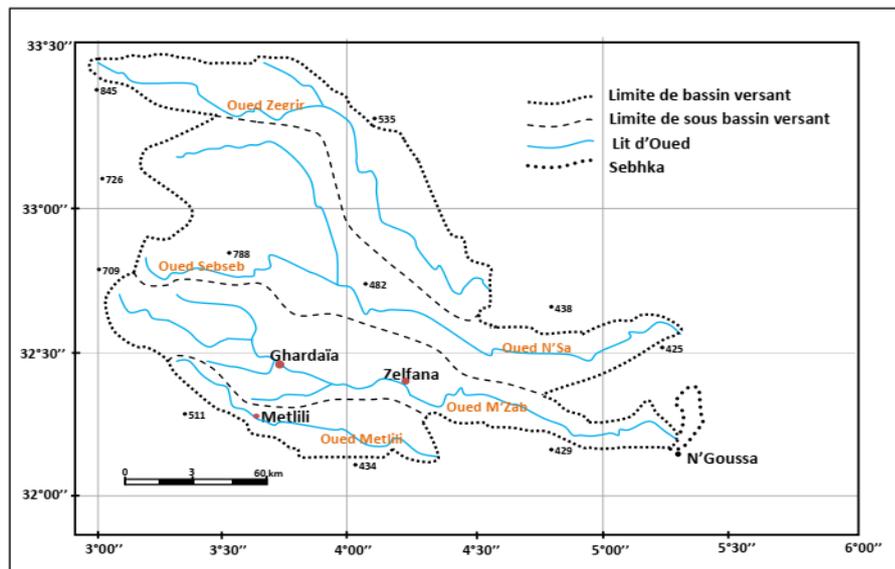


Figure 15 : Réseau hydrographique de la région du M'Zab - Source ANRH

Exceptionnellement, quand les pluies sont importantes, surtout au Nord-Ouest de la région de Ghardaïa, ces oueds drainent d'énormes quantités d'eaux. Les conséquences sont parfois catastrophiques et les dégâts sont souvent remarquables, notamment par l'Oued M'Zab, qui à chaque pluie exceptionnelle cause beaucoup de dommages principalement à la ville de Ghardaïa (ANRH, 2003).

III.7 Bassin versant du M'zab

Pour le bassin d'une superficie de 1573 Km², qui s'étend jusqu'à El Atteuf, 23 sous-bassins élémentaires peuvent être combinés en de nombreux ensembles dont les grands bassins suivants :

- *Oued El Abiod*, est situé en amont de Ghardaïa.
- *Oued Laadhira* se localise sur la rive gauche d'oued M'Zab.
- *Oued Touzouz* se situe sur la rive droite d'oued M'Zab et il le rejoint en amont de la palmeraie de Ghardaïa.
- *Oued N'Tissa* rencontre l'oued M'Zab au niveau de Béni Isguen traversant sa palmeraie.
- *Oued Azouil* se situe à quelque centaines de mètres en aval de l'oued précédent et traverse les jardins de Bounoura.
- *Oued Noumirate*, se situe en amont de la ville de Zalfana.

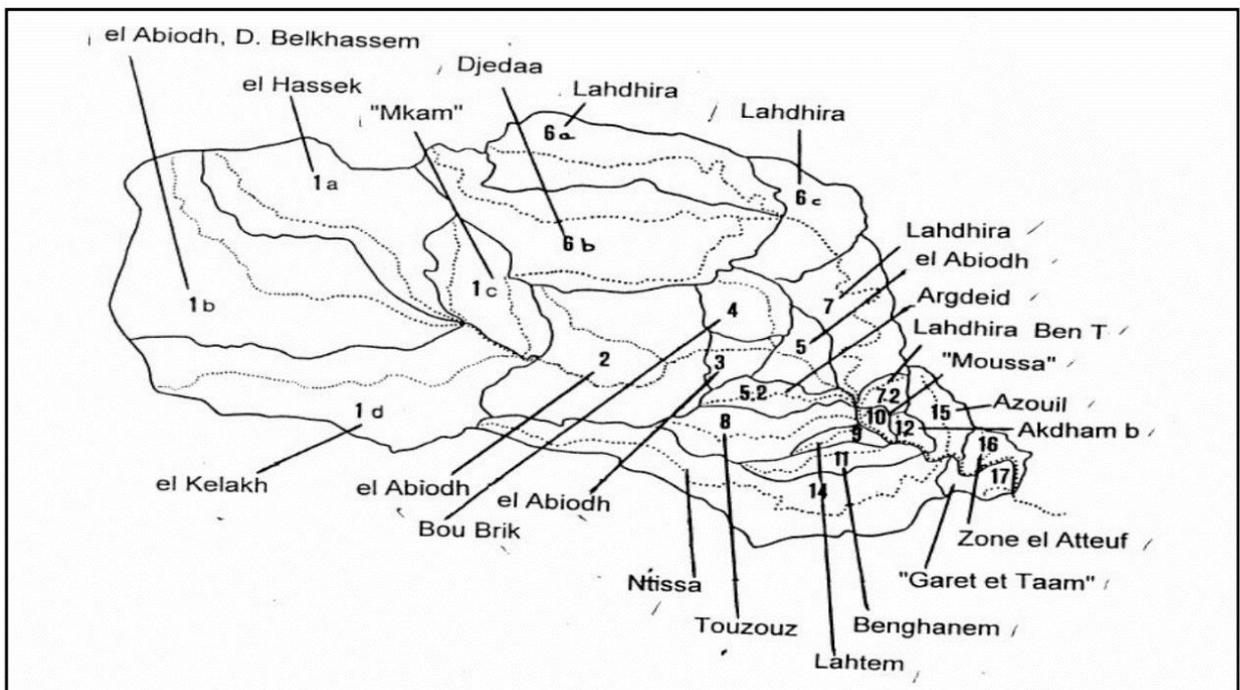


Figure 16 : Les sous-bassins versant qui forment le BV du M'Zab

N'Tissa, affluent de rive droite de l'Oued M'Zab et barré de deux digues traditionnelles. A l'aval immédiat de la confluence avec Chaabet Azouil, on 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 cette palmeraie.

Dans toute la vallée, la végétation spontanée est très rare et ne se rencontre qu'en bordure des Oueds. Les espèces qui reverdissent après chaque pluie sont des herbacées et des arbustes appartenant à la flore saharienne.

III.9 Protection de la vallée contre les inondations

L'augmentation de la population incontrôlée a causé l'étroitesse de la vallée et aussi l'extension dans les zones inondables, ce qui a augmenté le risque d'inondations ce qui nécessite des mesures et des dispositifs pour la protection de la vallée contre les crues de l'Oued M'Zab, et cela de la partie amont de la vallée jusqu'à la partie avale.

Sur la partie amont trois grands barrages (El Haimeur, Bou Brik et El Abiod) ont été implantés pour but de contrôler et de laminer le débit qui vient des bassins versant à l'amont de la manière suivante :

- Stockage et vidange régulée à 20 m³/s (5 m³/s pour Boubrik) pendant 1 à 7 jours des crues centennales et moins.
- Déversement sur l'évacuateur de crue pendant quelques heures, et vidange régulée pendant une semaine pour les crues supérieures

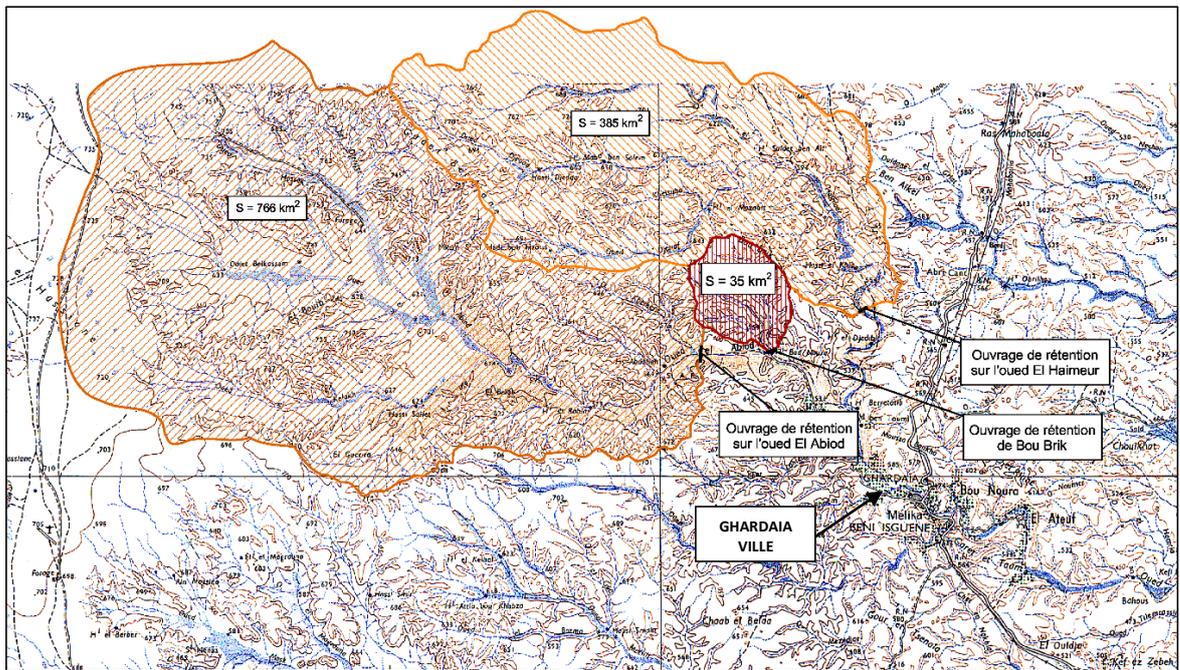


Figure 18: Localisation des barrages en amont de la vallée du M'Zab

Pour ce qui est de la partie aval de la vallée, le recalibrage du cours d'eau représente une mesure complémentaire aux trois barrages qui vise à augmenter la capacité hydraulique du cours d'eau c'est à dire à permettre le passage d'un certain débit sans danger pour des conditions bien déterminées (pente, section, rugosité,..) ce qui augmente la sécurité en cas de crues.

