

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Laboratoire de Géomatériaux Environnement & Aménagement

(L G E A)



Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle LMD

Spécialité : Génie civil

Option : Géotechnique

Thème

**INFRASTRUCTURES HYDRAULIQUES ET RISQUES NATURELS
D'INONDATION (CAS DE LA VALLEE DE L'OUED SEBAOU)
(GRANDE KABYLIE, ALGERIE)**

Présenté par : Leghouchi Abdelghani

Soutenu publiquement 15 Novembre 2021 devant le jury composé de :

Mr.MELBOUCI Bachir.....Professeur.....UMMTO.....Président

Mr.DJEMAI Mohammed.....Professeur.....UMMTO.....Rapporteur

Mr.KHATTAOUI Mohammed.....Professeur.....UMMTO.....Examineur

Mme.BOUZELHA Karima.....Professeur.....UMMTO.....Examinatrice

Mr.BAHAR Ramdane.....Professeur.....USTHB/Alger.....Examineur

Mr. BERREKSI Ali.....M.C. A.....UAM/Bejaïa.....Examineur

Année universitaire 2020 / 2021

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été réalisée au laboratoire de Géo-matériaux Environnement et Aménagement (LGEA) de l'Université de Tizi-Ouzou. Mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de cette thèse ainsi qu'à la réalisation de ce travail.

*J'adresse mes plus grands remerciements à mon directeur de thèse le Professeur **Mohammed Djemai** pour m'avoir permis de réaliser ce travail. Je le remercie pour son accueil, ses conseils, sa disponibilité et sa patience et pour l'aide et les conseils qu'il m'a fournis.*

*J'adresse mes remerciements à **M. Derdous**, de m'avoir aidé à réaliser ce travail ainsi que pour ses conseils, sa disponibilité et sa patience, pour toute l'aide qu'il m'a apportée et pour son soutien, aussi pour son aide précieuse, ces commentaires, ses conseils et ses encouragements.*

Mes remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury de ma soutenance.

*Je souhaite également adresser mes plus sincères remerciements au **l'ensemble du personnel de l'ANRH** de Tizi-Ouzou et à toute son équipe pour son aide et ses conseils.*

*Je tiens à remercier mes amis et collègues en particulier **M^{lle} Deghoul Lylia**, **Alioua Sonia** et **M. Alioua Nacer Eddine**, **Terbouche Farid** pour leur soutien durant tout le temps consacré à la thèse.*

*Enfin, j'adresse mes plus grands remerciements à ma famille proche, **mes parents**, **mes frère** et **mes sœur** pour leur soutien, sans oublié mon épouse **Siham Kerroum** et mon bébé **Assil**, qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de cette thèse.*

Résumé

La défaillance des infrastructures hydrauliques entraîne des inondations majeures dans la zone en aval, pouvant entraîner des indemnités catastrophiques. Par conséquent, il est nécessaire de prévoir les inondations résultant d'une rupture éventuelle d'un barrage et de planifier les mesures appropriées pour atténuer les dommages. Aussi lors des crues exceptionnelles, des risques d'inondation peuvent être occasionnés par suite d'un éventuel débordement d'un Oued au niveau de la vallée moyenne du Sébaou, entraînant une divagation des cours d'eaux conjuguée aux débits de ruissellement en provenance des zones imperméabilisées. Ces phénomènes ont pour conséquence immédiate le dis-fonctionnement des réseaux d'assainissement, entre autres ceux des eaux pluviales. À cet égard, la modélisation numérique est de plus en plus adoptée pour simuler et comprendre le mécanisme hydraulique du phénomène. De plus, les systèmes d'information géographique (SIG) sont actuellement indispensables pour une analyse et une gestion efficaces des catastrophes dans ce domaine.

La présente étude vise à prédire la vague de crue survenant après un scénario de la rupture du barrage Taksebt et à analyser le temps de propagation de la vague en aval du barrage, et le cas d'un scénario de débordement de cours d'eau pour préparer des cartes des inondations de différentes périodes de retour 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans dans l'oued Bougdoura; Oued Sébaou et Oued Sebt dans la ville de Draa Ben Khedda à Tizi Ouzou. À cette fin, le modèle hydrodynamique HEC RAS 2D a été utilisé pour simuler les deux scénarios, ce qui a permis d'estimer les caractéristiques hydrauliques en aval du barrage et dans les rives des oueds. Grâce à l'analyse SIG, le modèle fournit une vue réaliste et ses capacités d'affichage sont combinées à la modélisation hydraulique et les outils pour développer la carte d'inondation. L'analyse géospatiale réalisée dans les SIG a montré que de nombreuses zones résidentielles sont considérées comme étant en danger en cas de rupture du barrage Taksebt. Par conséquent, un système d'alerte et d'évacuation des résidents concernés a été suggéré pour modérer les liens de causalité sur la base des résultats obtenus.

Mots clés : Inondation ; Barrage Taksebt; Rupture du barrage; Débordement de cours d'eau ; Oued Sébaou; HEC-RAS 2D; SIG; Plan d'alerte et évacuation.

Abstract

Failure of hydraulic infrastructure leads to major flooding in the downstream area which potentially leading to catastrophic damage. Therefore, it is necessary to forecast the floods resulting from a possible failure of a dam and to plan the appropriate measures to mitigate the damage.

Also during exceptional floods, the risk of flooding can be caused following a possible overflow of a wadi at the level of the middle valley of the Sébaou, causing a strain of the rivers combined with the runoff from the rivers that originate from impermeable areas. The immediate consequence of these phenomena is the dysfunction of sanitation networks, including rainwater sewer system. For this, a numerical modeling is increasingly adopted to simulate and understand the hydraulic mechanism of the phenomenon. In addition, a geographic information system (GIS) is currently essential for an effective analysis and management disaster in this area.

The present study aims to predict the flood wave that could occur after a scenario of the Taksebt dam's failure. As well to analyze the propagation time of the wave dam in the downstream area, and the case of a stream overflow scenario. For this, an inventory flood maps are elaborated at different return periods; 10 years, 20 years, 50 years and 100 years in the Bougdoura wadi; Sébaou wadi and Sebt wadi in the city of Draa Ben Khedda, Tizi Ouzou Province.

To this end, the HEC RAS 2D hydrodynamic model was used to simulate the two scenarios, which made it possible to estimate the hydraulic characteristics downstream of the dam as well of the riverbanks. Through GIS analysis, the model provides a realistic view and its display capabilities are combined with hydraulic modeling and tools to develop the flood map. A geospatial analysis was carried out in the GIS environment has shown that many urbanized areas are considered to be at risk in the event of failure of the Taksebt dam. Therefore, an alert and evacuation system for affected urbanization was suggested to moderate the causal links based on the results obtained.

Keywords : *Floods ; Taksebt dam ; Dam's failure ; Sébaou wadi ; HEC-RAS 2D ; GIS ; Alert system ; Evacuation.*

Table des matières

REMERCIEMENTS

Résumé

Abstract

Liste des figures

Introduction générale----- 1

Chapitre 1 : Notions de base relatives aux risques naturels d'inondation

1. Introduction-----	6
2. Notion des termes : Risque, aléa ; vulnérabilité; enjeux; dommages-----	6
3. Définition d'inondation-----	7
4. Différents types d'inondation-----	8
4.1. Les crues torrentielles provoquant des inondations rapides-----	8
4.2. Les crues lentes provoquant des inondations lentes-----	8
4.3. La submersion marine (raz-de-marée)-----	9
5. Les causes des inondations-----	10
5.1. Causes naturelles-----	10
5.2. Causes anthropiques-----	11
6. Les facteurs les inondations-----	12
7. Notion de gestion du risque d'inondation-----	12
7.1. La prévention du risque d'inondation-----	12
7.2. La préparation à la gestion de crise-----	13
7.3. La culture du risque-----	13
8. Réduire le risque d'inondation-----	14
8.1. Les outils de mesure de l'aléa-----	14
8.2. Les outils de mesure des vulnérabilités-----	15
9. Aperçu sur les inondations dans le monde et en Algérie-----	16
9.1. Les inondations à l'échelle mondiale-----	16
9.2. Les inondations en Algérie-----	17
10. Conclusion-----	20

Chapitre 2 : Aperçus sur les infrastructures hydrauliques et les phénomènes de rupture des barrages

1. Introduction-----	21
2. Différents types d'ouvrage hydraulique-----	21

2.1. Les ouvrages enterrés de gestion des eaux pluviales-----	21
2.2. Ouvrage de rétention d'eau-----	24
2.2.1. Les seuils-----	24
2.2.2. Les barrages-----	24
3. Les phénomènes de rupture des barrages-----	28
3.1. Les cause de rupture-----	29
3.1.1. Cas d'un barrage béton-----	29
3.1.2. Cas d'un barrage en remblai-----	29
4. Le mécanisme de rupture des barrage en remblai-----	29
4.1. Mécanisme érosion externe initiée par une surverse-----	29
4.2. Mécanisme d'érosion interne-----	30
4.3. Mécanisme érosion externe et les affouillements-----	31
4.4. mécanismes de glissement-----	31
5. Aperçu historique sur les événements de la ruptures de barrages-----	32
5.1. Rupture du barrages en Algérie-----	36
6. Conclusion-----	37

Chapitre 3 : Description des concepts utilisés pour le modèle numérique HEC-RAS et le système d'information géographique

1. Introduction-----	38
2. Objectif de la modélisation-----	38
3. Les modèles hydrauliques-----	39
3.1. Les différents modèles hydrauliques-----	39
4. Description générale du logiciel HEC-RAS-----	40
4.1. Principes du calcul hydraulique par Hec-Ras-----	42
4.2. Modélisation hydraulique unidimensionnelle (1D) à l'aide de HEC-RAS et HEC-GeoRAS-----	42
4.3. Les équations de modèle HEC-RAS 1D-----	43
4.4. Les équations de modèle HEC-RAS 2D-----	47
4.5. Étude de rupture de barrage sur le logiciel HEC RAS-----	48
4.6. Les avantages et les inconvénients de modèle HEC RAS-----	51
5. Le Système d'Information Géographique (SIG)-----	52
5.1. Définition et objectifs-----	52
5.2. Les domaines d'application de SIG-----	53

5.3. Les composants du SIG-----	54
5.4. Les fonctionnalités du SIG-----	55
5.5. Les données dans un SIG-----	56
6. Modèle numérique de terrain (MNT)-----	57
6.1. La construction du modèle numérique de terrain-----	58
7. Conclusion-----	58

Chapitre 4 :Présentation de la Zone d'étude

1. Introduction-----	60
2. Présentation de la zone d'étude et caractéristiques du bassin versant de l'oued Sébaou-----	60
2.1. Situation géographique de bassin versant de l'oued Sébaou-----	60
2.2. Les paramètres morphométriques-----	62
2.3. Hypsometrie répartition des altitudes-----	62
2.4. Le réseau hydrographique-----	65
2.5. Occupation des sols dans la vallée de l'oued Sébaou-----	67
3. Les précipitations -----	68
3.1. Variation annuelle des précipitations -----	68
4. Les barrages dans la zone d'étude-----	70
4.1. Barrage de Taksebt-----	70
4.2. Barrage de Souk N' Tleta -----	71
5. Conclusion-----	71

Chapitre 5 : Modélisation des risques naturels d'inondation dans le haut et le moyen de Sébaou (Cas de la rupture du barrage Taksebt et du débordement de l'oued Sébaou et de ses affluent les oueds Bougdoura et Sebt)

1. Introduction-----	73
2. L'objectif-----	73
3. Méthodologie de Construction d'un modèle de simulation Hec Ras 2D et SIG-----	74
4. Modélisation de scénarios de la rupture du barrage Taksebt-----	75
4.1. Les données topographiques (création du MNT)-----	75
4.2. Le modèle hydraulique HEC RAS 2D-----	76
4.3. Résultats et discussion-----	80
4.4. Impact de l'onde de la rupture sur les ponts-----	92
5. Modélisation du scénario de débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura-----	95
5.1. La situation géographique de Draa Ben Khedda-----	95

5.2. Le modèle hydraulique adopté-----	96
5.3. Les condition aux limites-----	97
5.4. Résultats et discussion-----	97
6.Conclusion-----	105

Chapitre 6 : Élaboration d'un plan d'alerte et d'intervention pour la protection et l'évacuation des populations en cas de rupture du barrage de Taksebt

1. Introduction-----	106
2. Alerte et évacuation-----	106
2.1. Le système d'alerte-----	106
2.2. Le plan d'évacuation-----	108
3. Les types d'évacuation-----	110
3.1. L'évacuation horizontale-----	110
3.2. L'évacuation vertical-----	110
3.3. La mise en œuvre d'évacuation dans les cas de rupture de barrage Taksebt-----	111
4. Consignes a respecter par la population-----	112
5. Mesures d'action pendant la crise-----	112
6. Conclusions-----	113

Conclusion générale et perspectives-----	115
---	------------

Références bibliographiique

Annexe

Liste des figures

Figure 1.1. Composants de risque d'inondation (Matthieu Nivesse 2018)-----	7
Figure 1.2. Les différentes zones soumises au risque d'inondation(Matthieu Nivesse 2018)-----	8
Figure 1.3. Les différents types des inondations (Matthieu Nivesse 2018)-----	9
Figure 1.4. Tsunami provoqué par le tremblement de terre de Fukushima (Japon) le 11 mars 2011(Source : Toru Yamanaka / AFP/ Getty Images).-----	10
Figure1.5. Répartition mondiale des pays affectées par les inondations entre la période de 1985 à 2010 (source: Observatoire des inondations de Dartmouth)-----	17
Figure 1.6. Les inondations ayant affectées l'Algérie durant-la période 1912-2017 (NOURI Myriem 2016)-----	20
Figure 2.1 différent forme des canaux-----	22
Figure 2.2 Digue de protection contre les inondations ou submersions (fluviale, marine)(source Comité Français des barrages et réservoirs.2016)-----	23
Figure 2.3 Seuil après un déversement et la coupe type du seuil-----	24
Figure 2.4 Barrage gravité - un barrage construit en béton et / ou en maçonnerie qui basé sur son poids (gravité) pour la stabilité (Source: North Carolina Department of Environmental and Natural Resources 2017)-----	25
Figure 2.5. Schéma simplifié des barrages à contreforts (source Comité Français des barrages et réservoirs.2016)-----	26
Figure 2.6. Barrage rigide type voûte (source Comité Français des barrages et réservoirs.2016)	27
Figure 2.7. Barrage en terre compactée, homogène (source WIKIWATER.fr)-----	27
Figure 2.8. Barrage en terre à noyau central étanche (source WIKIWATER.fr)-----	28
Figure 2.9. Barrage en terre à masque amont (source WIKIWATER.fr)-----	28
Figure 2.10. La rupture de barrage en remblai par surverse (Mériaux et Al, 2004)-----	30
Figure 2.11. Mécanisme de l'érosion interne -renard hydraulique (Mériaux et Al, 2004)-----	30
Figure 2.12. Mécanisme de l'affouillement (Mériaux et Al, 2004)-----	31
Figure 2.13. Le mécanisme de glissement coté val en situation de crue (Mériaux et Al 2004)----	32
Figure 2.14. Le mécanisme de glissement coté fleuve lors de la décrue (Mériaux et Al, 2004)---	32
Figure 2.15. Crues soudaines le long de la rivière, après la rupture de barrage d'Edenville-----	33
Figure 2.16. La coulée de boue de déchets miniers a recouvert toute la zone autour du barrage minier, après la rupture (Bruno Correia 2020)-----	33
Figure 2.17. La brèche formée après la rupture du barrage Zeyzoun-----	34
Figure 2.18. Après la rupture du barrage Shihkang-----	34
Figure 2.19. État du barrage de Machhu après la rupture-----	35
Figure 2.20. les phase successive de la rupture du barrage Teton-----	35

Figure 2.21. La ville de Fréjus après la catastrophe-----	36
Figure 2.22. Barrage Fergoug après la rupture du 25 novembre 1927(Abdélaziz SEMCHA 2008) -----	37
Figure 2.23. Le barrage de Fergoug après reconstruction 1986 (Abdélaziz SEMCHA 2008)-----	37
Figure3.1. La fenêtre principale de Hec Ras 2D-----	41
Figure 3.2. L'éditeur de géométrie-----	41
Figure.3.5 : Composantes d'un S IG (d'après ESRI, 1990)-----	55
Figure.3.6. Organisation des couches d'information dans le SIG. (source ESRI)-----	55
Figure.3.7. Deux différents types de modèles géographiques (source ESRI)-----	57
Figure 4.1. La situation géographique générale de la wilaya de Tizi Ouzou en Algérie-----	60
Figure 4.2. Situation géographique du bassin versant de l'oued Sébaou au sein de les grands bassins en Algérien-----	61
Figure 4.3. Localisation du bassin versant de l'oued Sébaou - nomenclature du découpage de la plaine alluviale (Djemai 2008)-----	61
Figure 4.4. présentation du modèle numérique de terrain de la zone d'étude avec le réseau hydrographique et les principales stations hydrométéorologiques (code ANRH du bassin versant Sébaou)-----	63
Figure 4.5. Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Sébaou(Djemai 1985)-----	65
Figure 4.6. Profil en long de l'oued Sébaou (Djemai 1985)-----	65
Figure.4.7. Réseau hydrographique de bassin versant de Sébaou-----	66
Figure 4.8. Carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued Sébaou, assemblage des cartes de l'INSID 2011 (source: Ministère de l'agriculture et du développement rural)-----	67
Figure 4.9. Précipitations annuelle du Bassin versant du moyen Sébaou-----	69
Figure 4.10. <i>Précipitations annuelle du bassin versant du haut Sébaou</i> -----	69
Figure 4.11. Photos satellite du lac et la digue du barrage Taksebt (source Google Earth)-----	70
Figure 4.12. Situation générale du barrage Souk N' Tleta et du reservoir (source ANBT)-----	71
Figure 5.1. Méthodologie de la création d'un modèle hydraulique à l'aide de HEC-RAS 2D et SIG-----	75
Figure.5.2. Modèle numérique de terrain du bassin versant de l'oued Sébaou en aval du-----	76
Figure.5.3. Le modèle numérique de terrain utilisé dans Ras mapper-----	77
Figure.5.4. Maillage de modèle adopté (50*50m) pour le scénario de la rupture du barrage Taksebt-----	78
Figure. 5.5 : Hydrogamme utilisé dans cette étude (source: ANBT Tizi Ouzou)-----	79
Figure. 5.6. La forme et les informations de la brèche entrées dans HEC-RAS-----	80
Figure 5.6. La propagation et le temps d'arrivée de la première vague de l'onde de-----	87

Figure 5.8. Vitesse d'écoulement au niveau de l'aval du barrage 15 minute après la rupture-----	88
Figure 5.9. Vitesse d'écoulement dans la région de l'oued Aissi et le pont de bougie (vallée large) suite la rupture de barrage-----	89
Figure 5.10. Vitesse d'écoulement dans la région de Timizar, Elaghbar, Akaoudj RN72 (vallée étroite) suite la rupture de barrage-----	89
Figure 5.11. Vitesse d'écoulement dans la commune de Draâ Ben Khedda; Sidi Naâmane; Tadmait; RN12 (vallée large) suite la rupture de barrage-----	90
Figure 5.12. Hauteur d'eau au niveau de villages de Oued Aissi et du Pont de Bougie (max=21m) suite la rupture de barrage-----	91
Figure 5.13. Hauteur d'eau au niveau de la commune de Draâ Ben Khedda ; Sidi Naâmane ; Tadmait; RN12 (max 12m) suite la rupture de barrage-----	92
Figure 5.14 Situation des différents ponts à l'aval de barrage Taksebt-----	94
Figure 5.14.La situation géographique de Draa Ben Khedda-----	95
Figure.5.15. Géométrie et maillage du modèle adopté (25m*25m) pour le scénario de-----	96
Figure.5.16. Hydrogrammes des différentes périodes de retour (source ANRH Tizi Ouzou)-----	97
Figure 5.17: Plaines inondables obtenues pour des événements avec des périodes de retour (T10 ; T25; T50; et T100 ans) de débit sur la zone du DBK-----	99
Figure 5.18. les hauteur d'eau pour une période de retour de T=10 ans-----	100
Figure 5.19. les hauteur d'eau pour une période de retour de T=25 ans-----	101
Figure 5.20. les hauteur d'eau pour une période de retour de T=50 ans-----	102
Figure 5.21. les hauteur d'eau pour une période de retour de T=100 ans-----	103
Figure 5.22. les quartiers vulnérables dans la période de retour T=100 ans-----	104
Figure.6.1. Signal d'alerte spécifique aux ouvrages hydrauliques-----	107
Figure.6.2. Architecture globale du plan d'alerte-----	108

Introduction générale

L'aléa risque naturel d'inondation est un phénomène imprévisible dans l'espace et le temps qui impactent les infrastructures Hydrauliques dans leur diversité. Les inondations peuvent se manifester de par le monde, en zones rurales ou urbaines. Présentement, un bon nombre d'économie à travers le monde sont affectées par des inondations ([Hadeid, M. 2018](#)). Elles peuvent se produire à tout moment de l'année et sont le plus souvent causées soit par une pluie torrentielle, une fonte rapide d'un épais manteau neigeux ou, par la rupture d'une digue de barrage. De manière générale toutes les rivières peuvent présenter un risque d'inondation à un moment ou un autre au gré de l'aléa climatique ([Scarwell, H. J., et al. 2004](#)).

L'Algérie est parmi ces pays qui sont soumis aux phénomènes de risques naturels d'inondation dont la réalisation est plus probable que les autres risques naturels (séisme, éruption volcanique,...). L'essor industriel et l'accroissement démographique conjuguée avec une gestion inappropriée des plans d'occupation des sols (P.O.S) à tous les niveaux entraîne l'exposition des zones névralgiques à ce type de phénomène. L'action anthropique de l'homme au niveau du réseau hydrographique (exploitation des alluvions, défrichement des parcelles mitoyennes au lit majeur du cours d'eau et endommagement des protections des berges,...) montre que la majorité de ces inondations se produit soit à la suite d'épisodes pluviométriques importants s'étalant sur des durées plus longues, quand la saturation de la nappe phréatique et l'aquifère rendent l'infiltration impossible. ([Hadeid, M. 2018](#)), soit suite à des averses de courtes durées (crues éclaires et torrentielles). Certaines inondations se produisent, par débordement des oueds, alimentés en partie par des collecteurs d'eau pluviale ou des réseaux d'assainissement, issus le plus souvent de zones bâties du fait de l'imperméabilisation des surfaces impactées.

Les inondations des agglomérations résultent de pluies torrentielles dont les effets sont souvent amplifiés par les facteurs naturels du relief et de la couverture du sol ainsi que d'autres facteurs liés à une urbanisation anarchique (construction en zones inondables) et non maîtrisée (manque de curage des réseaux d'assainissement) ([Boutkhil Morsli et al 2016](#)).

Dans ce contexte, de nombreuses régions limitrophes de l'Oued Sébaou et son affluent Bougdoura sont confrontées aux phénomènes de crues et d'inondations qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement socio-économique. Ces phénomènes sont les catastrophes naturelles les plus destructives et même les plus fréquentes en grande Kabylie. Elles occasionnent des pertes en vie humaines et matérielles importantes, montrant le caractère exceptionnel et dangereux des crues.

En effet l'inondation printanière de la vallée moyenne du Sébaou et de son affluent l'oued Bougdoura, survenue fin Mars 1974, en est une des illustrations marquantes. Cette dernière fut extrême par ses niveaux d'eau et ses débits, par son étendue spatiale, ainsi que par les dommages qu'elle a engendrés, qui ont été évalués à Tizi-Ouzou comme suit : 52 morts et 4570 maisons détruites, 130 villages isolés, et plus de 18 000 sinistrés, 13 ponts détruits et des dizaines de kilomètres de routes emportées. ([Behlouli 2004](#))

De part le monde, au cours du siècle dernier, les craintes relatives à la rupture de barrages ont considérablement augmenté en raison de la survenue plusieurs accidents catastrophiques. Parmi les défaillances de barrages bien connues ayant entraîné des pertes humaines, on peut citer les exemples suivants : le barrage de Gleno en Italie 1923 ([Pilotti et al 2011](#)); Désastre du barrage Francis en Californie en 1928 ([Rogers et al 2006](#)); Barrage de Vega de Tera en Espagne 1959 (Jansen 1980); Malpasset France-1959; Vajont Italie-1963 Banqiao Chine-1975. ([Marche 2008](#)); Rupture du

barrage de Teton à Idaho en 1976 (Arthur 1977); Effondrement de Tous dam en Espagne en 1982 (Alcrudo et al 2007); et la défaillance du barrage de Camará en 2004 au Brésil (Menescal et al 2005). Sur le continent africain, il convient de noter l'échec du barrage de stériles Virginia No.15 en Afrique du Sud en 1994 (Saxena et al 2004).

En Algérie seuls deux événements de rupture de barrage ont été documentés selon les recensements faits par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB). Il s'agit des deux accidents du barrage de l'Habra (construit sur l'oued Fergoug) à Mascara ayant eu lieu durant la période coloniale française, en 1881 et 1927.

Le 10 mars 1872: une crue exceptionnelle estimée à 700 m³/s provoqua la rupture du déversoir en créant une brèche de 55 mètres de longueur sur 12 mètres de hauteur. Le débit d'eau sortant de la brèche fut évalué à 5600 mètres cubes par seconde et plus de 200 000 m³ de déblais furent entraînés. Il fut reconstruit sous forme d'un mur unique, profilé pour éviter les affouillements, basés sur de solides fondations après remplissage des excavations découvertes dans le rocher, et définitivement terminé en mai 1873.(SEMCHA, A., et al. 2008).

Le 15 décembre 1881: une crue de 850 m³/s emporta 125 mètre du barrage sur la rive droite. 250 personnes furent noyées, ponts, et maisons emportées par les flots déchaînés. La reconstruction du barrage dura deux années, de 1883 à 1885, avec modification du profil et coûta 1300000 fr

La rupture en 1927

Une nouvelle crue survenue le 26 Novembre 1927 cause une rupture complète du barrage. Cette rupture s'est également produite en crue, avec cette fois-ci le réservoir initialement presque vide ; et une lame d'eau maximale de **3,85 m** au-dessus du déversoir, niveau maximal jamais atteint au barrage. La brèche s'est amorcée au voisinage de l'évacuateur (rive gauche), dans les maçonneries, puis s'est propagée vers la rive droite. Trois quarts d'heure après l'annonce de la rupture du barrage, les flots torrentiels déferlaient dans la ville de Perrégaux (Mohammadia), emportant sur son passage le pont métallique du chemin de fer, les locomotives et les wagons. Les routes sont coupées, les vergers arrachés, les récoltes anéanties. Une cinquantaine de maisons n'ont pas résisté et se sont effondrées. Dans les rues, la hauteur des eaux boueuses atteint deux mètres. Grâce à l'appel téléphonique de l'ingénieur du barrage, mais aussi du fait que la catastrophe se soit déroulée de jour, il n'y eut pas de victime à Perrégaux (Mohammadia). On dénombra cependant quelques noyés dans la plaine. (Veale, B. Davison, I. 2013)

Dans cette optique, les chercheurs ont travaillé pendant plusieurs décennies pour réduire le risque d'inondation, car les crues des rivières ont fait l'objet de beaucoup d'attention de la part de la recherche (Garg, PK 2015) pour assurer et développer les solutions clés en vue de l'atténuation des inondations et les mesures non structurelles importantes pour la planification et l'optimisation de leur utilisation (Linh, NTM, et al 2018; Shahiri, A. et al 2016) C'est aussi l'une des informations de base la plus importante requise dans les projets de génie civil qui doit être prise en considération avant tout investissement ou développement opérationnel du plan d'occupation des sols.

Dans ce domaine, les modèles hydrauliques permettent de prédire les conséquences d'inondation en facilitant l'évaluation de ce risque dans les régions inondables (aval de barrages), ce qui peut aider à concevoir les mesures d'atténuation appropriées (Derdous et al. 2015). Jusqu'aux dernières années, il s'agissait le plus souvent d'un modèle d'acheminement des inondations, tel que le modèle DAMBRK du service météorologique national ou le modèle FLDWAV, le modèle SMPDBK (modèle simplifié de prévision des inondations), le modèle HEC RAS de la US Army Corps of Engineers ou l'un des modèles commerciaux aux capacités similaires (Wahl. 2010). Plusieurs études de modélisation de la propagation des vagues ont été menées dans le passé après la

rupture de barrages. La plupart des modèles utilisés étaient des modèles 1D ([Yanmaz et al 2001](#), [Macchione 2008](#), [Petaccia et Natale 2008](#), [Froehlich 2008](#)). Parmi ces modèles, le modèle HECRAS, mis au point par le Centre de génie hydrologique de l'USACE, a été appliqué à divers fleuves et rivières. Compte tenu des limitations des modèles 1-D et de l'augmentation de la puissance de calcul au cours des dernières années, les modèles 2D qui résolvent les équations en eaux peu profondes sont devenus un choix bien établi ([Néelz et al 2013](#)). Les logiciels MIKE 12, FLO-2D, DSS WISE, TELEMAC, Iber ou le modèle HEC RAS 5) incluent des fonctionnalités de modélisation d'écoulement instationnaire bidimensionnel.

Une modélisation numérique a été réalisée à l'aide de HEC-RAS 2d version 5.03 sur les vastes plaines de Llanos de Moxos en Amazonie bolivienne. L'objectif de cette simulation était de comparer les résultats du modèle numérique avec les images satellites de l'inondation ([Moya et al 2016](#)). Le modèle hydraulique HEC RAS 2D a donné de bons résultats par rapport aux inondations observées à partir d'images satellites. En outre, il a fourni des informations supplémentaires telles que la profondeur de l'eau et l'heure d'arrivée des inondations, vérifiées à l'aide des données secondaires disponibles. ([Moya Quiroga et al 2016](#); [Kumar et al 2019](#)). L'utilisation des SIG dans l'intégration de la modélisation hydraulique dans l'étude des événements de rupture de barrage a pris de l'importance ces dernières années. De nos jours, les SIG sont largement utilisés par les administrations compétentes aux niveaux régional et municipal. En effet, les SIG fournissent une vaste gamme d'outils permettant de cartographier les résultats et d'effectuer des analyses avancées. ([Seker et al. 2003](#); [Cannata et al. 2012](#); [Derdous et al. 2015](#)). L'analyse des données géospatiales a permis d'exploiter les progrès récents des technologies SIG, ce qui a accru l'utilisation de modèles numériques 2D pour des prévisions plus précises de la propagation des ondes de crue ([Haltas et al 2016](#)). La combinaison d'un modèle hydraulique, utilisant le modèle de simulation d'inondation 2D HEC-RAS, et d'un outil SIG indique la capacité de simuler des inondations et de décrire spatialement le degré d'exposition ou de vulnérabilité de la région à un événement dangereux en termes d'étendue d'inondation, et de la profondeur de l'eau. Les résultats de la simulation du modèle HEC-RAS ont donné le même résultat que celui de l'enregistrement de la profondeur d'inondation observée à cet endroit. ([Yerramilli 2012](#) ; [Kumar et al 2019](#)).

Néanmoins, à mesure que les barrages en Algérie vieillissent, il est impératif d'analyser les conséquences de leur éventuelle défaillance, car avec le modèle hydraulique, la seule mesure efficace, lorsque la pluie est tombante est l'évacuation préventive des populations à risque. Lorsque ces systèmes sont pleinement utilisés, le modèle de base utilisant HEC-RAS est connecté aux SIG. Ainsi, toutes les informations relatives à la population, et aux propriétés peuvent être gérées directement à partir de la carte. Dans le domaine de la gestion des urgences, le calcul de l'évaluation des risques de planification et de formation constitue la base de la prise de décision. Lorsque les calculs sont liés à des informations géographiques, il est beaucoup plus facile de sauver les personnes exposées au risque. ([Heino et Kakko, 1998](#); [Seker et al. 2003](#)).

Ce faisant, dans le cadre de cette thèse, on se propose de modéliser numériquement deux scénarios d'inondation, illustrés respectivement par le débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura et la propagation de l'onde de crue issue de la défaillance hypothétique du barrage Taksebt

❖ Débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura

La grande agglomération des lotissements, situés sur les rives de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura présente un grand risque d'inondation. Dans le cadre de la lutte contre les inondations,

une modélisation numérique a été réalisée pour illustrer le scénario de débordement oueds concernés

❖ La propagation de l'onde de crue issue d'un scénario de défaillance hypothétique du barrage Taksebt

Le modèle hydraulique HEC-RAS 2D a été utilisé pour simuler les deux scénarios associés et le SIG a été utilisé pour les cartographier. Ainsi, toutes les informations sur la population, et les propriétés peuvent être gérées directement à partir de la carte de risque. Dans le domaine de la gestion des urgences, le calcul de l'évaluation des risques, de planification et de formation constitue la base de la prise de décision.

L'objectif de la thèse est de contribuer au développement de la connaissance du risque des inondations en Algérie en général et en particulier au niveau de la wilaya de Tizi Ouzou en améliorant la connaissance des facteurs explicatifs et des processus associés aux risques d'inondation causés par la rupture éventuelle du barrage Taksebt, et par le débordement des cours d'eau dans la vallée du Sébaou (oued Sébaou et son affluent Bougdoura). Pour cela, nous proposons de réaliser une modélisation numérique en 2D qui considère les différentes catégories explicatives : facteurs physiques (géologie, hydro-climatiques, topographie, morphologie) et facteurs humains (plan d'occupation des sols)(POS) lesquelles sont analysées de manière intégrée pour évaluer et spatialiser les risques d'inondation dans la moyenne vallée du Sébaou en vue d'améliorer les dispositifs de prévention et l'évacuation de la population en situation de gestion de crise.

Pour ce faire, nous nous appuyons sur les outils du système d'information géographique (SIG) pour réaliser l'évaluation environnementale intégrée des données physiques géoréférencées sur cette zone qui se situe en aval du barrage Taksebt et le modèle hydraulique HEC RAS 2D (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydraulique) pour modéliser le scénario de l'onde de rupture. En somme, cette thèse est une contribution à l'amélioration des connaissances d'un territoire de la grande Kabylie (la moyenne vallée de l'oued Sébaou) exposée aux risques naturels d'inondation à l'aide de modèle hydraulique HEC RAS 2D et des outils de SIG

En vue de concrétiser l'ensemble de ces objectifs, la présente thèse est structurée en six (06) chapitres qui s'intitulent respectivement comme suit.

✓ **Chapitre 1 : Notions de base relatives aux risques naturels d'inondation**

C'est une synthèse bibliographique qui définit le contexte général sur les inondations et décrit également l'impact important des inondations, comme elle illustre l'envergure des inondations à l'échelle mondiale et particulièrement en Algérie.

✓ **Chapitre 2 : Aperçus sur les ouvrages hydrauliques et les phénomènes de rupture des barrages**

Ce chapitre donne des concepts théoriques qui aident à la compréhension de la problématique de recherche à travers une revue détaillée de la littérature sur les ouvrages hydrauliques de captage, d'adduction-distribution et d'assainissement, en particulier les barrages et les phénomènes de rupture de ces derniers.

✓ **Chapitre 3: Description des concepts utilisés pour la modélisation hydraulique (HEC-RAS) et système information géographique (Arc-Gis)**

Ce chapitre est une description de la modélisation hydraulique et des équations appliquées à la modélisation hydraulique avec le modèle HEC-RAS pour simuler la dynamique d'inondation. Il

décrit aussi les détails de la construction du modèle numérique utilisé à l'aide de logiciel SIG (Arc-Gis) version 10.02, en insistant particulièrement sur le choix des techniques et des méthodes numériques utilisées.

✓ **Chapitre 4: Présentation de la zone d'étude**

Ce chapitre consacré la présentation de la zone d'étude, avec une description détaillée du barrage Taksebt. (Contextes géographique, climatique, géologique, et topographique, ainsi que les caractéristiques morphométriques du bassin versant). Il décrit aussi les détails des aménagements existants et projetés sur la base du P.D.A.U et du P.O.S de chacune des agglomérations de la vallée.

✓ **Chapitre 5 : Modélisation des risques naturels d'inondation dans la vallée de l'oued Sébaou à l'aide des modèles numériques (HEC-RAS 2D) et SIG (Cas de la rupture du barrage Taksebt et du Débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura).**

Ce chapitre fournit les exemples les applications des deux modèles, l'un sur la rupture hypothétique du barrage Taksebt l'autre ,sur le débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura à l'aide du logiciel (HEC -RAS) version 5.03.

La première partie relative à la rupture hypothétique du barrage Taksebt, est réalisée sur un fond de topographie très complexe. Les résultats numériques obtenus par le modèle HEC -RAS lors de la simulation de la rupture du barrage Taksebt sont présentés sur les les cartes à l'aide de SIG. Afin de valider le modèle proposé pour des problèmes liés aux ruptures des digues de barrages, nous avons effectué cette modélisation d'écoulements 2D dus à la rupture d'une digue de barrage pour analyse le temps de propagation des ondes de débit en aval de celui-ci suite à une rupture progressive et complète de la digue. Dans la deuxième partie, la modélisation des inondations suite au débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura (s'étendant du pont Ait Aissa Mimoune de la Route Nationale N°74 au pont de Sidi Naâmane de la route national N°12) a été réalisée en utilisant le modèle d'inondation 2D HEC-RAS. Le modèle d'inondation a été calibré et validé pour l'événement d'inondation de 28 Mars 1974. De plus, la sensibilité du modèle d'inondation au MNT a également été réalisée en simulant le modèle d'inondation HEC-RAS 2D calibré avec différents terrains créés à partir des , SRTM. Ensuite, le modèle de crue calibré a été simulé pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans.

✓ **Chapitre 6 : Élaboration d'un plan d'alerte et d'intervention pour la protection des biens et l'évacuation des populations en cas de rupture éventuelle du barrage de Taksebt**

Dans le sixième chapitre on s'intéresse à l'évaluation des inondations et les méthodes utilisées pour communiquer les systèmes d'alerte adaptés pour l'évacuation des populations et sensibiliser la communauté sur le risque d'inondation induit par la rupture éventuelle du barrage de Taksebt. Ce chapitre montre également notre stratégie de l'utilisation de cartes informatives fournies par le SIG (plan particulier d'intervention) pour présenter des différents niveaux de vigilance au niveau de la région vulnérable.

Chapitre 1 : Notions de base relatives aux risques naturels d'inondation

1. Introduction

Les inondations peuvent survenir dans toutes les régions, rurales ou urbaines. Jusqu'à maintenant, des centaines de milliers de dollars dans le monde ont été affectés par des inondations. Elles peuvent se produire à tout moment de l'année et sont le plus souvent causées soit par une pluie torrentielle, une fonte rapide d'un manteau neigeux épais ou, par la défectuosité d'un barrage. De manière générale toutes les rivières peuvent présenter un risque d'inondation à un moment donné.

Deux principaux objectifs sont abordés dans ce chapitre. Il s'agit d'entrée de jeu d'évaluer et spatialiser quelques notions de base essentielles dans le concept de risque d'inondation. Il est nécessaire donc d'aborder quelques définitions de : risque, inondation, aléa, puis de présenter la gestion intégrée du risque d'inondation, et décrire également l'impact important des inondations, comme elle illustre l'envergure des inondations à l'échelle mondiale et particulièrement en Algérie.

2. Notion des termes : Risque, aléa ; vulnérabilité; enjeux; dommages

Le risque résulte de la rencontre, sur un même espace, d'un aléa et d'une vulnérabilité.

✓ **Un aléa:** phénomène naturel ou accident technologique qui a une faible probabilité d'avoir lieu. On appelle aléa la possibilité d'apparition d'un phénomène ou événement potentiellement dangereux. C'est un événement ou processus, qui doit être défini par une intensité (pourquoi et comment ?), une occurrence spatiale (où ?) et temporelle (quand ? durée ?). L'aléa d'inondation correspond au phénomène physique, découlant d'événements hydrométéorologiques. Il doit être considéré indépendamment de ses conséquences en termes de dommages. Il se décrit par une probabilité d'occurrence et se représente, par exemple, par des cartes de submersion de période de retour définie.

✓ **Une vulnérabilité:** importante (vies humaines, bien matériel, enjeux environnementaux) dépend des éléments exposés et de leurs résistances. Elle est caractéristique d'un site à un moment donné. Elle est modulable et évolutive en fonction de l'activité humaine. Cette définition de la vulnérabilité évolue depuis une dizaine d'années, vers une nouvelle définition qui traduit la fragilité d'un système dans son ensemble et sa capacité à surmonter la crise provoquée par l'aléa.

✓ **Les enjeux:** sont la cible potentielle des inondations. Il s'agit des personnes, des biens et infrastructures, mais aussi de l'activité économique en général, ainsi que des milieux naturels.(écosystèmes)

✓ **Les dommages:** sont les conséquences concrètes des épisodes d'inondation. On cherche souvent à chiffrer les dommages provoqués par une inondation sur une zone définie, sous forme d'un coût. Cependant, ces dommages sont en fait difficiles à évaluer en raison du grand nombre d'acteurs en jeu (tous les propriétaires, dont l'État, les collectivités locales...), mais aussi parce qu'ils sont de natures variées.