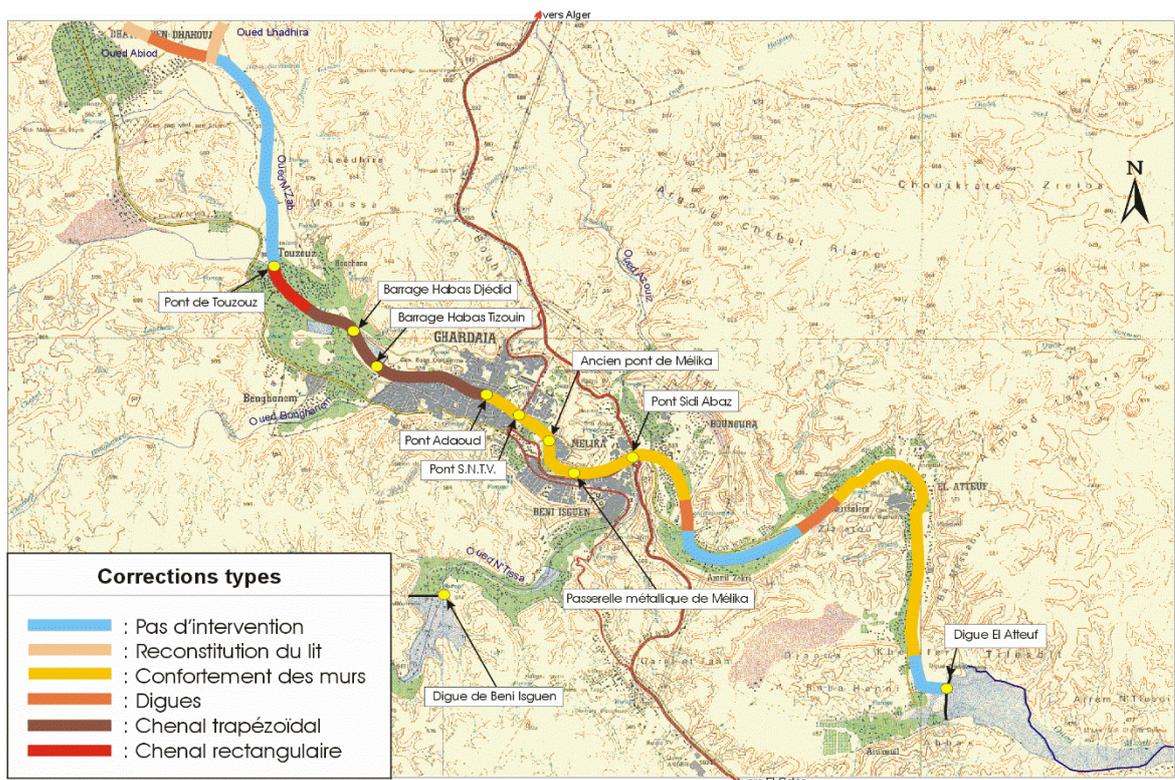


Figure 19: Mesures complémentaires de protection en aval de la vallée du M'Zab- Source OPVM

III.10 CRUES DE L'OUED M'ZAB

III.10.1 Sources de données

Pour le M'Zab, aucune mesure hydrométrique n'a jamais été faite, mise à part l'observation sommaire et qualitative des crues qui ont traversé l'agglomération de Ghardaïa.

Pour la période de 1907-1953, nous nous sommes basé sur la liste récapitulée par Dubief et qui a même proposé une analyse fréquentielle selon les sites atteints. Par la suite, c'était les crues de juin 1991 et septembre 1994 qui ont été prises en considération. Des évaluations de débits peuvent aussi être faites par des formules hydrauliques en certains sites où les hauteurs d'eau et les pentes maximales sont repérables sur des photos prises après les dernières crues.

III.10.2 Historique des crues importantes de la vallée du M'Zab



Figure 20 : inondations de 1920 -Oued Mssah Djember- « Décembre »

Source: Archives recueillis auprès de la protection civile de la wilaya de Ghardaïa.

Cet inventaire illustre de la meilleure manière, l'occurrence des inondations dans la vallée du M'Zab, et donc, la vulnérabilité de la région face à ce phénomène naturel. Ces crues sont récapitulées dans le tableau suivant:

Tableau 4 : Les crues importantes dans la région de M'Zab depuis 1920

<i>Date des crues</i>	<i>Importance</i>	<i>Observations</i>
<i>Décembre 1920</i>	Importante	8 jours d'écoulement, la crue a atteint la placette de SALM O Aissa (Fig.24)
<i>15-17 Mars 1925</i>	Importante	Dépasse BOU NOURA après avoir rempli tous les barrages situés en amont
<i>Décembre 1932</i>	Importante	Remplit les barrages de Ghardaïa et s'arrête à celui de MELIKA
<i>Novembre 1938</i>	Importante	Inondation totale des oasis de Ghardaïa, Béni Isguen, partielle de celle de Bounoura (oued Zouil)
<i>Février 1939</i>	Importante	Arrivant jusqu'à El Atteuf, remplissant à moitié le barrage d'aval de l'oasis. Tous les barrages situés sur le parcours aval de l'oued ont été remplis
<i>21 Janvier 1946</i>	Très importante	Inondation de tous les oasis. l'oued M'Zab est arrivé à El Atteuf, tous les barrages ont été remplis
<i>2 Octobre 1951</i>	Importante	L'oued M'Zab est arrivé jusqu'à El Atteuf, après avoir rempli les barrages de Ghardaïa et Melika. Plus en aval, la crue alimentée par les affluents inférieurs du M'Zab atteint Hassi Chegga le 4 Octobre
<i>24 avril 1952</i>	Très Importante	A Zalfana, le débit maximum a pu être évalué entre 500 et 1000 m ³ / seconde. la crue emporta des tentes, noya plus de 1200 tête de bétail (renseignement d'Ouargla)
<i>17 Novembre 1980</i>	Importante	98,9mm de précipitation et 4 jours d'écoulement
<i>2 Juin 1991</i>	Très Importante	Nombreux dégâts.
<i>1 octobre 2008</i>	Très importante	6 jours d'écoulement, pertes humaines considérables (43victime des dégâts matériels très importants. (Fig. 26)

III.10.3 La crue exceptionnelle du 1^{er} octobre 2008

A l'aube du 1^{er} octobre 2008, et suite à une averse de 40,5mm, une importante crue dévastatrice s'en est suivie sur l'oued Mzab. L'écoulement a débordé des berges, inondant ainsi tout ce qui est avoisinant comme constructions et autres ; les ponts ont été totalement submergés

Figure 21 :
inondations de 1 octobre
2008 –vue du ciel



La hauteur d'eau dans l'oued au centre la ville de Ghardaïa a atteint 9 mètres. Les écoulements ont charriés de fortes masses solides (sables ; galées ; boue, etc..)

Plusieurs endroits qui se trouvent au bas lit d'oued ont été submergés, les raisons pour lesquelles il a été enregistré plusieurs pertes humaines.

Suite à l'enquête effectuée sur terrain et après avoir parcouru l'oued Mzab et ses principaux affluents (Touzouz ; Labiod et Laadhira), il a été constaté que :

L'oued Laadhira et son bassin versant ayant amenés le plus grand volume d'eau qui s'est déversé dans l'oued M'zab, causant la destruction de tous les périmètres agricoles qui se trouvent sur son parcours.

L'oued Touzouz a aussi véhiculé un apport mais de faible ampleur.

L'oued Labiod, était équipé d'un barrage d'une capacité de stockage de 27millions de m³. La crue a été retenue, ainsi il n'est pas responsable de la catastrophe de Ghardaïa.

Les causes de ce déluge sont l'effondrement d'une retenue collinaire construite en 2005 au niveau de l'oued Laadhira à 20 Km du chef-lieu de Ghardaïa (**Fig 21**). En effet, les fortes pluies ont engendré l'accumulation des eaux sur 2 Km.



Figure 22 : Photo de la digue détruite du barrage d'El Haimeur

Durant la journée pluviométrique de l'ANRH, le bassin du M' Zab a reçu une quantité d'eau très importante par l'accumulation pluviométrique du 28, 29, 30 septembre et du 1er octobre qui ont provoqués trois averses exceptionnelles, enregistrées à la station de l'ANRH de Ghardaïa

Les indices pluviométriques mensuels et annuels ont atteint des valeurs très élevées, notamment dans la station de l'ANRH à Ghardaïa,

- Les précipitations enregistrées en 04 jours sont l'équivalent de 05 fois la moyenne mensuelle et 95% de la moyenne annuelle

Jamais de mémoire d'octogénaires de la vallée du M'Zab, la région n'a vécu une telle catastrophe. L'oued M'Zab, qui est sortie de son lit vers 4h du matin, tout emporté sur son passage, les dégâts sont énormes : décès de 43 personnes et 89 blessés et 756 familles sinistrées, 19 établissements scolaires ont été endommagés, 7200 foyers ont été privés d'électricité et 2300 d'eau.

Plus de 1200 ha de cultures maraîchères d'arboricultures et de palmeraie ont été laminés par les eaux, la perte de plus de 1000 têtes de bétail, et plus de 300 véhicules ont été emportés par les eaux.

Les dégâts causés aux infrastructures tournent autour de 20,1 Milliards de Dinars (200 millions d'euros).

CHAPITRE 04

Quantification de l'envasement du barrage El-Haimeur

III.1 INTRODUCTION

Suite à l'enquête de la crue du 01 Octobre 2008 effectuée sur terrain par les Oumanas et après avoir parcouru l'Oued M'Zab et ses principaux affluents (Aridane, Touzouz, El-Abiod et Laadhira), il a été constaté que Oued de Laadhira et son bassin versant ayant amenés un très grand volume d'eau qui est incomparable avec les quantités d'eau délivrées par les autre affluents.

Dans ce chapitre on va décrire le barrage d'El-Haimeur sur l'Oued de Laadhira, puis on va présenter les résultats des travaux effectués sur terrain des mesures de son envasement, pour arriver à la phase de comparaison entre les résultats obtenus et les prévisions proposés lors de l'étude de réalisation de cet ouvrage.



Figure 23 : Photo aérienne de la digue du barrage d'El Haimeur

VI.2 Présentation du barrage d'El Haimeur

VI.2.1 L'accès au site de l'ouvrage

Le barrage d'El-haimeur est situé à environ 15 Km en amont de la vallée de M'zab, dans la commune de Daya ben dahoua Le but de construction de cet ouvrage est la protection de la vallée du M'Zab contre les Inondations, et aussi la recharge de la nappe phréatique.

Cet ouvrage réalisé par l'entreprise d'AMENHYD Spa, les travaux ont démarré en 14 Octobre 2008 dans un délai contractuel de 30 mois.

L'accès au site d'El Haimeur se fait depuis Ghardaïa en suivant l'ex CW 103 jusqu'à l'entrée de Daya Ben Dahoua : à cet endroit, proche de la confluence El Abiod – El Haimeur, on traverse l'oued El Abiod puis on remonte la vallée de l'oued El Haimeur en suivant une piste de qualité médiocre. L'accès à ce site est également possible en suivant la RN 1 en direction d'Alger sur 9 à 10 km avant d'emprunter une piste sur la gauche qui conduit dans la vallée de l'oued El Haimeur. (Figure 23)

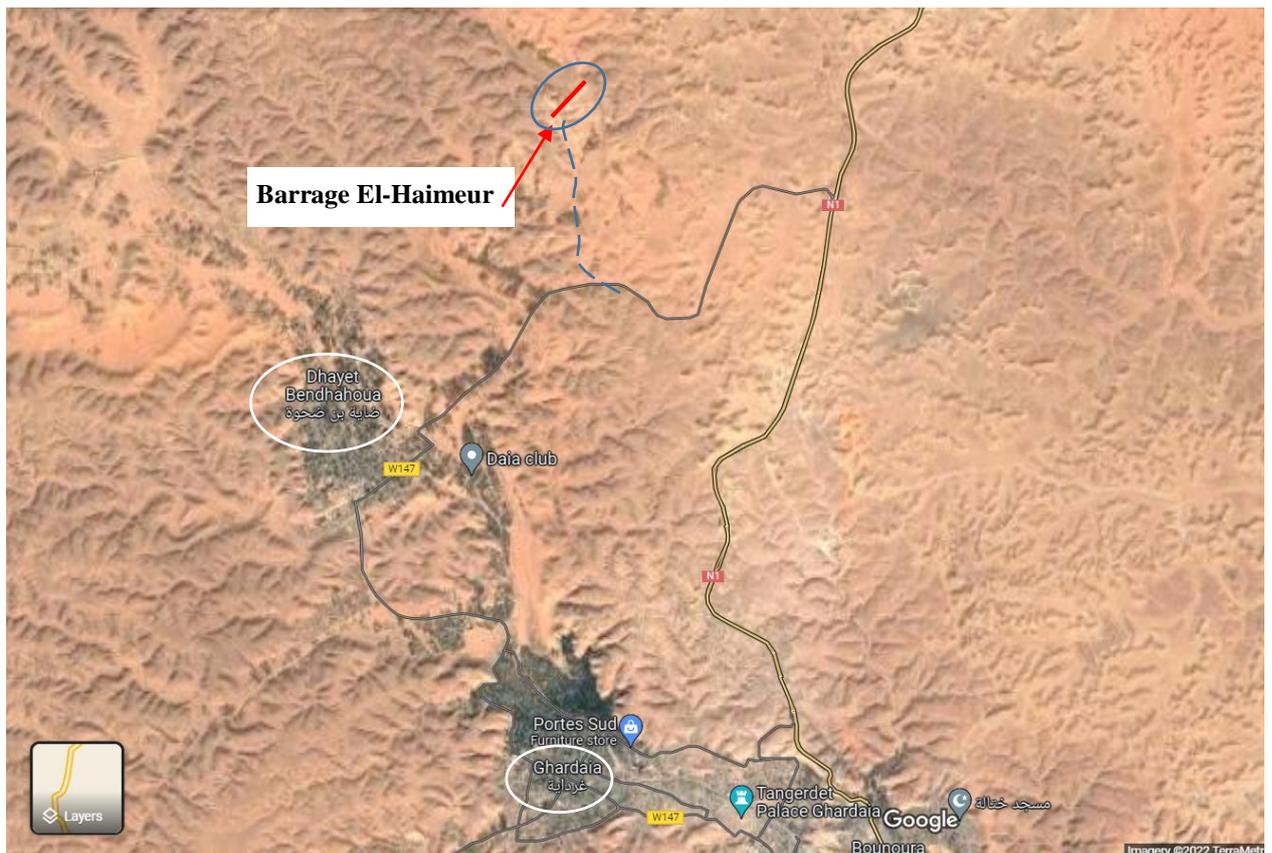


Figure 24 : L'accès au site du barrage d'El Haimeur

Les coordonnées du site et la superficie du bassin versant correspondant sont portées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5 : Les coordonnées du site d'El-Haimeur

Site d'ouvrage	X	Y	Z	S en Km2
ELHaimeur	561.138	3.605.862	543	385

VI.2.2 Présentation du bassin versant de Laadhira

Ce bassin se situe au nord-est de Ghardaïa, c'est à dire à l'amont de celle-ci, entre Ballouh de l'Est et El Abiode de l'Ouest. C'est un bassin de plaines, pratiquement plat, à faibles végétations, caractérisé par des écoulements sporadiques qui se manifestent suite à des averses orageuses.

La difficulté du dénombrement des affluents que réunit cet oued est à l'origine de la dénomination qui lui attribuée ; à savoir Laadhira, car ils existent près de 300 cours, parmi lesquels on cite le plus connu : Djaref. Ainsi cet oued prend naissance à Hassi R'mel.

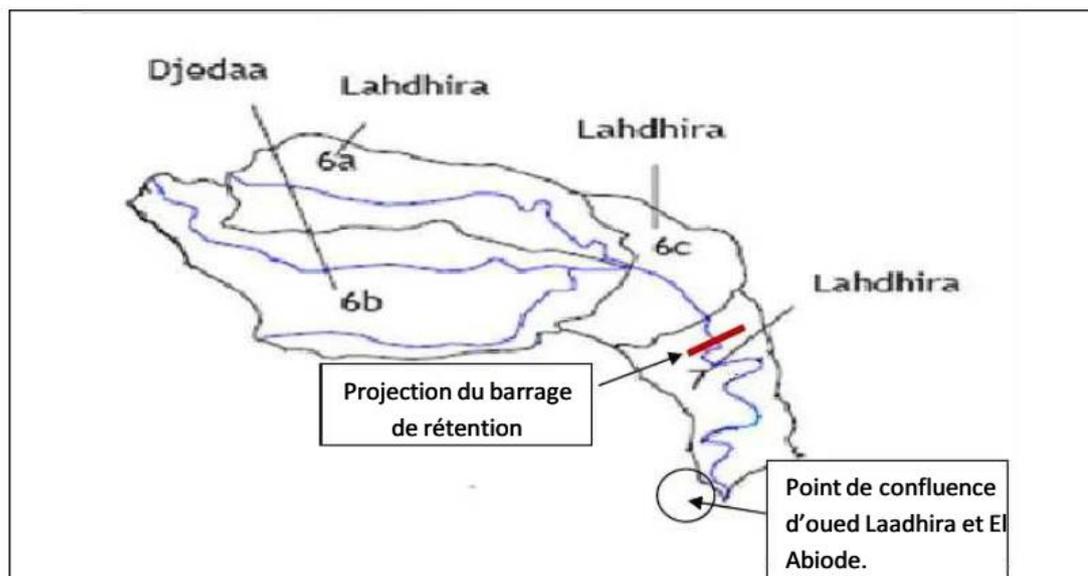


Figure 25 : délimitation du bassin versant de Laadhira

VI.2.3 Géométrie de l'ouvrage :

La digue d'El Haimeur est une digue en alluvion drainé situé sur oued LAADIRA, d'une hauteur de 22m et d'une longueur en crête de 430m, elle est destinée à réguler le débit des crues à 20 m/s au maximum. (figure 26).(BET GARDEL2008)