✓ **Le risque d'inondation:** est la combinaison de la probabilité de survenue d'une inondation et de ses conséquences négatives potentielles pour la vie et la santé humaine, l'environnement, les biens, dont le patrimoine culturel, et l'activité économique. Le risque étant défini par un croisement entre les aléas et les enjeux, ces derniers doivent être connus finement.

Pour ce faire, on peut s'appuyer sur le diagnostic de vulnérabilité, qui apporte des informations générales sur la typologie et la localisation des enjeux.



Figure 1.1. Composants de risque d'inondation

(Matthieu Nivesse 2018 <https://www.mnivesse.com/portfolio/schemas-scientifiques/>)

3. Définition d'inondation

Les inondations sont les risques naturels qui surviennent le plus fréquemment à l'échelle Mondiale, et elles sont les plus coûteuses en ce qui a trait aux dommages matériels. Cependant, il n'y a pas de définition universelle de terme inondation. Parmi les exemples de définitions d'inondation actuellement utilisées, on cite :

- L'inondation est la présence d'eau dans les zones généralement sèches. Ce phénomène entraîne la présence de beaucoup d'eau dans les zones qui ne sont pas habituellement sous l'eau (Jonkman and Kelman, 2005).
- L'inondation est une élévation du niveau d'eau, dans le lit ordinaire dénommé le lit mineur (le lieu des écoulements ordinaires), aboutit à un débordement dans le lit majeur (l'espace d'inondation) (Izambart, 2011).
- L'inondation est une augmentation significative du niveau d'eau dans un cours d'eau, un lac, un réservoir ou une région côtière (Vos et al., 2010).

Les inondations peuvent être provoquées par un certain nombre de processus, mais la cause dominante est la pluie. Les inondations sont un processus naturel, mais les activités de l'humanité affectent les inondations. Les inondations se produisent à intervalles irréguliers et varient en taille, en étendue et en durée.

Les inondations sont donc classées en risque majeur. En raison de pressions liées à l'urbanisation, d'origines économiques, sociales ou foncières, les cours d'eau et leurs abords ont souvent été aménagés, couverts, déviés, augmentant ainsi la vulnérabilité des hommes, des biens (économiques et culturels) et de l'environnement. La maîtrise de l'urbanisation en zone inondable et l'adaptation de l'habitat existant sont les outils importants de la prévention du risque inondation.

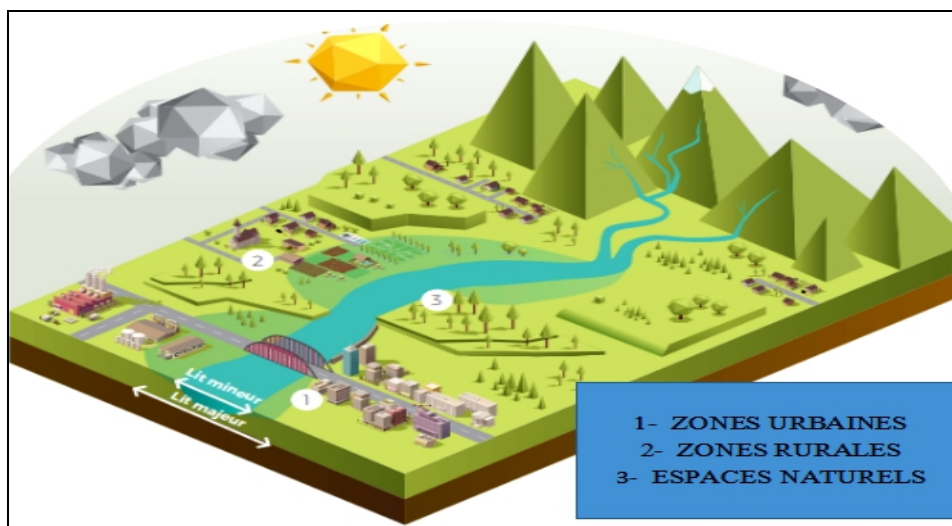


Figure 1.2. Les différentes zones soumises au risque d'inondation

(Matthieu Nivesse 2018 <https://www.mnivesse.com/portfolio/schemas-scientifiques/>)

4. Différents types d'inondation

La plupart des inondations se produisent lorsque le volume d'eau d'une rivière ou d'un cours d'eau dépasse la capacité du lit. Il y a également des inondations le long des lacs et des littoraux maritimes lorsque le niveau normal de l'eau augmente au-delà du niveau des terres riveraines. Cette submersion peut avoir différentes causes, et généralement classées selon la vitesse de formation de la crue qui la provoque. On distingue alors :

4.1. Les crues torrentielles provoquant des inondations rapides

Elles ont pour origine des événements pluvieux intenses et localisés principalement sur des bassins versants au relief assez fort (montagne). Les dégâts seront d'autant plus sérieux que le bassin versant sera pentu et que la capacité d'infiltration du sol sera faible. La quasi-totalité de l'eau tombée dans un laps de temps très court, n'a pu ni s'infiltrer ni s'évaporer et se concentre vers la rivière.

Cette crue peut avoir différentes causes:

✓ **Inondations naturelles avec concentration des ruissellements superficiels** De fortes précipitations provoquent une élévation brutale du niveau des cours d'eau et favorisent leur débordement. On parle de crues torrentielles. Ce sont des crues très rapides et puissantes dues à des précipitations brutales et intenses dans un bassin versant à fortes pentes. Les cours d'eau arrachent et transportent des matériaux dont l'accumulation peut tendre à la rupture des ouvrages de protection ce qui rend la crue encore plus dangereuse et dévastatrice.

✓ **Inondations accidentelles avec Rupture d'ouvrages hydrauliques.**

L'inondation est aussi causée parfois par la défaillance d'un barrage ou d'un autre ouvrage hydraulique, quand un véritable mur d'eau peut dévaler le lit de la rivière. Comme c'est à prévoir, un tel accident, presque toujours imputable à l'erreur humaine dans la conception, la construction ou l'exploitation de l'ouvrage, a des résultats désastreux en raison de sa soudaineté et de son ampleur.

4.2. Les crues lentes provoquant des inondations lentes

On distingue les crues de plaine à faible pente, avec des précipitations de faible durée et pendant une longue période, et les crues de nappes résultant de dynamiques différentes.

✓ **Inondation par limitation du taux d'infiltration** : L'écoulement d'averse en milieu urbain peut également provoquer la crue des rivières qui y coulent et l'inondation de la zone urbaine. L'urbanisation modifie radicalement le drainage des bassins versants naturels, car elle accroît le volume et le débit du ruissellement. Bien que les conséquences sur les gros réseaux fluviaux soient minimales, la capacité de transport des petits cours d'eau peut rapidement être dépassée, ce qui cause des problèmes d'inondation et d'érosion. Il arrive souvent que le ruissellement après une forte pluie dépasse la capacité de transport du réseau d'égouts, ce qui fait refluer l'eau dans le réseau et provoque l'inondation des sous-sols et des routes.

✓ **Inondation par remontée des nappes phréatiques** : un sol poreux, perméable et sans couverture étanche favorise les crues de nappes en augmentant la capacité de stockage de l'eau. Suite à plusieurs années humides consécutives, la nappe souterraine est saturée et l'eau remonte jusqu'à l'air libre. Certains points hauts du bassin versant peuvent alors être inondés. Ces crues sévères sont fortes et durables : plus de deux semaines à deux mois.

4.3. La submersion marine (raz-de-marée)

Les inondations par submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables du fait de la présence de facteurs anormaux liés à l'océan (fortes houles, marées de tempête, tsunami). Outre l'action propre de l'océan, ces phénomènes peuvent provoquer le débordement des cours d'eau qui débouchent à l'océan, ou de l'interaction entre les débits estuariens élevés et les marées. ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours. L'inondation par submersion marine est souvent liée avec une heure de marée haute ou raz-de-marée.

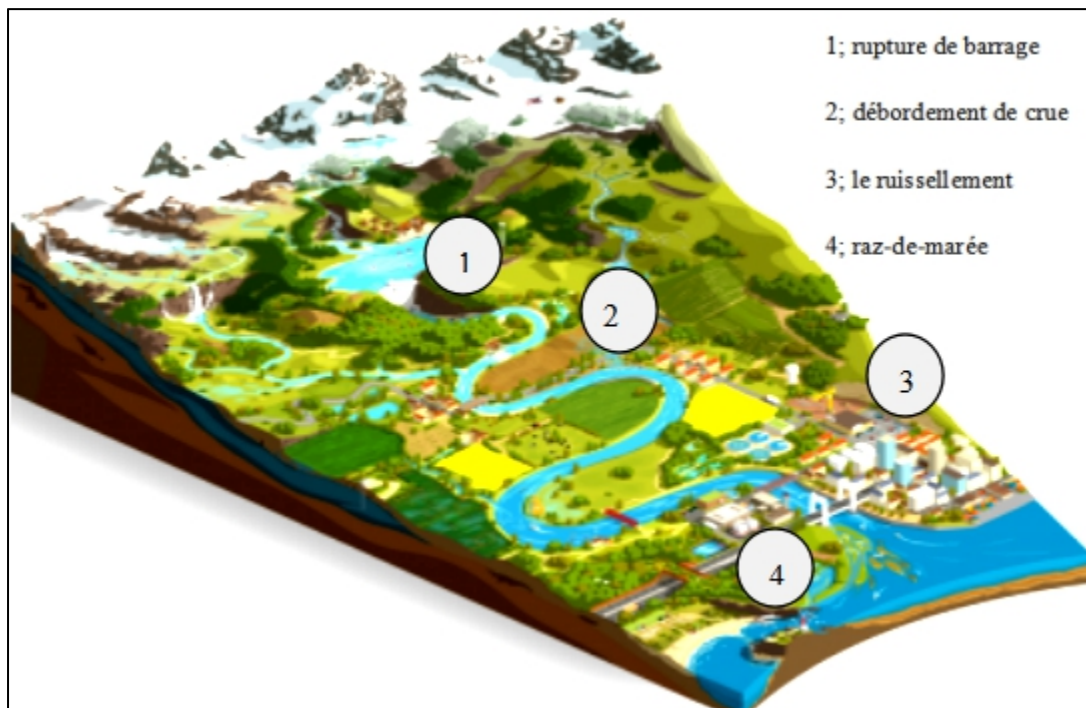


Figure 1.3. Les différents types des inondations

(Matthieu Nivesse 2018 <https://www.mnivesse.com/portfolio/schemas-scientifiques/>)

Un tsunami est une onde liée au mouvement rapide d'un grand volume d'eau en haute mer à d'un séisme (destruction de Lisbonne en 1755, tsunami de décembre 2004 en Asie), d'une éruption volcanique sous-marine (éruption du Krakatoa en 1883), d'un glissement de terrain sous-marin de grande ampleur (baie de Lituya, Alaska en 1958).

Les tsunamis se déplacent à très grande vitesse (plusieurs centaines de km/h), mais tant qu'ils se propagent en haute mer (en eau profonde), la hauteur de l'intumescence est faible, voire imperceptible. C'est à l'approche des côtes que l'onde gagne en amplitude et déferler sur le littoral, en provoquant d'énormes dommages.



Figure 1.4. Tsunami provoqué par le tremblement de terre de Fukushima (Japon) le 11 mars 2011 (Source : Toru Yamanaka / AFP/ Getty Images).

5. Les causes des inondations

5.1. Causes naturelles

➤ Intensité-durée des précipitations

Dans toutes les rivières, le débit de l'eau fluctue. Lors d'une pluie torrentielle, plusieurs paramètres déterminent le ruissellement qui atteint une rivière : la quantité, l'intensité, la durée, l'aire couverte et le trajet de la pluie. D'une part, le volume, l'intensité et la durée des précipitations influent sur la capacité de la terre d'absorber la pluie, ce qui à son tour influe directement sur le ruissellement, d'autre part, l'aire couverte par la tempête et sa trajectoire déterminent la région qui recevra la pluie et donc qui contribuera au ruissellement. Enfin, la superficie couverte et le débit du ruissellement déterminent le volume d'eau qui passera en un point donné en aval de la rivière ou du cours d'eau.

➤ Le type de sol et la topographie du bassin versant

La forme, la superficie, le type de sol et la topographie du bassin versant influent eux aussi sur la quantité d'eau qui atteint une rivière. Ces facteurs sont habituellement constants. Toutefois, le

degré d'absorption ou de dispersion de l'eau par un sol varie selon la couverture végétale, la saison et l'importance des pluies antérieures. De plus l'écoulement est plus lent dans les bassins qui renferment des zones naturelles de stockage de l'eau, comme les lacs et les marécages, ou des zones artificielles de stockage.

La topographie joue également un rôle dans l'exposition des territoires au risque d'inondation par ruissellement. Dans les zones de relief accidenté, l'eau qui ruisselle se concentre jusqu'à déborder les obstacles. Lorsque le débordement survient, l'arrivée soudaine et violente d'un gros volume d'eau peut provoquer des dégâts conséquents. Dans les plaines, du fait de l'absence de relief, l'eau qui ruisselle s'évacue moins naturellement. En conséquence, les sols sont plus vite saturés d'eau et favorisent le ruissellement.

➤ **Morphologie du cours d'eau**

L'écoulement de la crue diffère d'un cours d'eau à l'autre selon la morphologie des tronçons traversés (rectiligne ou avec méandres). Les vitesses de propagation des flots de crue varient d'un secteur à l'autre selon les pentes, les rayons, les formes du lit majeur et les aménagements. ([Oueslati, 1999](#))

➤ **Végétation du bassin versant**

La destruction des couvertures végétales augmente les risques d'inondations. En effet sa nature et son organisation influent sur la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Le couvert végétal tend à limiter le ruissellement, et son absence favorise l'écoulement de surface, empêche la recharge des nappes, diminue les temps de concentration et augmente les risques d'érosion en favorisant des régimes de crues intenses.

5.2. Causes anthropiques

➤ **L'urbanisation et l'implantation d'activités dans les zones inondables**

Avec l'essor de l'urbanisation, certaines villes se sont installées dans les trajectoires naturelles d'écoulement des eaux. L'urbanisation intensive crée de la vulnérabilité car elle imperméabilise les sols et amplifie le ruissellement pluvial, elles sont donc plus soumises au risque d'inondation par ruissellement ([Desbordes, 1997](#))

➤ **Occupation des sols sur des bassins de forte pente**

Toute modification de l'occupation du sol empêchant le laminage des crues et l'infiltration des eaux, favorise un écoulement plus rapide et une concentration des eaux. Le sens des cultures joue un rôle important dans le phénomène de ruissellement. L'idéal est de cultiver dans un sens parallèle aux courbes de niveau.

➤ **La diminution des champs d'expansion des crues**

Permet la protection des enjeux locaux à l'aval, en ralentissant et en stockant temporairement les crues. Elles ont également un rôle essentiel à jouer à une échelle plus large. En effet, elles limitent la propagation des crues jusque vers le réseau principal et évitent la surcharge de ce dernier, bénéfique aux secteurs habités en aval des cours d'eau.

➤ **La déforestation**

La déforestation est la conversion permanente d'une forêt à d'autres fins (ex. agriculture, construction résidentielle). Le couvert forestier favorise l'infiltration et le déboisement favorise une accélération du ruissellement des eaux de pluie qui en allant grossir les cours d'eau et en envahissant les chemins et les routes ont une influence directe sur le phénomène des inondations.

6. Les facteurs des inondations

Les précipitations sont le facteur le plus important dans la création d'une inondation, mais il existe de nombreux autres facteurs contributifs. Lorsque la pluie tombe sur un bassin versant, la quantité d'eau de pluie qui atteint les cours d'eau dépend des caractéristiques du bassin versant, en particulier sa taille, sa forme et son occupation du sol. Certaines précipitations sont «captées» par le sol et la végétation, et le reste pénètre dans les cours d'eau sous forme de flux. Les caractéristiques de la rivière telles que la taille et la forme, la végétation dans et autour de la rivière, et la présence de structures dans et à côté de la voie navigable affectent le niveau d'eau dans la voie navigable. Il est clair que les modifications apportées à l'utilisation des sols (plus particulièrement le scellement) au même titre que les changements climatiques naturels ainsi conditionnés par les activités humaines en font également partie.

❖ Caractéristiques du bassin versant

Il se caractérise par les lignes de partage des eaux, un exutoire, une surface et une pente. La nature des sols, la présence de végétation et/ou de constructions influencent également l'écoulement des eaux. Tous les bassins versants se définissent selon leur surface, leur forme et leur relief.

❖ Caractéristiques du réseau hydrographique

Un réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau, affluents et sous-affluents d'une rivière ou d'un même fleuve. A l'état naturel tous les réseaux sont hiérarchisés. De nombreux auteurs ont proposé des classifications de ces réseaux. En dehors du relief, certaines caractéristiques du réseau hydrographique, comme la forme du bassin versant, la densité de drainage, le rapport de confluence, le nombre de rang des cours d'eau etc. conditionnent l'écoulement des eaux dans le bassin versant ([Nadjla BENTEKHICI, et al 2018](#)) et dans certains cas peuvent favoriser les inondations.

7. Notion de gestion du risque d'inondation

La gestion intégrée du risque d'inondation constitue une réponse globale au risque d'inondation, structurellement systémique et enclin à évoluer au cours du temps. Une approche opérationnelle de la gestion intégrée du risque d'inondation consiste à considérer trois composantes de la gestion du risque d'inondation complémentaires et interconnectées : **la prévention, la préparation et la culture du risque**. Cette gestion constitue une réponse globale au risque d'inondation en associant notamment la connaissance et la gestion de l'aléa, la réduction de la vulnérabilité mais aussi l'approche par bassin versant, la volonté politique, la coordination et l'intégration de l'ensemble des acteurs concernés. Elle intègre une dynamique de mise en relation des différentes composantes du risque et des parties prenantes concernées (dont les institutions, le secteur privé, et la société civile).([KOVACS, Y,et al 2017](#))

7.1. La prévention du risque d'inondation

Selon le Bureau des Unies Nations de la réduction de catastrophe des risques (UNISDR), La prévention est définie comme l'évitement complet des effets négatifs des dangers et des catastrophes

connexes. Elle exprime le concept et l'intention d'éviter complètement les impacts négatifs potentiels grâce à des actions pré-prises. Mais, l'élimination totale du risque est très souvent impossible et les mesures d'atténuation doivent prendre le relais.

La prévention du risque d'inondation regroupe ainsi différentes actions, aussi bien en termes de gestion raisonnée de l'occupation des sols, que de réduction des vulnérabilités et de protection des populations. Elles visent notamment à : [\(Doussin, 2009\)](#)

- ❖ Limiter l'urbanisation en zone inondable,
- ❖ Gérer l'occupation du sol afin d'éviter un accroissement des écoulements et préserver les zones d'expansion de crue,
- ❖ Réduire la vulnérabilité des enjeux exposés,
- ❖ Protéger les enjeux et les populations par l'investissement dans des ouvrages de protection
- ❖ Entretenir les ouvrages de protection existants.

La démarche de prévention du risque d'inondation suppose également de s'interroger sur le développement du territoire sur le long terme, de manière à intégrer dans les réflexions et les actions menées, la croissance démographique, le développement économique du territoire et les éventuels impacts du changement climatique.[\(KOVACS, Y,et al 2017\)](#)

7.2. La préparation à la gestion de crise

Cette composante a pour objectif le renforcement de l'état de préparation aux inondations, de manière à favoriser :

- ❖ L'anticipation et l'efficacité des actions de mise en sécurité des populations et des enjeux. La gestion de crise relève autant de l'alerte, de l'intervention des services de secours que de la coordination entre ces différents services, le déploiement des moyens d'intervention, les capacités de communication, etc.
- ❖ Un rapide retour à la normale des services (eau potable, assainissement, énergie, transport, etc.), des activités et des conditions de vie des populations touchées. Ce volet doit permettre d'éviter qu'une inondation forte ne se transforme en catastrophe;
- ❖ Une amélioration continue, en s'inspirant des événements passés pour éviter de reproduire les erreurs commises et combler les manques identifiés. En outre, les catastrophes passées à l'échelle mondiale ont montré que la phase de reconstruction post-catastrophe constitue une opportunité critique pour reconstruire en mieux et favoriser la résilience des territoires [\(UNISDR, 2015\)](#).

Alors que la prévention du risque d'inondation s'applique à l'échelle globale du bassin versant, il est important de focaliser la préparation (intégrant à la fois la prévision et la gestion de crise) en priorité sur les zones où se concentre la vulnérabilité.[\(KOVACS, Y,et al 2017\)](#)

7.3. La culture du risque

L'application sur le terrain du concept de gestion intégrée des inondations n'est pas toujours conforme à la stratégie prévue « sur le papier ». Pour y arriver, il est nécessaire de renforcer la culture du risque jusqu'à ce que l'ensemble des acteurs concernés, non seulement les institutions

publiques et privées mais aussi la société civile et la population, prennent conscience de l'importance de traiter ces questions, et ce, tout particulièrement dans les pays en développement. Ainsi la motivation des parties prenantes est, dans les faits, plus importante que la manière dont est définie la gestion intégrée du risque d'inondation.(KOVACS, Y,et al 2017) La culture du risque est primordiale dans la mesure où elle permet de (Doussin, 2009):

- ❖ Réduire le sentiment global d'angoisse et d'anxiété en cas de crue ;
- ❖ Adapter les comportements des populations, gage de réduction des conséquences négatives des inondations ;
- ❖ Assurer une bonne efficacité des dispositifs de gestion du risque (dispositions de prévention, de préparation, de surveillance, d'alerte et de gestion de crise).

La culture du risque passe par différents niveaux d'appropriation par la population des informations communiquées :

➤ **La connaissance du risque:** L'information correctement interprétée sur le risque développe un état de connaissance du risque chez des individus. Toutefois connaître le risque n'implique pas le fait de se sentir concerné directement par ce risque.

➤ **La prise de conscience du risque:** Elle se caractérise par une appropriation personnelle de l'information sur le risque. Prendre conscience du risque d'inondation, c'est le prendre en compte comme un événement pouvant avoir un impact sur sa sphère personnelle ou collective (elle est d'autant plus présente chez les individus ayant vécu une inondation). Toutefois, la prise de conscience de ce que représente le risque pour soi ou pour un groupe ne conduit pas forcément à un comportement adapté pour se protéger face à ce risque.

➤ **L'acceptation du risque:** Elle amène les personnes à être demandeuses de plus d'informations, notamment d'une information ciblée sur le côté opérationnel, comme, par exemple, les moyens de s'informer en cas d'alerte. Elle est nécessaire pour initier un réel changement de comportement chez l'individu.

➤ **L'adaptation des comportements au risque:** Ceux-ci peuvent s'inscrire selon trois temps distincts : en anticipation de l'événement (réduction de sa vulnérabilité), au moment de la crise (réaction adaptée pour limiter l'impact de l'inondation), et en post crise (facilitation du retour à la normale). Les objectifs doivent s'appuyer sur un diagnostic de risque effectué au préalable, et faire référence dans la mesure du possible aux périodes de retour de crue.(Poulard, C.,et al, 2008)

8. Réduire le risque d'inondation

Pour réduire le risque d'inondation, il est donc possible de jouer sur ses deux composantes. La gestion des inondations comprend donc l'ensemble des mesures possibles, sur l'aléa et sur la vulnérabilité.

8.1. Les outils de mesure de l'aléa

Une meilleure compréhension des phénomènes d'inondation et de leurs caractéristiques est un préalable fondamental pour adapter les réponses en vue de limiter le risque d'inondation. Cette connaissance permet ainsi d'identifier les mesures de réduction de la vulnérabilité pertinentes pour le territoire, et de dimensionner correctement les ouvrages de protection.

La connaissance de l'aléa a pour objectif de :

- ❖ Identifier les zones inondables pour différentes périodes de retour, y compris les inondations exceptionnelles pour lesquelles les zones inondées sont souvent méconnues voire inconnues ;

- ❖ Caractériser les inondations en termes de vitesse de courant, hauteur de submersion et durée de submersion.

Les outils disponibles pour améliorer la connaissance de l'aléa à l'échelle d'un territoire comprennent notamment :

- ✓ **Les outils de mesure pluviométrique et hydrologique au sol** : ces outils, utilisés également en support de la prévision des phénomènes d'inondation, permettent d'enregistrer quantité de données locales sur l'aléa inondation, en particulier : les lames d'eau précipitées, les débits et les hauteurs d'eau des rivières.

- ✓ **Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)** : il s'agit d'une représentation du relief d'une zone, indiquant l'altitude des différents points d'un maillage choisi (plus ou moins précis en fonction des besoins). En matière de risque d'inondation, la connaissance de la topographie permet d'identifier les zones inondables à partir de la connaissance d'une hauteur de submersion donnée (issue par exemple d'un modèle hydraulique). Sur les zones inondables.

- ✓ **Le modèle hydraulique de simulation** : il permet d'analyser la propagation des crues dans le réseau hydraulique et de caractériser en termes de hauteur de submersion et de vitesse d'écoulement les débordements éventuels. Pour être fiables, les modèles demandent à être calés par exemple à partir de l'historique des mesures des débits ou des hauteurs d'eau, et des laisses de crues.

- ✓ **Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)** : ce sont des outils de représentation cartographique facilitant la présentation des résultats des analyses de l'aléa et de la vulnérabilité sur un territoire donné.

- ✓ **La connaissance informelle de la population et des acteurs locaux impliqués** : comme pour le recensement des enjeux, la population locale constitue une source d'information également en matière de connaissance de l'aléa, en particulier concernant : la hauteur d'eau maximale d'une inondation, la durée approximative de l'inondation, une évaluation qualitative des courants.

8.2. Les outils de mesure des vulnérabilités

La réduction des vulnérabilités d'un territoire est une composante essentielle de la prévention du risque d'inondations, soit en réduisant les enjeux (établissement de documents d'urbanisme), soit en cherchant à minimiser les conséquences d'un événement, par des dispositions constructives adaptées, des systèmes de prévision des crues et d'alerte, par des plans de gestion des crises, par la promotion de la culture du risque. Elle présente l'avantage de pouvoir être mise en place avec des investissements moindres, en comparaison de ceux pour des mesures structurelles (telles que les digues, les bassins de stockage et les réseaux d'évacuation d'eaux pluviales). Ces deux groupes de moyens d'action sont parfois qualifiés respectivement de mesures structurelles et mesures non structurelles. L'ensemble de ces mesures doit naturellement être coordonné et conçu, en particulier la coopération des institutions impliquées, la capacité des institutions à faire respecter les démarches instaurées, et l'adéquation des compétences du personnel avec les outils mis en place.

Trois grandes familles d'outils de réduction de la vulnérabilité des enjeux peuvent être identifiées, relevant chacune de mesures non-structurelles :

8.2.1. Le recensement des enjeux

L'objectif final d'une telle démarche est d'une part de cibler les zones où agir en priorité, et d'autre part de fournir une réponse en matière de réduction de la vulnérabilité adaptée au contexte local et des spécificités du territoire. Parmi les outils disponibles pour mener à bien ce travail, nous pouvons citer en particulier : L'analyse d'images satellites ; Les visites de terrain ; Les enquêtes auprès de la population locale et/ou la cartographie participative ; Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)

8.2.2. La planification urbaine et la gestion de l'occupation des sols

La planification urbaine doit aider les villes à anticiper la survenue d'une inondation bien en amont d'une situation de crise et à maîtriser au mieux leur croissance et la rationalisation de leurs services. Les mesures envisageables s'attachent aux biens existants et aux biens futurs issus de la croissance urbaine sur le territoire, et consistent par exemple à : (Doussin, 2009)

- ✓ Restreindre ou interdire de nouveaux aménagements dans les zones inondables.
- ✓ Améliorer l'aménagement des zones amont du bassin versant.
- ✓ Supprimer les biens et les constructions vulnérables.

9. Aperçu sur les inondations dans le monde et en Algérie

9.1. Les inondations à l'échelle mondiale

Durant ces dernières années, les inondations représentent la principale cause des catastrophes naturelles enregistrées à l'échelle mondiale (Bertonni, 2006 ; Amelie, A., 2018). Les inondations se présentent comme les risques les plus récurrents ayant un effet dévastateur sur la vie des gens (Khan et al., 2011). Pour la période 1985 -2010, 3713 centres géographiques des inondations ont été enregistrés, via des données satellitaires dans le monde, par l'Observatoire des inondations de Dartmouth1 (Figure.1.3). En 2017, le même observatoire faisait état de 4536 centres géographiques des inondations. Le CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) estime qu'en moyenne 37 inondations catastrophiques par an ont été recensées à travers le monde entre 1980-2013. L'Asie est particulièrement exposée: 9 des 10 premiers pays en termes de populations affectées par les inondations sont asiatiques(dont la Chine en premier lieu). En Afrique centrale, l'inondation est la catastrophe la plus courante, elle arrive en deuxième position en Afrique de l'Est, australe et en troisième position en Afrique du Nord . En Afrique de l'Ouest, plus de 600 000 personnes ont été affectées par les inondations entre juin et septembre 2009. En Europe le nombre de personnes exposées aux inondations est en constante évolution dans certaines régions de l'Europe, notamment dans les pays d'Europe occidentale et méridionale : France,Allemagne et Italie (Paprotny et al.,2018.).

Ces phénomènes, en constante évolution à l'échelle du globe, sont fortement aggravés par les activités humaines, notamment l'extension urbaine ou encore, la paupérisation absolue et l'urbanisation sauvage continue et non contrôlée des régions inondables (Kundzewicz et al., 2014)

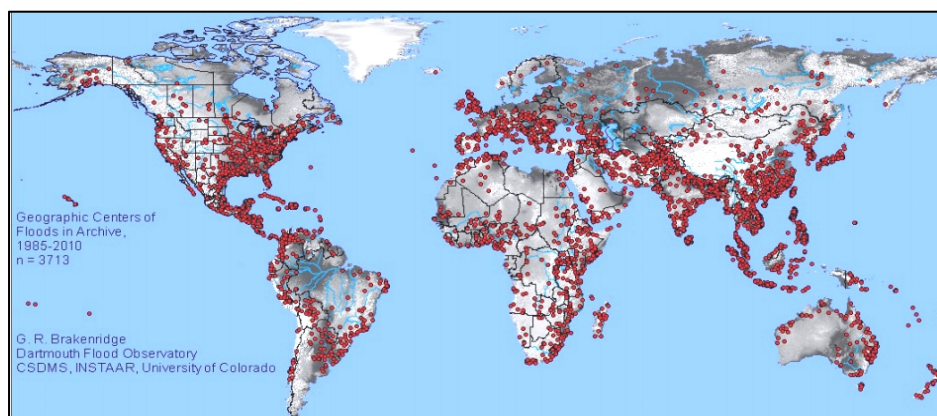


Figure 1.5. Répartition mondiale des pays affectées par les inondations entre la période de 1985 à 2010 (source: [Observatoire des inondations de Dartmouth](#))

Les statistiques ont montré que les dommages dus aux inondations sont d'autant plus graves qu'ils sont moins fréquents, car l'homme à la mémoire courte, ou obéit à des considérations économiques à court terme qui l'amènent à négliger le phénomène ou à admettre ses inconvénients. (Salomon, 1997).

9.2. Les inondations en Algérie

L'Algérie est confrontée aux phénomènes de crues et inondations, qui se manifestent de façon catastrophique constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et sociale. Plusieurs régions, de part leur topographie sont menacées par ces catastrophes hydrologiques aussi bien au Nord qu'au Sud (Touaïbia, 2000, Yahiaoui, 2010). L'Algérie est très exposée aux inondations sous leurs différentes formes: crue ou débordement de cours d'eau, ruissellement en surface, nous allons citer quelques inondations enregistrées en Algérie

❖ **12 octobre 1971:** Les fortes pluies orageuses qui se sont abattues sur la localité d'Azzazga (pluie journalière de 183 mm d'eau) causèrent 40 morts et des centaines d'habitations détruites.

❖ **27 au 29 mars 1973:** Des pluies exceptionnelles (pluie journalière de 166 mm d'eau à Annaba) généralisées à l'Est algérien provoquèrent des inondations catastrophiques dans plusieurs wilaya du pays.

❖ **28 au 31 mars 1974:** Des chutes de pluie exceptionnelles dans les wilayas d'Alger et de Tizi-Ouzou (688 mm en 4 jours) et 381 mm en une journée au col de Sakamody. Les dégâts à Tizi-Ouzou sont : 52 morts et 4570 maisons détruites, 130 villages isolés, et plus de 18 000 sinistrés, 13 ponts détruits et des dizaines de kilomètres de routes emportées.

❖ **01 septembre 1980:** Les pluies orageuses violentes localisées sur la ville d'El-Eulma provoquèrent des crues catastrophiques de l'oued Djehadi, le débordement fait 44 morts, 50 blessés et 365 familles sinistrées.

❖ **11 novembre 1982:** Des pluies orageuses violentes localisées à Annaba (la pluie enregistrée du 10/11 au 11/11/1982 est de 167 mm à l'Edough et 160 mm à Seraïdi engendrèrent de fortes crues des oueds Bouhdid, Forcha et Aneb.

❖ **22 août 1983:** Des pluies orageuses et violentes qui se sont abattues à Birine (W. Djelfa) inondèrent la commune à 60 % et provoquèrent 10 morts, 10 blessés, 200 habitations détruites et 1200 têtes de bétail emportées par les eaux.

❖ **03 février 1984 :** Les pluies abondantes généralisées sur l'ensemble de l'Est Algérien avec un foyer de maximum sur les monts de Constantine (120 mm en 3 jours) et les monts de Medjerda (80 mm en 3 jours) ont provoqué des inondations catastrophiques dans toutes les wilayas de l'Est Algérien et les dégâts occasionnés sont importants :

- ✓ Jijel : 20 morts, 500 têtes de bétail emportées et dégâts évalués à 50 millions de dinars.
- ✓ Constantine: 1140 familles sinistrées, 200 hectares de cultures détruites.
- ✓ Skikda : 8000 habitations envahies.
- ✓ Guelma : 03 disparus, 1957 familles sinistrées, 02 ponts détruits et canalisations d'AEP détruites à 100 %.

✓ Khenchela : 777 familles sinistrées et pertes importantes en Cheptel.

✓ Oum–El –Bouaghi : 144 maisons détruites et 429 familles sinistrées.

❖ **29 décembre 1984 au 01 janvier 1985:** Des pluies exceptionnelles (plus de 250 mm en 4 jours seulement et 195 mm en une journée) généralisées sur tout l'Est Algérien provoquent des inondations très catastrophiques dans les wilayas de Jijel, Constantine, Skikda, Guelma, Annaba et El-Tarf. Le Tableau 1.3, résume les caractéristiques des fortes crues observées sur l'ensemble des oueds des bassins versants de la Seybousse des côtières constantinois et du Kebir Rhummel.

❖ **05 juillet 1987 :** Les pluies orageuses et très violentes tombées sur Batna (pluie journalière de 57 mm), provoquèrent deux morts, des dizaines de familles sinistrées et des dégâts évalués à 175 millions de centimes.

❖ **01 septembre 1989 :** Les fortes chutes de pluies à la wilaya de Biskra accompagnées de grêles et d'un vent d'une rare violence provoquent le débordement des oueds El-Arab, El-Mellah et El-Kheddra occasionnant deux morts et 35 blessés et la destruction de 400 palmiers.

❖ **03 juin 1991 :** Un orage local très violent à Ghardaïa (8 mm en 3 heures) provoque neuf morts et des pertes importantes en cheptel et en palmeraies.

❖ **26 et 27 janvier 1992 :** Les fortes pluies généralisées du 24 au 28 janvier 1992 sur plusieurs régions du centre du pays engendrèrent des inondations catastrophiques dans les wilayas Alger, Blida Tipaza, Chelef, Ain Defla et Médéa. 637 familles sont sinistrées avec 361 à Alger, 106 à Tipaza, 87 à Médéa, 36 à Ain Defla et 23 à Chelef, et d'Importants dégâts sont aussi occasionnés.

❖ **29 septembre au 02 octobre 1994:** Plusieurs inondations catastrophiques sont enregistrées à Ghardaïa, Laghouat, Biskra, Mascara, Tissemsilt et Sidi Bel Abbès causent des dégâts importants :

- ✓ Ghardaïa : dégâts matériels évalués à 270 millions de dinars.
- ✓ Laghouat : dégâts matériels évalués à 5 millions de dinars dans le secteur de l'hydraulique.
- ✓ Mascara: deux mots et importants dégâts matériels.

- ✓ Tissemsilt : neuf morts.
- ✓ Sidi Bel Abbès : deux morts.
- ❖ **4 avril 1996:** Les inondations catastrophiques dans les wilayas d'Annaba et El-Taref, font cinq morts et dix blessés à Annaba et quatre ouvrages d'art endommagés à El-Taref.
- ❖ **14 janvier 1999:** De fortes chutes de pluies (74 mm à Adrar) dans le Sud Ouest causèrent de graves inondations à Adrar, provoquant ainsi deux morts et plusieurs et plusieurs disparus.
- ❖ **28 septembre 2000:** Des pluies diluviennes dans la région de Boussaâda engendrent de fortes crues de l'oued Boussaâda, qui se sont soldées par des dégâts estimés à un mort, un disparu, treize habitations détruites, trente-huit familles évacuées et 193 têtes de bétail emportées par les eaux.
- ❖ **24 octobre 2000:** Les inondations catastrophiques de Sidi Bel Abbès (oued Mekerra), Tissemsilt Theniet El Had (oued Mesloub), Chlef et Ain Defla causent la disparition de deux personnes emportées par l'oued Mekerra et d'importants matériels à Theniet El Had.
- ❖ **9 et 10 novembre 2001:** L'inondation spectaculaire et catastrophique sur l'Algérois à Bab El Oued (Bassin versant de l'oued Koriche) fit plus de 750 morts, 115 disparus et 30 millions de dinars de pertes matériels.
- ❖ **1 et 2 octobre 2008 :** Les pluies torrentielles, inhabituelles et incessantes, pendant quarante-huit heures sur la région semi-désertique de Ghardaïa, ont fait monter les eaux des différents cours d'eau (oued M'Zab dont le débit atteint 900 m³/s) et ont provoqué des inondations qui ont causé le décès d'au moins 34 personnes et fait des dizaines de blessés et de sinistrés, des centaines de maisons ont été détruites, de nombreuses routes ont été coupées et les liaisons téléphoniques ont été très perturbées. Les dégâts matériels ont été estimés à environ 2500 millions de dinars, dont 2000 millions dinars pour les infrastructures.
- ❖ **Le 09 octobre 2008 :** dans la wilaya D'AÏN DEFLA, les intempéries ont causé six décès et huit autres blessées parmi la population, suite à une inondation qui a surpris la région.
- ❖ **Le 12 octobre 2008** a été fortement pluvieuse, de 20h45mn à 23h35 min, de pluie ont été enregistrée, surtout dans les localités de KHEMIS MILIANA et Sidi Lakhdar où la force de l'averse a fait que le revêtement bitumeux de la chaussée en certains endroits a été endommagé, de même que des MILIANA ont envahi la majorité des quartiers. Même la voie ferrée n'a pas été épargnée par ces inondations.
- ❖ **Octobre 2008,** d'autres crues et inondations sont signalées à Batna (450 km au sud-est d'Alger) où deux personnes ont été emportées par les eaux d'oueds en crue.
- ❖ **15 et 16 octobre 2008** a Bechar, région habituellement désertique et aride, situé à plus de 1.000 km au sud-ouest d'Alger, au moins huit personnes sont mortes noyées dans des inondations qui l'ont frappé cette région.

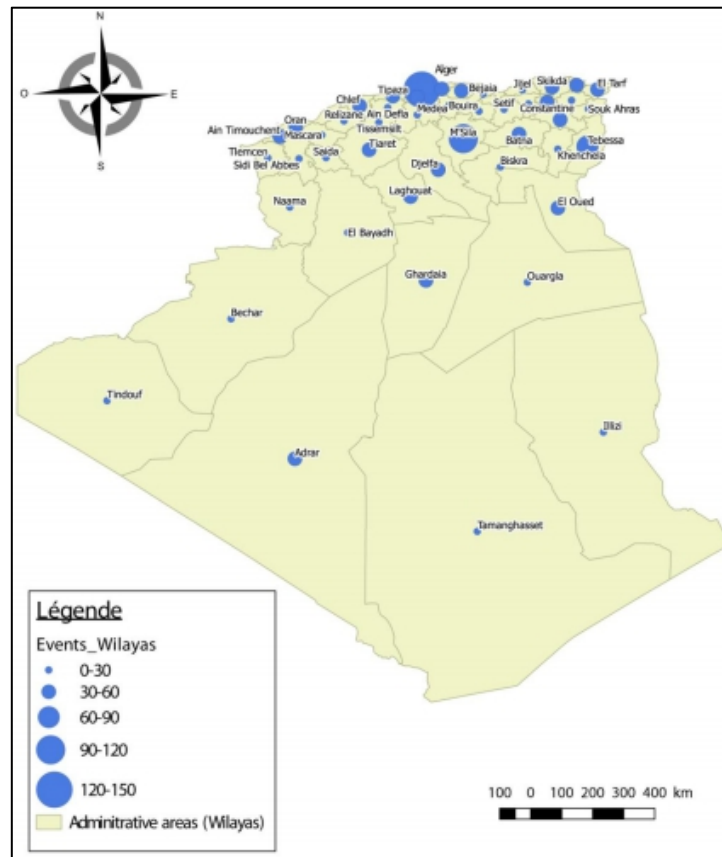


Figure 1.6. Les inondations ayant affectées l’Algérie durant-la période 1912-2017 (NOURI Myriem 2016)

10. Conclusion

En conclusion d'un point de vue global, les inondations font partie du cycle hydrologique naturel, dans lequel l'eau circule constamment entre la terre et l'atmosphère. L'expérience a montré la difficulté de trouver des modèles opérationnels qui peuvent fonctionner sur la population et les institutions concernées. En effet, l'application sur le terrain du concept de gestion intégrée des inondations n'est pas toujours conforme à la stratégie prévue « sur le papier ». Pour y arriver, il est nécessaire de renforcer la culture du risque jusqu'à ce que les acteurs concernés prennent conscience de l'importance de traiter ces questions, et ce, tout particulièrement dans les pays en voie de développement. Ainsi la motivation des parties prenantes est, dans les faits, plus importante que la manière dont est définie la gestion intégrée du risque d'inondation.