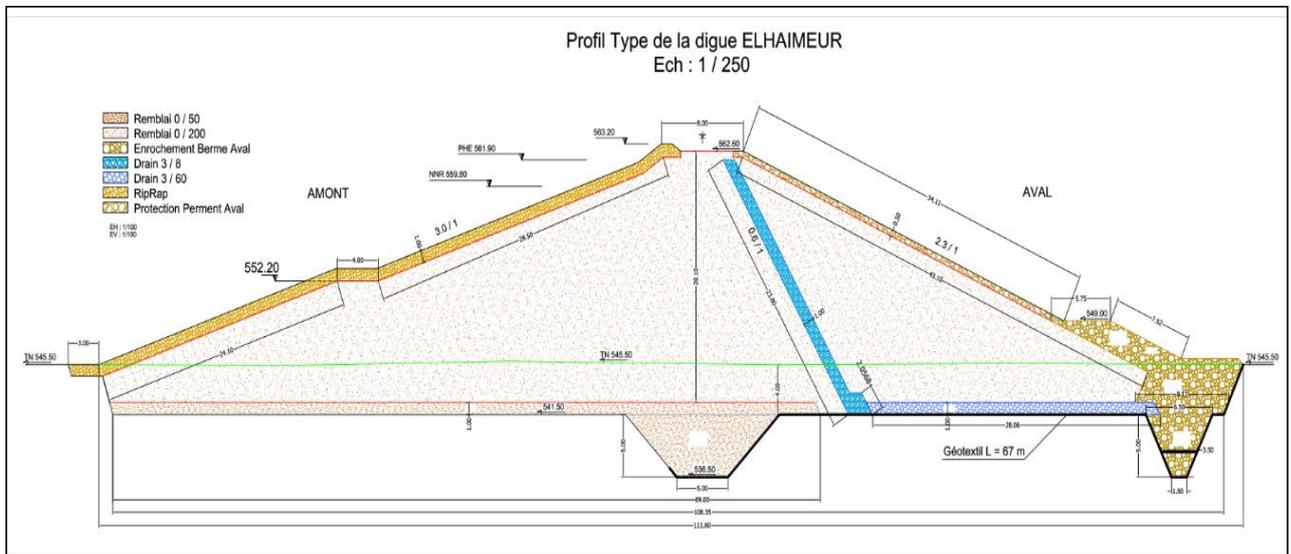


Figure 26 : Profil type de la digue d'El-Haimeur

Le corps de la digue est formé par des alluvions de l'oued, compacté par couches. Une clé d'encrage de 4 m de profondeur assurera que le gradient hydraulique au-dessous de la digue ne dépassera pas le gradient hydraulique admissible, elle sera construite avec des alluvions compactées de l'oued, criblé à **50 mm**. Un drain incliné et un drain tapis assureront l'évacuation des eaux d'infiltration à l'extérieur de la digue. Les talus des digues seront protégés contre l'érosion avec du Rip-Rap (**30/850**) en amont et des enrochements (**10/300**) en aval. Une tranchée drainante en aval dissipera les pressions interstitielles de la fondation. Le parement amont sera doté d'une berme à la côte de 552.2 m d'une largeur de 4m dont son premier rôle est celui d'un batardeau pour la crue de chantier décennal lors de la deuxième phase de construction. Elle aura un rôle très important lors de la pose du Rip-Rap à l'amont du barrage.

VI.2.4 Caractéristiques principales de l'ouvrage (Fig 26)**a. Barrage**

Type : Digue alluvions

Terrain de fondation : Alluvions oued

Hauteur maximale sur TN : 16 m

Longueur en crête : 420 m

Largeur en crête : 6 m

Cote de la crête : 562.60NGA

Volume du barrage : 200.000 m

b. Evacuateur de CrueType : seuil libre / coursier en
enrochements maçonnés

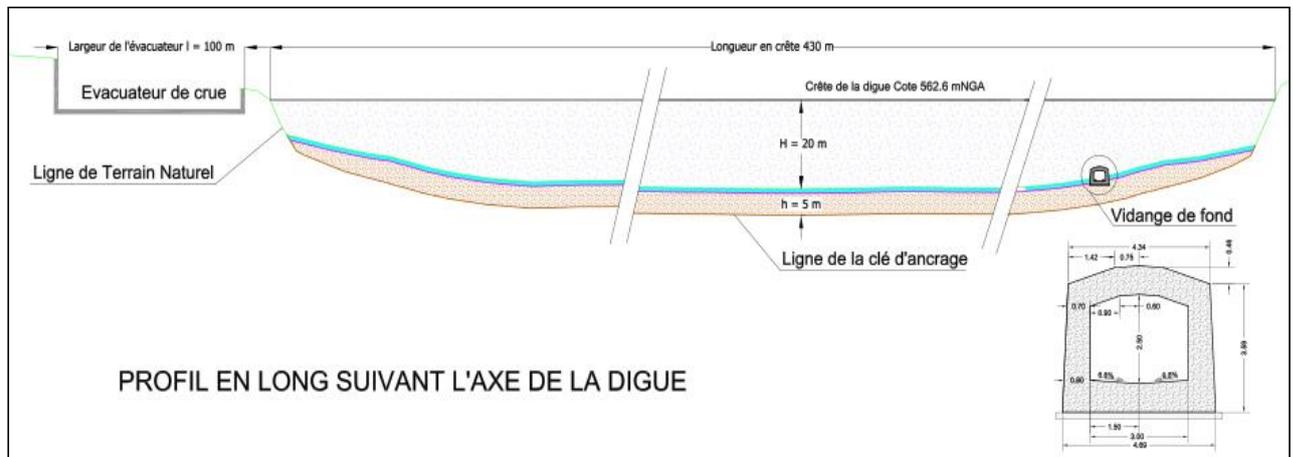
Longueur du seuil déversant : 100 m

Cote du seuil : 555,8 NGA

Débit maximal évacué : 473 m³/s**c. Vidange de fond**

Type : pertuis rectangulaire non vanné.

Dimensions du pertuis : 1.3m x 1.3m.

Capacité maximale sous RN : 20 m³/s.**Figure 27** : Profil en long de la digue d'El-Haimeur**Tableau 6** : Volumes selon les cotes dans le barrage d'El-Haimeur

	Cote (m NGA)	Surface (m ²)	Volume (m ³)
Niveau du volume mort	NVM = 550.00	557 318 m ²	1 038 961 m ³
Niveau normal de retenue (y compris le volume mort)	NNR = 559.80	2 395 108 m ²	15 484 726 m ³
Niveau des plus hautes eaux (y compris le volume mort)	PHE = 561.90	3 014 735 m ²	21 301 902 m ³
Tranche laminée	PHE = 561.90 H = 2.10	3 014 735 m ²	5 817 176 m ³

VI.3 Volume théorique de la vase :

Pour déterminer le volume théorique de la vase on va baser sur la formule de concentration des apports solides adopté lors de l'étude de réalisation du barrage, cette formule ainsi que les hypothèses concernées sont montrées dans le paragraphe suivant.

La concentration en matières solides et le charriage sur le fond de l'oued M'Zab n'ont pas fait l'objet de mesures directes. L'étude hydrologique s'est référée en conséquence à des mesures faites sur des bassins arides ou semi-arides dans d'autres régions en appréciant les différences possibles avec le M'Zab au niveau de l'érodabilité du bassin versant (topographie et géologie).

Cette étude a ainsi conduit à proposer une concentration moyenne de 5g/l de matières solides en suspension et à un charriage de fond équivalent en poids au transport en suspension.

L'évaluation des apports liquides a été faite en ne considérant que les pluies dont l'intensité est suffisante pour provoquer un écoulement et en appliquant à ces pluies un coefficient de ruissellement inférieur à 1. Selon les conclusions de l'étude hydrologique sur les précipitations, seules les pluies journalières supérieures à 7.5 mm, qui représentent 50 % des précipitations totales (70 mm/an), soit environ 35 mm/an, déclenchent un écoulement ; au niveau des intensités, ce sont les pluies d'intensité moyenne supérieure à 2 mm/h, et de hauteur supérieure à 5 mm, soit environ 30 mm/an, qui sont susceptibles de déclencher un écoulement. Le coefficient de ruissellement pour une pluie centennale et une superficie de 100 km² est de 50 % environ. Ce coefficient diminue pour des événements pluvieux plus fréquents et pour des superficies de bassin versant plus grandes.

Pour un calcul prudent de ces apports solides, on a finalement retenu une hauteur de précipitation annuelle conduisant à un écoulement de 35 mm et un coefficient de ruissellement de 50 %. Ces valeurs définissent un apport de matières en suspension pendant une durée de 50 années de :

$$\text{MES}_{50} \text{ en T} = \text{Skm}^2 \times 50 \% \times 35 \text{ mm} \times 5 \text{ g/l} \times 50 \text{ années}$$

Les valeurs calculées ont ensuite été quasiment doublées pour tenir compte des incertitudes liées à ce type d'évaluation, une seule crue "historique" étant susceptible d'entraîner à elle seule un volume de matériaux équivalent à 10 ou 20 années moyennes, L'application au bassin du site sur l'oued El Haimeur pour 50 ans ainsi que la valeur cumulée depuis la mise en service du barrage en 2011 (11 ans) sont présentées dans le tableau ci-dessous

Tableau 7 : volume théorique de la vase d'El-Haimeur

Bassin	Superficie Km ²	Apports liquides annuels Mio m ³	Transport solide annuel		Transport solide total 50 ans		T S actuel (11 ans)	perte de volume de 11 ans
			Suspension Tonne	Charriage Tonne	Poids Tonne	Volume m ³	Volume m ³	%
Barrage El Haimeur	385	6.7	33.688	33.688	3 368750	2 113725	465019.5	3.00%

VI.4 Volume actuel (mesuré) de la vase :

Pour déterminer le Volume actuel (mesuré) de la vase on se base sur la méthode bathymétriques définie dans le premier chapitre, le taux d'envasement sera obtenu en comparant le volume initial de la cuvette avec le volume actuel, pour cela on a effectué un relevé topographique d'une partie de la cuvette du barrage pour la construction du MNT, puis les courbes de niveau.

VI.4.1 Matériel utilisé

L'appareil de mesures que nous avons utilisé, est une station totale SOKKIA, avec un prisme.



Figure 28 : Matériel topographique utilisé

VI.4.2 Procédure de mesure

- Repérage des traces de la crue sur les deux rives de notre section de contrôle ;
- Positionnement de l'appareil de telle sorte que à avoir la possibilité de visualiser tous les points de la section de contrôle ;
- Réglage de l'horizontalité de l'appareil ;
- Donner des coordonnées géographiques (GPS) pour créer une station libre et démarrer l'appareil ;
- Déplacement du prisme à travers la section de contrôle dans la cuvette et le corps du barrage ainsi que ses ouvrages annexes (**pertuis de fond, Evacuateur de Crue**) pour bien repérer notre levé, et à chaque déplacement, on effectue une mesure. L'enregistrement de la mesure au point (x, y et z) est achevé automatiquement dans le carnet numérique d'enregistrement (118 points ont été levés) ;

- Transfert des mesures de la station vers l'ordinateur. Les mesures transférées sont données sous forme d'un fichier texte et/ou **Autocad**.

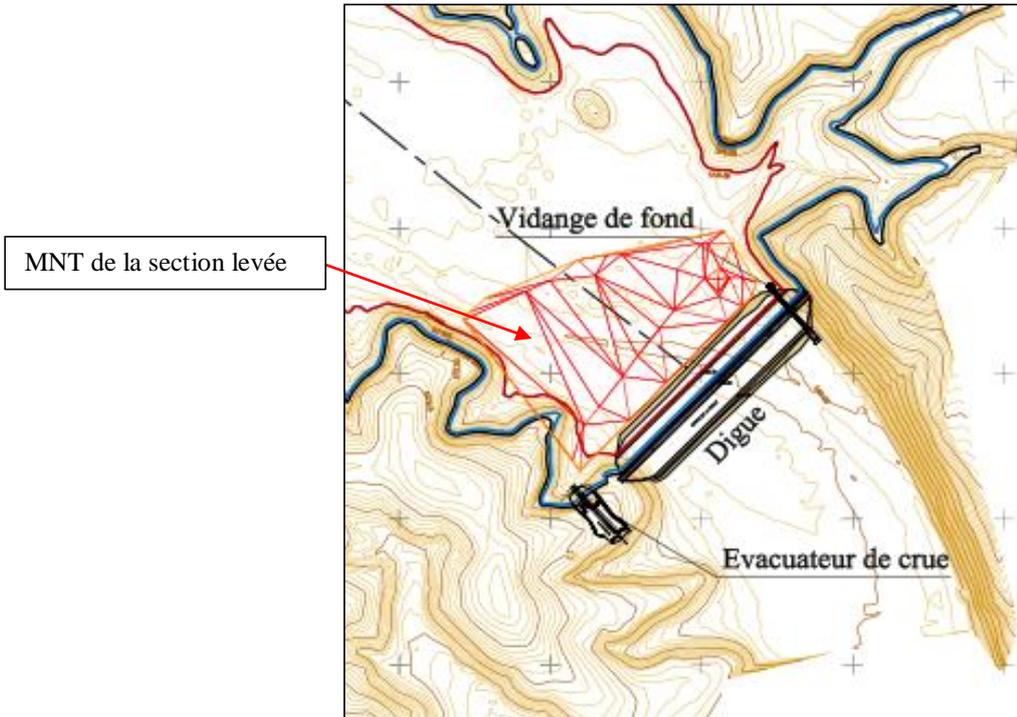


Figure 29 : Superposition du levé topographique sur le plan initial du barrage

VI.4.3 Chargement et calcul du MNT

Après exportation des données sur Autocad et délimitation du corps du barrage et ses ouvrages annexes on obtient un plan general (fig 27), dans lequel on détermine une partie de la cuvette (en amont du corps du barrage) qu'on va construire son MNT.

En utilisant l'outil covadis sur Autocad on a obtenu un polygone de surface de **96031.198m²** qui représente une proportion de **17.23%** de la surface de la retenue au niveau du volume mort NVM (**557318 m²**)

VI.4.4 Calcul de cubatures entre les deux MNT

La dernière phase dans le but de détermination du volume actuel de la vase donc la déduction du taux d'envasement n'est que la comparaison entre le MNT qu'on a calculé à partir du levé topographique effectué et le MNT initial de la cuvette du barrage, les résultats sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Résultats du calcul de cubatures MNT1 → MNT2			
Surfaces 2D		Volumes	
Avec déblai	52236.21 m ²	Déblai	35191.991 m ³
Avec remblai	43527.19 m ²	Remblai	66538.712 m ³
Sans écart	0.00 m ²	Total	101730.703 m ³
Total	95763.39 m ²	Différence	31,346.721 m ³
Surfaces 3D			
Avec déblai	52316.58 m ²		
Avec remblai	43883.89 m ²		
Sans écart	0.00 m ²		
Total	96200.47 m ²		

D'après les Résultats du calcul de cubatures MNT1 - MNT2 on peut déduire le volume de la vase (ΔV) cumulée dans la section levée qui est la différence des deux volumes remblais et déblais, $\Delta V = 31,346.721 \text{ m}^3$.

Pour obtenir le taux d'envasement total du barrage au niveau normal de retenue (NNR) $v = 15,484,726 \text{ m}^3$. On suppose que le taux d'envasement est le même dans chaque section du barrage donc dans la section levée, puis on compare le volume de la vase calculé (ΔV) à la section levée avec le volume de la même partie à l'état initial du barrage (V_0) à la cote du NNR = 559.80. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant:

Tableau 8 : Récapitulatif de quantification de l'envasement

Volume initial V_0	Volumes (m ³)		Taux d'envasement (%)	
	Volume actuel V_a	Volume de la vase (ΔV)	Mesuré (physique)	Calculé (théorique)
$V_0 = 1,255,793.92$	$V_a = 1,224,447.20$	31,346.72	2.50	3.00

VI.5 Conclusion

Après une série de mesures et des calculs, puis une comparaison entre les résultats obtenus en considérant la formule théorique de transport solide et ceux des mesures réalisés sur terrain, on a trouvé que le taux d'envasement dans le barrage de El-Haimeur est de 2.5% ce taux est inférieur par rapport à la valeur théorique (3.0%) utilisé lors de la phase d'études avant la réalisation de l'ouvrage.

CHAPITRE 05

**Impact du barrage El-Haimeur et son
envasement sur la protection de la ville
de GHARDAIA**

V.1 Introduction

Après la détermination du taux d'envasement dans le barrage d'El-Haimeur, nous arrivons à l'étape de la définition de son impact sur la protection de la ville, pour cela nous allons utiliser le model RRI (Rinfall-Runoff-Inundation) pour la simulation et visualisation des résultats en considérant la crue du 01 octobre 2008 comme référence.

La comparaison va concéder trois cas différents :

- Cas de la crue dans les conditions de 2008 (que le barrage Labiod existe)
- Cas de la crue dans en insérant les deux barrages (El-Haimeur et Boubrik)
- Cas de la crue dans en avec l'envasement des trois barrages

Vu le manque des données (hydrométriques en particulier), nous utilisons des données satellitaires à partir des sites compatibles avec RRI

V.2 Installation Model RRI.

Le paquet du modèle de RRI est disponible en open source sur le site Web de ICHARM, Institut de recherche des travaux publics, Japon.

https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/rri_top.html

V.3 Les données d'entrée

V.3.1 *Données topographiques*

Le modèle RRI donne la possibilité d'importer des données à partir du site HydroSHEDS.

V.3.1.1 Le projet HydroSHEDS

Le projet HydroSHEDS a été lancé en 2006 par le World Wild life Fond US dans le but de créer des couches de données numériques gratuites pour soutenir la recherche et les applications hydro écologiques à grande échelle dans le monde entier. HydroSHEDS fournit des produits de données hydrographiques transparents, y compris les limites des bassins versants, les réseaux fluviaux et les lacs. Les divers sous-ensembles de données existants sont uniformes à de multiples échelles et résolutions afin de soutenir la modélisation hydro environnementale mondiale et les efforts de conservation de l'eau douce. Depuis son introduction, la suite de données s'est élargie pour inclure une gamme de couches thématiques et complémentaires qui sont dérivées ou Co-enregistrées aux couches de données de base HydroSHEDS.

Bien que HydroSHEDS vise à fournir des informations hydrographiques de la plus haute qualité possible, la nature globale de HydroSHEDS signifie qu'il n'atteint pas la précision des cartes numériques locales à haute résolution des rivières ou des bassins versants.

V.3.1.2 Télécharger les données géographiques

Nous téléchargeons des fichiers DEM, Flow Direction et Flow Accumulation à partir du site HydroSHEDS en format BIL pour la ville de (Ghardaïa) et ce sur la région Africa.

This tab provides the void-filled digital elevation model underpinning HydroSHEDS v1. The following table provides links to download continental and global tiles in BIL format at multiple resolutions.

Void-filled DEM				
Continental and global downloads (BIL)				
Extent	Resolution	File size	File format	Link
Africa	15s	176MB	BIL (archived data)	Download
Asia	15s	246MB	BIL (archived data)	Download
Australia	15s	47MB	BIL (archived data)	Download
Central America	15s	20MB	BIL (archived data)	Download

Figure 30 : Interface de téléchargement HydroSHEDS

Les fichiers téléchargés sont ensuite collés dans

‘.....\RRI_1_4_2_5\RRI GUI\RRI_CONTENTS\HydroSHEDS’

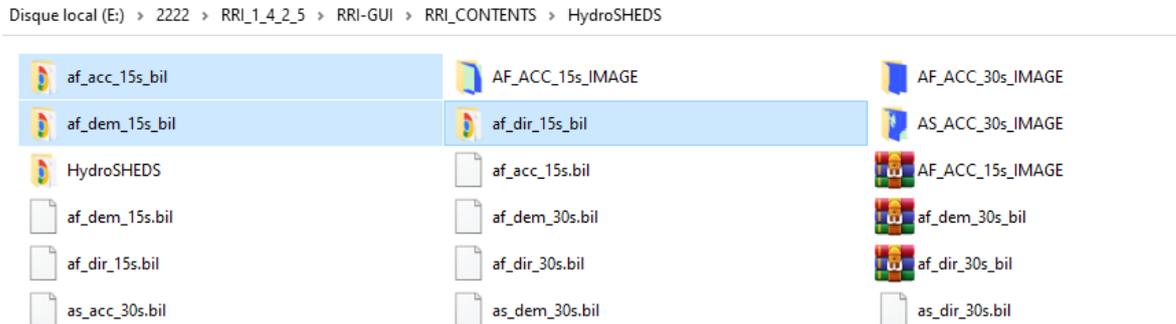


Figure 31: Emplacement des fichiers téléchargés HydroSHEDS’

V.3.2 Données des précipitations

V.3.2.1 Définition du site GSMaP

GSMaP dispose d’une carte multi satellite des précipitations mondiales dans le cadre de la mission Global Précipitation Measurement (GPM), en utilisant le radar de précipitations à double fréquence (RPD) à bord de satellites GPM, d’autres satellites de constellation GPM et de satellites géostationnaires. Ce site Web offre des renseignements horaires sur les précipitations mondiales.

La principale caractéristique de l’algorithme GSMaP est l’utilisation de divers attributs dérivés du radar de précipitations spatiales, du TRMM/PR et du GPM/DPR.

L’information sur les précipitations par GSMaP a été largement utilisée, non seulement à des fins scientifiques, mais aussi pour la météorologie, la prévention des catastrophes, la surveillance du climat, la surveillance agricole, la santé publique, l’éducation et ainsi de suite. Pour des exemples précis, veuillez consulter le livre d’utilisation.