Chapitre 2 : Aperçus sur les infrastructures hydrauliques et les phénomènes de rupture des barrages

1. Introduction

Les infrastructures hydraulique constituent des éléments en interaction avec un système nettement plus vaste, comprenant le bassin versant en amont ainsi que l'ensemble de la vallée et des plaines inondables en aval. En outre, plusieurs évolutions récentes ont encore accru la multiplicité et la complexité des questions auxquelles l'ingénieur hydraulicien se voit confronté. Qu'il s'agisse du changement climatique global, de l'urbanisation croissante, et les risques associés à la rupture d'un ouvrage hydraulique.

Le domaine de géotechnique et les constructions hydrauliques a bien entendu joué un rôle primordial à cet égard. Les interventions de l'ingénieur concernent tant la défense contre les crues et les inondations que la constitution de réserves d'eau pour assurer l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable ou industrielle et la génération d'hydroélectricité, et assurer la sécurité de ces infrastructures.

Le phénomène de rupture dépend du type de barrages. Elle peut être progressive, par érosion régressive, pour les barrages en remblai. Quant aux barrages en béton, un renversement ou un glissement d'un ou de plusieurs plots peut survenir de manière plus brusque ; toutefois, il existe des signes précurseurs. Le risque d'une rupture progressivement et inopinée d'un barrage est rare. Mais la rupture toujours possible est liée une évolution d'une dégradation de l'ouvrage que l'on devrait être en mesure de détecter rapidement par l'exercice d'une surveillance permanente et vigilante.

2. différents types d'ouvrage hydraulique

Les ouvrages hydrauliques en générales, sont utilisés, en fonction des besoins à satisfaire et des conditions des sites, selon leurs fonctions. Ces ouvrages Il s'agit de l'ensemble des ouvrages qui permettent de stocker et éventuellement dériver provisoirement des écoulements venant d'un bassin versant, ou d'assurer le stockage puis le ressuyage des venues d'eau en provenance de la mer, afin de contenir ou d'atténuer les effets d'une inondation. Ces ouvrages sont généralement éloignés de la zone protégée mais contribuent à sa protection, sont divisés en trois types différents:

2.1. Les ouvrages enterrés de gestion des eaux pluviales

Les ouvrages enterrés d'assainissement pluvial ont pour vocation première la gestion des eaux pluviales. Ils permettent de stocker temporairement les eaux de ruissellement, limitant ainsi les risques d'inondation, de les traiter et de les évacuer soit vers un exutoire (réseau, cours d'eau) soit par infiltration dans le sol (nappe). Ils peuvent prendre la forme d'ouvrages ponctuels (puits d'infiltration), longitudinaux (tranchées) ou surfaciques (structures réservoirs). Ces ouvrages enterrés peuvent se situer sous voirie ou espaces verts. Ceci réduit considérablement l'emprise en surface en comparaison des ouvrages aériens de gestion des eaux pluviales. Le choix d'une technique par rapport à une autre se fait en fonction du volume de rétention nécessaire et de l'espace disponible. La capacité de stockage de ces ouvrages permet de les classer ainsi (par ordre croissant) : les puits d'infiltration, les tranchées puis les structures réservoirs. Ces ouvrages ne sont pas visitables à l'exception des puits vides.

2.1.1. Les puits d'infiltration:

sont des ouvrages ponctuels plus ou moins profonds, jusqu'à 5 m, Les puits d'infiltration permettent le stockage temporaire et l'évacuation des eaux pluviales par infiltration dans les couches perméables du sol. L'eau de pluie est collectée dans une chambre de décantation en amont du puits, par des canalisations ou par ruissellement. Dans la plupart des cas, les puits sont comblés de matériaux poreux qui permettent la filtration de la pollution. Et les parois sont recouvertes de géotextile pour empêcher la migration des fines. Les puits sont souvent utilisés en complément des techniques de stockage (tranchée drainante, noue et fossé, bassin de rétention) pour assurer leur débit de fuite

2.1.2. Les tranchées

sont des ouvrages longitudinaux de faible profondeur, c'est-à-dire adaptés et adaptables aux surfaces imperméabilisées linéaires (chaussées, trottoirs, pistes cyclables, ...). Leur largeur est généralement comprise entre 0,50 m et 2 m.

2.1.3. Les canaux

sont des ouvrages hydrauliques linéaires qui transportent de l'eau à surface libre et destinés à canaliser de l'eau pour l'acheminer d'un point à un autre. Ils servent couramment de voies navigables en lieu et place d'un cours d'eau difficilement navigable ou pour pallier une absence de cours d'eau. Ils ont en général été créés par l'homme. Les parois latérales d'un canal délimitant un bief, usuellement appelées « digues de canaux », sont réglementairement assimilées à des barrages.



Figure 2.1 différentes formes des canaux

2.1.4. Les digues de protection contre les inondations ou contre les submersions

Les digues sont des talus construits afin de protéger les basses terres contre la crue des eaux, et c'est la structure la plus répandue au monde. Elles empêchent seulement les eaux de crue de pénétrer

dans les régions basses. Le degré de protection offert par une digue dépend de sa hauteur et de son type de construction. Les eaux en crue exercent une pression contre les digues, en accélèrent l'érosion et leur saturation, et causent des infiltrations par en-dessous; de plus, les digues peuvent être débordées lors des crues extrêmes. Chacun de ces facteurs peut causer la rupture d'une digue. La fiabilité d'une digue repose sur son inspection et son entretien continus. De plus, il faut souvent adjoindre aux digues un drainage interne et des postes de pompage afin de réduire au minimum les inondations derrière la digue, lesquelles peuvent être causées par les infiltrations d'eau à travers la digue, l'interruption du drainage naturel dans la zone protégée et le reflux des eaux d'égout lorsque le ruissellement d'averse est abondant. Il existe 5 grands types de digues :

- ✓ Digue de protection contre les inondations ou submersions (fluviale, marine, estuarienne, torrentielle etc.)
- ✓ Digue de rivière canalisée
- ✓ Digue de canal (Hydroélectricité, navigation, irrigation...)
- ✓ Digue portuaire
- ✓ Digue de barrage, d'étang etc.

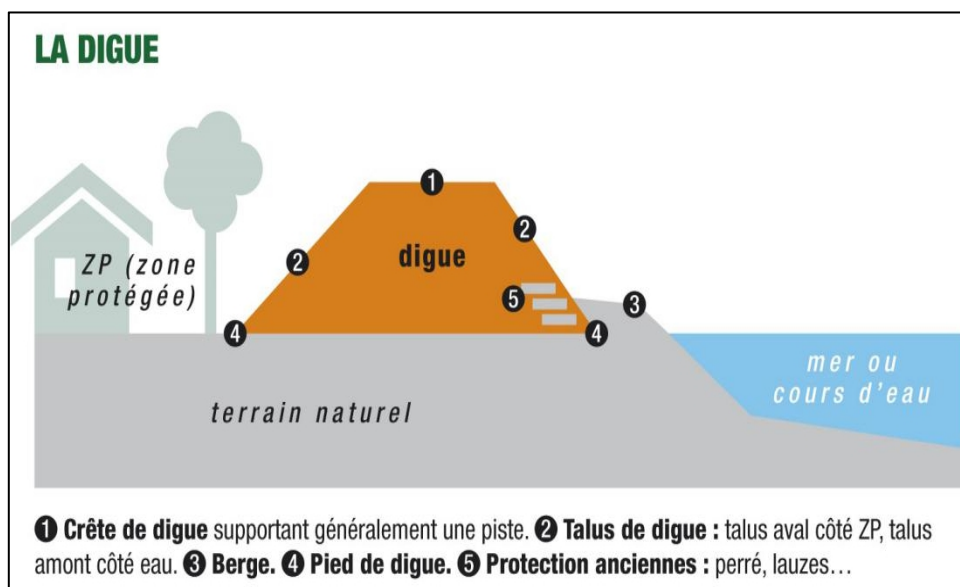


Figure 2.2 Digue de protection contre les inondations ou submersions (fluviale, marine)(source [Comité Français des barrages et réservoirs.2016](#))

Les systèmes d'endiguement peuvent être des systèmes complexes impliquant un fonctionnement hydraulique particulier et pour lesquels les performances des ouvrages qui le composent doivent être soigneusement calibrés en fonction des enjeux à protéger. Pour cela, il est nécessaire de définir la zone géographique que l'on souhaite effectivement protéger, c'est ce que l'on appellera la « zone protégée ». La zone protégée est la zone qui, en l'absence du système d'endiguement désigné, serait inondée par la crue (en référence à un cours d'eau et à un niveau de crue). La zone protégée est donc la zone que l'on souhaite exempter de venues d'eau pour un aléa (crue) bien défini.

2.2. Ouvrage de rétention d'eau

2.2.1. Les seuils

Les seuils sont des ouvrages hydrauliques dont la fonction première est de stabiliser les cours d'eau en diminuant la pente de la ligne d'eau et en formant des points fixes sur le profil en long. Les seuils fixes appelés également déversoirs sont constitués d'une digue positionnée en travers du cours d'eau. Le niveau à l'amont est donc maintenu à la cote de l'ouvrage hydraulique et le surplus s'écoule par déversement au-dessus de la digue. Ce type d'ouvrage est rustique. Le seuil est un ouvrage, fixe ou mobile, qui barre tout ou partie du lit mineur d'un cours d'eau. Sa hauteur est en général inférieure à cinq mètres. Les seuils fixes ont été essentiellement construits en tant que prise d'eau pour l'irrigation ou l'alimentation de moulins.

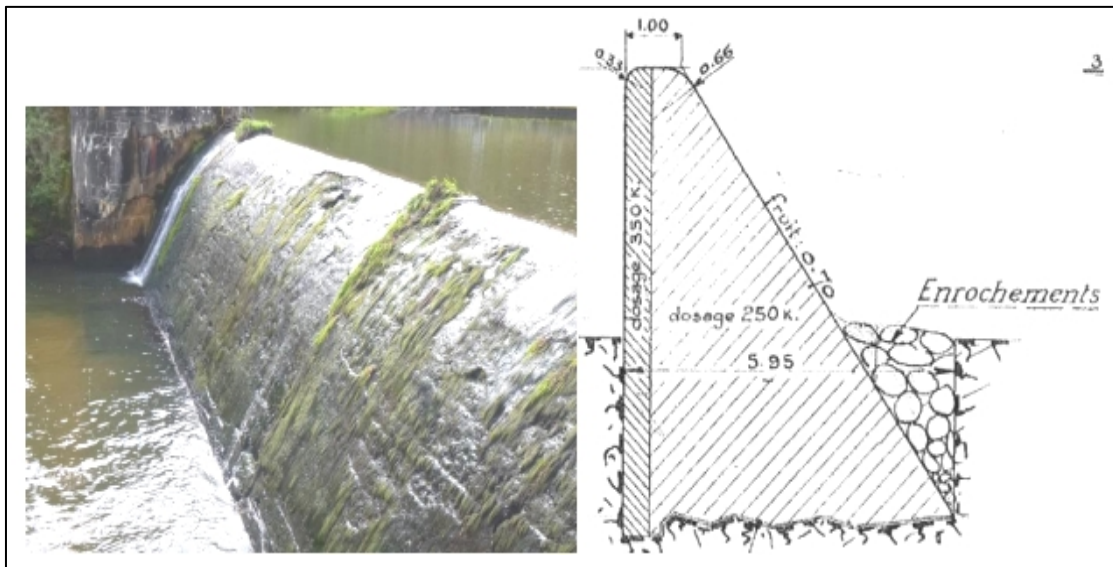


Figure 2.3 Seuil après un déversement et la coupe type du seuil (source WIKIWATER.fr)

2.2.2. Les barrages

Les barrages sont des infrastructures hydrauliques permettant de barrer un lit de rivière afin d'élérer le stockage de l'eau et de créer un grand lac artificiel appelés réservoir. Les barrages sont faits pour retenir momentanément une quantité d'eau plus ou moins éminente pour diverses utilisations (activités touristiques, normalisation des débits de cours d'eau, irrigation, approvisionnement en eau potable, multiplication d'énergie hydroélectrique...). Selon leur importance, leurs dimensions, la complexité des problèmes à résoudre lors de la conception et de la construction, leur influence sur l'environnement, etc., les barrages entrent dans l'ordre des ouvrages d'art les plus importants en général.

Ils sont construits avec des matériaux locaux - argile, limon, sable, gravier, pierre concassée, puis béton et béton armé; certains éléments structurels nécessitent de l'asphalte, de l'acier, du bois, des matières plastiques, etc. Les plus répandus sont les barrages en remblai, qui sont réalisés avec des matériaux locaux; puis, différents types de barrages en béton. Un nombre énorme de barrages de toutes sortes ont été construits dans le monde.

2.2.2.1. Les différents types de barrages

Il existe de nombreux types de barrages disponibles. Voici les 8 types de barrages les plus courants dans le monde.

A. Barrages rigides

Ils regroupent les barrages poids, contreforts, voûte, et voûtes multiples qui diffèrent les uns des autres par la forme de l'ouvrage. La construction de ces barrages est presque toujours réalisée en utilisant le béton (la maçonnerie de moellons est de moins en moins employée). Le béton utilisé dans la construction des barrages rigides est constitué de gros éléments de dimensions inférieures à 250 mm. Le choix de gros éléments présente deux avantages : résistance à la rupture par compression, plus (grande proportionnelle à la racine cinquième des dimensions des plus gros agrégats) et prix réduit des installations de concassage. (MAALEL, Khelifa et al. 2012)

◆ Barrages poids ou « gravité »

Ce sont des barrages en béton ou en maçonnerie qui résistent aux forces auxquelles ils sont soumis, entièrement par leur poids propres. En pratique, le parement amont présente un léger fruits ($m \approx H/V = 0.05$) et la somme des fruits des parements amont et aval est voisine de 0.75. L'engraissement du profil permet l'établissement d'un passage en crête avec une largeur de 4 à 6 m. Enfin, le parement amont présente, en général, une forme cylindrique pour éviter que des contraintes de traction ne prennent naissance dans le béton au voisinage de ce parement ; dans ce cas le barrage se comporte comme une voûte travaillant à la compression. Dans certains cas, le parement aval présente une forme en marches d'escalier pour des raisons de coffrage et de construction.

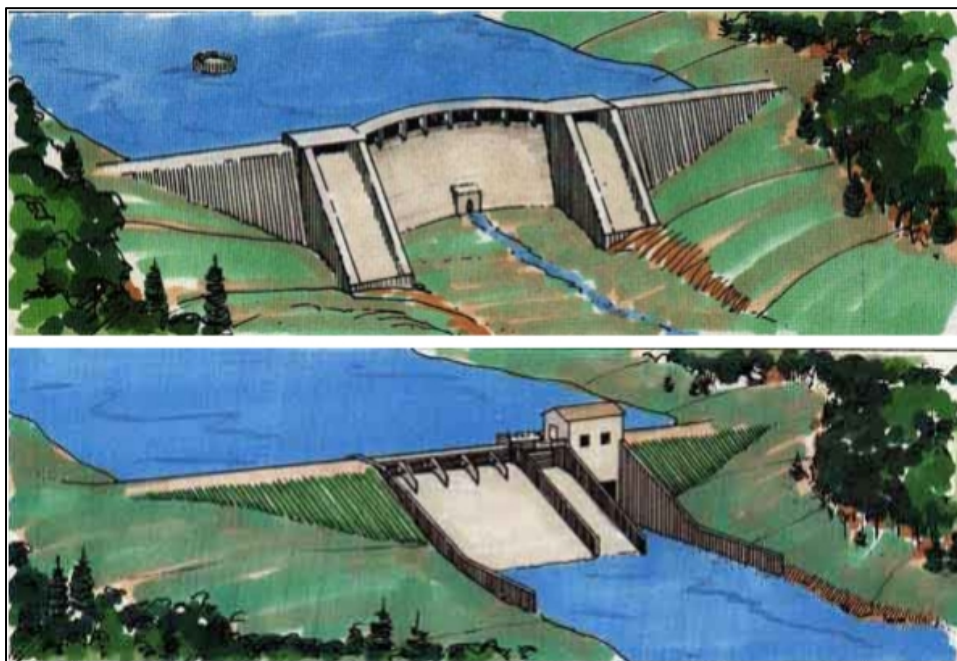


Figure 2.4 Barrage gravité - un barrage construit en béton et / ou en maçonnerie qui basé sur son poids (gravité) pour la stabilité (Source: North Carolina Department of Environmental and Natural Resources 2017)

◆ Barrage à contreforts

Ce sont des barrages poids évidés pour économiser du béton. Ils sont formés de membranes imperméables soutenues par des contreforts perpendiculaires à l'axe du barrage. Bien qu'il existe plusieurs types de contreforts, les deux plus importants sont les murs plats et les voûtes multiples. Dans les premiers, la membrane supportant l'eau est une plaque plane et continue en Béton Armé, s'étalant le long des contreforts (plots séparés dont la section horizontale a la forme d'une poutre en I ou en T). Dans les seconds, la membrane est faite d'une série de côtes elles aussi en béton armé

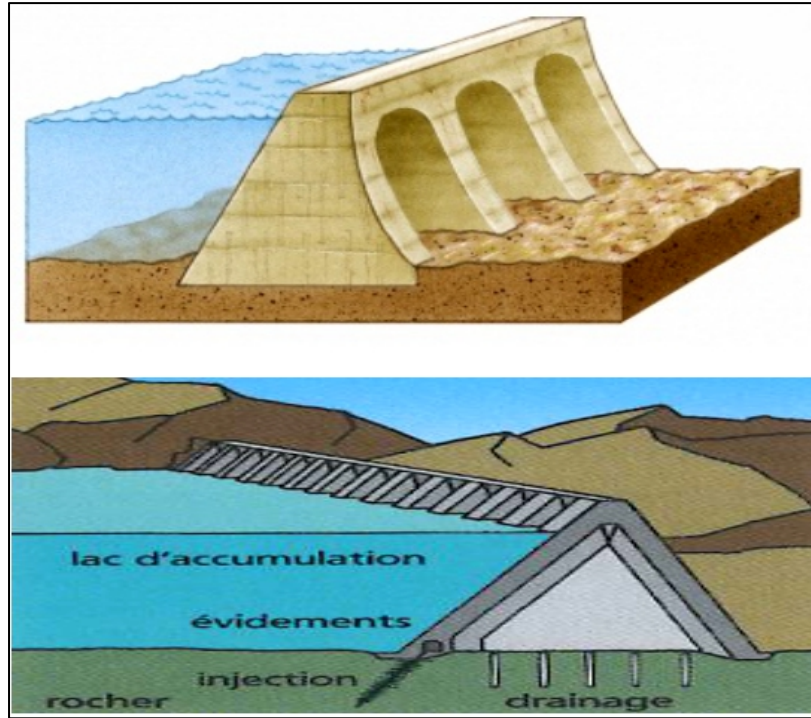


Figure 2.5. Schéma simplifié des barrages à contreforts (source Comité Français des barrages et réservoirs.2016)

Les barrages contreforts sont bien adaptés aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité. Si le rocher de fondation est recouvert d'une couche relativement épaisse d'alluvions ou de rochers altérés, les fouilles des contreforts restent individualisées. De plus, plus l'écartement est grand entre chaque contrefort moins les fouilles seront importantes et donc les concepteurs n'auront pas à prévoir le dégagement du lit de la rivière. Ces barrages peuvent aussi être construits lorsque des appuis solides sont éloignés, les autres barrages ne convenant pas.

En somme, les barrages à contreforts sont donc bâtis dans des milieux espacés mais où les barrages poids ne peuvent pas être mis en œuvre à cause des coûts trop importants liés au dégagement du cours d'eau.

◆ barrages voûtes

La conception des barrages voûtes, qui est très ancienne, consiste à reporter les charges sur les appuis latéraux. Le poids de l'ouvrage ne joue aucun rôle vis-à-vis de sa stabilité. Les sous-pressions sont faibles, les poussées horizontales sont les plus importantes et s'exercent différemment sur le rocher en fonction des différents niveaux d'altitude, et de la variation du rayon de courbure de la voûte.

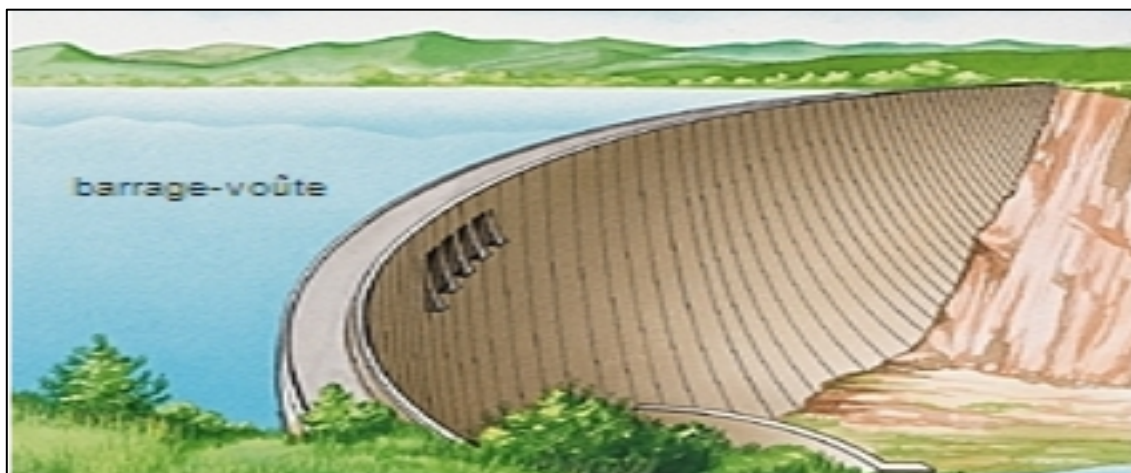


Figure 2.6. Barrage rigide type voûte (source Comité Français des barrages et réservoirs.2016)

B. Barrages souples

Les barrages souples sont construits avec un matériau meuble (terre ou enrochement). Les barrages en terre sont conçus de manière à contrer la force de poussée de l'eau par le poids et la forme triangulaire étendue de la digue.

Il existe trois schémas principaux de structure de barrage souple:

◆ **barrage en terre homogène**

Le barrage en terre homogène est composé par le même type de matériau meuble. Ce dernier est constitué en majorité d'argiles et il est relativement suffisamment imperméable pour assurer à la fois l'étanchéité et la résistance, la terre est généralement mise en place par compactage. La structure de ces barrages est souvent complétée par un dispositif de drains dans sa partie aval et d'une protection mécanique contre l'érosion dans sa partie amont. (Djemili L. 2006)

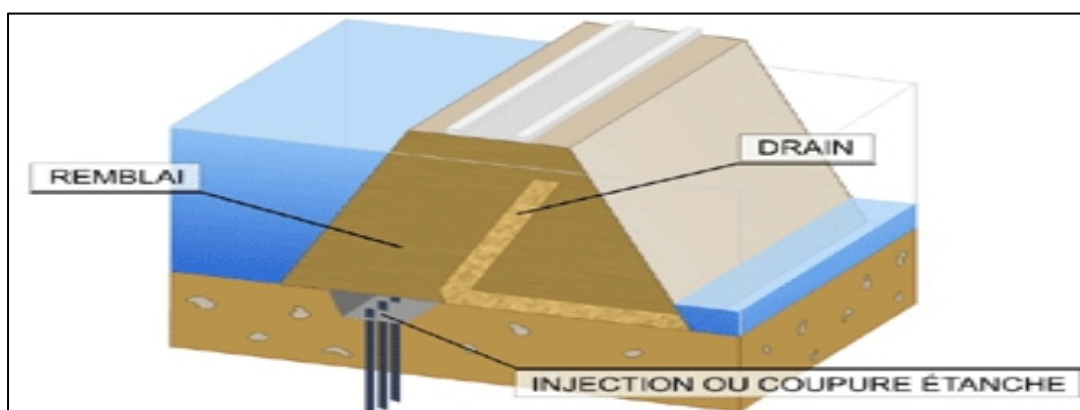


Figure 2.7. Barrage en terre compactée, homogène (source WIKIWATER.fr)

◆ **Barrage à noyau**

Barrage en terre ou en enrochement ayant deux composantes distinctes soit un noyau central étanche et une partie externe qui le recouvre. La partie externe s'assure de la stabilité de l'ouvrage. Elle est composée de terre, d'alluvions ou d'enrochements. Le noyau est généralement constitué de terre relativement imperméable comme l'argile, le limon, ou la moraine ou tout autre matériau

terreux comportant une forte proportion de matériaux fins lui conférant une faible perméabilité. Il peut être également sous la forme d'une paroi en béton, en béton bitumineux ou en acier.

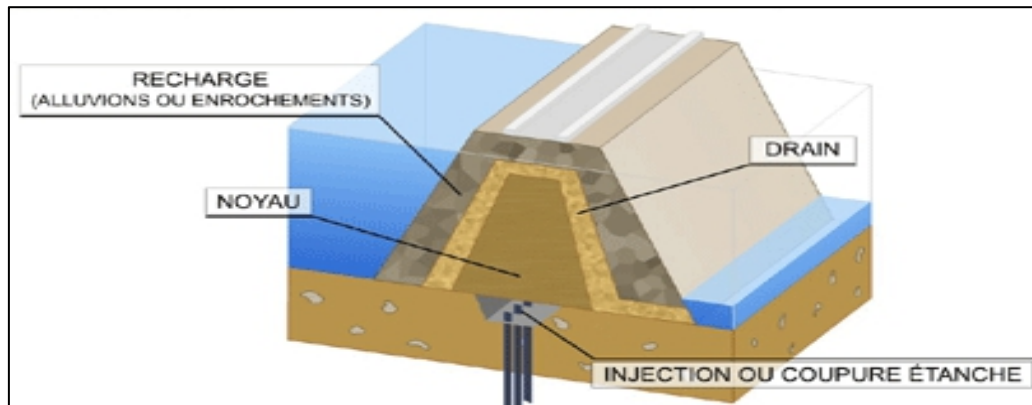


Figure 2.8. Barrage en terre à noyau central étanche (source WIKIWATER.fr)

◆ Barrage à masque amont

Barrage en terre ou en enrochement constitué d'un matériau relativement perméable. Dans ce cas, l'étanchéité est assurée par un masque amont de nature très différente: béton armé, matériel bitumineux, "bâche" et même tôle d'acier. Le corps du barrage assurant la stabilité peut être en matériau quelconque pour autant qu'il soit peu déformable.

La réalisation d'une digue à noyau étanche peut présenter des difficultés telles que l'indisponibilité de matériaux conformes et la difficulté de mise en oeuvre, cette technique devrait être alors comparée à celle d'une digue homogène à masque amont étanche.

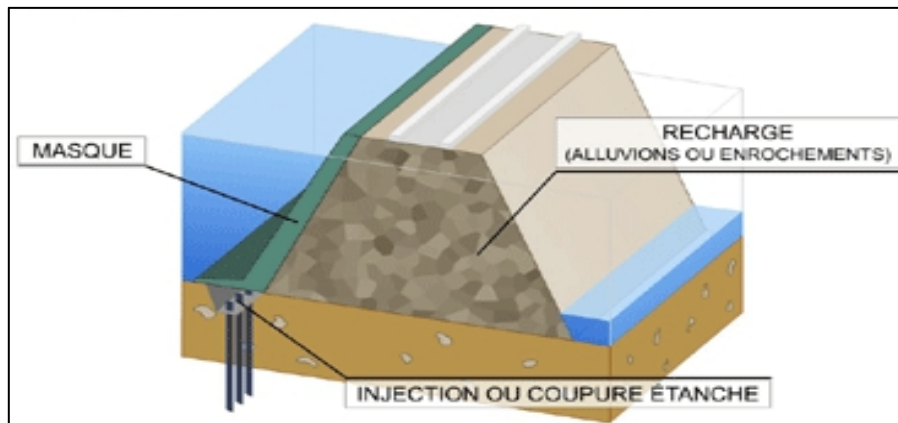


Figure 2.9. Barrage en terre à masque amont (source WIKIWATER.fr)

3. Les phénomènes de rupture des barrages

Selon la commission internationale des Grands Barrages (CIGB) formule la définition de phénomène de la rupture de barrage comme suit: Rupture ou mouvement d'une partie du la digue de barrage ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse retenir l'eau. En général. Le résultat sera une libération importante de l'eau stockée, à l'amont, dans la retenue, entraînant des risques pour les gens ou les biens à l'aval, malgré que la rupture d'un barrage est un phénomène plutôt rare, mais, lorsque qu'il survient, il donne naissance à une véritable catastrophe à produirait une onde de submersion très destructrice dont les caractéristiques (hauteur, vitesse, horaire de passage...) ont été étudiées en tout point de la vallée

Aucune crue naturelle ne peut rivaliser avec la violence et la rapidité de celle issue de la rupture d'un barrage.

Foster, Fell et Spannagle 2000 présentent une étude statistique enregistrée après 1987 sur plus de 11 000 barrages en remblai à travers le monde. Il en résulte que 47 % des ruptures sont engendrées par la surverse, 48,7 % sont dues au renard et 4,3 % sont causées par le glissement.

3.1. Les cause de rupture

Les causes de rupture d'un barrage proviennent essentiellement de la ruine ou de la détérioration de la digue. Ces causes de rupture peuvent être diverses et souvent cumulatives et liées aux matériaux de construction du barrage (terre ou béton).

3.1.1. Cas d'un barrage béton

Dans le cas d'un barrage béton, les causes de rupture sont essentiellement dues aux :

- ✓ la risque de stabilité du barrage ;
- ✓ problème de la discontinuité des fondations ;
- ✓ Défaut dans les systèmes de drainages ;
- ✓ Perméabilité élevée.

3.1.2. Cas d'un barrage en remblai

Dans le cas d'un barrage en remblai, les causes de rupture sont les suivantes :

- ✓ Déversement par-dessus le barrage par défaut du système d'évacuation ;
- ✓ Érosion interne le long du contact avec les fondations ;
- ✓ Tassement important dans les fondations ;
- ✓ Renards qui sont dus aux fissures par tassement ;
- ✓ Hétérogénéités dans les fondations ou le barrage lui-même.

4. Le mécanisme de rupture des barrage en remblai

Les processus de vieillissement et de dégradation des barrages en remblai sont essentiellement liés à des mécanismes d'infiltration et d'érosion ou d'instabilité mécanique qui peuvent aboutir aux mécanismes de rupture. Ceci pose un problème conséquent pour la prédiction du comportement du barrage, et en particulier de sa sécurité, à différents pas de temps. Il y a quatre mécanismes de rupture sont classiquement Considérés : l'érosion externe, l'érosion interne, l'instabilité externe et la liquéfaction

4.1. Mécanisme érosion externe initiée par une surverse

La surverse est un mécanisme de rupture par submersion, lorsque le débit dépasse les capacités d'évacuation des crues, la retenue déverse sur la crête et peut alors conduit généralement et rapidement à la brèche, jusqu'à une rupture totale du barrage. Dès le début d'une surverse sur un barrage, l'eau acquiert une forte vitesse sur le talus aval du barrage et l'érode par arrachement des grains qui sont transportés vers le bas. Comme expliquée dans la figure suivante.

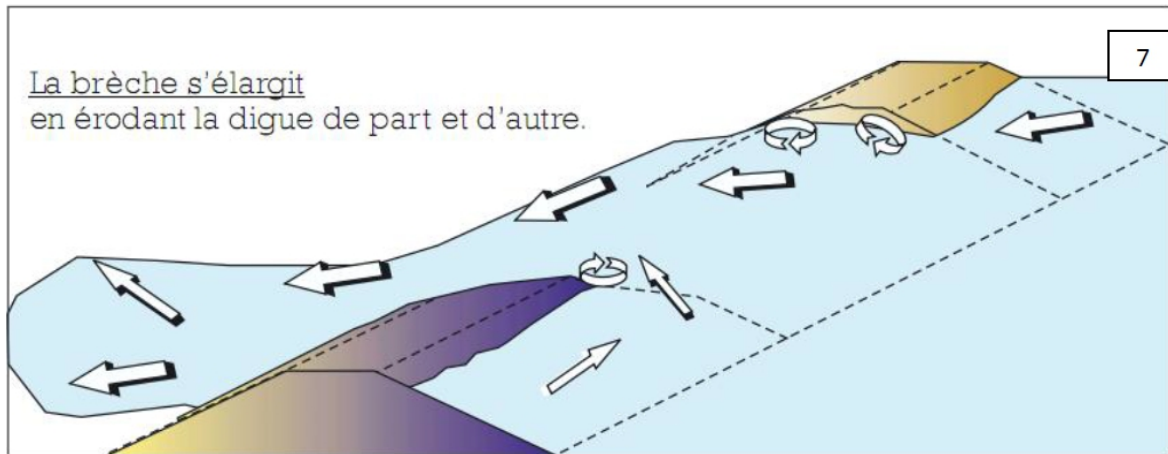


Figure 2.10. La rupture de barrage en remblai par surverse (Mériaux et Al, 2004)

Le mécanisme d'érosion externe induit par une surverse peut être dû à :

- ✓ un dimensionnement insuffisant ou un dysfonctionnement de l'évacuateur de crues résultant trop souvent d'un entretien inadapté ;
- ✓ la présence d'embâcles (arbres, branches, caravanes, etc.) bloquant tout ou partie du seuil déversant ;
- ✓ des tassements de la crête du remblai initiés par des déformations du remblai ou de la fondation.

4.2. Mécanisme d'érosion interne

L'érosion interne est un phénomène causé par un écoulement d'eau dans le remblai qui arrache et transporte les particules du sol. Ce mécanisme, qui désigne d'une façon générale dans les ouvrages en remblai les migrations de particules, couvre plusieurs phénomènes (figure 2.11) :

Le mécanisme d'érosion interne se produisant au cœur de l'ouvrage ou de sa fondation, il peut être décelé visuellement par la détection de fuites plus ou moins chargées en particules fines débouchant sur le parement aval ou au pied aval du remblai.

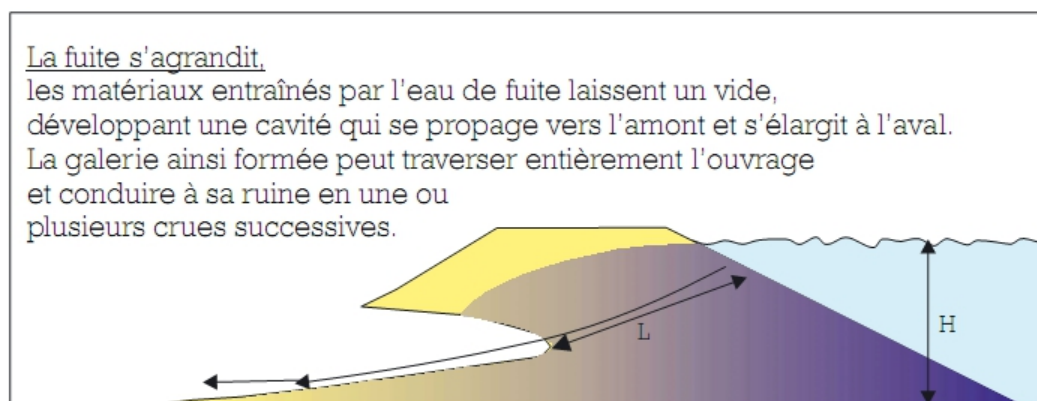


Figure 2.11. Mécanisme de l'érosion interne -renard hydraulique (Mériaux et Al, 2004)

Le mécanisme d'érosion interne peut être dû à :

- ✓ la défaillance du système d'étanchéité ;

- ✓ l'absence de filtre ou des conditions de filtre non respectées entre un matériau grossier et un matériau fin ;
- ✓ la défaillance du système de drainage (colmatage, contournement, rupture) ;
- ✓ un sous-compactage des couches de matériaux constituant le remblai ;
- ✓ l'écoulement non contrôlé le long d'une conduite de vidange (ou autre) ou la défaillance de la conduite ;
- ✓ la présence de terriers (animaux fouisseurs) dans le corps du remblai ;
- ✓ la présence de végétation arborée sur le remblai dans lequel le système racinaire peut s'implanter et se développer.

4.3. Mécanisme érosion externe et les affouillements

L'érosion externe et les affouillements ne conduisent pas toujours à la brèche. Cela peut subvenir lorsqu'il y a enchaînement des désordres. Lorsqu'il n'y a pas formation d'une brèche les dégradations peuvent cependant être importantes et très dangereuses (risque élevé de dégradations ultérieures).

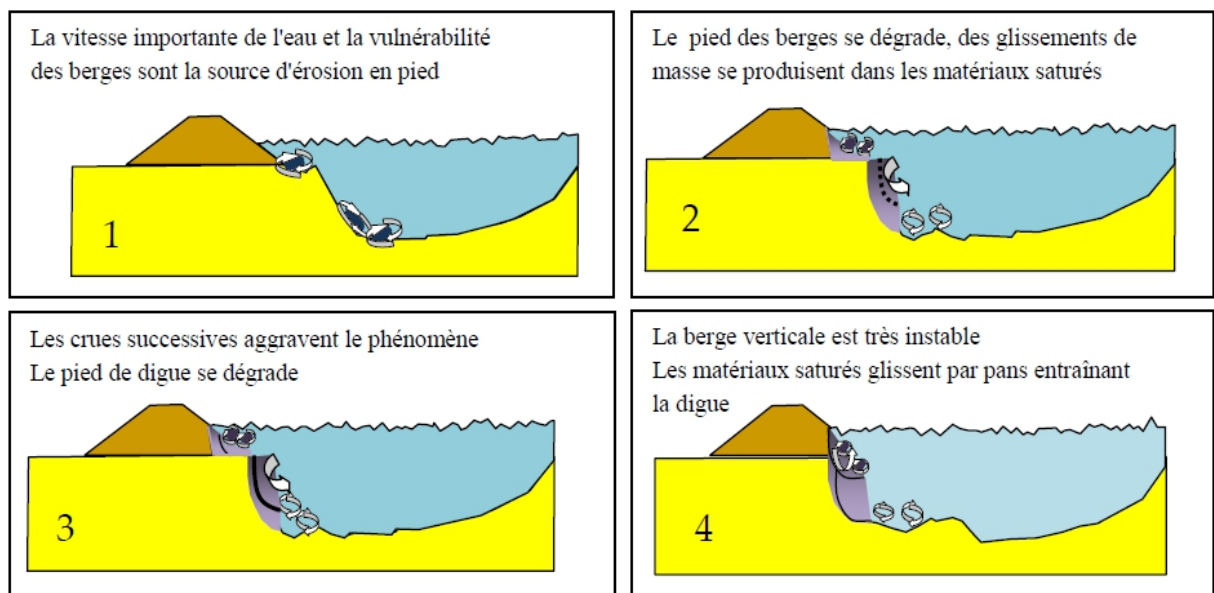


Figure 2.12. Mécanisme de l'affouillement (Mériaux et Al, 2004)

4.4. mécanismes de glissement

Il existe deux mécanismes de glissement :

- ✓ le glissement du talus côté aval, se produisant le plus souvent durant la crue ;
- ✓ le glissement du talus côté fleuve, se produisant lors de la décrue



Figure 2.13. Le mécanisme de glissement coté val en situation de crue (Mériaux et Al 2004)

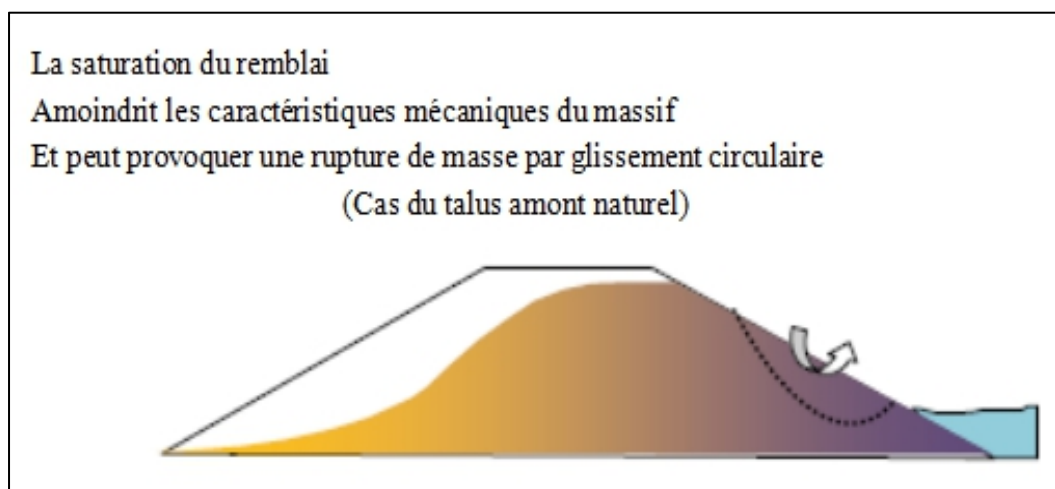


Figure 2.14. Le mécanisme de glissement coté fleuve lors de la décrue (Mériaux et Al, 2004)

Le mécanisme de glissement du parement peut être dû à :

- ✓ la défaillance du système d'étanchéité ;
- ✓ la défaillance du système de drainage (colmatage, contournement, rupture) ;
- ✓ l'augmentation des pressions interstitielles dans le remblai ;
- ✓ la déformation ou la fracturation du remblai.

5. Aperçu historique sur les événements de la ruptures de barrages

À l'échelle mondiale, environ 2000 ruptures de barrages sont enregistrées. Quelques cas de ruptures relativement bien connus et documentés, qui ont eu lieu après 1900 à ce jour, seront maintenant présentés en détail. Il s'agit de cas très variés tant au niveau de la catégorie d'ouvrage que du type de ruptures. Ces accidents ou incidents, bien documentés ont fait l'objet de longues études et investigations, d'ailleurs certains d'entrés eux ont permis d'améliorer considérablement les connaissances antérieures dans le domaine de sécurité de barrages.

◆ Edenville et de Sanford. États-Unis 19/20 Mai 2020

La digue de barrage d'Edenville a éclaté le soir du mardi 19 mai 2020 à la suite de fortes pluies les jours précédents, vidant en seulement une heure son lac de réservoir de 81 millions de mètres

cubes d'eau. Une autre rupture de barrage a également été signalée dans l'État. La digue de Sanford a commencé à déborder peu de temps après.

La montée des eaux déclenchée par ces deux ruptures de barrage a submergé mercredi 20 mai des zones de la ville de Midland, également dans le Michigan. Des évacuations ont eu lieu pour les habitants de la ville. En outre, les habitants d'Edenville et de Sanford ont été invités à évacuer immédiatement les lieux. Le barrage de Sanford a mieux résisté mais a été entièrement submergé, 11.000 personnes ont été évacuées dans le centre du Michigan suite à des brèches sur les barrages d'Edenville et de Sanford.



Figure 2.15. Crues soudaines le long de la rivière, après la rupture de barrage d'Edenville

◆ **Brumadinho au Brésil 25/ Janvier 2019**

Le 25 janvier 2019, la rupture d'un barrage d'une mine de fer libérait un torrent de boue et de résidus, dévastant et engloutissant tout sur son passage. Le bilan humain n'est toujours pas connu avec certitude. Il est question de 270 morts. Mais les secouristes continuent de creuser dans la boue à la recherche d'une dizaine de disparus.

Outre le drame humain, la rupture du barrage est aussi une catastrophe écologique. Le cours d'eau qui était utilisé par une tribu amérindienne est durablement pollué. Le groupe minier propriétaire du barrage, déjà mis en cause dans une autre catastrophe, a reconnu la gravité des faits.



Figure 2.16. La coulée de boue de déchets miniers a recouvert toute la zone autour du barrage minier, après la rupture

◆ Zeyzoun au Syrie 4juin 2002

Le barrage Zeyzoun en remblai, une hauteur de 43m et s'étendant sur une longueur de près de 5 km, est de type mixte terre-enrochement avec noyau central.

La capacité de son réservoir est de 71 millions de m³ et l'eau destiné { l'irrigation est amené par pompage. Une brèche de 80 m s'est formé le 4juin 2002 par submersion en raison d'une accumulation trop importante due aux apports qui n'avaient pas été interrompus. Le volume emmagasiné était de 82 millions de m³ au moment de la rupture.



Figure 2.17. La brèche formée après la rupture du barrage Zeyzoun

◆ Shihkang Taïwan 21 septembre 1999

Le barrage est traversé par une faille dont l'extension n'avait pas été reconnue lors du projet. Cette faille active est l'origine d'un violent tremblement de terre a frappé le centre de Taïwan à 1h47 (heure locale), le matin du 21 septembre 1999 qui a atteint une magnitude de la secousse est estimée à ML = 7,3 (Central Weather Bureau de Taïwan) Un déplacement vertical différentiel de 9 m a été mesuré. La ruine du barrage est localisée sur le passage de la faille et seuls 2 blocs ont été affectés.

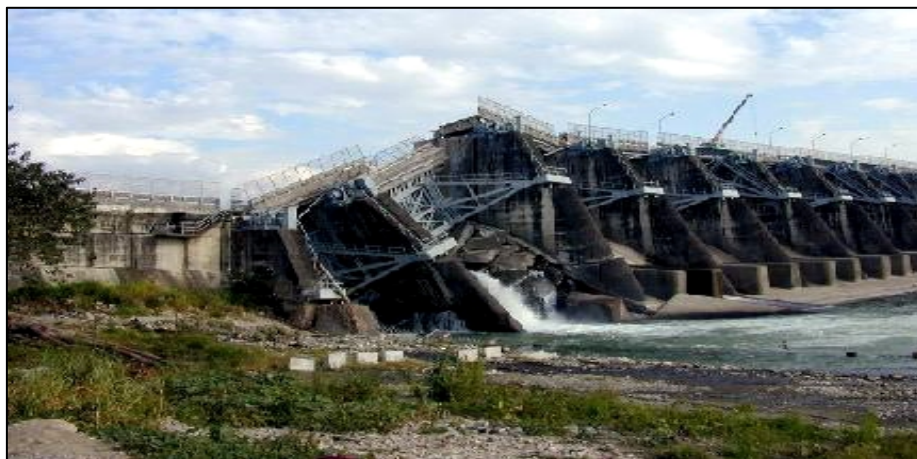


Figure 2.18. Après la rupture du barrage Shihkang

◆ Machhu en Inde 11 août 1979

Situé en Inde sur la cote Ouest de l'état du Gujarat, le barrage Machhu-2 consistait en une combinaison d'un barrage poids en maçonnerie et de digues en terre. Le barrage était d'une hauteur de 60 m pour une longueur de crête de 3905,0 m. La rupture du barrage Macchu-2 a fait, selon les

estimations, entre 2000 et 15 000 victimes. Elle avait été provoquée par des précipitations très abondantes 11 août 1979. La capacité d'évacuation du déversoir était largement insuffisante, ce qui entraîna la rupture de tout l'édifice. Une vague de 5 à 10 mètres de haut s'abattit alors subitement sur la ville de Morvi et sur ses environs, situés à 5 km en aval.



Figure 2.19. État du barrage de Machhu après la rupture

◆ **Teton États-Unis 05 Juin 1976**

Le barrage en remblai de Teton d'une hauteur de 91.5m, est du type en terre avec un noyau argileux imperméable. Sa rupture a eu lieu le 5 Juin 1976 durant son quelques mois seulement après sa première mise en eau une brèche s'est apparue en rive droite au contact barrage-appui, un premier écoulement a été remarqué d'environ 50 l/s à 40 m sous la crête du barrage à 7h du matin. Une demi-heure plus tard une source d'eau chargée, de 400 à 600 l/s apparaît 50 m plus bas. (Marche C. 2008).



Figure 2.20. les phase successive de la rupture du barrage Teton

◆ **Malpasset France 2 décembre 1959**

Le 2 décembre 1959, à 21 h 14, le barrage a littéralement explosé, par faute de résistance de la roche du côté droit, cette dernière a littéralement explosé. La crue de rupture a causé des dégâts considérables et a fait 433 victimes en inondant les villages de Malpasset et de Bozon avant d'atteindre la ville côtière du Fréjus 20 minutes plus tard pour finir sa course dans la mer Méditerranée. La rupture du barrage de Malpasset est à l'origine de la mise en place des premières législations en matière de sécurité des barrages en France.

Malpasset est la seule voûte accidentée en service normal ce qui n'a pas facilité les investigations. La première explication donnée a été le glissement le long d'une faille existant sous

la rive gauche et apparaissant en surface à l'aval. L'explication a été complétée un peu plus tard par la" considération de pressions hydrauliques.

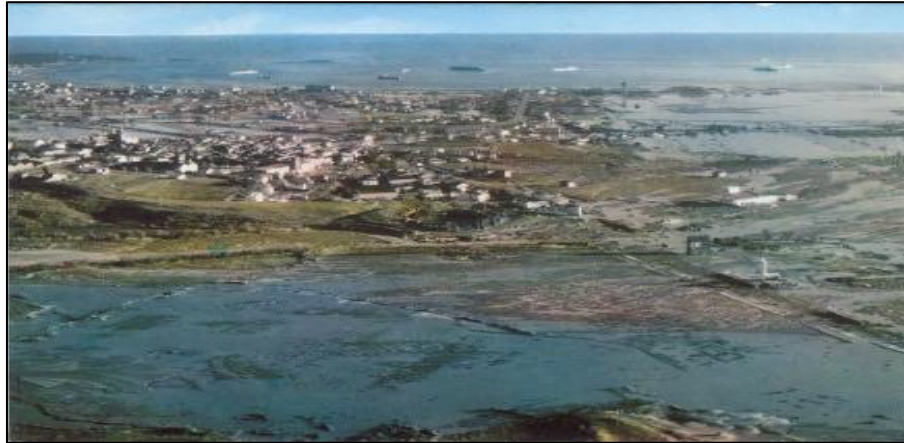


Figure 2.21. La ville de Fréjus après la catastrophe

5.1. Rupture du barrages en Algérie

En Algérie 2 ruptures de barrages sont répertoriées selon les recensements faits par la Commission International des Grands Barrages (CIGB). Il s'agit des deux accidents du barrage de l'Habra à Mascara ayant eu lieu durant la période coloniale française, en 1881 et en 1927.

◆ **Le 15 décembre 1881** : une crue de 850 m³/s emporta 125 mètre du barrage sur la rive droite. 250 personnes furent noyées, ponts, et maisons emportées par les flots déchaînés. La reconstruction du barrage dura deux années, de 1883 à 1885, avec modification du profil et coûta 1300000 fr

◆ **La rupture en 1927**

Une nouvelle crue le 25 Novembre 1927 cause une rupture complète du barrage. Cette rupture s'est également produite en crue, avec cette fois-ci réservoir initialement presque vide ; et une lame d'eau maximale de 3,85 m au-dessus du déversoir, niveau maximal jamais atteint au barrage. La brèche s'est amorcée au voisinage de l'évacuateur (rive gauche), dans les maçonneries, puis s'est propagée vers la rive droite. Trois quarts d'heure après l'annonce de la rupture du barrage, les flots torrentiels déferlaient dans la ville de Perrégaux, emportant sur son passage le pont métallique du chemin de fer, les locomotives et les wagons. Les routes sont coupées, les vergers arrachés, les récoltes anéanties. Une cinquantaine de maisons n'ont pas résisté et se sont effondrées. Dans les rues, la hauteur des eaux boueuses atteint deux mètres. Grâce à l'appel téléphonique de l'ingénieur du barrage, mais aussi du fait que la catastrophe se soit déroulée de jour, il n'y eut pas de victime à Perrégaux. On dénombra cependant quelques noyés dans la plaine. (Deroo L., Jimenez B. 2011)



Figure 2.22. Barrage Fergoug après la rupture du 25 novembre 1927 (Abdélaziz SEMCHA 2008)



Figure 2.23. Le barrage de Fergoug après reconstruction 1986 (Abdélaziz SEMCHA 2008)

6. Conclusion

Les infrastructures hydraulique sont nécessaires pour approvisionner les populations, agriculture et les industries en eau potable et irrigation, ainsi que pour recueillir, traiter et évacuer les eaux usées, gérer le ruissellement urbain et rural des eaux pluviales et prévenir les inondations. L'importance des infrastructures hydrauliques est mieux appréciée quand ils sont beaucoup plus accessibles par les populations. Pour mieux apprécier les facteurs démographiques liés à la distribution de ces infrastructures hydrauliques. En témoigne notamment la grande variété de constructions hydrauliques édifiées par l'homme depuis l'Antiquité, ou encore le lien étroit entre l'essor économique de certaines régions et leur alimentation en eau de qualité.

La rupture de barrage pose de nombreux défis. Lorsque les eaux stocké sont évacuées sans maîtrise, les gens touchées peuvent se trouver géographiquement ou temporellement à bonne distance de l'onde de rupture. Pour cette raison et bien d'autres, la société doit agir collectivement pour promouvoir la sécurité et protéger les barrages en eau contre le phénomène de rupture. Les défis que cela implique en matière de gouvernance sont d'ordre juridique, institutionnel, financier, économique et culturel.

Chapitre 3 : Description des concepts utilisés pour le modèle numérique HEC-RAS et le système d'information géographique

1. Introduction

La majorité des problèmes rencontrés aujourd'hui en hydraulique peuvent se résoudre à l'aide de codes numériques. Les dernières décennies ont vu une explosion de méthodes et d'outils numériques, qui d'un côté ont permis de résoudre efficacement un nombre croissant de problèmes d'ingénierie, mais d'un autre côté plongent l'ingénieur dans un abîme de perplexité quant au choix du bon outil.

La modélisation hydraulique est une partie importante dans ce travail. L'hydraulique intervient essentiellement pour examiner les conséquences des débits prévus par le scénario de rupture de barrage sur l'ampleur des inondations dans le lit majeur des cours d'eaux. L'objectif de ce chapitre est présenter le modèle hydraulique HEC-RAS et le SIG pour simuler et prévoir les inondations. Le modèle HEC-RAS est utilisé pour la simulation hydraulique et le SIG représente la plate forme de cartographie des zones inondables. (MAREF, 2019) Notre travail est basé principalement sur l'utilisation de la modélisation hydraulique pour l'écoulement à surface libre sous le modèle de Saint-Venant connu sous le nom de HECRAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), Le SIG permet une intégration aisée et rigoureuse des données, tant topographiques, en prétraitement des calculs hydrauliques. L'utilisation du modèle numérique de terrain (MNT) et d'un support photographique (Images satellitaires) combinée à une étude préliminaire géomorphologique, permet d'établir un modèle de modélisation bidimensionnelle. L'exploitation des SIG offre ainsi des moyens performants pour l'étude des crues (BRACHET, et al. 1997).

2. Objectif de la modélisation

La modélisation hydraulique de l'aléa d'inondation vise à comprendre les processus à l'origine des dangers liés aux crues, et à déterminer les niveaux d'eau atteints et les superficies inondées au passage des crues. Dans l'approche actuelle, la modélisation hydraulique a pour objectif la délimitation des zones inondables pour des récurrences de 20 ; 100 et 1000 ans. Les autres scénarios comme la rupture de barrage apportent toutefois de grandes problématiques : des incertitudes bien plus grandes et une évolution du régime des crues. À cet effet, la modélisation hydraulique permet d'évaluer :

- ✓ La hauteur d'eau atteinte à différents endroits du modèle,
- ✓ Les vitesses d'écoulement qui seront plus ou moins rapides en fonction de l'endroit où l'on se trouve (sur une zone urbanisée ou sur une zone plus végétale) (zone rurale).
- ✓ Détermination des zones inondables dans le cadre de différents scénarios d'inondation (débordement de cours d'eau ; rupture de barrage ; ruissellement)
- ✓ Déterminer l'impact d'un aménagement futur
- ✓ Comprendre le fonctionnement hydraulique

C'est un outil couramment employé dans le cadre de la gestion des inondations, aussi bien pour la prévision des inondations que dans les volets de prévention et de gestion de crise.

3. Les modèles hydrauliques

Un modèle hydraulique est une création d'une représentation simplifiée sur ordinateur de la rivière et de la topographie des zones environnantes, à l'aide de données spécifiques, les modèles représentent aussi de manière simplifiée les différents ouvrages présents dans la rivière comme les ponts et les barrages de navigation. Les modèles hydrauliques deviennent de plus en plus précis mais ne permettent pas encore d'avoir une représentation exacte de la situation naturelle.

L'emploi des modèles hydrauliques est intimement lié aux données topographiques disponibles car celles-ci forment la structure géométrique du modèle. Dans le cas d'une rivière, les écoulements lors de débordement se font à la fois sur les lits mineur et majeur. Les caractéristiques de l'écoulement soit la vitesse, la profondeur d'eau et la rugosité varient significativement d'un lit à l'autre. La berge (l'interface entre les lits) est importante car elle est la source de la majorité des incertitudes pour la simulation des écoulements débordant. (Geoffroy 2007) identifie trois types de pertes de charges dans cette zone et à l'interface entre le fond de la rivière et du fluide. Le premier type (1) sont les pertes par frottement causées par les micro-turbulences au fond du cours d'eau, le second (2) type est dû aux macro-turbulences issues de la différence entre les vitesses entre les lits et enfin le troisième (3) est causé par le transfert des quantités de mouvement entre les lits. Cela représente un volume important de données, qu'il peut parfois être difficile et coûteux d'obtenir à cause d'un manque inéluctable de stations de mesures, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain (Mason et al. 2012; Matgen et al. 2007). Ces modèles restent donc teintés d'une part d'incertitude. Cette incertitude, de même que le manque de données nécessaires au fonctionnement optimal de ces modèles, peuvent cependant être réduits par l'intégration de données issues de sources autres que les relevés manuels sur le terrain ou les stations de mesures automatisées. (Tanguy, 2012)

3.1. Les différents modèles hydrauliques

Aujourd'hui les modèles hydrauliques deviennent de plus en plus précis mais ne permettent pas encore d'avoir une représentation exacte de la situation naturelle. Deux types de modèles sont largement utilisés pour la délimitation des zones inondables, soit les modèles (à une dimension), 1D comme (HEC-RAS 1D, ISIS, MIKE-11) et les modèles à deux dimensions, comme (HEC RAS 2D, TELEMAC-2D, MIKE-21, H2D2, LISFLOOD) (Werner, 2004). Les modèles 1D supposent que les niveaux d'eau restent parfaitement horizontaux entre les sections et que l'écoulement s'effectue de façon longitudinale. Les modèles 2D sont mieux adaptés aux situations complexes où les niveaux varient le long d'une coupe transversale (Werner, 2004). Des modèles à trois dimensions, 3D, sont également disponibles, mais peu utilisés pour délimiter les zones inondables, car le temps de calcul est très long (Desrochers, 2017).

3.1.1. Le modèle unidimensionnel (1D)

Les modèles unidimensionnels (1D) sont les plus répandus. Ils font l'hypothèse que les lignes d'écoulement du fluide sont parallèles et qu'ainsi, en un point du profil en long, la cote de la ligne piézométrique est identique sur toute la largeur du profil en travers considéré. Ces modèles peuvent représenter des écoulements plus complexes (bidirectionnels) s'ils sont maillés (plusieurs bras) ou à l'aide de casiers (plans d'eau) interconnectés au modèle par des ouvrages hydrauliques (le plus souvent des déversoirs). La ligne d'eau en amont des ouvrages ou leur débitante est en générale calculée par des lois d'ouvrages établies empiriquement (loi de seuil dénoyé ou noyé, loi d'orifice...). Ces modèles ont pour principal avantage de représenter les écoulements à l'aide d'un nombre de

points de calculs limités : les temps de calcul sont courts (quelques secondes à quelques minutes). Par contre ils peuvent rencontrer des difficultés pour représenter les écoulements quand les lignes de courant ne sont pas parallèles, ce qui est le cas de la plupart des rivières de plaine avec un grand lit majeur par exemple.

3.1.2. Le modèle bidimensionnel (2D)

Les modèles bidimensionnels (2D) sont capables de représenter des écoulements dont la direction (en plan) est variable sur l'ensemble du domaine modélisé. La description de la géométrie de ces modèles fait appel à un maillage qui décrit la topographie de la rivière et de son lit majeur. Les mailles sont constituées par des sommets correspondant à des points de topographie du terrain (semis de point de géomètre, relever LIDAR). Ce maillage peut être régulier ou irrégulier (taille des mailles). La forme des mailles peut également varier (triangulaires, rectangulaires...). Pour représenter la topographie du lit mineur ou de certains obstacles à l'écoulement, la taille des mailles doit être suffisamment fine. Le modèle calcule les cotes atteintes par la ligne piézométrique en tout point du modèle, de proche en proche. Ces modèles représentent un nombre de points de calcul beaucoup plus important que les modèles unidimensionnels et la résolution des équations est plus complexe car les écoulements peuvent se faire dans toutes les directions. Ces modèles nécessitent des temps de calcul beaucoup plus élevés que les modèles unidimensionnels (une à plusieurs heures). Les ouvrages hydrauliques (ponts, seuils, vannages) sont aussi plus difficiles à modéliser et à intégrer au modèle.

3.1.3. Le modèle tridimensionnel (3D)

Il existe également des modèles tridimensionnels (3D) capables de représenter des écoulements très complexes, dans les trois dimensions, donc présentant des courants ascendants ou descendants dans la veine liquide. Ces modèles présentent un nombre de points de calcul encore plus élevé et sont donc pour l'instant utilisés pour des ouvrages de taille réduite (écoulements autour d'une pile de pont ou sur le déversoir d'un grand barrage par exemple). Ils permettent de réaliser des calculs nécessitant autrefois de coûteux modèles physiques (maquettes).

4. Description générale du logiciel HEC-RAS

HEC-RAS, *Hydrologic Engineering Centers River Analysis System* (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique) est un logiciel de modélisation 1D et 2D des cours d'eau, selon que le régime d'écoulement à résoudre est permanent ou non-permanent, les équations utilisées pour la résolution changent. Le régime permanent utilise le principe de la conservation d'énergie et les équations de pertes de charge par frottement de Manning. Pour le régime non-permanent, le modèle emploie les équations de Saint-Venant et une méthode de différences finies ([U.S. Army Corps of Engineers, 2010](#)), ce logiciel élaboré par le ministère américain de la Défense, dans le but de gérer les rivières, les ports et autres travaux publics relevant de leur compétence, il a été largement diffusé de par le monde depuis sa publication en 1995. Développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) en Californie, ce système permet aux ingénieurs en hydraulique d'analyser les débits dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables. Il intègre de nombreux moyens de saisie de données, de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, d'édition de rapports sous forme de tables et de graphiques. HEC-RAS est initialement un logiciel de modélisation hydraulique monodimensionnelle (1D) destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux. Il permet également la modélisation bidimensionnelle (2D) depuis la

version 5.0 lancé en 2016. HEC-RAS 1D/2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale notamment dans la plaine inondable et gestion d'assurance contre les inondations des études pour évaluer les empiétements du canal de dérivation et les canaux naturels et artificiels avec la prise en compte des ouvrages de franchissement. Certaines des utilisations supplémentaires sont les suivants : le pont et la conception ponceau et d'analyse, des études de levée, et des études de modification de canal. Il peut être utilisé pour l'analyse de rupture du barrage, bien que d'autres méthodes de modélisation son actuellement à cet effet plus largement accepté. Ce système intègre de nombreux moyens de saisie de données, de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, d'édition de rapports sous forme de tables et de graphiques. Il permet de simuler les écoulements graduellement variés en régime transitoire et d'effectuer les calculs de lignes d'eau en régime dynamique en simulant les différents obstacles le long du cours d'eau. Le logiciel HEC-RAS 1D/2D peut résoudre les équations de Barré de Saint-Venant (1871) à deux dimensions et les équations de diffusion d'onde.

La console générale chapeaute l'ensemble des fonctions du logiciel. Elle est similaire à celle des versions précédentes de HEC-RAS.

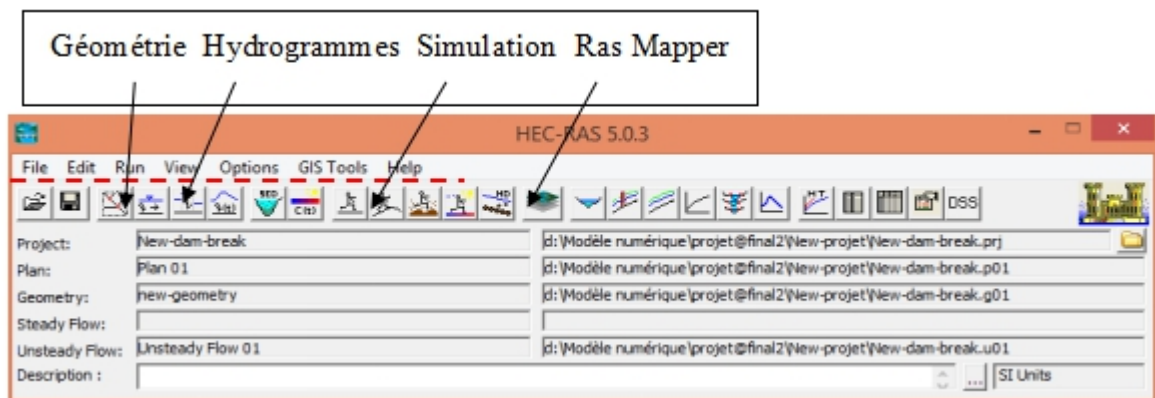


Figure3.1. La fenêtre principale de Hec Ras 2D

De nouveaux outils ont été ajoutés à l'éditeur de géométrie (création du maillage des zones 2D, liaisons 2D / 2D, création des lignes de contrainte, ...)

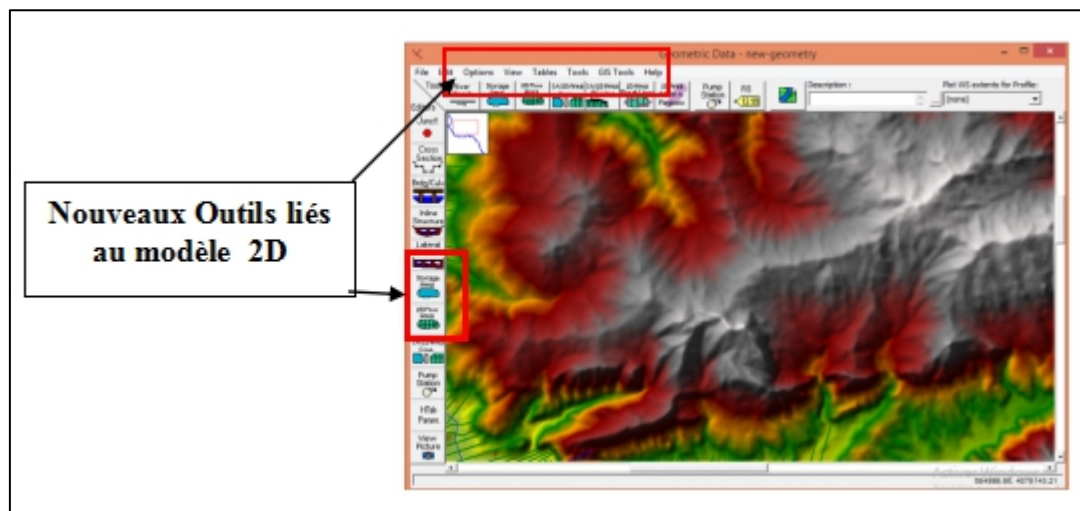


Figure 3.2. L'éditeur de géométrie

4.1. Principes du calcul hydraulique par Hec-Ras

Le modèle HEC-RAS capable d'effectuer des simulations de la propagation des écoulements dans les cours d'eau par :

- ✓ Le calcul des écoulements permanents et non permanents dans un réseau de cours d'eau
- ✓ Le calcul de transport des sédiments et le changement morphologique d'un canal mobile.
- ✓ L'analyse de la qualité de l'eau et prise en compte du couvert de glace, et la température de l'eau,

HEC-RAS 1D/2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale : étude de l'impact de la construction d'ouvrages (ponts, seuils, épis)

- ✓ ruptures de barrages ;
- ✓ études d'inondation ;
- ✓ transport de traceurs chimiques ou de polluants.

4.2. Modélisation hydraulique unidimensionnelle (1D) à l'aide de HEC-RAS et HEC-GeoRAS

HEC-GeoRAS est une extension d'Arc-GIS accélère de manière significative la création d'un modèle HEC-RAS (1D) et son test, ce qui permet d'obtenir des résultats plus fiables et plus précis. Construire rapidement des modèles HEC-RAS depuis diverses sources de données. Accélérez le flux d'ingénierie et simplifiez l'évaluation de l'analyse. HEC-GeoRAS offre une interface facile à utiliser pour créer tous les jeux de données en entrée et offre des fonctions utiles qui aident l'utilisateur à obtenir ces données (sections transversales équidistantes le long d'un cours d'eau). En outre, HEC-RAS est capable de prendre en compte dans le calcul hydraulique les effets des ouvrages franchissant un cours d'eau : tels que les ponts, ponceaux, déversoirs et d'autres structures traversant la section du cours d'eau. Il simule aussi les défaillances des digues, les barrages et ouvrages de stockage. (MAREF, 2019).

4.2.1. Méthodologie de la modélisation par HEC-RAS (1D) et HEC GeoRAS

Récemment, une interface de système d'information géographique (SIG) appelée HEC GeoRAS a été développée à l'Université d'Austin au Texas. Cette extension de modélisation permet de faire face aux aspects quasi-2D de l'étendue de la surface de l'eau, en reliant la géométrie du cours d'eau à un modèle numérique de terrain sous la forme d'un réseau irrégulier triangulé (TIN).

HEC GeoRAS est une interface graphique 2D/3D interactive pour HEC-RAS, compatible avec Auto CAD, Micro-Station et ESRI Arc GIS. L'organigramme de la méthodologie de la modélisation hydraulique avec HEC-RAS (1D) et HEC GeoRAS utilisée pour l'analyse des zones inondables et l'évaluation des risques à l'aide d'un modèle unidimensionnel utilisant HEC-RAS, SIG et HEC-GeoRAS est présenté aux étapes suivant :

- ✓ création des données de topographie de base (modèle numérique de surface de l'agglomération de la zone d'étude complète par des levés topographiques ponctuels)
- ✓ exportation du fichier de géométrie (chenaux, berges, lit majeur sections transversales)
- ✓ prise en compte des ouvrages d'art influençant le développement des inondations

- ✓ paramétrage du modèle (conditions limite)
- ✓ simulation des écoulements et obtention de l'extension, hauteur d'eau et vitesse maximales
- ✓ comparaison avec la carte des phénomènes et des estimations par rapport à la géomorphologie de la zone d'étude.

4.3. Les équations de modèle HEC-RAS 1D

Dans la modélisation hydraulique 1D, tous les débits d'eau sont supposés couler dans une direction longitudinale. Les modèles unidimensionnels représentent le terrain comme une séquence de coupes transversales et simulent l'écoulement afin de fournir des estimations des paramètres d'écoulement tels que la vitesse d'écoulement et la profondeur de l'eau. Pour simplifier le calcul, HEC-RAS suppose une surface d'eau horizontale à chaque section transversale normale à la direction de l'écoulement de sorte que l'échange de quantité de mouvement entre le canal et la plaine inondable puisse être négligé (Brunner, 2016). Dans le logiciel HEC RAS, la structure du programme qui permet la résolution des équations de Saint Venant est basée sur une version modifiée du module UNET (Unsteady network model), développée par . Les écoulements en rivière sont modélisés de manière simplifiée par les équations de Saint Venant (unidimensionnelles) qui permettent de simuler l'évolution dans le temps et le long de l'axe hydraulique de la rivière des deux variables débit Q et niveau de la surface libre z (André Paquier 2002). Ce type de modélisation voit son origine dans les travaux de Barré de Saint Venant qui écrivit ces équations quasiment sous la forme actuelle (Barré de Saint-Venant, 1871). HEC RAS utilise la technique implicite à quatre points afin de générer l'ensemble d'équations différentielles. HEC RAS résout ces équations en utilisant une technique de linéarisation et de résolution de matrices creuses. La ligne d'eau est calculée d'une section à une autre en résolvant l'équation de l'énergie par une méthode itérative (standard step method). Elle est obtenue à partir de l'équation de quantité de mouvement, et représente la conservation de la charge hydraulique. Ils sont adaptés pour certaines rivières ayant peu d'apport intermédiaire. Ce sont des outils d'étude pour la construction et l'exploitation des aménagements fluviaux. Ils permettent l'analyse de l'évolution morphologique d'un cours d'eau, la correction des rivières, la mise au point de consignes de crue et de régulation des plans d'eau des retenues de barrages.

En outre, l'écoulement d'une rivière en crue a été décrit pour la première fois par Saint-Venant en 1871, en se basant sur des équations obtenues par intégration des équations de Navier Stokes (moyennées ponctuellement). En fait, le passage de Navier-Stokes (3D) à Saint-Venant (2D) se fait en se basant sur l'hypothèse de vitesses verticales faibles, et ainsi les variables peuvent être intégrées verticalement (Roche et al. 2012). Pour les équations de Saint-Venant en bief simple (1D), on fait l'hypothèse d'une dimension privilégiée (suivant la longueur du bief) et d'un écoulement lentement varié, et ainsi, l'intégration des équations (3D) s'effectuent sur les sections transversales. A cette partie, nous présenterons les équations de base régissant les écoulements in-stationnaires à 1 et 2 dimensions (1D et 2D), ainsi qu'une simplification de ces équations, et quelques notions de base concernant la solution numérique de ces équations.

4.3.1. Cas de régime stationnaire (permanent)

Un modèle hydraulique 1D en régime stationnaire permet d'obtenir la côte de l'eau en tout point du réseau modélisé ainsi que les vitesses moyennes dans les sections de calcul et les ouvrages hydrauliques. Ces informations peuvent être suffisantes quand les volumes de stockage disponibles sont faibles par rapport aux volumes moyens des crues. Cela et en particulier le cas quand la

topographie des lieux permet de traiter le cours d'eau par morceaux de faible longueur hydrauliquement indépendant. (Yahiaoui, A. 2012)

Le modèle en régime permanent permet de tester l'incidence sur la hauteur d'eau atteinte en rive opposée d'un endiguement, par exemple. Il facilite aussi la détermination des débits de plein bord tenant compte des modifications locales de topographie. Il peut aussi aider à déterminer les courbes de remous dues à un ouvrage hydraulique particulier. Ces modèles donnent donc dans certains cas des résultats tout à fait pertinents pour répondre aux questions d'aménagement posées.

4.3.1.1. Équation de conservation de l'énergie

Hec-Ras 1D utilise dans ce cas l'équation énergétique de Bernoulli pour le calcul hydraulique est effectué essentiellement en appliquant l'équation d'énergie entre les profils en travers. Celle-ci est gérée par

$$Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e = Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \longrightarrow (3.1)$$

Y : hauteur d'eau (m)

Z : côte du fond de canal (m)

V : vitesse moyenne sur une section (m/s)

G : gravité (m /s²)

α : Coefficient de pondération (ad)

h_e : pertes de charge (m)

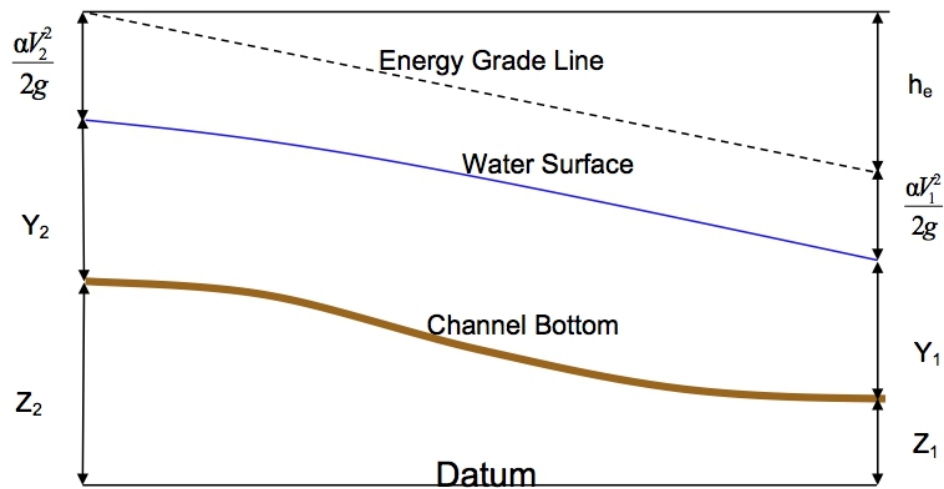


Figure 3.3. Conservation de la charge entre deux sections (source: USACE)

La perte de charge h_e entre deux sections est composée de pertes de charge linéaires entre les sections et de perte par expansion et contraction. h_e est donnée par :

$$h_e = L * S_f + C \left| \frac{\beta_2 V_2^2}{2g} - \frac{\beta_1 V_1^2}{2g} \right| \longrightarrow (3.2)$$

Où :

L : Distance pondérée entre les deux sections

Sf : Pente des pertes de charge par frottement entre les deux sections

C : Coefficient de perte due à l'expansion ou à la contraction

La distance L est donnée par :

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \rightarrow (3.3)$$

Où : L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} : Longueurs du chenal entre les deux sections respectivement en rive gauche, dans le chenal principal et en rive droite

Q_{lob} , Q_{ch} , Q_{rob} : la moyenne arithmétique du débit respectivement dans la rive gauche, le chenal principal et la rive droite

Le débit Q est calculé à partir de la formule suivante :

$$Q = K \sqrt{S_f} \rightarrow (3.4)$$

avec ;

$$K = \frac{1}{n} SR_H^{2/3} \rightarrow (3.5)$$

Où :

K : Débitance de chaque subdivision

n : Coefficient de Manning de chaque subdivision

S : Surface d'écoulement de chaque subdivision

RH : Rayon hydraulique de chaque subdivision

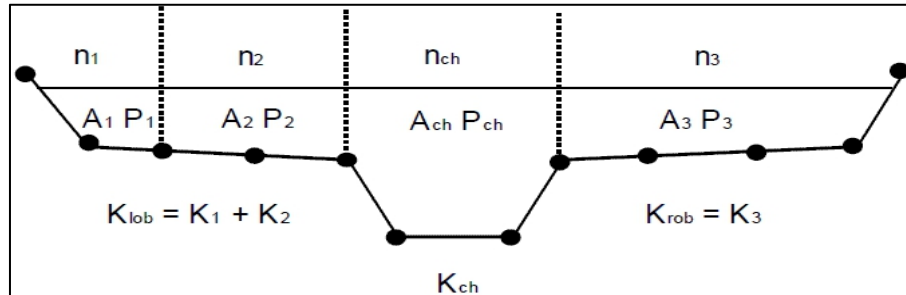


Figure 4.4. Découpage de la section pour le calcul du frottement (*source: USACE*)

Le choix de la valeur n de Manning appropriée est très important pour le calcul précis des profils de surface de l'eau. La valeur du n de Manning est très variable et dépend d'un certain nombre de facteurs, dont la rugosité de surface, l'irrégularité de section du canal, l'alignement de chenal de l'écoulement, la taille et la forme du canal, la végétation, les obstructions, matériaux du fond et lits du canal (USACE, 2010). La valeur n diminue avec l'augmentation de niveau et de débit d'eau. Lorsque la hauteur d'eau est peu profonde, l'irrégularité du fond du canal sera bien apparue et son effet peut devenir prononcé. Cependant, la valeur n peut être importante aux niveaux élevés si les rives sont rugueuses et herbacées.

4.3.1.2. L'équation de continuité (ou de conservation de la masse)

Ainsi, d'après l'analyse de Barkau (1982), les équations de continuité pour le chenal et pour les rives inondées indiquent que le débit reste constant entre les sections transversales adjacentes. Ainsi, la masse de l'eau reste constante tout au cours de l'écoulement, autrement dit il n'y a ni apport extérieur, ni prélèvement de masse. Cette équation permet de décrire les changements dans une section transversale et la vitesse d'un endroit à l'autre sont explicitées comme suit :

$$\frac{\partial(Q)}{\partial(x)} + \frac{\partial(A)}{\partial(t)} + q = 0 \rightarrow (3.6)$$

Avec,

Q : débit (m³/s) ;

A : sections transversales (m²).

q : débit latéral (m³ /s)

4.3.1.3. Équation de conservation de la quantité de mouvement

L'équation de la quantité de mouvement est basée sur la deuxième loi du mouvement de Newton, indiquant que la somme des forces agissant sur un élément est égale au taux de changement de la quantité de mouvement. La formulation de l'équation de quantité de mouvement sera différente selon les forces envisagées. Compte tenu de la résistance à la pression, à la gravité et au frottement, l'équation de continuité unidimensionnelle peut s'écrire:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) + g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} + h \right) = g(S_0 - S_f) \rightarrow (3.7)$$

V : la vitesse d'écoulement

G : la gravité

H : la profondeur

S_f : coefficient de frottement entre deux sections

S₀ :

4.3.1.4. L'équation dynamique

Les équations dynamiques pour le lit mineur et le lit majeur s'écrivent respectivement comme suit :

$$\frac{\partial Q_c}{\partial t} + \frac{\partial (V_c Q_c)}{\partial x_c} + g A_c \left(\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_{fc} \right) = M_f \rightarrow (3.8)$$

Et

$$\frac{\partial Q_f}{\partial t} + \frac{\partial (V_f Q_f)}{\partial x_c} + g A_f \left(\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_{ff} \right) = M_c \rightarrow (3.9)$$

Où M_c et M_f représentent les flux de quantités de mouvement par unité de distance échangés par le lit mineur et le lit majeur, respectivement. L'hypothèse introduite ici suppose que la surface de l'eau reste horizontale en chaque section transversale perpendiculaire à l'écoulement.