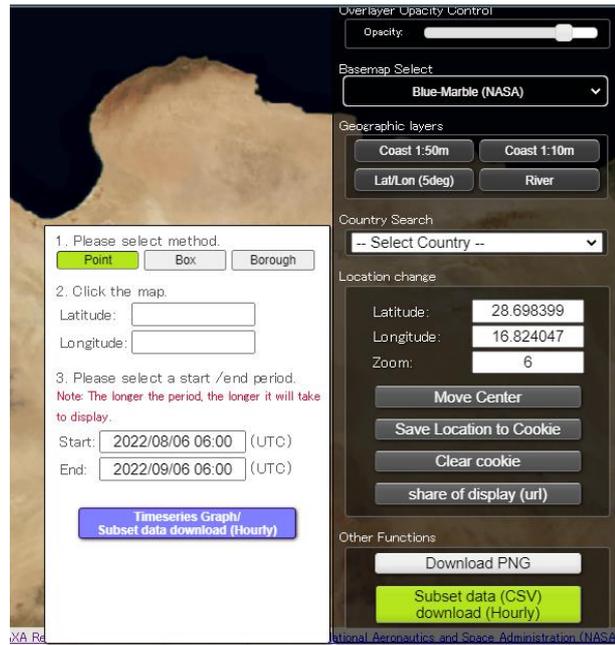


Figure 32 : Site des données des précipitations -GSMaP

V.3.2.2 Téléchargement des données des précipitations de GSMaP

Nous téléchargeons les données des précipitations entre deux dates 28/09 et 01/10/2008 dans 15 points dans la zone d'étude. Puis nous les enregistrons dans un fichier csv, les coordonnées des 15 points aux alentours du BV sont mentionnées dans le tableau

Tableau 9 : Points sélectionnés pour les précipitations

15	BO	HA	AL1	AL2	GH1	GH2	ALH2
lat	32.731250	32.764583	32.611768	32.525706	32.538704	32.526246	32.588211
log	3.147917	3.402083	3.458534	3.479289	3.554217	3.639028	3.620319
	H2	AKHL	H3	BOUb	H4	BOUb2	GH3
lat	32.699552	32.502438	32.653252	32.653252	32.639096	32.557831	32.548978
log	3.358288	3.401302	3.620629	3.564015	3.427020	3.549651	3.664197

V.4 Exécution de la simulation avec RRI_Builder

- 1) Le premier écran de « RRI_BUILDER_64.exe » permet de choisir « New Project » ou « Load Project ». Sélectionnez « New Project » dans ce cas.
- 2) Entrez un nouveau nom de projet (p. ex., « ghardaia12 ») en sélectionnant « Use HydroSHEDS ». Et « Africa15 », puis cliquez sur « OK ».

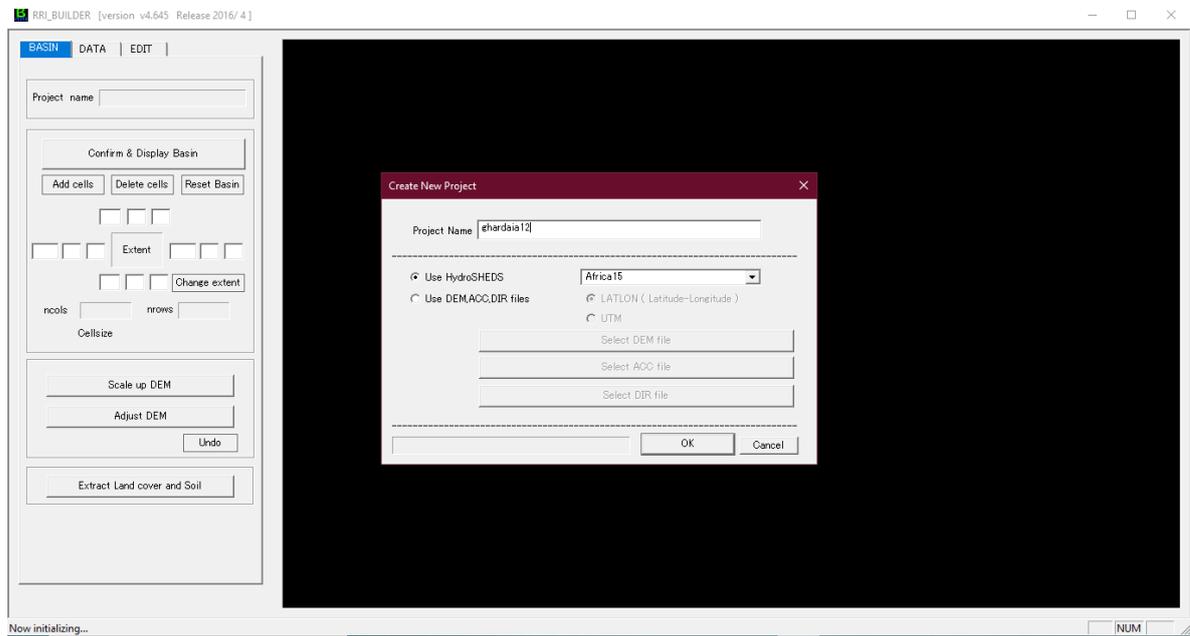


Figure 33: Le premier écran de RRI_BUILDER

- 3) Après la sélection de la région (Afrique), nous sélectionnons un point en amont de la ville de Ghardaïa, RRI délimite son bassin versant.

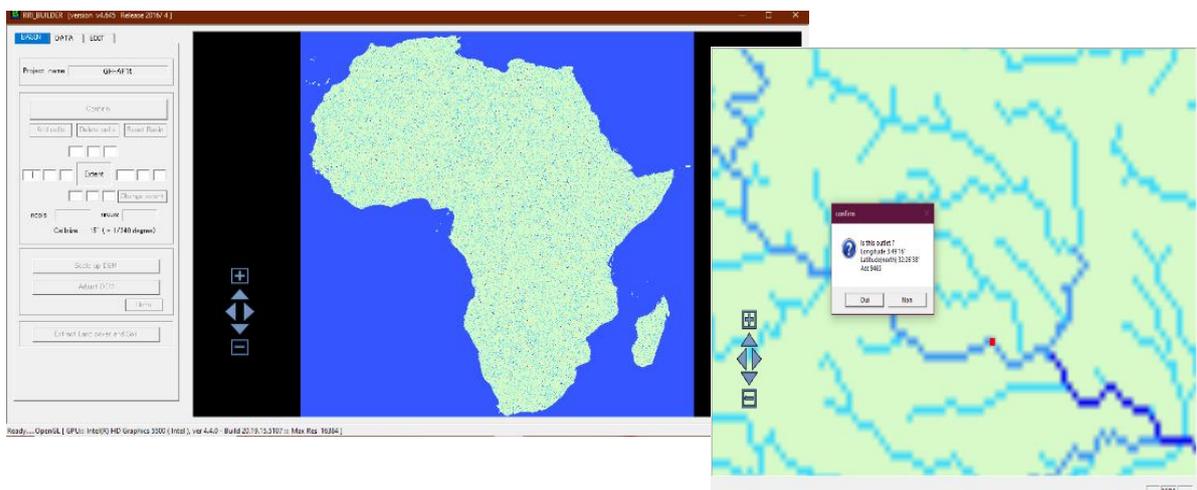


Figure 34: Sélection de la région (Afrique)

Après insertion de tous les données, les paramètres peuvent être visualisés dans tout le bassin versant à savoir : DEM, ACC, DIR, river width, river depth, hauteur de la berge ainsi que la pluie cumulative.

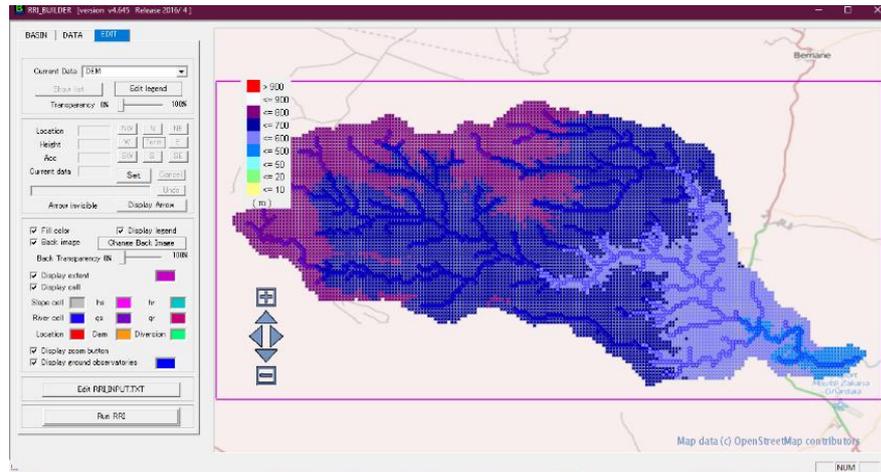


Figure 35: visualisation des paramètres du BV

- Les données entrées sont enregistrées dans un fichier “ RRI_INPUT.TXT”, ce fichier sera mise à jour chaque modification des entrées.