4.4. Les équations de modèle HEC-RAS 2D

Traditionnellement, les modèles de rivières 1D ont été utilisés pour modéliser les inondations fluviales. Les modèles 1D sont constitués d'une série de coupes transversales décrivant la topographie de la rivière et de la plaine d'inondation, et les niveaux d'eau sont calculés en utilisant la forme unidimensionnelle des équations directrices. Les modèles 1D ne nécessitent la collecte de données topographiques qu'au niveau des sections transversales qui composent le modèle, ce qui constituait un avantage majeur lorsque l'accès aux données topographiques était limité. Alors que les modèles 1D fonctionnent bien lorsque le débit est limité entre les berges du canal, la modélisation 2D a montré qu'elle permettait de mieux estimer les débits dans les plaines d'inondation topographiquement complexes, où le débit est considéré comme largement bidimensionnel, (Cook et Merwade 2009), (Vojinovic et Tutulic 2008). Le modèle bidimensionnel 2D permet à l'eau de se déplacer dans les directions longitudinale et latérale, alors que la vitesse est supposée être négligeable dans la direction z . Cependant, contrairement au modèle 1D, ce modèle représente le terrain comme une surface continue à travers un maillage ou une grille. Afin d'améliorer le temps de calcul, HEC-RAS utilise une approche de sous-grille, qui utilise une grille de calcul relativement grossière et des informations à plus fine échelle sous-jacentes à la topographie (Brunner, 2016). Les équations de bathymétrie de la sous-grille sont dérivées des équations de l'eau peu profonde et des ondes de diffusion

4.4.1. L'équation de continuité 2D (ou de conservation de la masse)

L'équation de continuité dans le modèle 2D c'est la même forme de modèle 1D, le débit reste constant entre les sections transversales adjacentes. Ainsi, la masse de l'eau reste constante. La différence est que les débits massiques sont désormais calculés en 2 dimensions. L'équation de continuité bidimensionnelle peut s'écrire :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} + q = 0 \rightarrow (3.10)$$

4.4.2. Équation de conservation de la quantité de mouvement

Comme dans le cas 1D, l'équilibre de quantité de mouvement est basé sur le principe que la somme des forces agissant sur un élément est égale au taux de changement de quantité de mouvement. En considérant le forçage par gravité, la viscosité des tourbillons (échange de moment), le frottement et l'effet Coriolis, les équations d'équilibre de moment 2D peuvent être écrites comme suit.

Équilibre de quantité de mouvement dans la direction x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \rightarrow (3.11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \rightarrow (3.12)$$

h : Hauteur d'eau (m)

u, v : Composantes de la vitesse suivant la direction horizontale et verticale (m/s)

g : Accélération de la pesanteur (m/s²)

ν_t : Coefficient de diffusion de la vitesse (m²/s)

H : Cote de la surface libre (m)

t : temps (s)

x, y : Composantes d'espace horizontales (m)

q : Introduction ou prélèvement de fluide (m/s)

f_u, f_v : Termes sources représentant le vent, la force de Coriolis, c_f le frottement sur le fond, une source ou un puits de quantité de mouvement dans le domaine (m/s²)

La solution du modèle 2D de Saint Venant est donnée par un algorithme implicite de volume fini, qui permet des pas de temps plus longs que les méthodes explicites. La méthode des volumes finis confère au modèle une augmentation de la stabilité et de la robustesse par rapport aux méthodes traditionnelles par différences finies. De plus, l'algorithme est capable de résoudre des régimes sous-critiques, supercritiques et mixtes (USACE, 2016). En général, les équations 2D, diffusion des ondes permettent au logiciel de fonctionner plus rapidement et d'avoir de meilleures propriétés de stabilité

4.5. Étude de rupture de barrage sur le logiciel HEC RAS

La formule employée dans HEC-RAS pour le calcul du débit de brèche dans le cas d'une rupture par déversement (ouvertopping) est similaire à la formule permettant de calculer le débit par-dessus d'un déversoir à seuil trapézoïdal épais. Elle s'écrit comme suit :

$$Q_b = C_w \left[b_s (H_t - h_b)^{1.5} + 0.8 z (H_t - h_b)^{2.5} \right] \longrightarrow (3.13)$$

Q : est le débit instantané de brèche (m³/s)

H_t : la charge énergie totale

C_w : le coefficient de débit

h_b : est la hauteur instantanée au fond de la brèche (m)

Dans le cas d'une rupture par érosion interne (piping) HEC-RAS utilise également l'équation d'un écoulement par orifice afin de calculer le débit de brèche (Gee, 2009) :

$$Q_b = C \sqrt{2g} A \left(Z_H + \frac{v^2}{2g} - Z_b \right)^{0.5} \longrightarrow (3.14)$$

Avec :

Q_b : est le débit instantané de brèche

C : est le coefficient de débit (orifice)

A : est l'aire (orifice)

Z_H : est le niveau d'eau amont

v : est la vitesse d'approche

Z_b : est l'élévation au centre de la brèche

Les effets de submergée aval sont pris en compte par la réduction d'énergie spécifique par le niveau d'eau aval (Z_T) et par l'introduction d'un facteur de submergence critique (R_C). L'équation (3.15) devient alors :

$$Q_b = \frac{C}{R_C(1-R_C)} \sqrt{2g} A \left(Z_H + \frac{v^2}{2g} - Z_T \right)^{0.5} \longrightarrow (3.15)$$

L'équation reliée à la détermination du facteur de submergence critique (R_C) n'est pas disponible dans les manuels de HEC-RAS.

Pour estimer les conséquences d'une rupture de barrage pour un scénario choisi, on doit en premier lieu modéliser le processus de la rupture elle-même et la formation de l'écoulement au droit de la digue (Paquier A. 2002). Il est essentiel de connaître au droit du barrage, la géométrie de la brèche, le temps de formation de la brèche ainsi que le débit maximal à l'ouvrage.

Plusieurs formules sont disponibles dans la littérature pour estimer ces paramètres, elles ont été généralement développées sur la base de données de laboratoire et de cas réels observés de rupture de grand barrage.

Les travaux théoriques de Ritter, supposant une retenue infinie et une rupture instantanée, donnent une première estimation du débit maximal à la brèche:

$$Q_{\max} = 0.9 * L * H_0^{1.5} \longrightarrow (3.16)$$

L : largeur constante de l'ouvrage s'effaçant, en mètres

H_0 : profondeur initiale d'eau en amont.

Les formules de Costa (3.17), de Molinaro (3.18) et de Lempérière (3.19) (pour des matériaux de petites dimensions et de cohésion nulle) relient la hauteur H du barrage (m) et le volume V de la retenue (m^3) au débit maximal à la brèche $Q_{\max}$ (m^3/s).

$$Q_{\max} = 0.116 * (g * H)^{0.5} * H^2 (V / H^3)^{0.22} \longrightarrow (3.17)$$

$$Q_{\max} = 0.7 * \sqrt{g * H} * H^2 * \sqrt{V / H^3} \longrightarrow (3.18)$$

$$Q_{\max} = 325 * (H * V / 10^6)^{0.42} \longrightarrow (3.19)$$

Le temps nécessaire pour atteindre le débit maximal peut être estimé à l'aide de la formule (3.20) :

$$T = 10 * V^{0.5} * g^{-0.5} * H \longrightarrow (3.20)$$

La formule de Hagen fait intervenir les mêmes paramètres, mais en unité impérial : H' (m), V' (m/s) et $Q'_{\max}$ (m³/s)

$$Q' = 370 * \sqrt{(V' * H'^2)} \longrightarrow (3.21)$$

Les formules du U.S. Bureau of Reclamation (1982) (3.22) et Evans(1986) (3.23) mettent en avant l'importance des caractéristiques du réservoir dans l'évaluation du débit maximal de rupture :

$$Q_{\max} = 75 * D^{1.85} \longrightarrow (3.22)$$

D : profondeur du réservoir (m)

$$Q_{\max} = 0.072 * V^{0.53} \longrightarrow (3.23)$$

V : volume du réservoir (m³)

Mac Donald et Langridge-Monopolis (1984) relie le débit maximal à la brèche $Q_{\max}$: (m³/s), la hauteur d'eau H_w dans le réservoir au dessus de la brèche (m) et le volume dans le réservoir V_w au moment de la rupture (m³) :

$$Q_{\max} = 1.175 (H_w * V_w) \longrightarrow (3.24)$$

Singh fait intervenir les rapports H_s/H et H_s/B_m dans l'évaluation de la forme de la brèche, du débit maximal de rupture et du temps pour l'atteindre :

$$H_s = V^{33} \longrightarrow (3.25)$$

Avec

H : hauteur de l'ouvrage

B_m : largeur moyenne de la brèche

B : largeur au sommet de la brèche

d : profondeur de la brèche

il propose

$$B/d = 0.4 H_s/H \longrightarrow (3.26)$$

$$Q_{\max} / (g B_m^2 H^3)^{0.5} = 0.0125 H_s/H \longrightarrow (3.27)$$

$$T(g/H)^{0.5} = 1.5 H_s/B_m \longrightarrow (3.28)$$

L'étude du développement de la brèche dans les ouvrages en remblai pour différents mécanismes de rupture révèle une forme de brèche triangulaire ou trapézoïdale de largeur moyenne :

$$B = 9.5 K_0 (VH)^{0.25} \longrightarrow (3.29)$$

La brèche se développant en un temps T :

$$T = 0.59^{0.47} H^{0.9} \longrightarrow (3.30)$$

Avec :

B : largeur moyenne de la brèche (m)

T : durée de formation de la brèche (h)

V : volume d'eau dans la retenue (m³)

H : hauteur d'eau de la retenue (m)

K₀ : coefficient égal à 1 pour une rupture par submersion et égal à 0.7 pour une rupture par érosion interne

On obtient alors le débit maximal (m³ /s) par la formule suivante :

$$Q_{\max} = 3.1B \frac{C}{T + C\sqrt{H}} \longrightarrow (3.31)$$

$$Q_{\max} = 23.4 * A/B \longrightarrow (3.32)$$

Où A est la surface au miroir du réservoir à l'élévation du sommet du barrage (m²).

Les formules de Froehlich (3.33), (3.34), (3.35) établies pour les barrages en remblai en étudiant 63 cas réels proposent :

$$B_m = 0.1803 K_0 V^{0.32} h_b^{0.19} \longrightarrow (3.33)$$

$$Z_0 = 0.9$$

$$T = 0.00254 V^{0.53} h_b^{0.9} \longrightarrow (3.34)$$

Où

V: volume de la retenue

K₀: égal à 1.4 pour un déversement sur la crête et égal à 1 dans les autres cas.

Le débit maximal de l'onde de crue est donné par la formule suivante :

$$Q_p = 0.607 V_w^{0.295} h w^{1.24} \longrightarrow (3.35)$$

4.6. Les avantages et les inconvénients de modèle HEC RAS

4.6.1. Les avantages

HEC-RAS a des mérites, notamment son soutien par le corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis (US Army Corps of Engineers), les futures améliorations en cours, et son acceptation et validé par de nombreux organismes gouvernementaux (laboratoire de recherche) et les entreprises privées.

Outil polyvalent et complet :

- ✓ Capable de modéliser en 1D pur, 2D pur et couplage 1D/2D
- ✓ Génération du maillage, modélisation, présentation des résultats, ...
- ✓ Très bonne représentation des ouvrages hydrauliques, modulable et proche de la réalité
- ✓ Modélisation précise du lit mineur (conservation de la précision des levés topographiques)

HEC-RAS travaille à une échelle plus fine que la maille et produit des résultats plus précis qu'un autre modèle pour un même nombre de mailles

- ✓ Le téléchargement direct de HEC comprend une documentation complète,

4.6.2. Les inconvénients

Les utilisateurs peuvent trouver des problèmes :

- ✓ Sensible aux instabilités ;
 - ✓ Plus grands risques d'incohérences dans les résultats du fait du couplage ;
 - ✓ Nécessité de disposer d'une topographie précise (type LIDAR ; LAND) ;
 - ✓ Gourmand en temps de calculs.
 - ✓ Représentation simplifiée et limitée des ouvrages hydrauliques pour le modèle 2D ;
 - ✓ Peu adapté à des écoulements complexes et multidirectionnels en lits majeurs pour le modèle 1D.
- ✓ Certaines fonctionnalités en 1D ne sont pas encore disponibles en 2D comme la modélisation du transport de sédiments ou de la qualité de l'eau et la présentation des ouvrages hydraulique.

5. Le Système d'Information Géographique (SIG)

5.1. Définition et objectifs

Pour définir un SIG, il existe de nombreuses définitions. Deux options sont possibles, la première est d'insister sur les finalités de l'outil, la deuxième est de mettre exergue ses fonctionnalités. La première est une définition issue des utilisateurs, l'autre est la définition des producteurs. Si l'on se focalise sur les fonctionnalités, selon Denégre et Salgé, un SIG doit pouvoir répondre à cinq questions : Où ? Les objets doivent y être localisés ; Quoi ? Les objets y sont définis (bâtis, forêts, cours d'eau...) ; Comment ? Les relations entre les objets doivent pouvoir être déduites (c'est de l'analyse spatiale) ; Quand ? Les données doivent pouvoir être mises à jour et les historiques conservés ; Et si ? Il doit être possible d'y effectuer des simulations. Un SIG est de ce fait un outil complet de connaissance, d'aide à la décision et de communication. Il ne peut être réduit à sa seule dimension de logiciel, même si dans le langage courant, c'est assez souvent le cas. Un système d'information géographique, est un système permettant d'informatiser des informations localisés au au sein de l'espace géographique dans le but de pouvoir les structurer, les rassembler, les gérer, les présenter et les analyser. Les informations recueillies sur le terrain vont ainsi être représentées et géolocalisées en « couche d'informations spatiale » et en « données alphanumériques » constituant une base de données. Son objectif : faciliter la compréhension des territoires, et mettre en exergue les enjeux et contraintes qui y sont liés. Une aubaine pour les collectivités, qui peuvent alors établir des stratégies de gestion de risque en partant des données analysées. Le tout, grâce à une interprétation fine de données cartographiques et à leur mise en perspective dans des stratégies de gestion patrimoniale.

De nombreux outils sont intégrés au SIG, afin de pouvoir travailler avec les données géographiques. Les utilisateurs disposent de trois volets pour afficher et manipuler les informations

- ✓ La Géodatabase
- ✓ Le Géotraitement
- ✓ La Géovisualisation

❖ **La Géodatabase** : comportent un modèle d'informations complet permettant de représenter et de gérer des informations géographiques. Ce modèle d'informations complet est mis en œuvre sous forme d'une série de tables contenant des classes d'entités, des jeux de données raster et des attributs. En outre, des objets de données SIG avancés ajoutent un comportement SIG, des règles de gestion de l'intégrité spatiale, et des outils permettant d'utiliser de nombreuses relations spatiales entre les principaux jeux de données : entités, rasters et attributs.

❖ **Le Géotraitement** : Ce volet est un outil de géotraitement exécuté sur un serveur et dont l'exécution, ainsi que les sorties, sont gérées par le serveur. Lorsque vous partagez un résultat de géotraitement en tant que service de géotraitement, une tâche de géotraitement correspondante est créée par l'outil qui a généré le résultat. Le terme « tâche » est utilisé par les applications sur l'internet pour décrire des routines exécutées sur un serveur et qui renvoient des résultats.

❖ **La Géovisualisation** : un SIG est un ensemble de cartes intelligentes et de vues qui montrent des entités et leurs relations à la surface de la terre. Il est possible d'élaborer différentes vues cartographiques des informations géographiques sous-jacentes, qui s'utilisent comme des fenêtres ouvertes sur la base de données, afin d'effectuer des requêtes, des analyses et de modifier les informations.

D'une manière générale en analyse de risque d'inondation, les SIG sont beaucoup sollicités pour la représentation cartographique les zones inondables. Par ailleurs, le SIG rend possible la mise à jour des données pour suivre une évolution spatio-temporelle d'un problème de risque d'inondation. Dans le champ plus spécifique, les SIG sont notamment utilisés dans le processus d'évaluation de l'exposition des personnes au risque d'inondation. Ils permettent de préciser la délimitation spatiale de la zone étudiée (à l'aide des données d'occupation du sol), d'identifier des sources et des voies d'exposition potentielles (industries, principales infrastructures routières, agriculture, etc.) Enfin, il peut être très utile comme outil d'aide à la décision dans le cadre d'une procédure de gestion des alertes. Il permet la synthèse des données de gestion de crise pour une compréhension rapide des enjeux et une prise des décisions plus juste et éclairées. Ils sont très utilisés comme outil d'aide à la décision dans des domaines très variés (urbanisme, planification, environnement,...) dans la mesure où ils permettent la gestion et l'analyse de l'information spatiale.

5.2. Les domaines d'application de SIG

Le principe d'un SIG consiste à organiser les données en couches discrètes alignées les unes par rapport aux autres (géoréférencées) dans l'espace géographique. Le SIG permet de générer dans des délais raisonnables, des produits cartographiques : cartes, tableaux, graphes pouvant permettre de répondre à certaines questions essentielles et pratiques de gestion et de planification. Les utilisations possibles des SIG sont tellement nombreuses qu'il est difficile de les décrire autrement que par une liste interminable de types de tâches (inventaire, évaluation, gestion, planification, ...), de thématiques (gestion municipale, aménagement, gestion de réseau, défense, ...), de types d'organisations susceptibles de les utiliser (administration, collectivités, sociétés privées,

groupes de citoyens...) Il comprend des outils de saisie, de stockage, d'analyse et d'affichage de données spatiales. Les principales fonctions d'un SIG sont résumées comme suit :

- ✓ l'analyse spatiale
- ✓ la gestion de données et de bases de données géographiques
- ✓ Le Tourisme (gestion des infrastructures, itinéraires touristiques)
- ✓ Le marketing (localisation des clients, analyse du site)
- ✓ La planification urbaine (cadastre, voirie, réseaux assainissement)
- ✓ La protection civile (gestion et prévention des catastrophes)
- ✓ Le transport (planification des transports urbains, optimisation itinéraires)
- ✓ L'hydrologie
- ✓ Les forêts (cartographie pour aménagement, gestion des coupes et sylviculture)
- ✓ La géologie (cartographie, aléas, amiante environnemental, prospection minière)
- ✓ La biologie (études du déplacement des populations animales)
- ✓ Les télécoms (implantation d'antennes pour les téléphones mobiles)
- ✓ Génie civil et hydraulique (cartographie des zones inondable)

5.3. Les composants du SIG

Un SIG peut être constitué d'un ensemble de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques, et de personnel capable de saisir ou exploitants de l'outil et des méthodes qui se traduisent par le respect des règles et procédures propres à chaque organisation (Zerouali 2005)

✓ **Ressources humaines** : Les SIG s'adressent à une très grande communauté d'utilisateur depuis ceux qui créent et maintiennent les systèmes jusqu'aux personnes qui utilisent quotidiennement la dimension géographique.

✓ **Matériel** : le développement de l'informatique graphique a permis d'utiliser les SIG dans une grande variété d'ordinateurs connectés en réseau ou autonomes.

✓ **Logiciel** : plusieurs fonctionnalités sont offertes par les logiciels SIG.

✓ **Données** : les SIG manipulent des données géographiques et des données tabulaires associées pouvant être constituées en interne, ou acquises depuis les producteurs de données.

✓ **Processus** : Le succès de la mise en application d'un SIG est fonction de la bonne conception du plan de sa mise en œuvre selon des méthodes et des pratiques propres à chaque organisation



Figure.3.5 : Composantes d'un SIG (d'après [ESRI, 1990](#))

Un SIG contient plusieurs couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie ; chaque couche contient des objets de même type (point ; puits, regard, ligne ; routes, cours d'eau, polygone ; bâtiments, limites de communes) et chaque objet est constitué d'une forme (géométrie de l'objet) et d'une description. La figure (3.6) montre un exemple d'organisation du SIG en couches d'information : les villages, les routes et les infrastructure. Ce concept, à la fois simple et puissant a prouvé son efficacité pour résoudre de nombreux problèmes concrets.

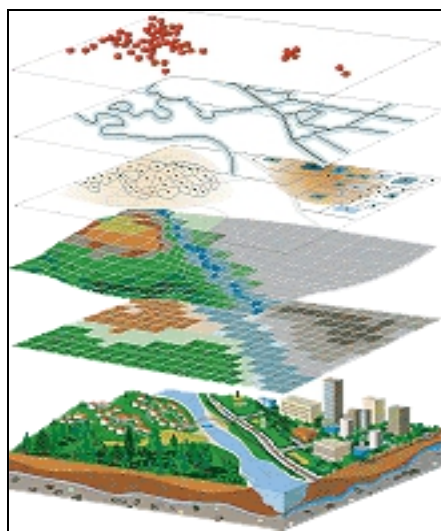


Figure.3.6. Organisation des couches d'information dans le SIG. ([source ESRI](#))

5.4. Les fonctionnalités du SIG

Les SIG comportent des fonctions de saisie des données géographiques (Acquisition), de gestion de ces données (Archivage), de manipulation, de croisement et de transformation de ces données spatiales (Analyse) et de mise en forme des résultats (Affichage). En tant que système d'information, un SIG réalise une certaine modélisation du monde réel. Il comporte pour cela des outils permettant cette abstraction de la réalité (Abstraction). Ces fonctions constituent ce qu'on appelle communément les « 5 A ».

✓ **L'acquisition des données** : ensemble de fonctions permettant de saisir des données géographiques suivant différentes sources.

✓ **L'archivage des données** : stockage de l'ensemble des données dans des bases de données aptes à contenir des données géoréférencées et sémantiques.

✓ **L'abstraction des données** : modélisation des données géographiques au niveau des bases de données et de l'échange des données.

✓ **L'analyse des données** : analyse fournissant un ensemble de fonctions telles que le croisement, la transformation, la manipulation pour pouvoir ressortir de nouvelles informations.

✓ **L'affichage des données** : interface entre l'utilisateur et le cœur du système pour présenter des graphismes, des données et informations relatives à l'information géographique.

Un SIG répond à 5 A présentent de multiples apports pour la collectivité, en interne (données fiables et adaptées à la vision du territoire des décideurs), avec les partenaires (informations partagées avec les gestionnaires de réseaux) ainsi qu'avec le public (renforce-ment du lien collectivité citoyens, meilleure connaissance du territoire).

5.5. Les données dans un SIG

Les données dans un SIG peuvent être identifiées par leur type, leur format et leur méthode d'acquisition.

5.5.1. Les types de données dans un SIG

✓ **Données factuelles** : un SIG doit permettre la manipulation des données de nature alphanumérique liées aux concepts géographiques, des noms de lieux, des valeurs numériques comme la population, les surfaces etc.

✓ **Données géométrique** : liées à la spécialisation des concepts dans un univers réel à deux ou trois dimensions, et sa représentation devient tributaire d'un système de coordonnées (référentiel) et de son environnement (relation spatiale), grâce à des primitives de représentation des informations géométriques.

5.5.2. Les modes de données dans un SIG

Un SIG permet de visualiser et d'analyser des données géographiques de deux modes principaux :

✓ **mode raster** : permet de stocker l'information géographique dans des cellules contiguës généralement carrées. Ces cellules des images numériques sont donc l'unité élémentaire appelée pixel (contraction de picturale élément). Chaque pixel possède une valeur qui traduit une couleur (photographies ou scannées), ou une énergie électromagnétique captée dans un domaine de longueur d'onde à partir d'un satellite (Figure.3.7). Ce mode décrit la totalité de la surface cartographique point par point. Il est utilisé principalement dans les systèmes à balayage (capteurs en télédétection, images satellites, photographies aériennes, cartes scannées, etc.). Il a l'avantage qu'il présente une meilleure adaptation à la représentation des détails surfaciques. Tandis qu'il a les inconvénients de la mauvaise adaptation à la représentation des détails linéaires (obligation de parcourir toute la surface pour extraire un détail) et l'impossibilité de réaliser certaines opérations topologiques (la recherche du plus court chemin dans un réseau par exemple)

✓ **Mode vecteur:** qui correspond à une simplification du monde réel en objets graphiques auxquels sont reliées des informations descriptives plus ou moins complexes. Dans ce mode, chaque thème du territoire (réseau hydrographique, réseau routier, villes, parcelles agricoles, etc.) est représenté sous forme d'une couche thématique au format vecteur. Le type de forme qui représente en général une parcelle (et tous les objets surfaciques) est un polygone, mais il est aussi possible de représenter les objets géographiques sous forme ponctuelle (points de prélèvements, arbres, bâtiments ...) ou linéaire (réseau routier, réseau hydrographique, système d'irrigation, haie, ...). Les types de représentations graphiques (point/ligne/polygone) ne sont jamais mélangés dans une même couche. Ce mode présente les avantages qu'il a une meilleure adaptation à la description des entités ponctuelles et linéaires, une facilité d'extraction de détails et une simplicité de transformation de coordonnées. Tandis qu'il a l'inconvénient de la difficulté de croisement des couches d'information. Le mode vecteur est le plus utilisé en cartographie. Nous supposons dans tout ce qui suit que les données sont exprimées dans ce mode. Dans la figure.3.7, une représentation des deux modes est présentée.

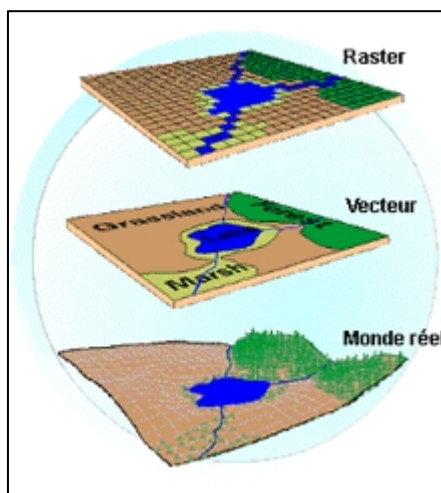


Figure.3.7. Deux différents types de modèles géographiques ([source ESRI](#))

5.5.3. Les méthodes d'acquisition

L'obtention des données spatiales consiste au rassemblement de différentes sources permettant la saisie des données dans le but de leurs intégrations dans un SIG. Dans la pratique, les données géographiques proviennent de sources différentes, ont des modes d'acquisition différents, sont sur des médias différents. Certaines données sont directement mesurées sur le terrain (levés topographiques) ou captées à distance (système de positionnement Global GPS, photos aériennes, images satellitaires), ou saisies à partir de cartes ou de plans existants, ou récoltées par des organismes de production de données et ensuite importées.

6. Modèle numérique de terrain (MNT)

Le Modèle numérique de terrain (MNT) est certainement l'information centrale pour la modélisation hydraulique. Elle détermine les directions, les intensités et les modes d'écoulement de l'eau en surface ainsi que les temps d'arrivée jusqu'aux exutoires. Sa représentation numérique devra donc rendre compte le plus précisément possible de ses variations spatiales dans la zone d'étude.

De tous les descripteurs de la topographie, c'est celui de l'altitude qui est le plus fondamental. Il permet de dériver la plupart des autres indicateurs morphologiques du terrain tels que les pentes et

leur orientation, les indices de forme et les bassins versants. La représentation numérique des variations de l'altitude dans la zone d'étude est appelée modèle numérique de terrain (MNT); il est produit par des techniques d'interpolation appliquées à des données relevées généralement sur des documents tels que les cartes topographiques.

6.1. La construction du modèle numérique de terrain

Les éléments à considérer pour la réalisation d'un modèle numérique de terrain sont sa structure, la nature et le contenu des sources d'information disponibles, ainsi que le choix de la procédure d'interpolation adaptée aux sources et à la finalité du MNT.

On peut distinguer les MNT selon le type de maillage utilisé :

- ✓ maillage régulier carré (raster),
- ✓ maillage triangulaire régulier,
- ✓ maillage triangulaire quelconque (TIN)

La qualité d'un MNT dépend directement de l'intervalle du maillage et de la source des données à partir desquelles il est généré.

La construction peut se faire de plusieurs manières :

- ✓ Interférométrie radar,
- ✓ Stéréoscopie à partir de couples d'images aériennes (photogrammétrie) ou prises par satellite, par numérisation des courbes de niveau d'une carte,
- ✓ Saisie directe des coordonnées (x, y, z) des points du terrain, mesurées par triangulation (géomètres) ou lasergrammétrie (technique permettant de capturer les coordonnées d'un point en x, y, z au moyen d'un laser),
- ✓ Système laser aéroporté (LIDAR).

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appris l'essentiel sur les outils de modélisation hydraulique et le système d'information géographique, de gestion de base de données, les équations employées pour conceptualiser la propagation des crues de ruptures, et sur la façon dont ces instruments contribuent à l'élaboration et à la coordination des plans de risque d'inondation. Afin de comprendre les risques de inondation, il est nécessaire de visualiser et d'évaluer la vulnérabilité, ce qui implique l'acquisition de données actualisées et cohérentes (cartes). Au vu des efforts continus en matière de prévention, il a été démontré que la modélisation hydraulique, et l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) en particulier, font partie des outils les plus fiables pour déterminer les zones inondables et l'amélioration de la gestion des risques d'inondation. Comme nous l'avons déjà écrit, un SIG est bien plus qu'un logiciel, le SIG se réfère à tous les aspects de gestion et d'utilisation de données géographiques numériques.

Le modélisateur choisit le modèle mathématique qui, selon lui, représentera « au mieux » le système à étudier ; s'ensuit alors le choix d'un code de calcul, en réalité imposé par la pratique courante du modélisateur lui-même. Ce code de calcul réalise le traitement numérique du modèle mathématique, c'est-à-dire la résolution approchée des équations. Ce traitement repose sur des choix techniques et des simplifications qui relèvent de l'expertise du concepteur du logiciel. Le code de

calcul résout donc une sous-classe plus ou moins large des équations d'origine. Par ailleurs, un même code fondé, par exemple, sur les équations de Saint-Venant peut être utilisé pour simuler différentes rivières, caractérisées par leurs données statiques, par opposition aux données dynamiques qui vont changer au cours de l'exploitation du modèle. Ainsi, pour une étude de diagnostic de digues, dans un premier temps, la bathymétrie et le profil en long de la digue étudiée constitueront des données statiques, alors que les apports de débit aux frontières de la zone d'étude sont des données dynamiques car on exploitera le modèle en jouant différents scénarios de crue qui permettront, par exemple, de déterminer l'événement au-delà duquel la digue du barrage subit un mécanisme de surverse pouvant conduire à sa rupture.

Chapitre 4 :Présentation de la Zone d'étude

1. Introduction

La grande Kabylie qui présente un relief montagneux fortement accidenté s'étale sur une superficie de 2994 Km² avec une population environ de 1 200 000 habitants, soit une densité de 400 habitants / km². Le réseau hydrographique renferme deux (02) grands bassins versants à savoir le bassin de l'Oued Sébaou et le bassin côtier. La pluviométrie moyenne de l'année en cours de la Wilaya de Tizi Ouzou a atteint 900 mm. La principale ressource en eau potable de la Wilaya est soutirée à partir de : Nappe alluviale de l'Oued Sébaou : 32 %; Ressources superficielles (barrages) : 62,5 % ; Sources superficielles, prise d'eau : 5 % ; Dessalement : 0,5 % (ANRH)

2. Présentation de la zone d'étude et caractéristiques du bassin versant de l'oued Sébaou

2.1. Situation géographique de bassin versant de l’oued Sébaou

Administrativement, la plaine alluviale du Sébaou se situe dans les wilayas de Tizi-Ouzou et de Boumerdès, à 100Km à l'Est - Sud Est d'Alger.

Le bassin versant de l’oued Sébaou appartient au Tell septentrional. Il se positionne entre les latitudes Nord 40G 50 (36°30) et 41G 00 (37°00) et les longitudes Est 01G 50 (03°30) et 2G50 (04°30), Il s’intègre dans les bassins versants côtiers Algérois de code (02), selon la nomenclature de l’agence nationale des ressources hydriques (ANRH) (Figure.1).

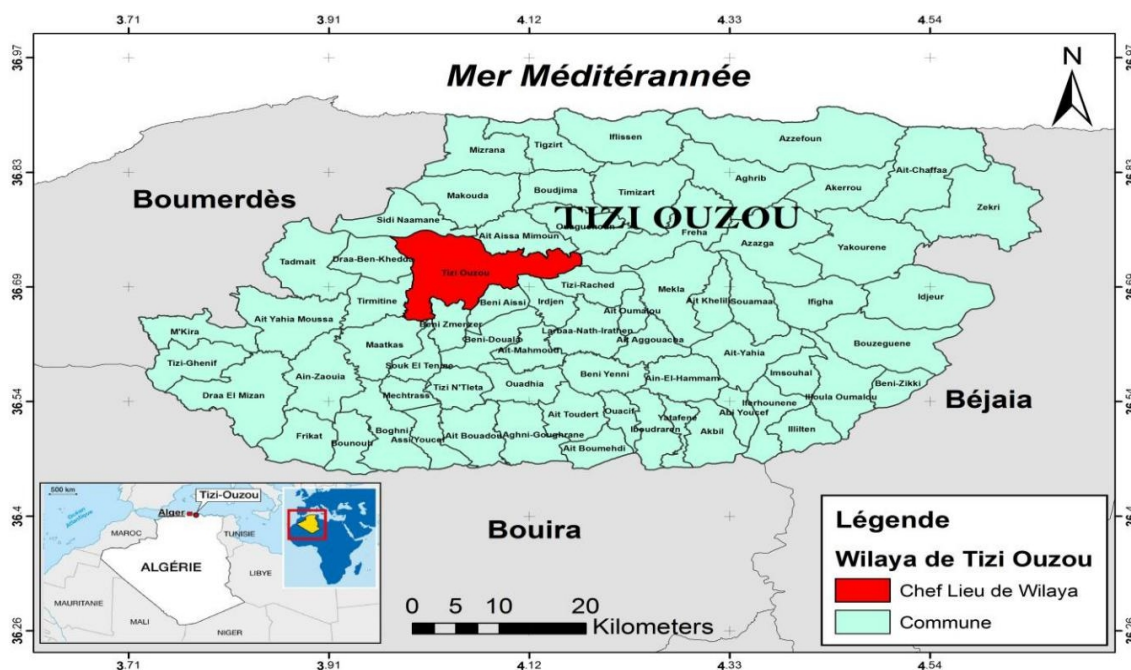


Figure 4.1. La situation géographique générale de la wilaya de Tizi Ouzou en Algérie

Il s'étend sur une superficie de 2500 km² dont 80% environ de celle-ci correspondent à la surface issue du nouveau découpage administratif de la wilaya de Tizi-Ouzou; Le bassin versant de Sébaou est caractérisé par un relief typiquement montagneux, couvrant 82% de la superficie totale, il est limité:

- ✓ Au Nord par la chaîne littorale et la mer Méditerranée.
- ✓ A l'Est, par le bassin versant de l'oued Soummam.

- ✓ A l'Ouest, par le bassin versant de l'oued Isser.
- ✓ Au sud et sud Est par la chaîne du Djurdjura (chaîne calcaire).

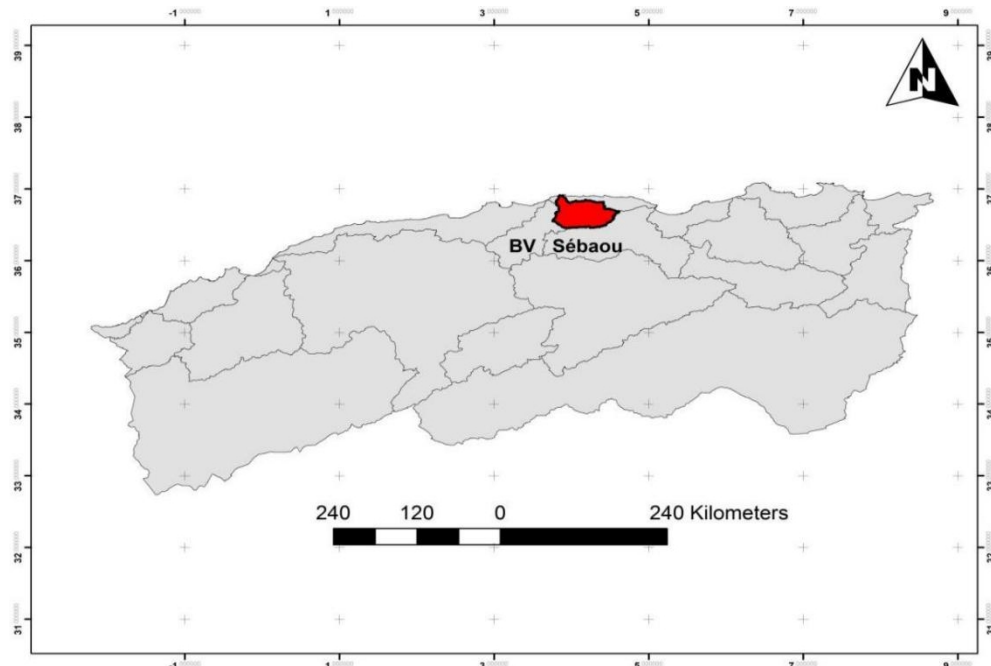


Figure 4.2. Situation géographique du bassin versant de l'oued Sébaou au sein de les grands bassins en Algérien

Pour des raisons de commodités administratives relatives à l'exploitation et la gestion de la ressource, le Bassin versant de l'oued Sébaou au même titre que la nappe alluviale est scindé en trois parties qui sont respectivement : le haut, le moyen et le bas Sébaou (Figure.4.3). L'orientation des dépôts alluvionnaires reflète les directions des écoulements de surface héritées de l'histoire géologique de la région.

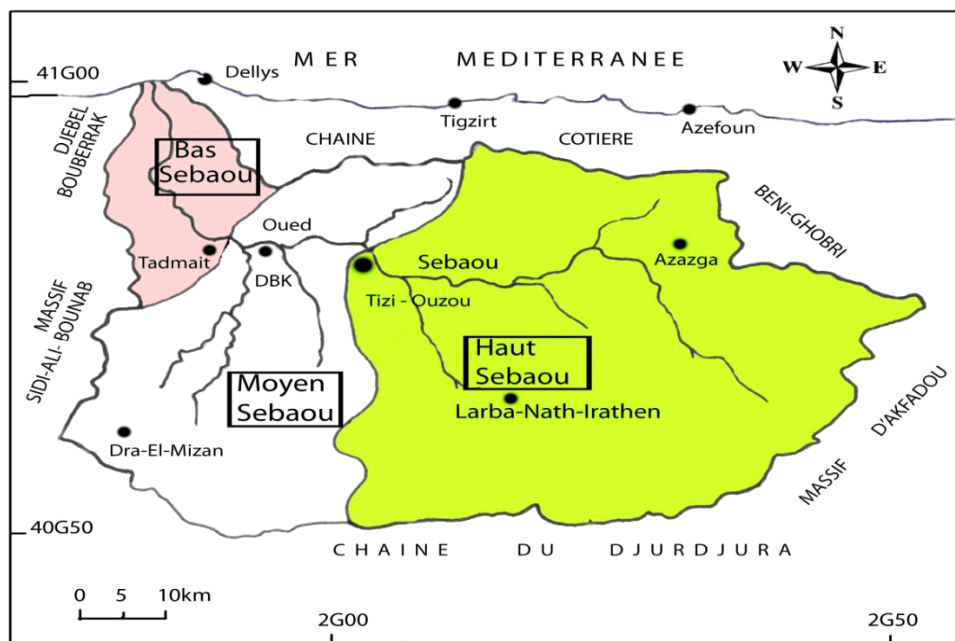


Figure 4.3. Localisation du bassin versant de l'oued Sébaou - nomenclature du découpage de la plaine alluviale (Djemai 2008)

✓ **Haut Sébaou:** S'étend de la source Acif n'Boubehir jusqu'à la cluse de Belloua ou l'oued Sébaou prend la direction NNW-SSE.

✓ **Moyen Sébaou:** Au niveau de la cluse de Belloua l'oued Sébaou forme son premier coude avec le haut Sébaou et prend une direction NE-SW,

✓ **Bas Sébaou:** L'oued marque son deuxième coude au niveau de Tadmait et empreinte la direction NNW-SSE.

2.2. Les paramètres morphométriques

Les paramètres morphométriques relatifs à la forme, le relief et l'hydrographie ont été déterminés à travers les études effectuées sur les sous-bassins versants du haut, du moyen et du bas Sébaou (DJEMAI, M. 1982,1985). Les résultats sont récapitulés dans le tableau n°4.1

Table 4.1: Paramètres morphométriques des sous-bassins versants du Sébaou

Sous-Bassins	Haut Sébaou	Moyen Sébaou	Bas Sébaou
Paramètres			
Périmètre : P (Km)	190	147	57
Surface :S (Km ²)	1432	906	172
Long. du Rect. Équivalent (km)	76	58	20
Indice de Compacité de Gravelius : K _p	1.4	1.37	1.22
Indice pente globale : I _g (%)	1,76	1,53	2.2
Altitude moyenne : H(m)	656	428	180
Densité de drainage D _d (km/km ²)	5.23	5.74	/

2.3. Hypsometrie répartition des altitudes

Les trois sous bassins versants présentent 90% de leur surface comprise entre : (30m et 470m) pour le Bas Sébaou, (150m et 1030m) pour le moyen Sébaou et (180m et 1425m) pour le haut Sébaou .

Afin de caractériser le bassin versant dans sa globalité, nous avons entrepris de déterminer ses paramètres morphométriques. Pour ce faire, nous avons utilisé les systèmes d'information géographique Arc Gis et neuf (09) cartes topographiques au 1/50.000ème dessinées et publiées par l'institut géographique national (I.G.N) pour délimiter le bassin versant, à savoir :

- ✓ Dellys, carte n°8 (1964) ;
- ✓ Tizi-Ouzou, carte n°23 (1967) ;
- ✓ Azazga, carte n°24 (1963) ;
- ✓ Djebba-Cap Sigli, carte n°25 (1965) ;
- ✓ Dra-El-Mizan, carte n°44 (1964) ;

- ✓ Larba-Nath-Irathen, carte n°45 (1961) ;
- ✓ Sidi-Aiche, carte n°46 (1959) ;
- ✓ Bouira carte n°66 (1964) ;
- ✓ Tazmalt, carte n°67 (1967)

Nous avons déterminé les dimensions du rectangle équivalent et caractérisé la forme allongée du bassin versant en calculant l'indice de compacité de Gravelius avec la formule : $K_p = 0,28 \times P \times S^{-1/2}$ (où P et S représentent respectivement le périmètre et la surface du bassin versant) .A l'aide de la méthode du carroyage Lambert, qui consiste à affecter à chaque nœud du carroyage une cote topographique, nous avons déterminé les altitudes caractéristiques (Minimale, et maximale) du bassin versant.

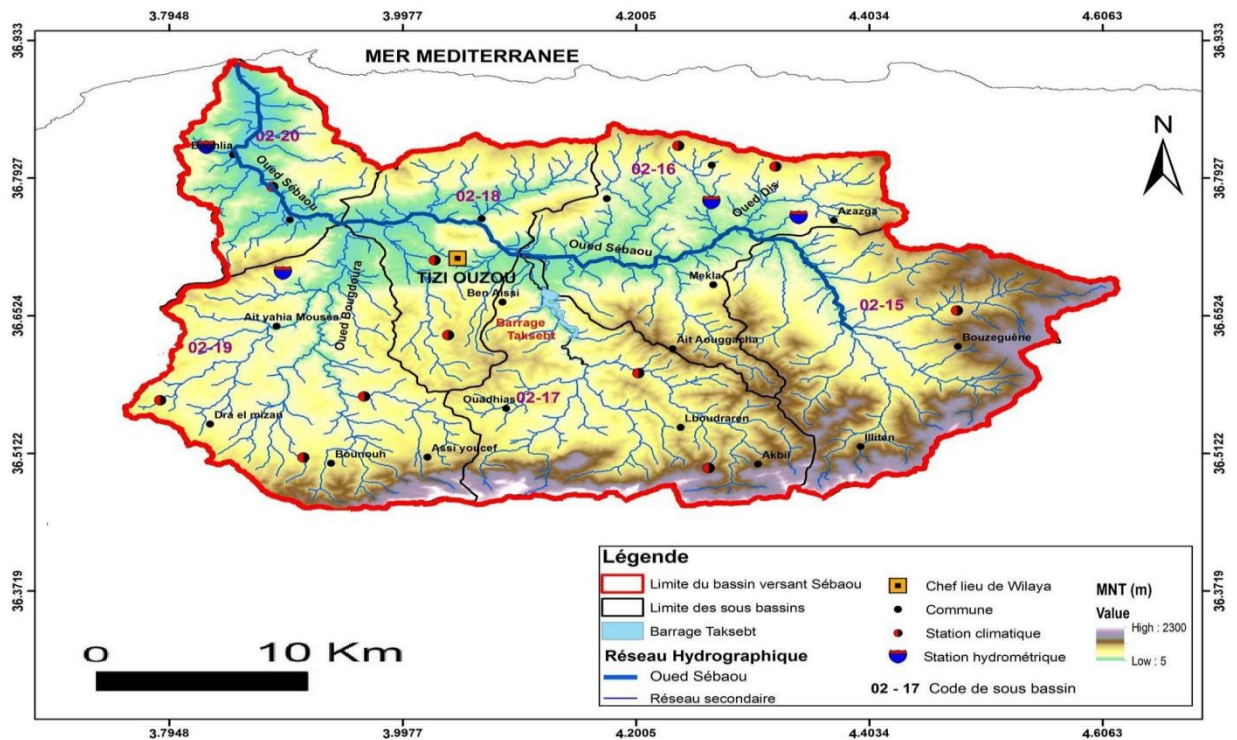


Figure 4.4. présentation du modèle numérique de terrain de la zone d'étude avec le réseau hydrographique et les principales stations hydrométéorologiques (code ANRH du bassin versant Sébaou)

La répartition des altitudes en classes (ou tranches) d'altitudes en fonction du pourcentage de surface correspondant, nous a permis de calculer l'altitude moyenne du bassin versant selon la formule :

$$\text{Altitude moyenne (Hmoy.)} = \Sigma (N_i \times h_i) / \Sigma N_i \quad (4.1)$$

et de tracer la courbe hypsométrique du bassin versant (Tableaux n°4.1 et n°4.2) (Figure.4.5).

Table 4.2: Calcul de l'altitude moyenne et tracé de la courbe hypsométrique (Djemai 2008)

Classes d'altitudes	Effectif N _i	Alt.moy.(h _i)(m)	Produit N _i x h _i	N _i cumulés	% Surf.>
0-100	158	50	7900	2547	100,00
101-200	308	150	46200	2389	93,80
201-300	306	250	76500	2081	81,70
301-400	345	350	120750	1775	69,69
401-500	293	450	131850	1430	56,14
501-600	227	550	124850	1137	44,64
601-700	224	650	145600	910	35,73
701-800	142	750	106500	686	26,93
801-900	123	850	104550	544	21,36
901-1000	89	950	84550	421	16,53
1001-1100	67	1050	70350	332	13,03
1101-1200	61	1150	70150	265	10,40
1201-1300	52	1250	65000	204	8,00
1301-1400	40	1350	54000	152	5,97
1401-1500	34	1450	49300	112	4,40
1501-1600	29	1550	44950	78	3,06
1601-1700	18	1650	29700	49	1,92
1701-1800	15	1750	26250	31	1,22
1801-1900	7	1850	12950	16	0,63
1901-2000	6	1950	11700	9	0,35
2001-2100	1	2050	2050	3	0,12
2101-2200	2	2150	4300	2	0,08

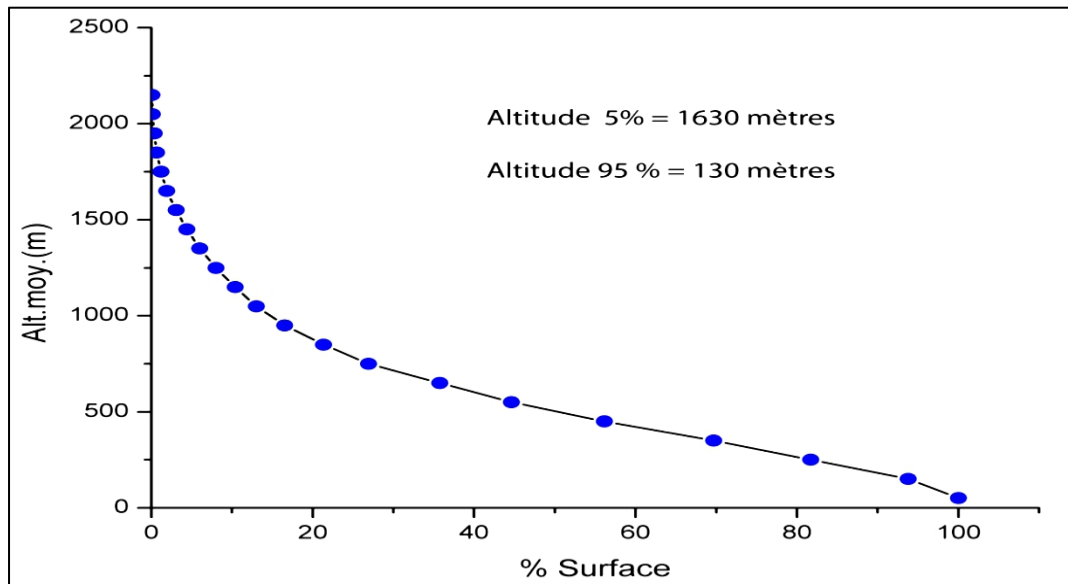


Figure 4.5. Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Sébaou (Djemai 1985)

2.4. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique représenté par le thalweg principal : l'Oued Sébaou (Figure.4.5) et ses affluents principaux : les oueds Bougdoura, Aissi, Rabta et Dis, présentent les caractéristiques ci après :

Les pentes du lit des oueds sont fortes en amont traduisant les phénomènes d'érosion et du transport des matériaux érodés, faibles en aval favorisant les phénomènes de dépôt des matériaux transportés et l'infiltration des eaux de surface permettant ainsi la réalimentation de la nappe (DJEMAI .M,1982 et 1985).

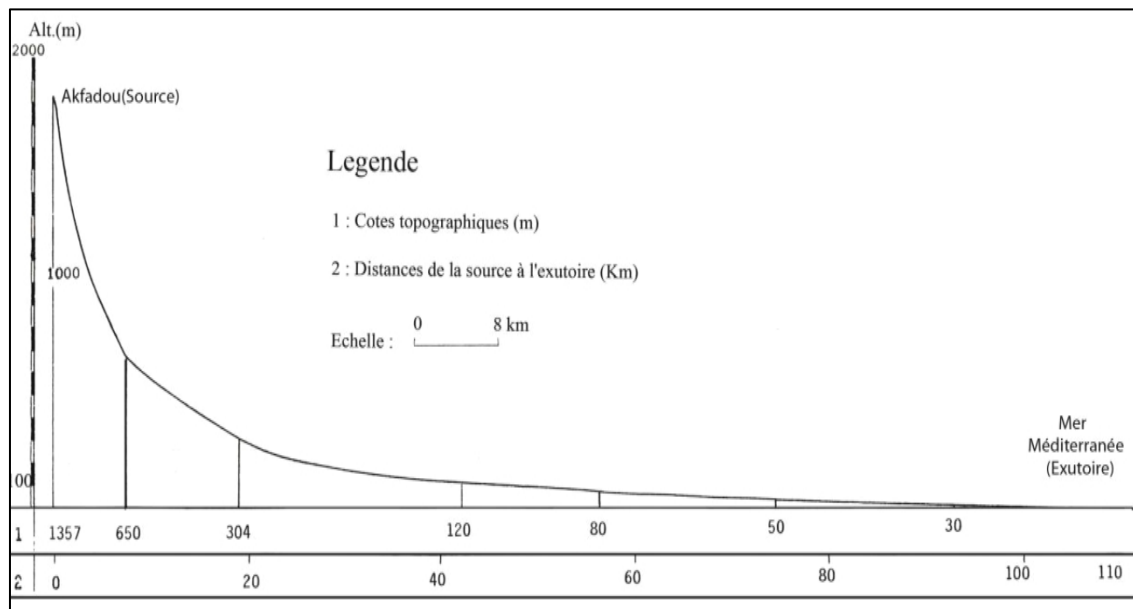


Figure 4.6. Profil en long de l'oued Sébaou (Djemai 1985)

L'étude du réseau hydrographique selon la classification de SCHUM et HORTON (Figure.4.7), nous permet de déterminer graphiquement le nombre total de thalweg de chaque ordre ainsi que sa longueur moyenne, sachant que :

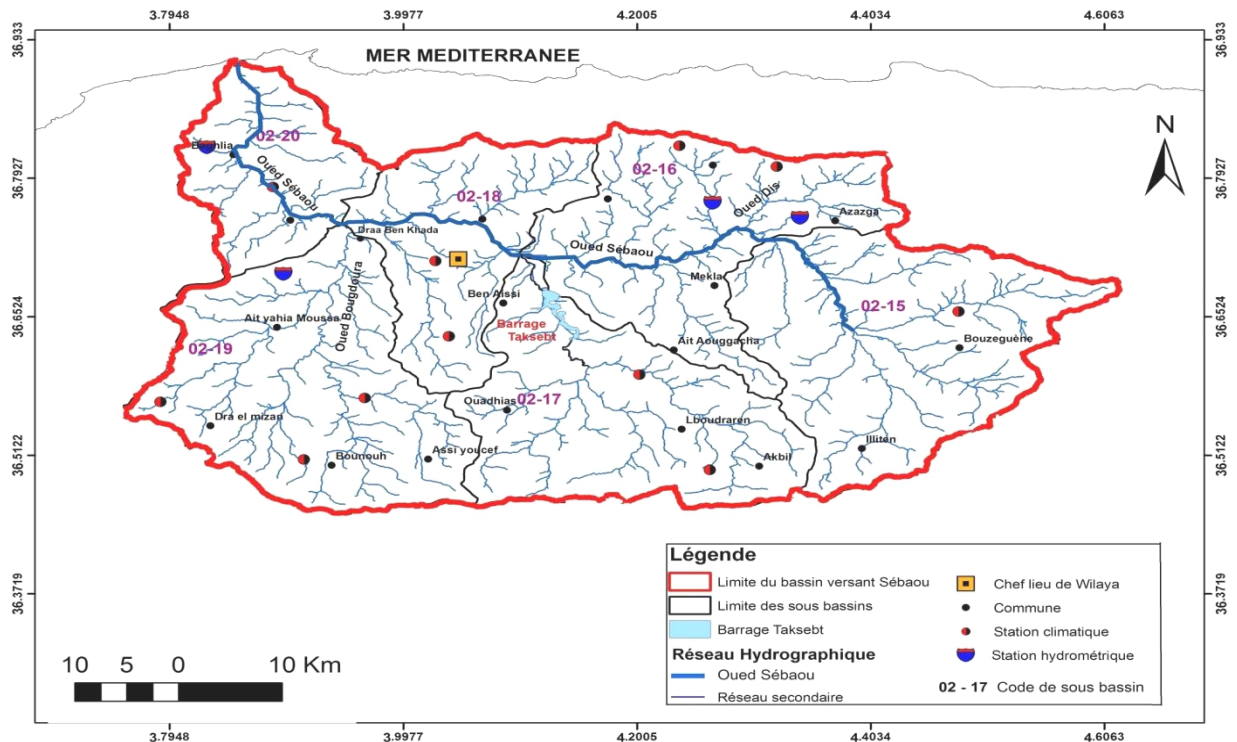


Figure.4.7. Réseau hydrographique de bassin versant de Sébaou

Le drainage très dense s'effectue par une multitude de torrents plus ou moins long. Les torrents de rive droite proviennent de la chaîne littorale au nord du bassin versant et ne dépassent pas une quinzaine de kilomètres de long. L'oued Dis qui présente le plus fort débit prend sa source au DJ Tamgout à 1278m d'altitude et débouche dans l'oued Sébaou juste après le premier coude majeur de l'oued à hauteur du village de Freha.(Djemai 1985)

Les torrents de la rive gauche naissant dans le socle de la grande Kabylie :

- ✓ L'oued Sébaou lui-même et ses deux principaux affluent sud. Prennent naissance dans la chaîne du Djurdjura.
- ✓ Les quatre torrents confluent après cinq kilomètres de parcours pour former le haut Sébaou, que les kabyles nomment Actif n'Boubhir.
- ✓ Dans la haute vallée, l'oued suit une direction SSE-NNW, jusqu'à un premier coude majeur, localisé entre Azazga et Freha.
- ✓ Dans la moyenne vallée, l'oued coule suivant une direction Est-Ouest dans le synclinal Miocène de Tizi-Ouzou.
- ✓ Dans la basse vallée, on assiste à une nouvelle orientation du tracé. Vers Tadmait l'oued effectue un nouveau coude majeur et se met à couler suivant une direction parallèle à celle de sa direction amont, pour déboucher en mer, à l'Ouest de Dellys.
- ✓ Dans cette section la terrasse la plus basse extrêmement étendue ennoie toute la plaine alluviale, l'oued n'est plus adapté à la structure géologique dans cette région, car il coupe en classe la chaîne littorale et les chaînons côtiers (Benhassaine. M, 1980).

✓ L'oued Bougdoura prend sa source à 1900m d'altitude. Le profil longitudinal très relevé dans la section amont, s'abaisse rapidement, et au contact de la plaine, s'insinue entre les inters fleuves.

✓ L'oued Aissi prend sa source à 2000m d'altitude. C'est l'affluent qui a le plus fort débit et qui est responsable des modifications du tracé du lit de l'oued Sébaou. En effet l'oued Aissi débouche dans l'oued Sébaou juste en amont des gorges du Belloua.

✓ L'oued Sébaou débute à l'Est de la chaîne du Djurdjura par l'intermédiaire de quatre torrents qui naissent entre le col de Tirourda à 22000m d'altitude et le col de Chellata à 2100m d'altitude.

2.5. Occupation des sols dans la vallée de l'oued Sébaou

La connaissance de l'occupation du sol a un intérêt pour la modélisation hydraulique dans la mesure où elle fournit une indication quant à la rugosité de la surface du sol; celle-ci ayant une influence considérable sur les modalités du ruissellement et des écoulements de l'eau en surface. A ce point de vue, les images satellitaires et le SIG sont une source d'information potentiellement riche. Il est relativement aisé de distinguer les zones de végétation des autres occupations, ainsi que d'exprimer de manière relative la densité du couvert végétal par la production d'indices de végétation (Abednego, et al 1990). Le potentiel des images satellitaires n'est pas seulement lié à la production automatisée, d'une telle information numérique et spatiale sur la rugosité, mais bien plus à la fréquence d'acquisition. Cette dernière permet de prendre en compte dans la modélisation hydraulique les modifications temporaires ou permanentes de cette rugosité de surface, donc de l'occupation du sol. (Caloz, R., et al 1986)

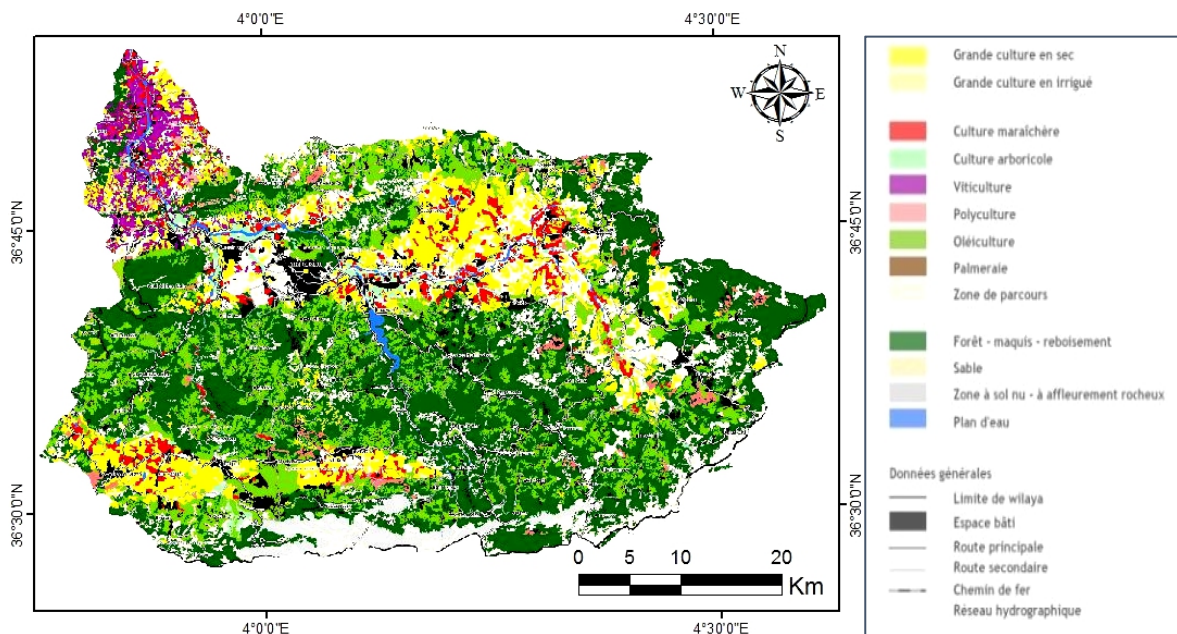


Figure 4.8. Carte d'occupation du sol du bassin versant de l'oued Sébaou, assemblage des cartes de l'INSID 2011 (source: Ministère de l'agriculture et du développement rural)

2.5.1. Le couvert végétal

Le couvert végétal joue un rôle extrêmement important, dans la protection des sols contre l'érosion par son action atténuante des crues et des averses particulières, en réduisant et en freinant le ruissellement superficiel.

La végétation de la région d'étude est de type méditerranéen, caractérisée dans son ensemble par trois étages bioclimatiques bien distincts :

➤ **Les cultures:** elles sont concentrées dans les plaines et représentées par l'arboriculture et les superbes champs des cultures maraîchères, auxquelles s'ajoutent laurier rose et le roseau dominant les zones incultes et inondables.

➤ **Les maquis :** caractérisent en particulier les zones intermédiaires, constituées essentiellement de très denses champs d'oliviers et de petites parcelles de figuiers (îlot de Aissa Mimoune) et par quelque peuplement de chêne liège (la chaîne littorale) et de chêne vert, complétés par une végétation arbustive assez basse qui reflète l'état de dégradation de la végétation dans la région.

➤ **Les forêts :** occupent les zones montagneuses et représentées généralement par le chêne vert, le chêne liège et le pin d'alepe.

3. Les précipitations

Les précipitations constituent la composante fondamentale de l'hydrologie et la connaissance de cet apport d'eau au sol est essentielle pour appréhender l'état des réserves en eau du sol, la recharge des nappes et le régime des cours d'eau.

Le bassin versant du Sébaou reçoit en général deux formes de précipitation bien distinctes :

- la pluie: forme la plus répandue dans tout le bassin versant ;
- la neige: forme la plus localisée dans le temps et dans l'espace, se produit principalement sur les reliefs montagneux du Djurdjura au sud, la chaîne littorale au nord.

L'utilité avantageuse de la neige apparaît surtout dans l'écoulement, est qu'elle le ralentit relativement et laisse le sol s'imbibber d'une façon continue et donc l'eau a largement le temps de s'infiltrer.

Malgré cet intérêt indéniable qu'elle apporte aux ressources en eau, la neige reste le facteur le moins étudié dans le bassin du Sébaou en l'absence de stations d'observation appropriées en hautes montagnes (pluviomètre totaliseur, nivometre, planche à neige).

3.1. Variation annuelle des précipitations

A partir des données relatives aux stations de Tizi Ouzou, Makouda, Bouassem, Draa El-mizan et Draa Ben Khedda nous avons construit le graphique des variations inter-annuelles des précipitations sur lequel nous remarquons une évolution en dents de scie de la pluviosité au niveau de ces stations durant la période allant de 1984/1985 à 2003/2004. Nous constatons :

Depuis l'année hydrologique 1988/1989; les apports en quantité de pluie annuelle ne cessent de diminuer jusqu'à l'année hydrologique 1997/1998 où on a enregistré une nette augmentation des précipitations qui ont atteint 1103.4mm.

Après 1998; à nouveau; un cycle de baisse de la pluviosité reprend et durera jusqu'à l'année 2001/2002 dont seulement 641.8mm de pluie ont été enregistrés.

Au cours de l'année 2002/2003; une nouvelle augmentation des précipitations a été enregistrée pour atteindre exceptionnellement 1217.5mm.

Sur un autre plan; le diagramme de la figure 4.9 établi à partir des données pluviométriques enregistrées au niveau des stations de Tizi Ouzou, Makouda, Bouassem, Draa El-mizan et Draa Ben Khedda montre que les variations inter-annuelles des précipitations durant la période s'étalant depuis 1979 à 2008 sont assez concordantes.

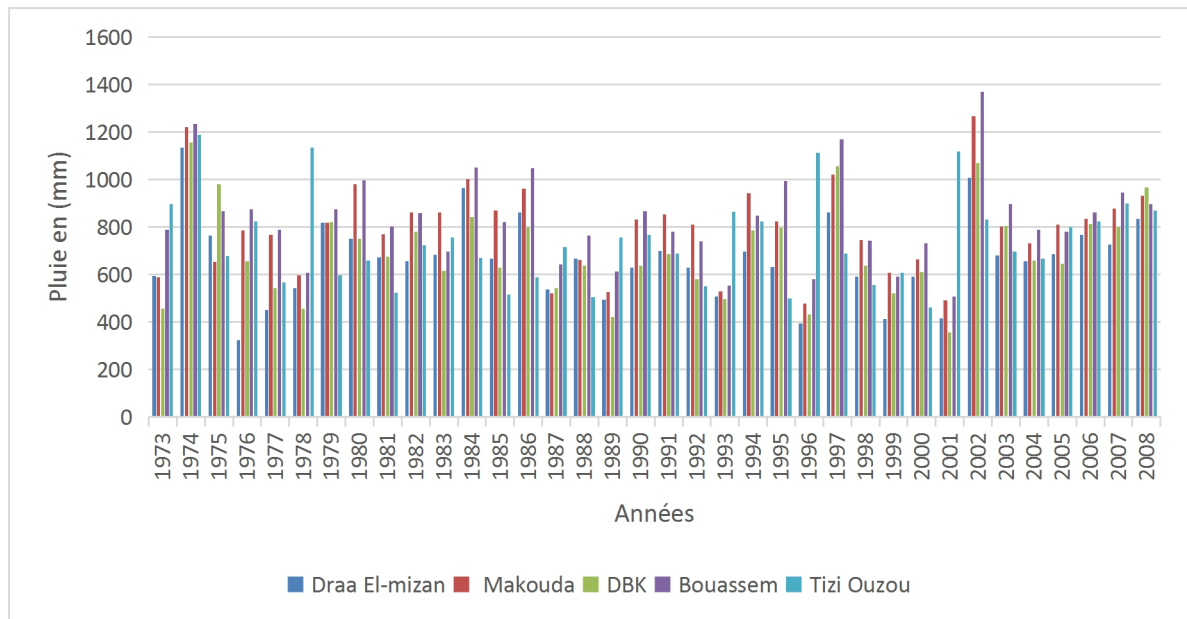


Figure 4.9. Précipitations annuelle du Bassin versant du moyen Sébaou

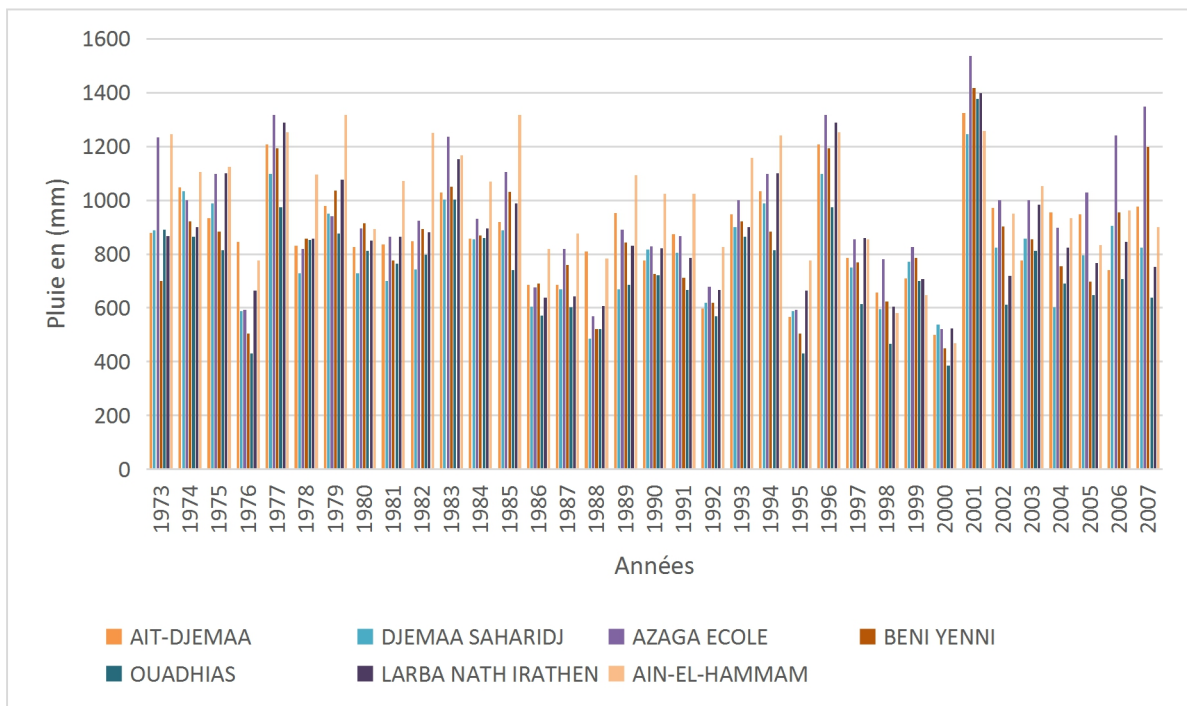


Figure 4.10. Précipitations annuelle du bassin versant du haut Sébaou

4. Les barrages dans la zone d'étude

4.1. Barrage de Taksebt

Le barrage Taksebt est située à 10km à l'est de la ville de la wilaya de Tizi-Ouzou, il collecte les eaux de Oued Aïssi qui est un effluent du Sébaou, (Figure 4.10). Les travaux de construction du barrage ont débuté en 1993 et se sont achevés vers Janvier 2002, date de première mise en eau. Il s'agit d'un barrage en terre, avec une digue zonée.

L'implantation du barrage a résulté de l'analyse des diverses conditions, notamment topographiques, géologiques et géotechniques. L'ouvrage est voué à l'alimentation en eau potable (AEP) et industrielle de la région de Tizi-Ouzou, et assure également un transfert de l'eau vers les régions Est d'Alger et Boumerdès.

- ✓ 118 Hm³ pour l'alimentation en eau potable des wilaya d'Alger et de Boumerdès ;
- ✓ 57 Hm³ pour l'alimentation de la ville de Tizi-Ouzou et des localités : Azazga; Freha; Draa Ben Khedda ; et Tadmait.

Les Principales caractéristiques du barrage se résume dans ce qui suit (source ANBT) :

- ✓ Capacité initiale : 175 Hm³ .
- ✓ Capacité au dernier levé (2004) :181,02 Hm³ .
- ✓ Apport moyen annuel : 196 Hm³ .
- ✓ Envasement moyen annuel : 0,27 Hm³ /an.
- ✓ Surface du bassin versant : 448 km².
- ✓ Pluie moyenne annuelle : 960 mm.

La photo satellite suivante prise par Google Earth montre une cuvette assez allongée, situé dans une zone montagneuse accidentée.



Figure 4.11. Photos satellite du lac et la digue du barrage Taksebt (source Google Earth)

4.2. Barrage de Souk N' Tleta

Le site du futur barrage de Souk N'Tlata se trouve dans la région de Tadmaït. Ce barrage en remblai zoné à noyau argileux, sera d'un volume d'eau de 150 millions de m³, soit une capacité de stockage qui ne sera pas trop loin de celle du barrage de Taksebt qui est de 180 millions de m³. Le barrage de Souk N'Tlata sera installé sur un important affluent de l'Oued Sébaou et qui est l'Oued Bougdoura, à 8 km au sud de la commune de Draa Ben Khedda dans la province de Tizi Ouzou, afin de fournir d'eau d'irrigation et d'eau potable aux régions de Tizi Ouzou et Boumerdès.

Le barrage sera réalisé par une digue en matériaux meubles qui aura une hauteur de 95 m environ au-dessus de la fondation du noyau central étanche. Au niveau de la retenue normale (RN.) fixée à 122.00 NGA la cuvette retiendra 89.5 millions de m³.

Une digue de col, haute environ 20 m, sera réalisée pour barrer la dorsale en rive gauche. [\(LOMBARDI ENGINEERING\)](#)

La réception du projet du barrage de Souk Tleta prévu pour 2020 sera repoussé à 2021, en raison des contraintes techniques a annoncé, par le directeur de l'agence nationale des barrages et des transferts [\(ANBT\)](#).



Figure 4.12. Situation générale du **barrage** Souk N' Tleta et du reservoir [\(source ANBT\)](#)

5. Conclusion

En terme de risques, la plupart des sites retenus montrent la présence simultanée de plusieurs aléas naturels. Les exemples pris dans la région d'Oued Aissi; Draa ben Khedda et Tadmaït sont particulièrement représentatifs de cette situation « multirisques ». L'inondation reste cependant partout le phénomène dominant. Sur un même territoire, elle s'exprime parfois de différentes façons. Ainsi au niveau de la commune De Drâa ben Khedda, les inondations sont à la fois lentes (lorsqu'elles Proviennent de la rupture de barrage) et torrentielles (quand elles sont liées au

débordement de l'oued Sébaou et ses affluents: l'oued Bougdoura et l'oued Sebt.). en plus les débordements des rivières se combinent à ceux du réseau d'assainissement pluvial.

Enfin on notera que pratiquement tous les terrains étudiés connaissent des contraintes géographiques importantes, en dehors du caractère inondable du site (exception faite pour les exemples de l'oued Aissi). L'extension urbaine est souvent limitée, soit par une zone industrielle, ou la topographie (les falaises du Pont de bougie), soit par le passage d'une rivière qui coupe le territoire en deux (DBK, Sidi Naâmane), soit par des infrastructures hydrauliques.

Chapitre 5 : Modélisation des risques naturels d'inondation dans le haut et le moyen de Sébaou (Cas de la rupture du barrage Taksebt et du débordement de l'oued Sébaou et de ses affluent les oueds Bougdoura et Sebt)

1. Introduction

Dans ce chapitre, on projette les concepts présentés dans les chapitres précédents sur deux scénarios réels : ayant trait respectivement à la rupture du barrage Taksebt, et au débordement de l'oued Sébaou et de ses affluents les oueds Bougdoura et Sebt. La moyenne vallée du Sébaou est très sensible aux inondations dues à des précipitations intenses couplées à la fonte des neiges et à des facteurs anthropiques. Le district a connu de nombreuses inondations désastreuses. L'inondation de 1974 a été la plus catastrophique de l'histoire de Tizi Ouzou (La moyenne vallée du Sébaou), faisant 52 morts et 4570 maisons détruites, 130 villages isolés, et plus de 18 000 sinistrés, 13 ponts détruits et des dizaines de kilomètres de routes emportées. Pour cela, la modélisation des inondations du débordement de l'oued Sébaou et de ses affluents les oueds Bougdoura s'étendant du pont Ait Sidi Mimoune de la route nationale N°74 au pont de Tadmait de la route nationale N°12 a été réalisée en utilisant le modèle hydraulique 2D HEC-RAS. Ce modèle a été calibré et validé pour l'événement d'inondation de 1974. De plus, la sensibilité du modèle hydraulique au MNT a également été réalisée en simulant le modèle HEC-RAS 2D calibré avec différents terrains créés à partir des, SRTM. Ensuite, le modèle de crue calibré a été simulé pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans.

Il n'est pas nécessaire de rappeler que la rupture de la digue d'un barrage est conditionnée par son comportement hydromécanique. Il s'agit d'illustrer dans ce chapitre l'étude d'un cas réel relatif à celui du barrage Taksebt. Les règlements et recommandations actuels concernant la sécurité des barrages incluent des consignes très strictes en ce qui concerne la sécurité à l'aval de ces derniers. Afin d'aboutir à une méthodologie de gestion du risque plus poussée et intégrée, une des parties les plus importantes est sans aucun doute la modélisation hydraulique et le système d'information géographique. Celle-ci influence de manière importante le cours de l'élaboration d'un scénario de l'onde de rupture d'un barrage.

La modélisation de deux scénarios est un exercice complexe qui demande une bonne connaissance du terrain et des écoulements. Le logiciel hydraulique HEC-RAS 2D est un outil informatique qui permet de simuler les écoulements d'un cours d'eau et est donc utilisé pour modéliser l'onde de rupture du barrage Taksebt et le débordement de l'oued Sébaou et de ses affluents les oueds Bougdoura et Sebt. Cette modélisation nous permet de constater la vitesse, le débit, le temps, la hauteur et la surface de l'onde de crue en chaque point à l'aval du barrage et la moyenne vallée de l'oued Sébaou, afin de nous permettre de tracer les cartes de risque à l'aide du SIG qui permet d'intégrer facilement différents types d'informations surfaciques.

2. L'objectif

Afin de mieux identifier spatialement les zones les plus exposées aux risques d'inondation pour les populations et les infrastructures dans la zone en aval du barrage Taksebt et la moyenne vallée du Sébaou, lors de fortes crues, nous projetons l'élaboration et l'application d'un modèle de modélisation des niveaux d'inondation à partir des ondes de flux en aval du barrage Taksebt, suite à une rupture progressive et complète de la digue, et un modèle de débordement de l'oued Sébaou et

son affluent l'oued Bougdoura, à l'aide du logiciel HEC-RAS 2D. Ces modèles intègrent à partir d'un système d'information géographique (SIG), des données de débits et de niveaux d'eau et un modèle numérique de terrain (MNT) de haute précision, rendant possible la simulation ainsi que la visualisation des différents niveaux d'eau atteints par l'oued Sébaou et ses affluents les oueds Bougdoura et Sebt. Les résultats du modèle sont présentés visuellement sous forme de cartes permettant d'observer et d'identifier les limites de propagation de l'eau lors des crues de rupture du barrage et de débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura.

3. Méthodologie de Construction d'un modèle de simulation Hec Ras 2D et SIG

Les principales étapes méthodologiques menant vers la réalisation des deux modèles de modélisation de la rupture progressive du barrage Taksebt et le débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura se résument ainsi :

- Création des MNT, lesquels sont étroitement liés aux (SIG) ;
- Création de modèle hydraulique (géométrie et forme de la brèche)
- Incorporation des données hydrologiques qui peuvent être ajoutées en parallèle,
- Simulation des niveaux d'inondation, qui repose sur les trois étapes précédentes,
- Cartographie des niveaux d'inondations en aval du barrage, à laquelle on ajoute des informations sur les infrastructures urbaines aux résultats des simulations. (SIG)

Le tout permet d'évaluer les secteurs touchés, et par le fait même les infrastructures affectées, dépendamment des débits et des niveaux atteints par la propagation de l'onde de rupture lors de différents temps d'arrivée de la vague d'inondation.

Dans ce schéma méthodologique global, la modélisation numérique interactive en tant qu'outil de connaissance et de cartographie des inondations comme moyen de prescription et d'information des riverains et du public est privilégiée dans le cas de risque de rupture du barrage. Cette approche constitue également un cadre plus efficace qui intègre les dimensions économiques, sociales et écologiques de l'évaluation des options à travers les cycles de planification et de réalisation des projets. C'est la notion même de risque de la rupture de barrage, qui propose cette démarche interactive et intégrée aboutissant à la production de cartes délimitant le corridor de sécurité le long de l'oued Sébaou en aval du barrage Taksebt

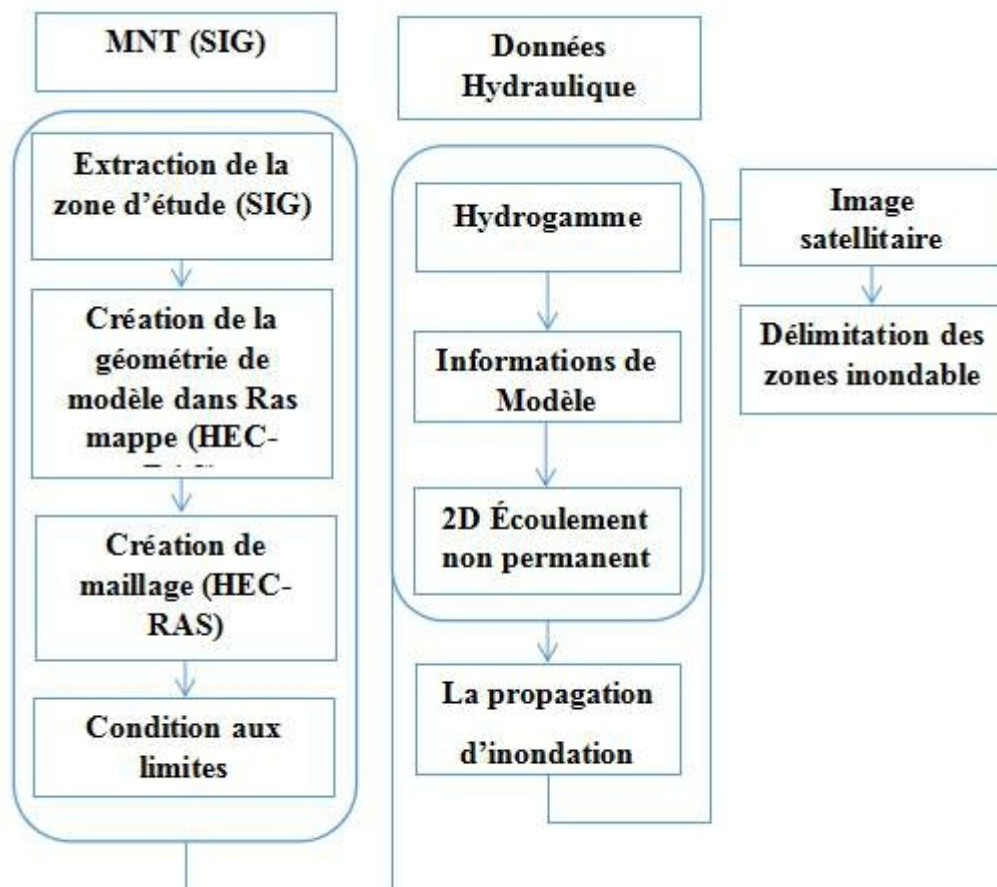


Figure 5.1. Méthodologie de la création d'un modèle hydraulique à l'aide de HEC-RAS 2D et SIG

Le fonctionnement du logiciel HEC-RAS 2D est basé sur la saisie d'une gamme de données.