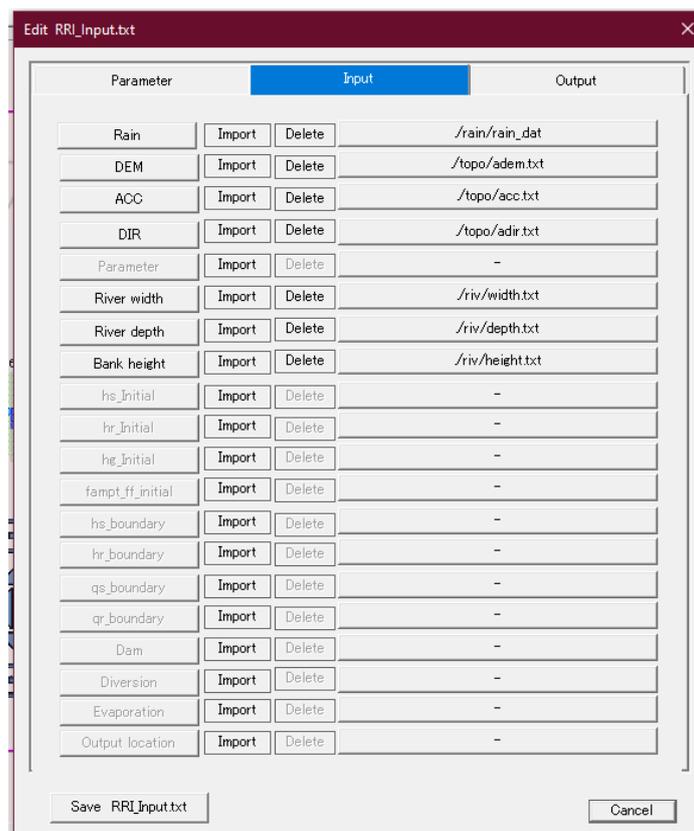


Figure 36: Interface des paramètres entrés (RRI_INPUT)

V.4.1 Ajout des barrages

RRI modèle peut simuler l'effet des barrages d'une manière simple. Le modèle de barrage a deux paramètres : le débit sortant et le volume de stockage maximum. Le modèle prend le volume de stockage comme variable d'état, qui continue d'être mis à jour en fonction des flux entrants et sortants simulés. Le débit sortant est maintenu à un certain débit inférieur au débit d'entrée jusqu'à ce que le volume de stockage atteigne le niveau de stockage maximal du barrage. Après que le volume de stockage dépasse le niveau maximum, le modèle est conçu pour libérer l'eau au même taux d'entrée.

Pour activer le modèle de barrage il suffit de créer un fichier texte en déterminant le nombre des barrages, leurs noms, leurs coordonnées selon la matrice du BV, capacité de stockage, et débit de vidange. Sous la forme suivante

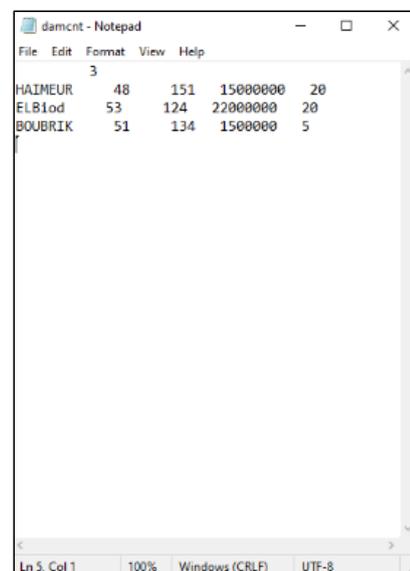


Figure 37: Fichier txt pour l'ajout des barrages sur RRI

V.5 Résultats et discussion

La comparaison va concéder trois cas différents :

- Cas de la crue dans les conditions de 2008
- Cas de la crue dans en insérant les deux barrages (El-Haimeur et Boubrik)
- Cas de la crue dans en avec l'envasement des trois barrages

Après la simulation avec les conditions des trois cas proposés, et le choix de quelques points dans le parcours de la crue nous avons obtenu les résultats suivants :

Cas N°01

Les hauteurs d'eau sont proche à celle réelles enregistrées en 2008, dont la valeur maximale était de ~ 8 m à la palmeraie.

Le moment du pic de la crue enregistré au 01/10/2008 à 07 :00.

Les valeurs des débits obtenues ont connu un écart important par rapport à ceux enregistrés (ou calculés) en 2008, ce qui nécessite des corrections et calage.

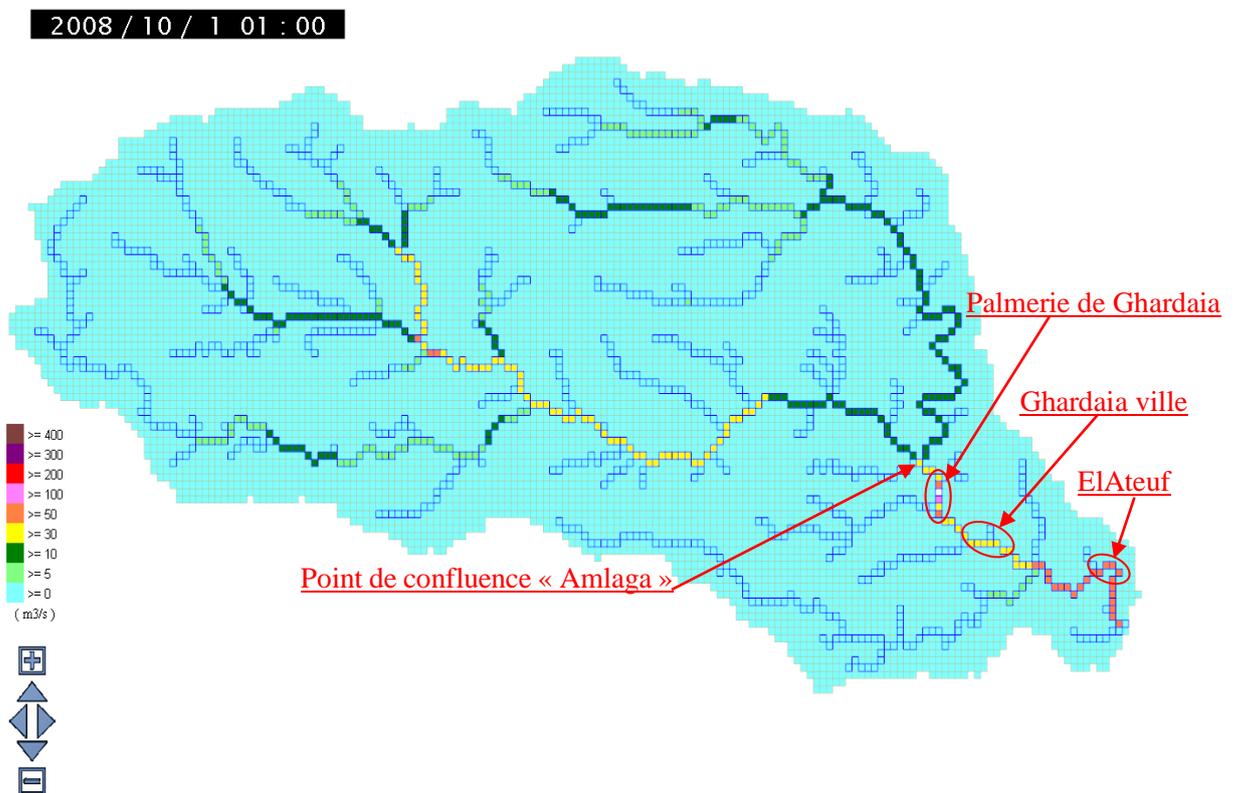


Figure 38 : Début de montée des débits

Cas N°02 et N°03

Les résultats des cas 2 et 3 (état initial des barrages et leurs états après l'application du même taux d'envasement sur les trois barrages) sont quasiment les mêmes.

L'insertion des deux barrages Boubrik et El-Haimeur a montré l'impact remarquable de ces ouvrages dans la diminution des débits (Fig 40 par rapport à fig 38).

Le débit enregistré en amont du barrage El-Haimeur a atteint 240 m³/s alors qu'il n'a pas dépassé 20 m³/s en son aval. (Fig 40)

Les hauteurs d'eau ont connu une diminution remarquable, mais la palmeraie a toujours enregistré des valeurs maximales de ~ 6 m. (Fig 41)