Ces données sont de trois types :

- ✓ Les données topographiques : fournissent une description physique de la zone (importation de MNT).
- ✓ Les données géométriques : la création de la zone d'écoulement bidimensionnel (en utilisant le MNT) et du maillage afin de contrôler la propagation de l'onde de crue, l'identification de coefficient de rugosité (importation de la carte d'occupation de sol), traçage des lignes qui définissent les conditions aux limites de l'écoulement 2D.
- ✓ Les données hydrauliques : sont exigées pour exécuter une modélisation de l'écoulement bidimensionnel. Ces données comprennent les débits, les conditions aux limites et le régime d'écoulement.

4. Modélisation de scénarios de la rupture du barrage Taksebt

4.1. Les données topographiques (création du MNT)

Afin de mettre en œuvre une modélisation à deux dimensions, HEC-RAS nécessite un modèle numérique de terrain, pour la zone d'étude afin que le programme puisse déterminer différentes hauteurs de la surface analysée. La topographie de la zone d'étude à l'échelle 1/5000 a été obtenue de

l'Institut national de cartographie et de télédétection de Constantine-Algérie (INCT). La mission SRTM, qui consiste à télécharger un modèle numérique de terrain en ligne (MNT), est utilisée comme source principale de données topographiques. Ce MNT a une résolution spatiale d'environ 30 m (SRTM-1) et une précision verticale d'environ 10 m. Il est disponible sous forme de données matricielles. Le dernier MNT est illustré à la Figure 5.2 avec un contour du lac situé derrière le barrage Taksebt et l'oued Sébaou, jusqu'à la mer. Le changement d'altitude du barrage à la mer est montré dans (Figure 5.2).

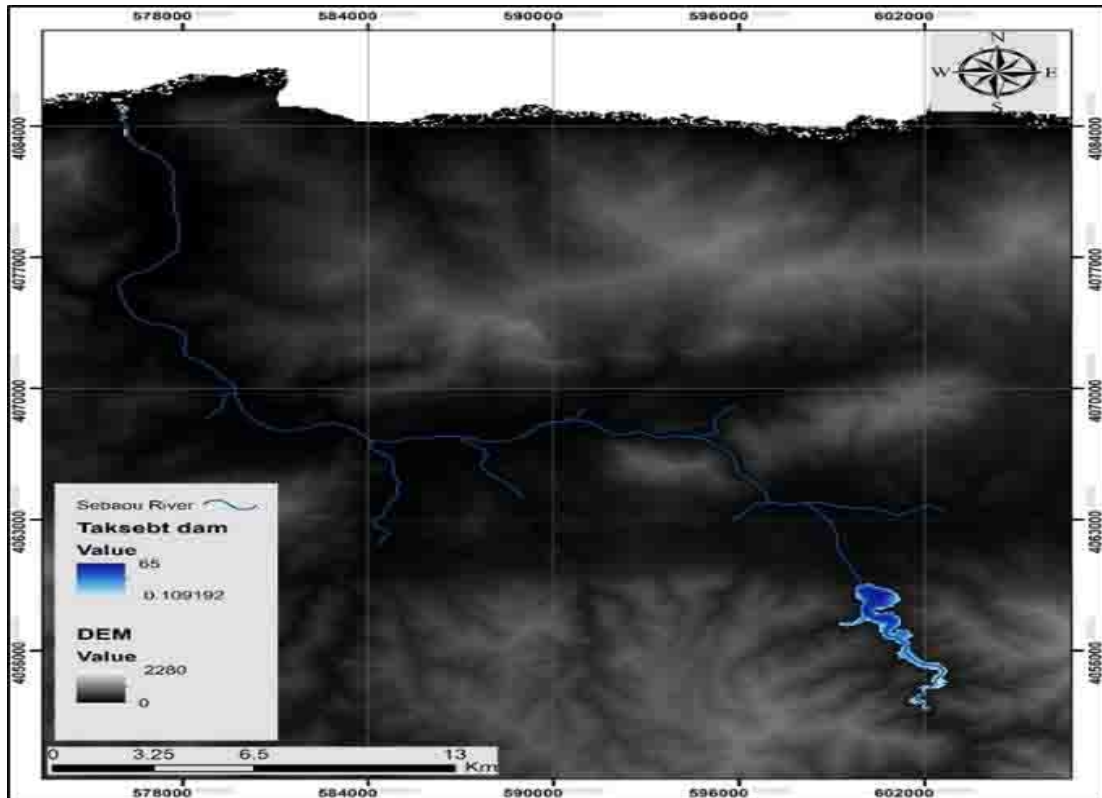


Figure.5.2. Modèle numérique de terrain du bassin versant de l'oued Sébaou en aval du barrage de Taksebt.

Le modèle de modélisation mis en place repose donc, en premier lieu, sur la création de modèles numériques de terrain précis pour les secteurs riverains sélectionnés le long de l'aval du barrage. Traités par le SIG, ce type d'information permet d'indiquer, en fonction des différents niveaux d'eau et débits de la rivière, l'étendue des hauteurs d'eau lors du temps d'arrivée et du passage de la vague de la rupture.

4.2. Le modèle hydraulique HEC RAS 2D

4.2.1. Importation du modèle de terrain et génération de maillage de calcul

Une fois que le modèle de terrain est au format raster et à la résolution souhaitée, il est nécessaire d'importer d'Arc Gis 10.02 dans HEC-RAS, dans ce cas, le raster importé avait une extension format .tif. Lors de l'importation du modèle de terrain, HEC-RAS demande un système de référence spatiale afin de pouvoir afficher le terrain en conséquence. Dans ce cas, le même SRS utilisé pour le prétraitement dans Arc Gis 10.02 sera sélectionné, 84-UTM-Zone 31-N. Une fois le modèle du terrain créé avec succès dans HEC-RAS, il est possible de le visualiser dans le RAS-Mapper. La figure 5.3 montre comment RAS Mapper représente le modèle de terrain utilisé dans ce

projet.

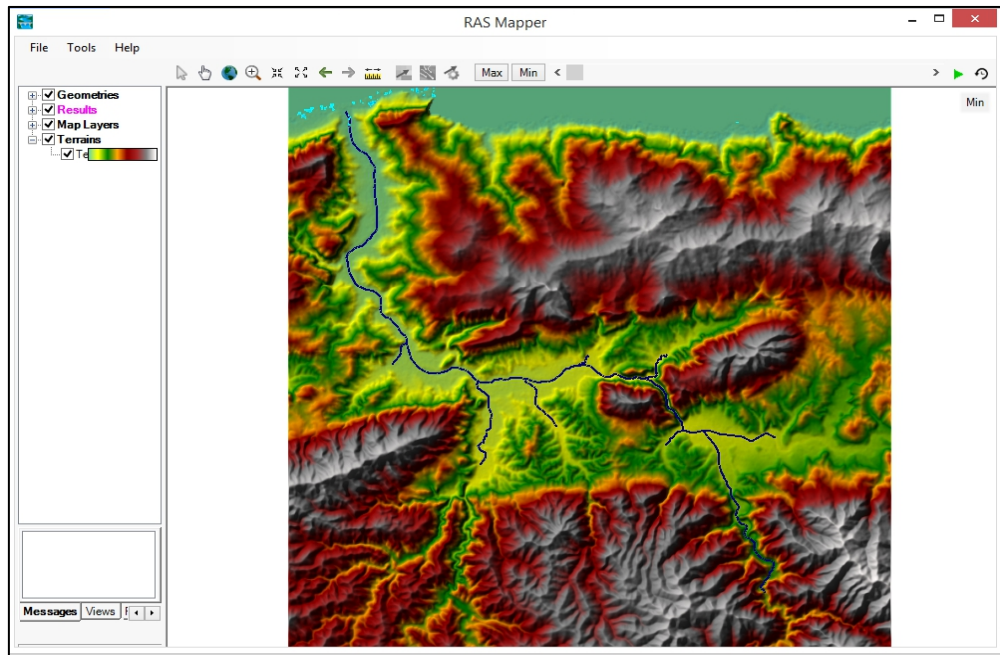


Figure.5.3. Le modèle numérique de terrain utilisé dans Ras mapper

4.2.2. La géométrie du modèle

Les fonctionnalités de modélisation 2D dans HEC-RAS permettent à un utilisateur de créer un maillage de calcul. Dans l'éditeur de données géométriques, le modélisateur peut définir les limites du maillage de calcul qui enveloppe le canal lui-même, ainsi que les zones adjacentes de la zone inondable. La génération du maillage de calcul 2D, qui commence par la définition de la zone d'écoulement 2D, a été conçue pour couvrir l'étendue de l'inondation lors de la rupture du barrage et indiquer le lieu où les calculs de flux auront lieu. Le succès de la modélisation 2D dans HEC-RAS dépend principalement de deux facteurs : le niveau de représentation du modèle de terrain et la stabilité de la simulation. Bien que les deux soient influencés par la taille de la cellule du maillage de calcul, celui-ci est également explicitement contrôlé par l'intervalle de calcul choisi ([González 2017](#)). Des détails spatiaux décrivant le polygone peuvent être définis. Les détails spatiaux incluent la taille des cellules de flux 2D individuelles ainsi que les valeurs de rugosité de Manning pour chaque cellule.

Dans notre cas l'aval du barrage Taksebt en péril a été modélisée via un maillage de calcul structuré composé de 80070 cellules avec une grille de 50 x 50 m (figure 5.4). Il s'agit d'un processus modifié au cours de l'étalonnage avec deux mailles de calcul Structure avec une grille de 100 x 100 m. et 75x75m. La taille de grille de 50 x 50 m, utilisée dans le maillage de calcul, répond à deux exigences fondamentales. Premièrement, les cellules s'adaptent au modèle de terrain aussi précisément que possible. Deuxièmement, la taille de la cellule lui permet d'interpréter la pente de la surface de l'eau et elle change de manière adéquate.

HEC-RAS utilise le coefficient de Manning pour mesurer la résistance à l'écoulement. Il a également la possibilité d'appliquer le coefficient de gestion continue pour la zone d'écoulement principale ou de diviser la région en différentes régions, chacune avec sa propre valeur de n effectif. Dans la simulation suivante, une valeur $n=0,06$ de Manning a été attribuée à la rivière et à la plaine inondable, respectivement. La valeur de référence choisie pour la représentation du canal et

des berges a été obtenue à partir d'une comparaison entre les caractéristiques des vallées vasculaires étudiées et les tables publiées par (USACE 2016). Outre le maillage de calcul 2D par défaut de HEC-RAS, le logiciel peut également créer un maillage 2D adaptatif afin de mieux représenter les conditions et structures d'écoulement 2D plus complexes. Le maillage de calcul est assemblé avec un mélange de formes et de tailles de cellules pouvant être des triangles, des rectangles ou même des éléments jusqu'à huit arêtes (USACE 2016). Le logiciel affine automatiquement le maillage 2D lorsque cela est nécessaire, par exemple à un passage routier. Le logiciel raffine automatiquement la zone de flux 2D pour incorporer la forme inefficace de la zone d'écoulement. La modélisation 2D implique que la bathymétrie de la rivière soit représentée par un espace tridimensionnel, mais que la grille du modèle est une grille horizontale à deux dimensions (rectangulaire). Une vitesse est calculée pour chaque élément de maillage et la direction de la vitesse est la résultante des vecteurs x et y dans le plan horizontal. Les magnitudes de la vitesse dépendent de la pente et du niveau du lit.

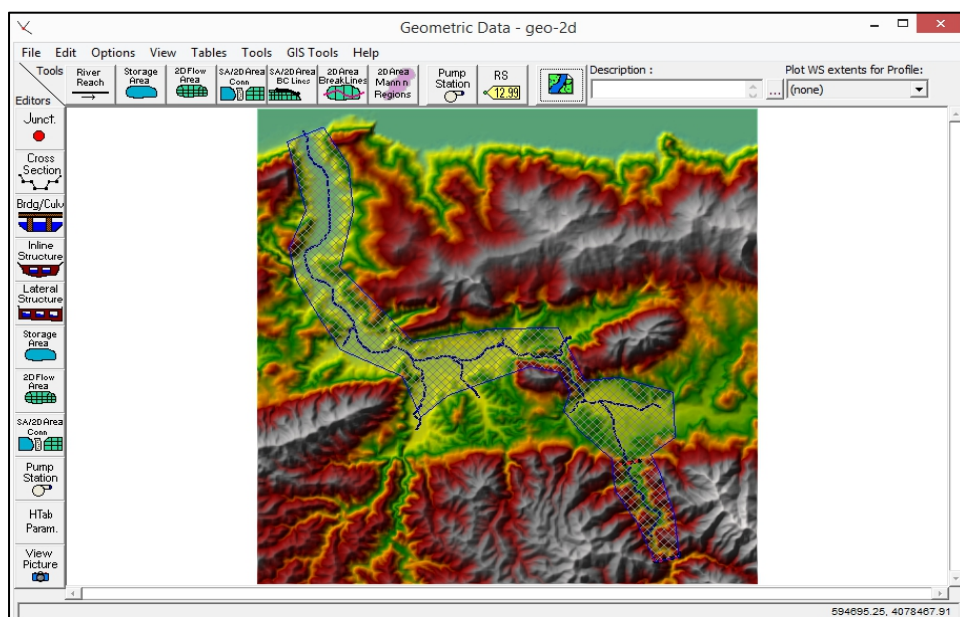


Figure.5.4. Maillage de modèle adopté (50*50m) pour le scénario de la rupture du barrage Taksebt

4.2.3. Les conditions aux limites

Le modèle nécessite des conditions aux limites en amont et en aval de la zone étudiée. Celles-ci sont essentielles pour le modèle car de mauvaises conditions aux limites peuvent entraîner des instabilités ou de faux résultats directs. La condition aux limites en amont sera basée sur l'hydrogramme de débit. Le scénario modélisé dans cette étude implique une défaillance progressive et complète du barrage Taksebt en une heure, en raison du débordement de la structure. La rupture est supposée se produire lors de la sollicitation de la crue de la période de retour de 10 000 ans avec 2500 m³ / sec de débit de pointe (figure.5. 5), qui a été déterminée à l'aide de l'analyse hydrologique du bassin versant de Taksebt (source ANBT Tizi Ouzou). La condition aux limites en aval sera établie sur la ligne de côte en liaison avec la mer et consistera en l'exigence d'une profondeur normale sur toute la longueur de la ligne de côte de la zone d'étude. Cette condition aux limites a besoin de la pente de la rivière et peut être calculée en faisant la moyenne de la pente du lit sur toute la longueur du ruisseau. Cette pente est égale à 0.0027

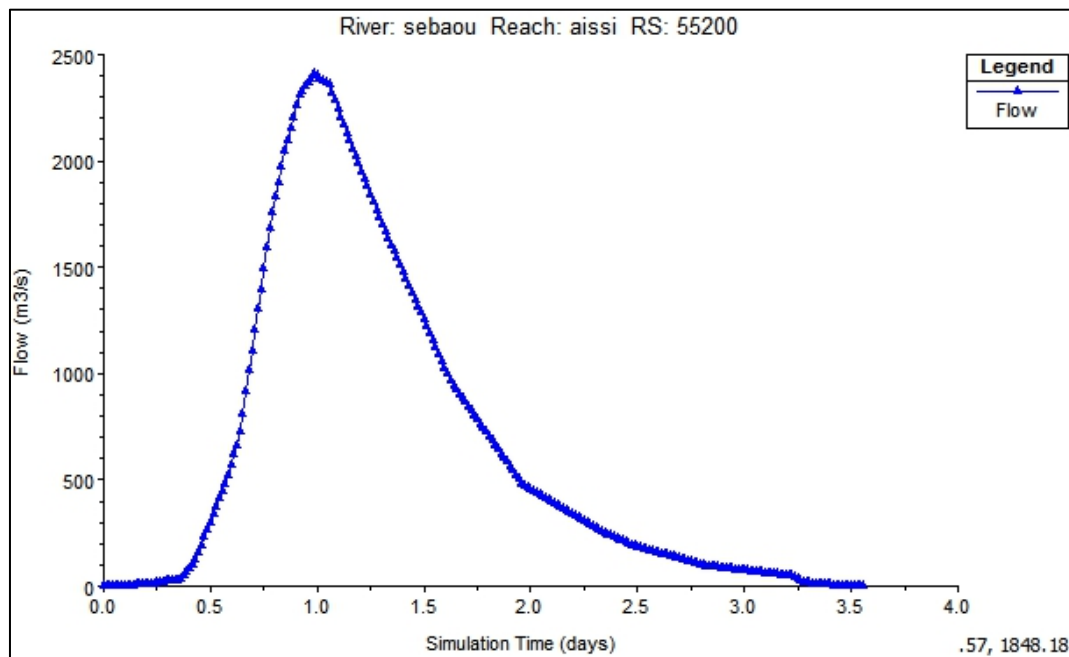


Figure. 5.5 : Hydrogamme utilisé dans cette étude (source: ANBT Tizi Ouzou)

4.2.4. Modélisation de la brèche du barrage

La simulation de la rupture du barrage a été réalisée à l'aide du module d'écoulement instable du modèle HEC-RAS. Ce composant de HEC-RAS est basé sur le modèle UNET et utilise un cadre similaire pour résoudre les équations de flux instables. Elle repose sur une solution implicite aux différences finies des équations complètes bidimensionnelles de la continuité et de la quantité de mouvement pour un écoulement instable, associée à un assortiment de conditions aux limites internes permettant de simuler des écoulements instables contrôlés par une grande variété de structures hydrauliques (USACE 2016). Un échec de dépassement de barrage a été utilisé comme scénario de rupture du barrage Taksebt pour les simulations HEC-RAS. Les paramètres de largeur de rupture moyenne et de temps de formation ont été estimés en fonction du volume du lac sur la base de 63 études de cas précédents dans le cadre d'une méthodologie décrite par (Froehlich 2008). Le manuel (USACE 2016) indique que les barrages gravimétriques en terre ont tendance à avoir une brèche partielle dans la mesure où une ou plusieurs sections de monolithes sont installées et que le temps nécessaire à la formation d'une brèche varie de 1 à 2 h. Pour la défaillance du barrage Taksebt, les paramètres sont définis avec une largeur de rupture de **174.36 m** et un temps de défaillance de **1 h et 40 min**. La taille de la brèche est définie par un trapèze. La saisie de données dans HEC-RAS des informations de violation est illustrée à la figure 5.6.

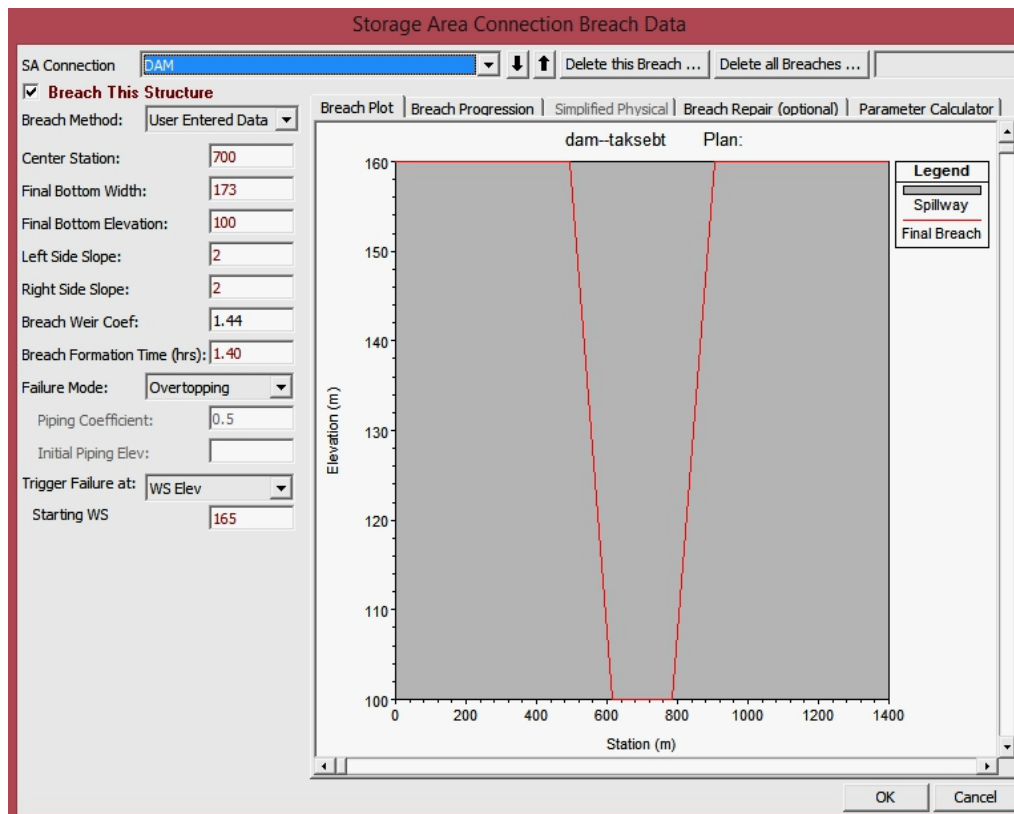


Figure. 5.6. La forme et les informations de la brèche entrées dans HEC-RAS

Après avoir défini la géométrie du modèle, qui comprend le modèle numérique de terrain (MNT), le coefficient de sécurité et le maillage de calcul, et le fichier d'écoulement in- stationnaire contenant les conditions aux limites, seuls les paramètres de calcul sont laissés pour commencer la modélisation.

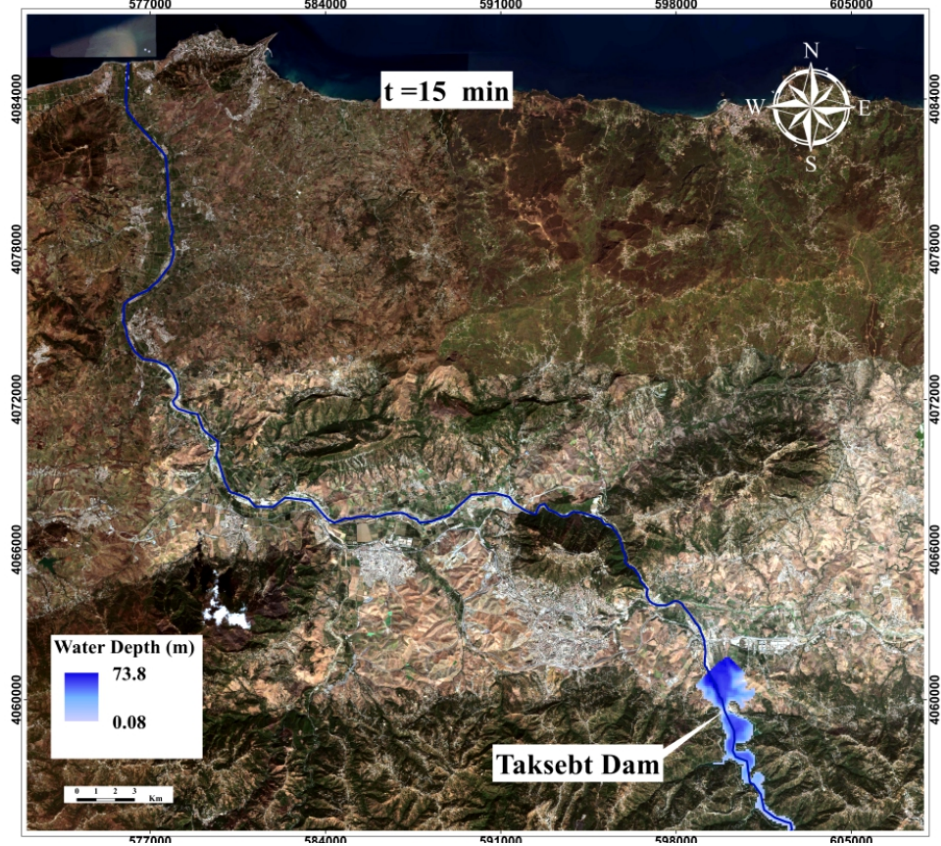
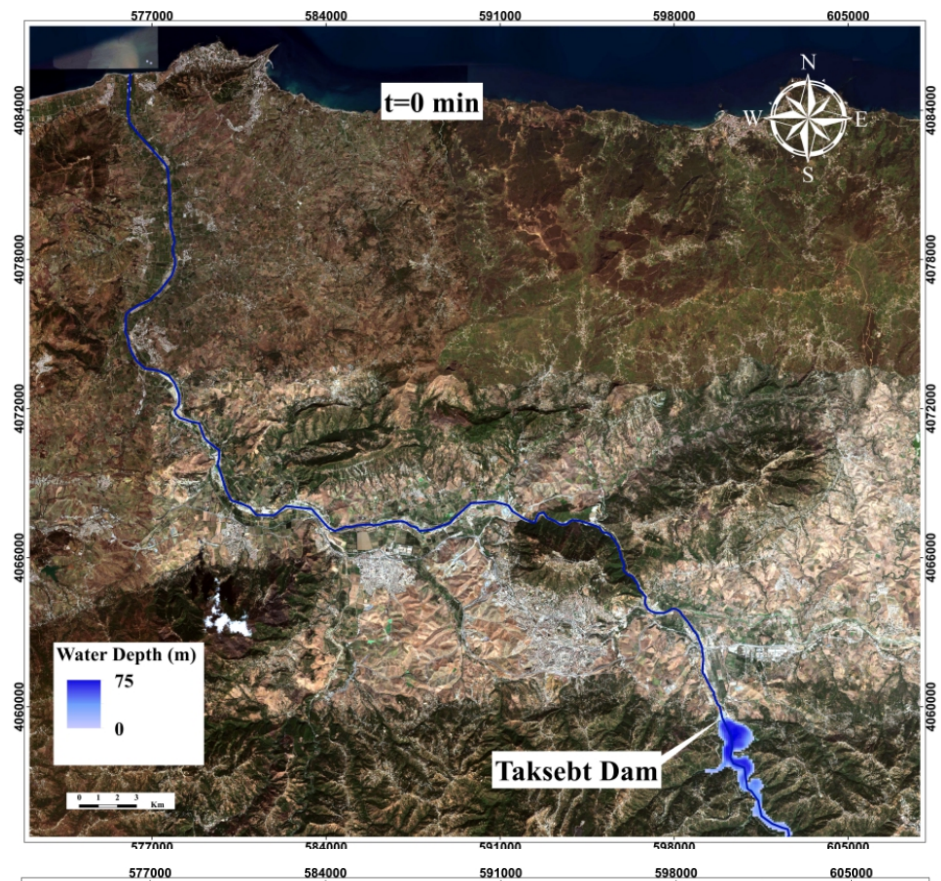
4.3. Résultats et discussion

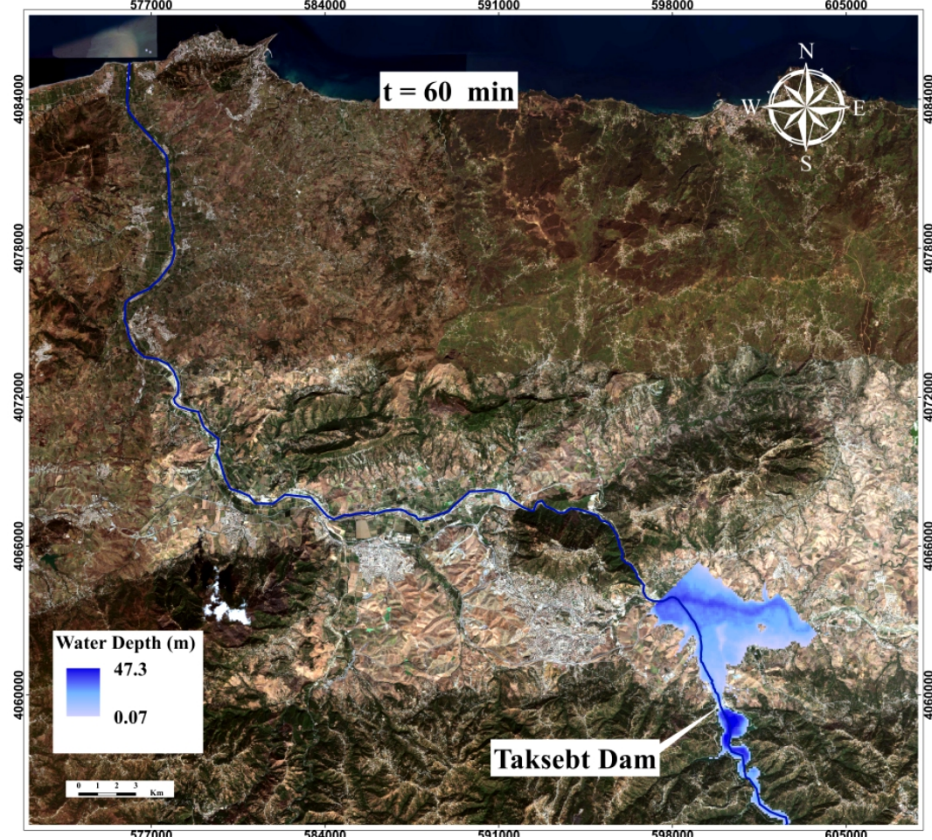
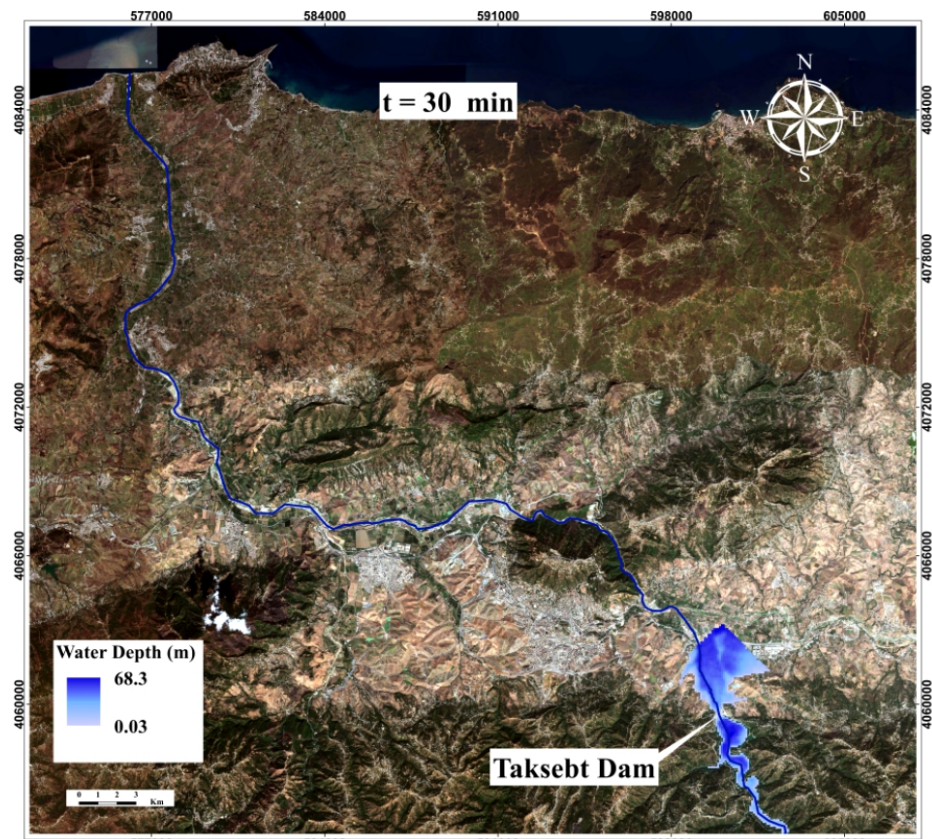
Les résultats d'un scénario de rupture du barrage Taksebt fournis par le modèle HEC RAS 2D sont particulièrement intéressants du fait de la précision obtenue dans la représentation de la topographie des terrains de cette étude. Le modèle HEC RAS 2D permet donc de déterminer avec une grande précision la propagation de vagues d'eau lors d'inondations, améliorant ainsi la cartographie des inondations à l'aide du SIG. Les résultats obtenus avec l'élaboration de ce modèle de modélisation de l'onde de rupture de la digue du barrage Taksebt pourraient donc être utilisés par plusieurs autres municipalités riveraines, (Oued Aissi; Sidi Naàmane; Drâa Ben Khada; Tadmaït). Au vu des résultats obtenus de ce scénario, le barrage peut constituer, en cas de rupture, un réel danger pour toutes les infrastructures de quelques types qu'elles soient et potentiellement pour les populations qui se trouvent à l'aval du barrage Taksebt

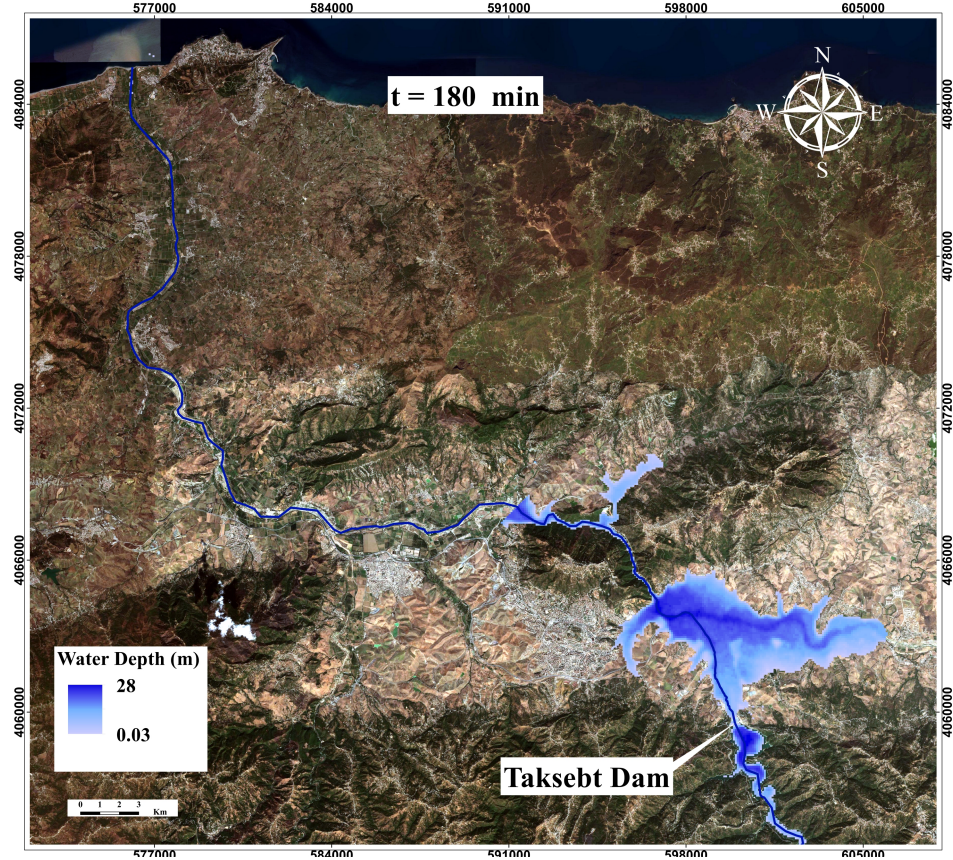
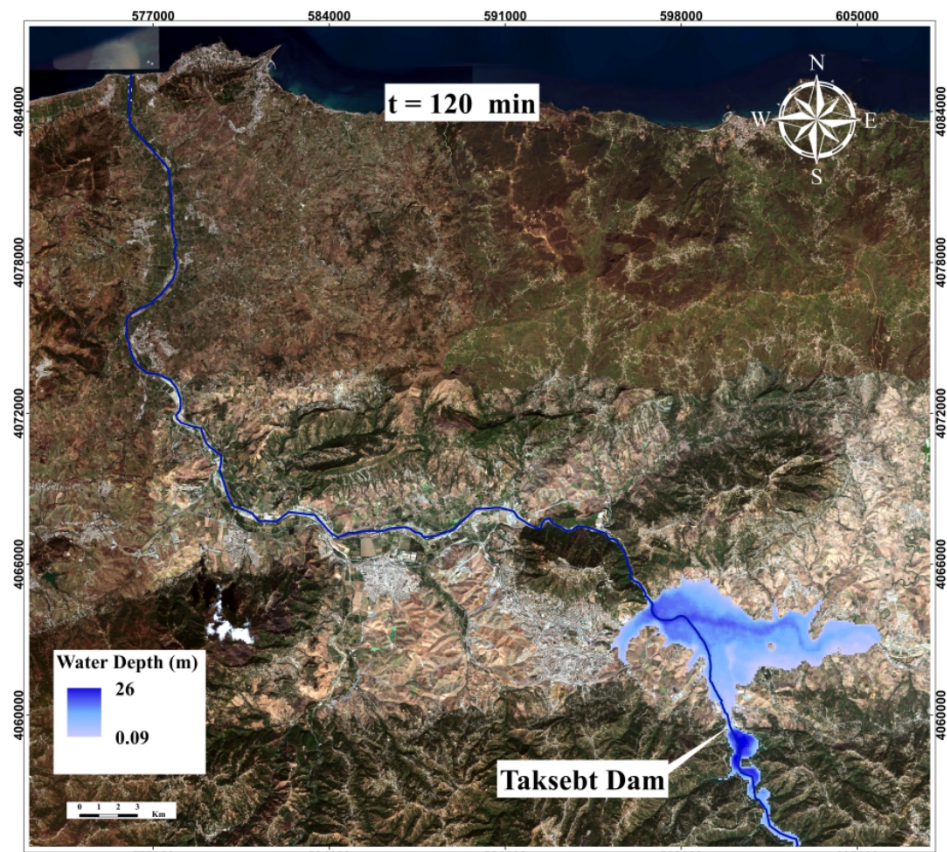
4.3.1. Temps d'arrivée et la propagation de la première vague

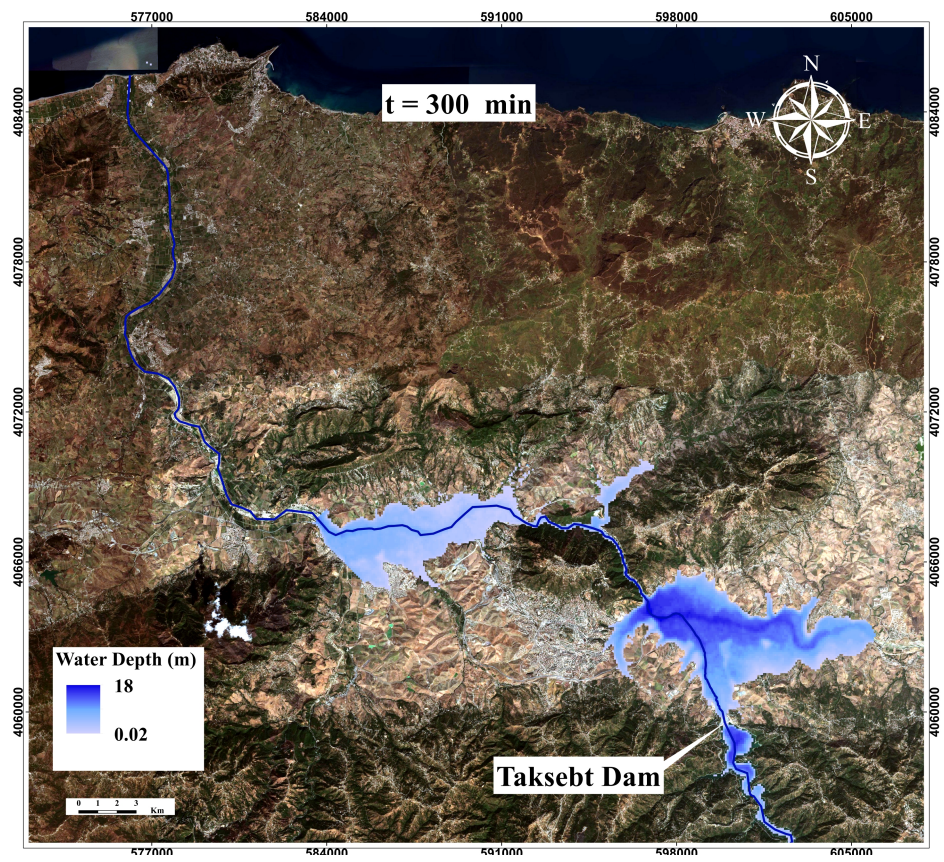
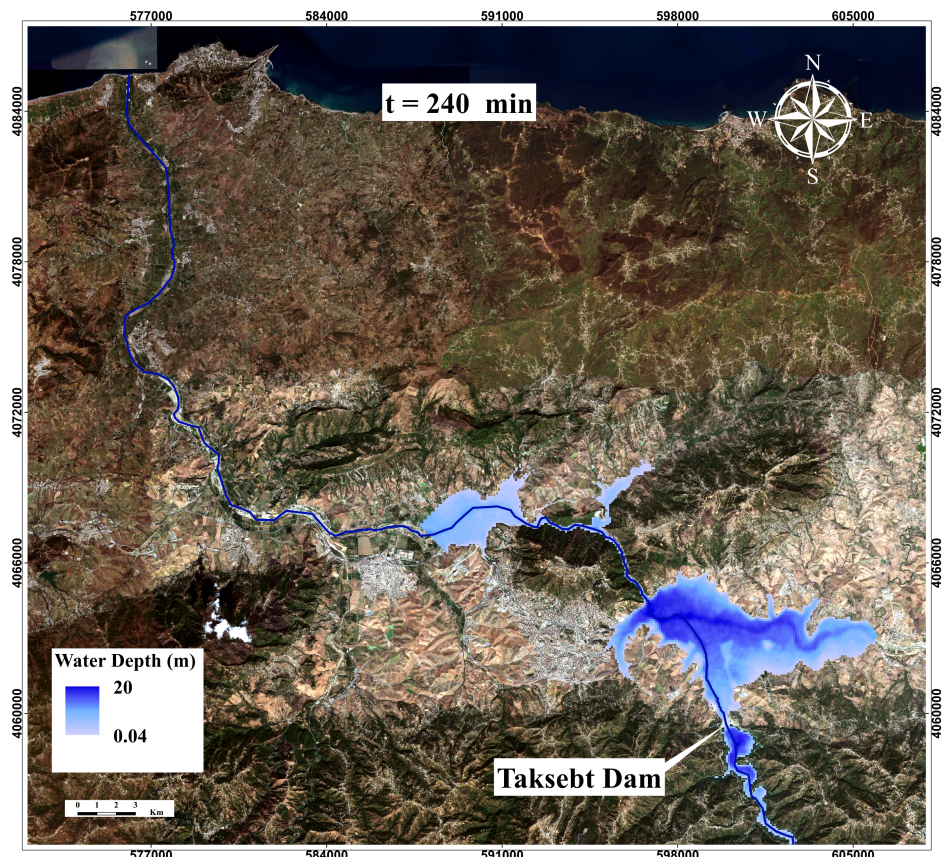
Une cartographie de l'inondation des régions en aval du barrage Taksebt est nécessaire pour mieux comprendre les conséquences des inondations causées par l'onde de rupture de ce barrage; le modèle HEC RAS 2D fournit des informations sur le temps d'arrivée de la vague de crue et les caractéristiques hydrodynamiques attendues de l'inondation (hauteur, vitesse, propagation), qui sont les éléments clés pour l'élaboration de stratégies d'alerte et d'évacuation. Dans cette étude, la cartographie des zones inondables suite à la rupture du barrage Taksebt est réalisée dans un