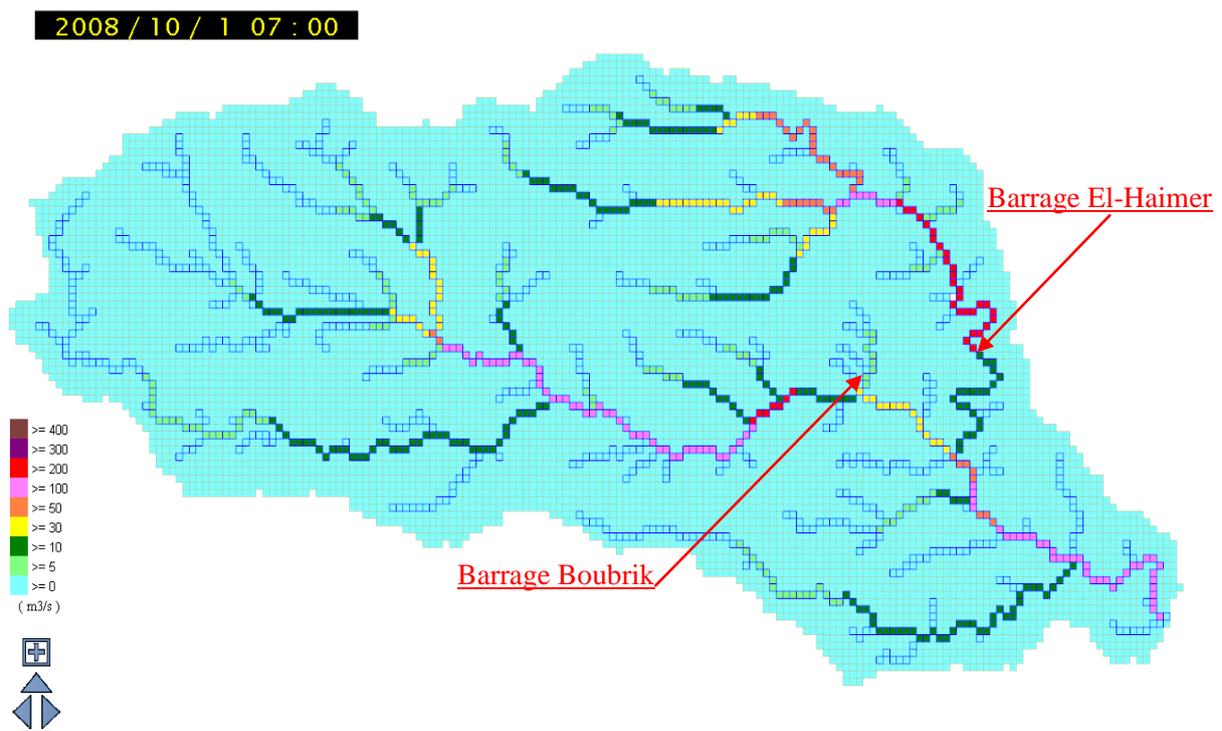


Figure 40 : Pic de la crue a la palmeraie de Ghardaïa -cas N°02 et N°03

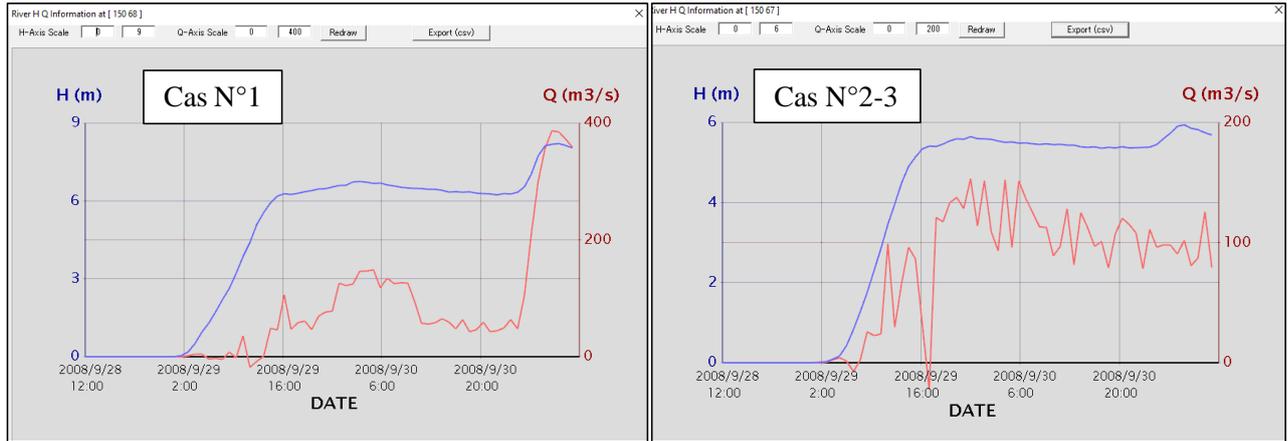


Figure 41 : comparaison des Q et H des deux cas dans la palmeraie

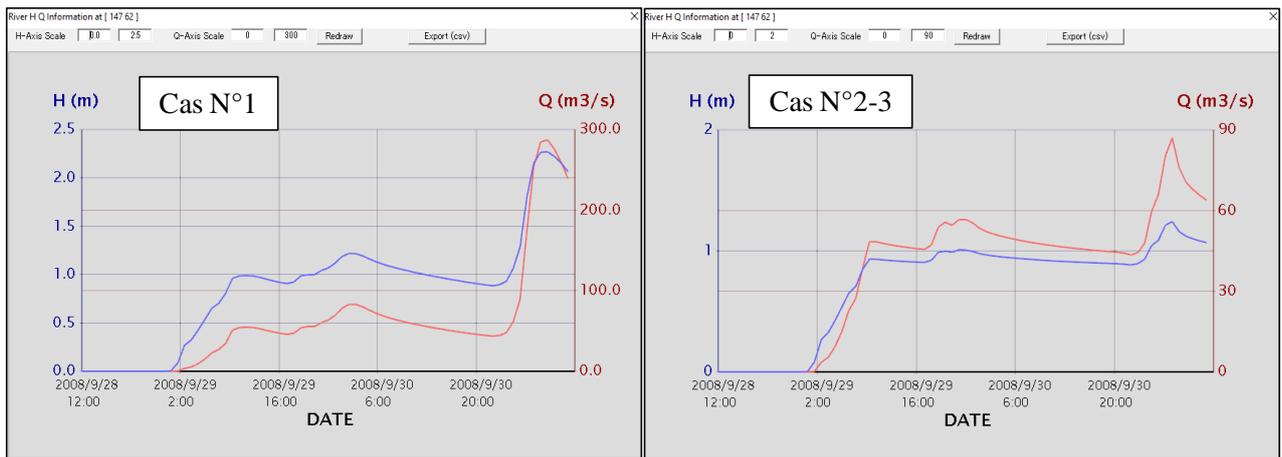


Figure 42 : comparaison des Q et H des deux cas dans le point de confluence « Amlaga »

V.6 Conclusion

Malgré que quelques valeurs obtenues ont besoin d'amélioration par le calage du modèle et la correction des inputs, la simulation nous a aidé dans la détermination des impacts des barrages implantés en amont de la ville de Ghardaia (El-Haimeur en particulier).

L'effet de l'envasement du barrage El-Haimeur n'a pas de grande influence sur son rôle de protection de la ville sur moyen terme

Conclusion générale

L'impact du phénomène de l'envasement des barrages, réduit considérablement leur performance du point de vue de la gestion des ressources hydriques, et de la protection contre les inondations, ainsi que la durabilité de l'exploitation de ces infrastructures hydrauliques.

La quantification de l'envasement dans les barrages est une étape importante permettant de connaître l'état actuel et de faire une prospective sur l'efficacité des ouvrages et leurs pouvoirs de faire face à des crues de grande ampleur.

Le barrage d'El-haimeur réalisé en 2011 situé à 15 Km en amont de la ville de GHARDAIA, qui fait partie du méga projet de la protection de la vallée de M'zab, a fait l'objet de notre étude de quantification de son taux d'envasement et son impact sur la protection de la ville.

Après une série de mesures et de comparaisons, un taux d'envasement calculé est de 2.5%, pendant 11 ans de fonctionnement de l'ouvrage.

Pour les résultats des calculs hydrauliques obtenus à l'aide du modèle RRI, nous avons constaté que le taux d'envasement calculé n'a pas un impact important pour une crue de référence (celle du 01 octobre 2008), les hauteurs d'eau sont proches aux valeurs réelles, elles suivent une certaine logique, c'est-à-dire que la ligne d'eau augmente lorsqu'il y a un rétrécissement ou une diminution de la pente, et qu'elle diminue lorsqu'il y a un élargissement ou une augmentation de la pente. L'insertion des barrages a aussi donné des résultats montrant le rôle important de ces ouvrages dans la protection de la ville.

Cette étude doit être suivie et améliorée par d'autres études comparatives et complémentaires afin de construire une base des données qui peuvent être bénéfiques dans les études de réalisation des ouvrages hydrauliques dans la région.

Nous avons rencontré quelques contraintes durant la réalisation de ce travail parmi lesquelles :

Le manque fatal des données hydrométriques dans la région étudiée, ce qui nous a conduits à utiliser des données satellitaires.

La maîtrise des logiciels utilisés (COVADIS et RRI) qui a nécessité énormément de temps.

Le facteur de temps nous a empêché de compléter de calage du model et validation des résultats.

Références Bibliographiques

Abdel-Fattah, M., Kantoush, S. A., Saber, M., & Sumi, T, (2018). «Rainfall-runoff modeling for extreme flash floods in wadi samail, oman», Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 74(5), I_691-I_696

Achour, M., (2014). « Vulnérabilité et protection des eaux souterraines en zone aride : cas de la vallée du M'zab GHARDAIA-ALGERIE », Thèse de Magister, Université d'Oran2, 156 pages

ALLOUANE, S., KRIMAT, B., (2017). « Modélisation par modèle réduit de barrage El-Haimeur (GHARDAIA) en cas de rupture et l'impact sur la ville », Thèse de Master, université de Bejaïa, 74 pages.

ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), (2003). « Note relative a l'étude de la nappe phréatique ». Direction régionale Sud Ouargla.

AZZI, F. (2017). « Contribution à l'étude prédictive de l'envasement et la durabilité du barrage du Ghrib », Thèse de Master, ENSH, 91 pages.

BENAHMED, H., (2015). « Valorisation des sédiments d'envasement du barrage de kramis dans le domaine de génie civil », Thèse magister, USTO, 128 pages

Bonnard, Gardel (Bureau d'étude suisse BG), (1996). « Etude hydrologique de l'Oued M'Zab ». 93 pages.

Bouach, A., (2011). « Simulation numérique du transport solide par charriage via le code de calcul RUBAR20TS ». Thèse de Magister, ENP, 122 pages.

Boubakeur, M., Lakhel, R., (2021). « Problèmes de risque d'envasement des barrages - cas du barrage Ain Dalia Souk Ahras » Thèse de Master, université de Bordj Bou Arreridj, 91 pages.

BOUKHETTA, A., SAMMOUNE, M., (2020). « Support de décision spatiale pour la gestion des ressources en eau de la Value de Ghardaïa ». Thèse de Master, université de Ghardaïa, 65 pages.

Dubief, J., (1953). « Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara ». Institut de Météorologie et Physique du Globe de l'Algérie, 451 pages.

FORTAS, M-T., (2020). « Prévission des inondations sur les bassins versants Algériens. Application sur le bassin versant d'Oued Ressoul », Thèse d'ingénieur, ENP, 117 pages.

HALA, Z., KARROUR, M., (2019). « Étude de la problématique de l'envasement du barrage Djorf-Torba Wilya de Bechar », Thèse de Master, université d'Adrar, 89 pages.

NACER, B., (2011). « Simulation de l'écoulement dans la palmeraie de GHARDAÏA cas de la crue d' octobre 2008 », Thèse d'ingénieur, ENP, 110 pages.

REMINI, B. (2005), « La problématique de l'eau en Algérie », Collection hydraulique et transport solide.

Sayama, T., (2014). « Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model Technical Manual », International Center for Water Hazard and Risk Management (ICHARM) - Japan, 107 pages

Taleb Bahmed, A., Chetibi, M., Mezali, F., Sioussiou, R., Benmamar, S., (2013). « Simulation de la rupture du barrage de Laadira-Ghardaia-(Laadira's dam break simulation) ».