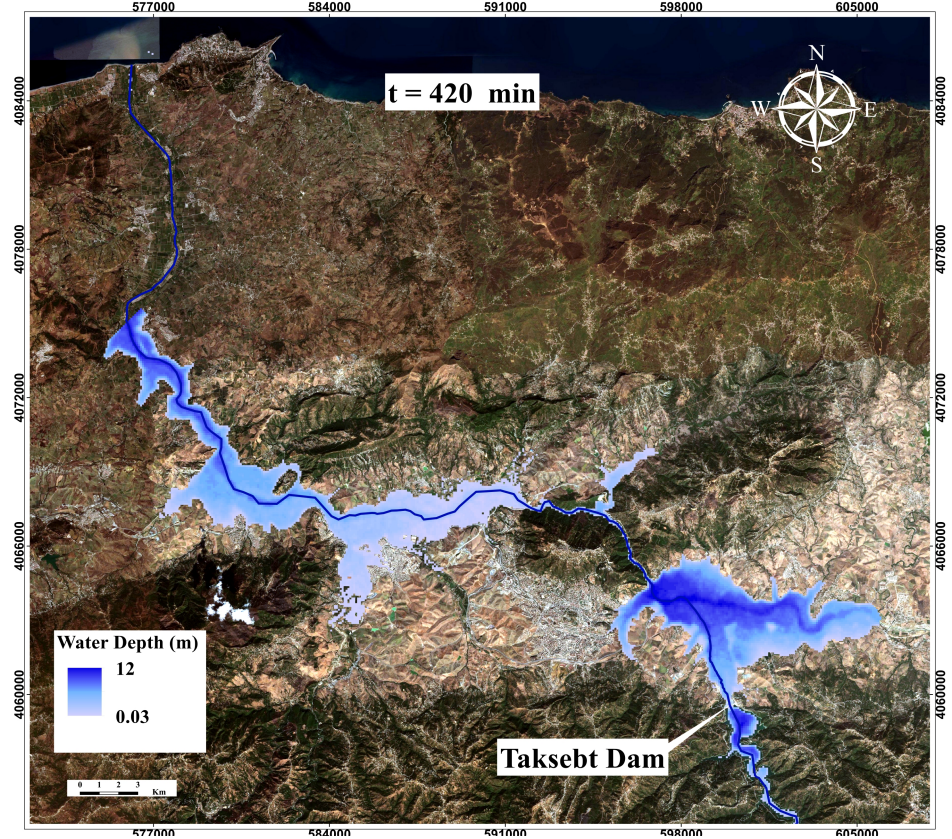
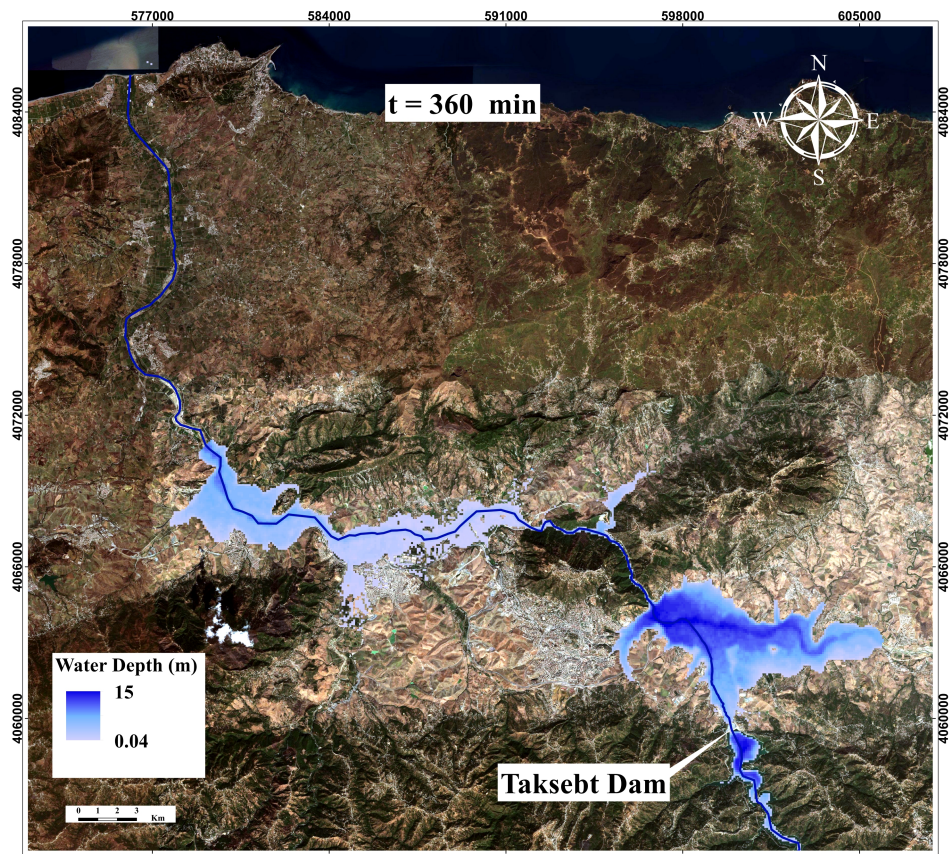
environnement SIG en exportant les résultats de HEC-RAS à l'aide des outils de Arc Gis. Les figures (5.7) affichent les temps de propagation de la vague obtenus par HEC RAS-2D à $t=15\text{min}$, 30min , 60min , 120min , 180min , 240min , 300min , 360min , 420min , 600min , 900min respectivement, dans ces figures les résultats sont donnés en hauteur d'eau, vitesses d'eau et intensité de submersion.











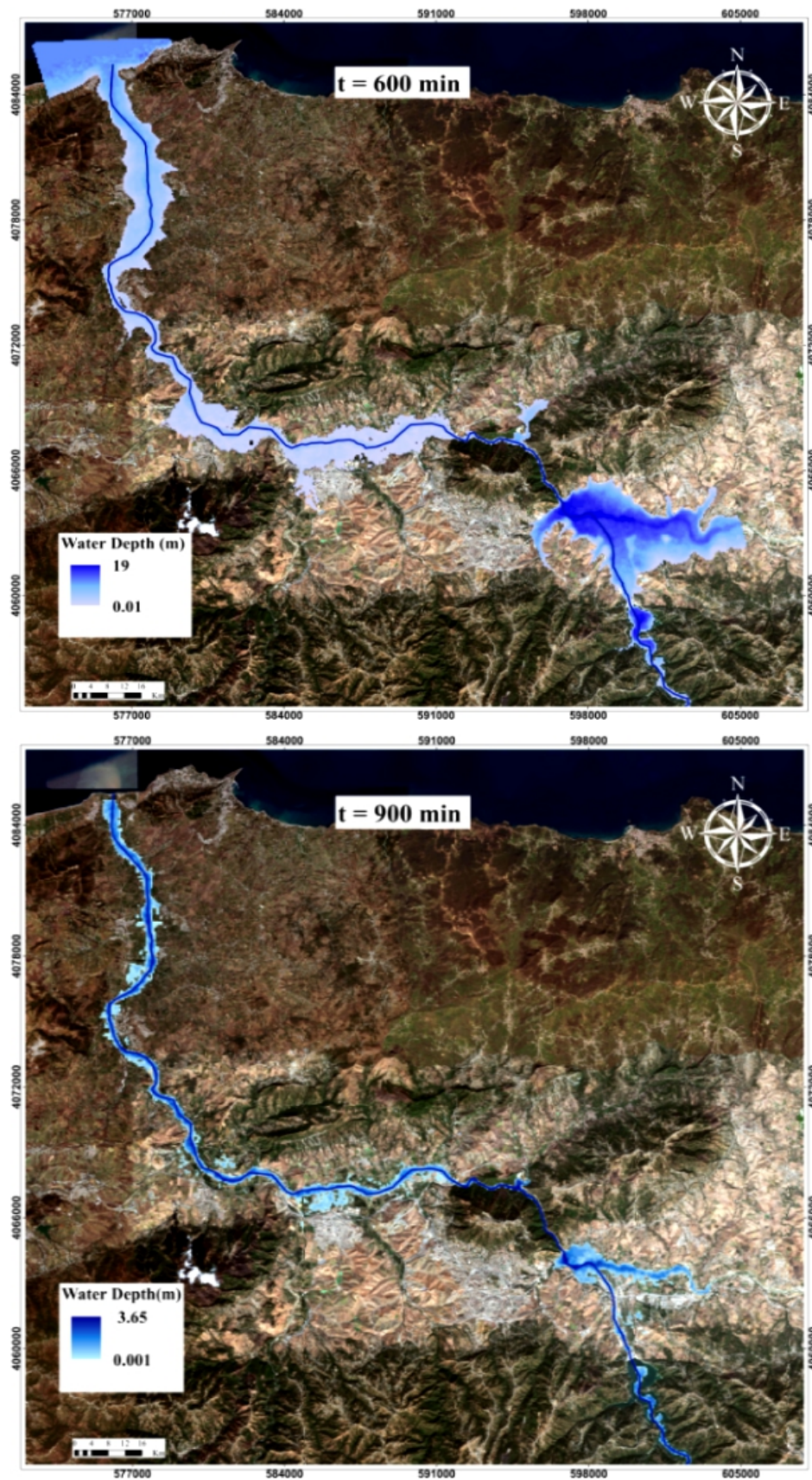


Figure 5.6. La propagation et le temps d'arrivée de la première vague de l'onde de rupture du barrage Taksebt

Ces résultats permettent d'identifier avec précision les infrastructures touchées dépendamment des différents débits et hauteur d'eau. Il devient ainsi possible de cibler les résidences et bâtiments publics à évacuer, et donc d'agir efficacement en identifiant les zones d'évacuation prioritaires au niveau de chaque région. De plus, puisque les municipalités doivent identifier leurs zones inondables, les données d'élévation utilisées dans le modèle HEC RAS 2D pourraient également être utilisées pour délimiter les zones inondables. Par ailleurs, en plus d'être utilisé en milieu urbain, en milieu naturel ou semi-naturel : le modèle HEC RAS 2D pourrait servir de guide dans l'aménagement des rives et des plaines inondables, ainsi que pour la protection de ces milieux. Dans le cadre d'un plan de mesures d'urgence, le modèle HEC RAS 2D et le SIG pourrait être utilisés par les communes afin de mettre en place un programme effectif d'évacuation des populations.

4.3.2. Vitesse d'écoulement

Les Figures (5.8 à 5.11) représentent l'irrégularité du régime de la vitesse le long du cours de l'oued. L'effet de la pente est un facteur plus important sur cette irrégularité, sans négliger évidemment la variabilité de la forme de la vallée de l'oued et ses singularités.

La zone inondée présente de très fortes vitesses. Les plus grandes sont atteintes à l'aval immédiat du barrage au niveau de la zone du quart d'heure atteignant une vitesse maximale de **200 m/min**, ensuite les vitesses ont tendance à décroître pour être relativement écrêtées en phase de décrue aux environs d'heure de la crue avoisinant une vitesse d'écoulement de **40 m/min**.

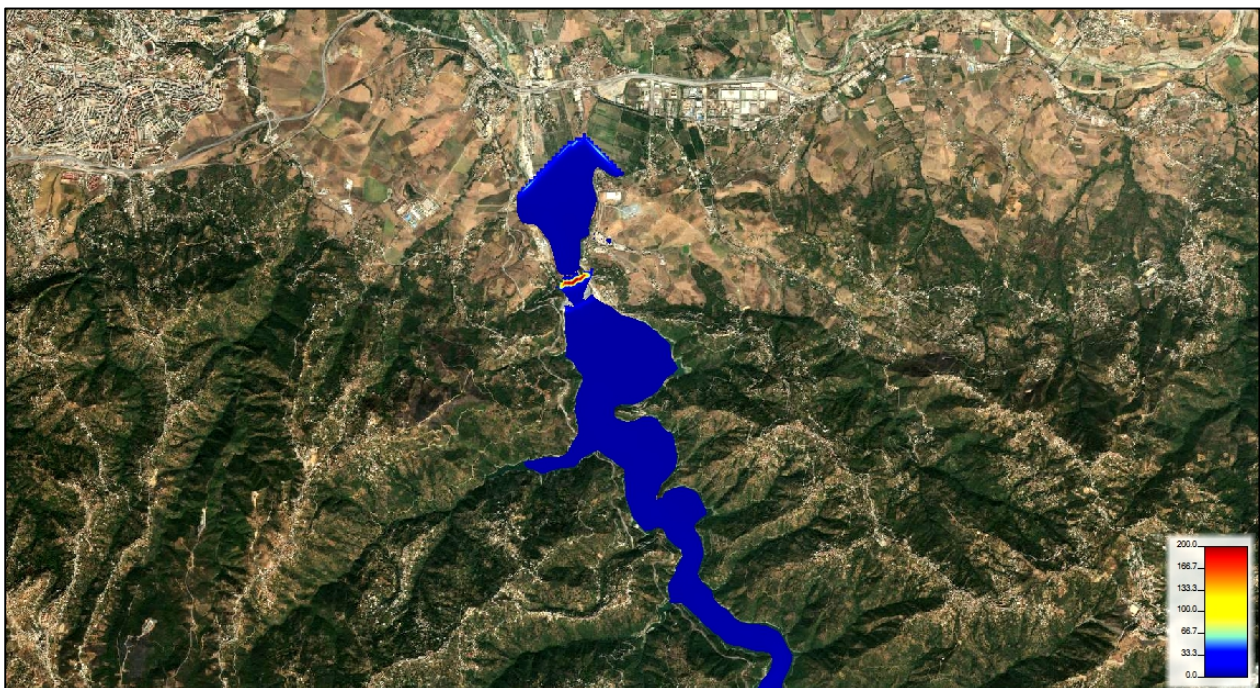


Figure 5.8. Vitesse d'écoulement au niveau de l'aval du barrage 15 minute après la rupture

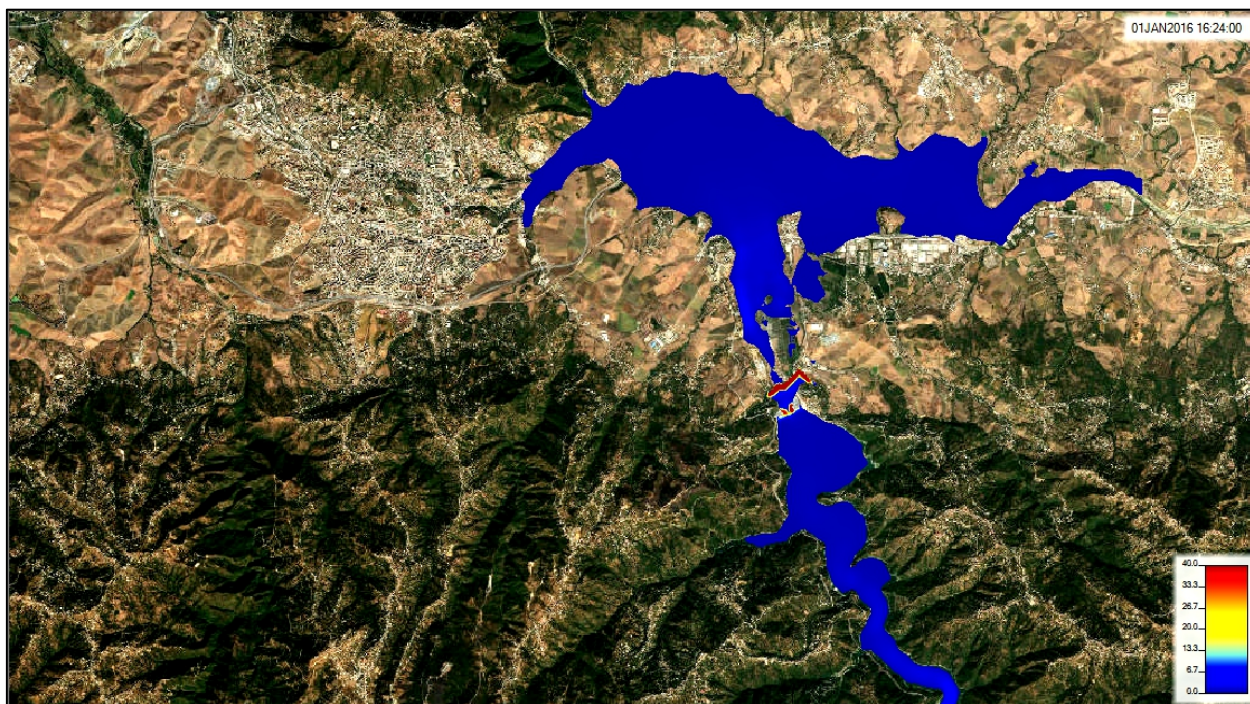


Figure 5.9. Vitesse d'écoulement dans la région de l'oued Aissi et le pont de bougie (vallée large) suite la rupture de barrage

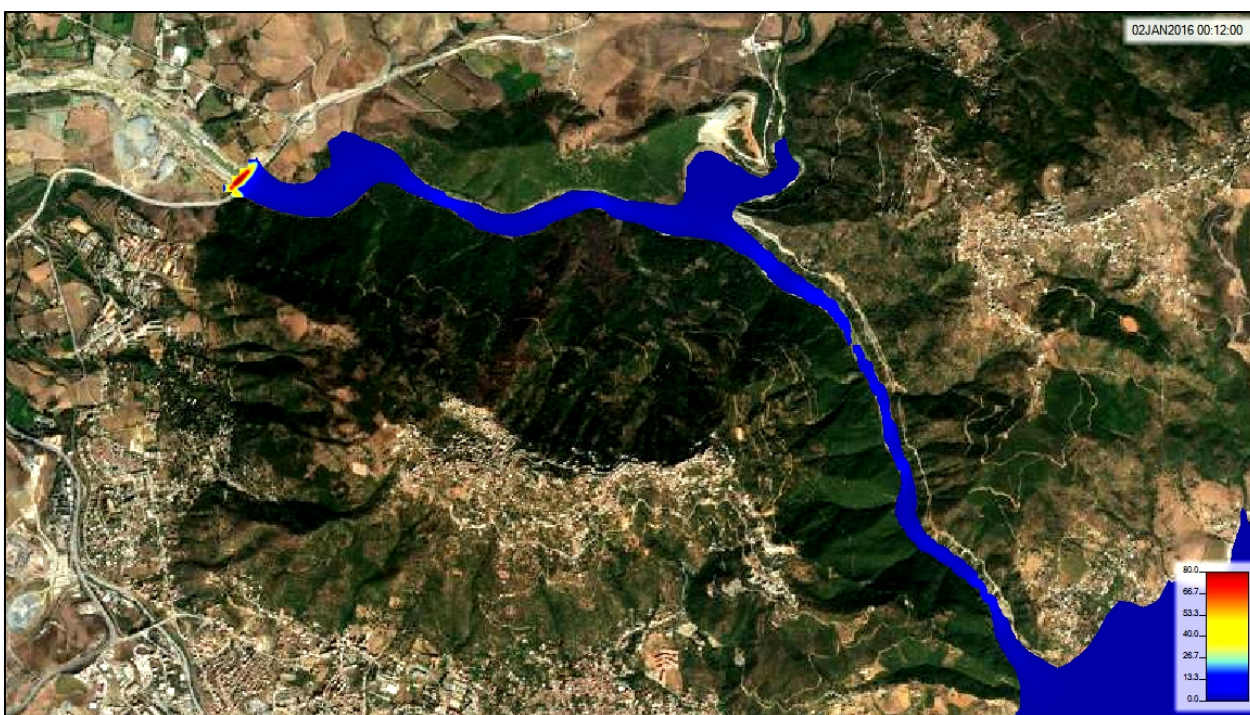


Figure 5.10. Vitesse d'écoulement dans la région de Timizar, Elaghbar, Akaoudj RN72 (vallée étroite) suite la rupture de barrage



Figure 5.11. Vitesse d'écoulement dans la commune de Draâ Ben Khedda; Sidi Naâmane; Tadmait; RN12 (vallée large) suite la rupture de barrage

4.3.3. Identification des différentes zones à risques

Dans la zone d'inondation, différentes caractéristiques de l'inondation permettent d'identifier différentes zones de danger, à savoir les niveaux d'eau et les moments de l'arrivée de l'inondation (Paquier, 1995). Le scénario de rupture du barrage Taksebt étudié complète les conclusions de l'analyse en fournissant une meilleure compréhension du comportement hydraulique de l'oued Sébaou. Plus important encore, nous avons constaté que, selon le cas de ce scénario, un débit important devrait arriver très rapidement à proximité des régions habitées, ce qui pourrait ne pas permettre aux habitants de s'échapper (Nibigira et al, 2018). Les cartes donnent une impression plus directe et plus forte de la distribution spatiale du risque d'inondation que d'autres formes de présentation (description verbale, diagrammes) (Merzet al 2007). Dans cette étude, trois zones ont été identifiées en fonction de la propagation de l'onde.

➤ Zone de 15 minutes

Elle comprend les villages de Oued Aissi et du Pont de Bougie. Comme le montre dans la carte des inondations, de nombreuses structures sont considérées comme étant sous l'eau au cours des 15 premières minutes qui ont suivi la rupture du barrage. La profondeur de l'eau dépasse 20 m dans certaines zones urbanisées, notamment le plus grand nombre de bâtiments résidentiels et administratifs situés le long de la rive du fleuve, ainsi que de vastes espaces agricoles, des pertes d'équipements sociaux et de lignes de vie (ludo-sportif, culturo-commercial,...), ainsi que des infrastructures de génie civil (chemins de fer, routes, ponts). .

L'étude des cartes de la hauteur de l'eau et de la distribution des propagations d'écoulement dans cette région montre clairement que plusieurs zones souffrent énormément des inondations

catastrophiques comme la zone industrielle d'Alma, ainsi que l'hôpital psychiatrique, les résidence universitaire, Casernes militaires et une grande partie de la route nationale RN12. La carte de distribution du champ d'écoulement montre que lorsque le flux arrive Pont de bougie il s'inverse en amont après un certain temps avant de revenir en aval. Cela indique que l'écoulement découle d'un phénomène de reflux sous l'influence du changement de la forme de la vallée de l'Oued Sébaou au niveau du pont de bougie. Selon des données préliminaires sur la population des régions inondées par les eaux de crue, des zones d'habitat d'environ 20 000 personnes, soit près de 90% de la population du village Ait Aissi, seraient exposées à une vague d'inondations de plus de **10 m**. Il n'est pas possible d'engager des procédures d'évacuation dans cette zone, une fois le barrage est défaillant. La population de ces régions où l'auto-sauvetage est le seul moyen d'évacuation efficace doit être avertie par des sirènes. Les habitants doivent être prêts à organiser leur propre sauvetage. et se familiariser avec leur itinéraire d'évacuation de leur point de vue habituel ceci sera explicité dans le prochain chapitre

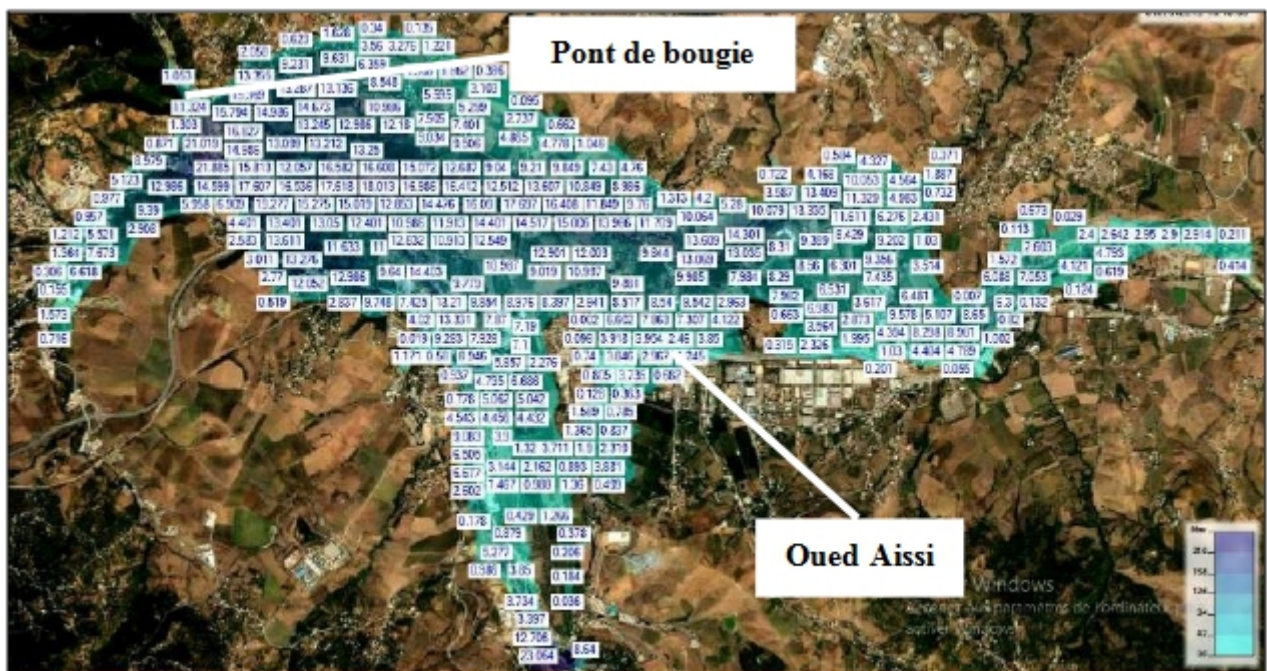


Figure 5.12. Hauteur d'eau au niveau de villages de Oued Aissi et du Pont de Bougie (max=21m) suite la rupture de barrage

➤ Zone d'alarme 1

La première zone d'alarme comprend les villages de Sidi Naàmane, Dràa Ben Khada et Tadmaït. Les profondeurs de l'eau sont très élevées dans cette zone et il s'agit d'une zone résidentielle située sur un terrain en pente en rive gauche. A la confluence des deux cours d'eau majeurs, le Sébaou et le Bougdoura (zone 400 logements ERCA et parti sud-est de la ville), des zones de danger potentiel ont été marquées. Les zones dangereuses contiennent environ 400 à 600 bâtiments résidentiels et un vaste espace pour l'agriculture et l'élevage, en particulier dans ces zones.

Cependant, le temps entre la rupture du barrage et l'heure d'arrivée de la vague de crue est plus long; entre 3 heures et 6 heures. La vague de crue se développant lentement quitte la région pour une période d'alerte plus longue pour la population et des valeurs de faible profondeur d'eau dans les zones plates. Cela suffit pour évacuer les résidents vers des zones sûres, où le matériel de la protection civile et les ressources humaines jouent un rôle important dans les opérations de

sauvetage des groupes communautaires les plus vulnérables (personnes âgées, handicapés, enfants, etc.).

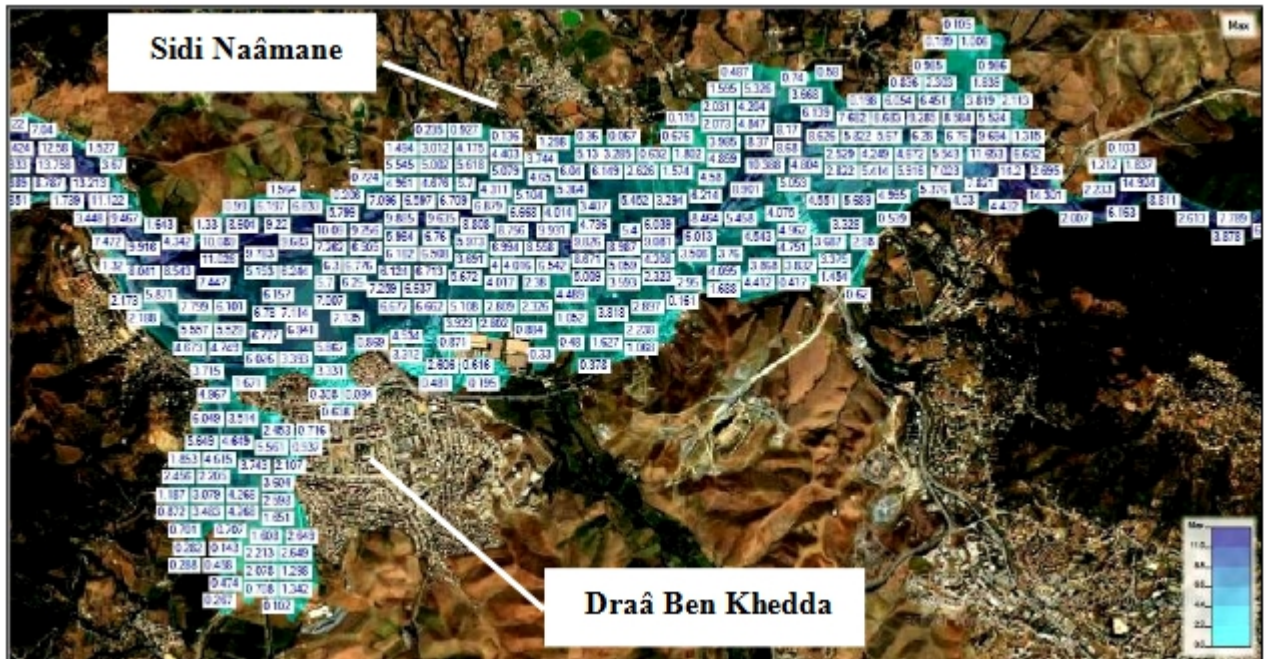


Figure 5.13. Hauteur d'eau au niveau de la commune de Draâ Ben Khedda ; Sidi Naâmane ; Tadmait; RN12 (max 12m) suite la rupture de barrage

➤ **Zone d'alarme 2**

Elles sont constituées par le fond de la basse vallée du Sébaou et représentent environ 10 % des superficies inondables. L'aléa inondation dans ces zones est très faible, car la basse vallée joue un rôle de collecteur et d'orientation des eaux de l'onde vers la mer. La quantité d'eau libérée dans ces axes, fut elle importante, ne suffirait pas à créer une inondation sur ces zones habitables, à moins que ces derniers soit obstrués. Elle comprend les zones qui s'étendent de Baghlia ; Sidi Daoud à la mer. La profondeur de l'eau étant plus faible que celle d'une inondation naturelle, et il est jugé suffisant que toute la population soit au courant du danger imminent et prendre les mesures nécessaires liées à l'urgence.

4.4. Impact de l'onde de la rupture sur les ponts

Sur la base des résultats de la modélisation, le risque de l'onde de la rupture du barrage Taksebt sur les différentes constructions et infrastructure hydraulique existantes à l'aval peut être considéré comme suit :

Table 5.1 : Récapitulatif des principaux résultats obtenus pour les sections des infrastructures à l'aval de barrage Taksebt.

Infrastructure hydraulique	Les deux pont de Oued Aissi (chemin de fer et routier)	Eloignement du barrage	3km
		Temps d'arrivé de l'onde	15 min
		Hauteur d'eau au-dessus de l'ouvrage	14m
		Vitesse d'écoulement au niveau de l'ouvrage	140,13 m/s
		Intensité de submersion	756,11 m ² /s
		Description des dégâts prévisible	Les deux pont seront totalement détruits
	Pont de RN 72	Eloignement du barrage	5.7 km
		Temps d'arrivé de l'onde	25 min
		Hauteur d'eau au-dessus de l'ouvrage	26,50m
		Vitesse d'écoulement au niveau de l'ouvrage	99,72 m/s
		Intensité de submersion	387,34 m ² /s
		Description des dégâts prévisible	Le pont sera totalement détruit
	Pont de Bogie RW 37	Eloignement du barrage	6.2km
		Temps d'arrivé de l'onde	45 min
		Hauteur d'eau au-dessus de l'ouvrage	28.67 m
		Vitesse d'écoulement au niveau de l'ouvrage	47,83 m/s
		Intensité de submersion	157,82 m ² /s
		Description des dégâts prévisible	Destruction totale de Pont
	Pont de Ait Aissa Mimoune	Eloignement du barrage	11km
		Temps d'arrivé de l'onde	2 heures 50 min
		Hauteur d'eau au-dessus de l'ouvrage	5.78m
		Vitesse d'écoulement au niveau de l'ouvrage	8,39 m/s
		Intensité de submersion	78,76 m ² /s
		Description des dégâts prévisible	Le pont sera totalement détruit
	Le pont de RN 12	Eloignement du barrage	14 km
		Temps d'arrivé de l'onde	3 heurs 35min
		Hauteur d'eau maximale	6,40 m
		Vitesse d'écoulement au niveau de l'ouvrage	12,53m/s
		Intensité de submersion	21,89 m ² /s
		Description des dégâts prévisible	Le pont sera totalement immergé
	Les ponts de DBK et Sidi Naâmane RN 12	Eloignement du barrage	24 km
		Temps d'arrivé de l'onde	4 heurs 45min
		Hauteur d'eau maximale	4,30 m
		Vitesse d'écoulement au niveau de l'ouvrage	5,83m/s
		Intensité de submersion	67,19 m ² /s
		Description des dégâts prévisible	Le pont sera totalement immergé



Figure 5.14 Situation des différents ponts à l'aval de barrage Taksebt

5. Modélisation du scénario de débordement de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura

5.1. La situation géographique de Draa Ben Khedda

Cette étude porte sur la moyenne vallée du bassin versant du Sébaou qui traverse Draa Ben Khedda et ses environs, ainsi que sur les affluents (oued Sebt ; oued Bougdoura) qui déversent leurs eaux dans le Sébaou. La ville de Draa Ben Khedda, se situe dans la wilaya de Tizi Ouzou, Algérie (Figure 5.14), est située entre trois (03) cours d'eau et est traversée par l'oued Bougdoura. Elle est limitée à l'Est par l'oued Sebt et au Nord par l'oued Sébaou qui est le plus grand oued de la wilaya de Tizi-Ouzou et qui reçoit tous les écoulements du territoire de la commune ; ce qui augmente le risque d'inondation, Ceci est dû à la nature topographique de la zone qui se caractérise par un déclin des zones habitées (Figure 5.14). En particulier, la zone d'étude couvre une zone inondable d'environ 8,75 Km² qui comprend de vastes zones agricoles et les zones urbaines avec une densité de population importante. Bien que les parties les plus sensibles aux inondations soient les plaines inondables sur les côtés du Draa Ben Khedda (cité Touares 3, cité El Talian , cité Frère Khellil, et cité LANDC) dans l'embouchure de l'Oued Bougdoura, il est également fondamental de contrôler les inondations dans l'Oued Sébaou en raison du potentiel de pertes des biens . Dans cette ville, l'expansion ultérieure le long des plaines alluviales de l'Oued Sébaou, qui a été faite sans études détaillées sur les inondations, en fait un bon cas pour l'étude des inondations.

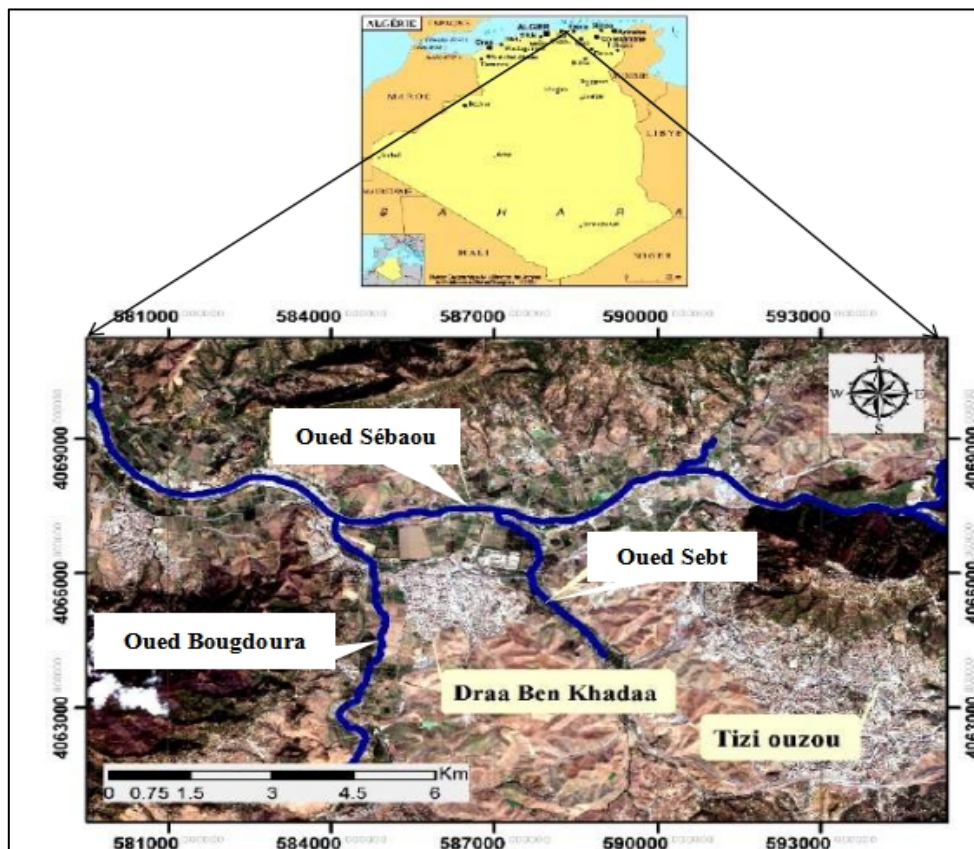


Figure 5.14. La situation géographique de Draa Ben Khedda

✓ **Oued Sébaou** : c'est le plus important oued qui traverse la ville, il est situé à l'extrémité Nord de la ville de Draa Ben Khedda. Cet oued est nettement plus sinueux avec une largeur de 200 m, son tracé est relativement rectiligne et sa pente est de 2 à 3% en moyenne. La

visite sur place a permis d'identifier plusieurs points noirs qui caractérisent cet oued, notamment la section très réduite et insuffisante à la confluence avec d'autres oueds. A ce niveau, le débordement des eaux préoccupe la population locale, notamment lors des fortes pluies.

✓ **Oued Bougdoura** : Cet oued est situé à l'extrémité ouest de la ville de Draa Ben Khedda et présente un lit large et relativement rectiligne. Il traverse quelques habitations situées en amont mais présente un danger relativement plus important que l'oued Sébaou

✓ **Oued Sebt** : Cet oued présente moins de danger pour la ville lors des fortes pluies car il est situé à l'extrême est de la ville. Les habitations sont situées en hauteur et ne sont pas exposées aux inondations, sauf l'usine textile qui peut être touchée.

5.2. Le modèle hydraulique adopté

Dans ce scénario, le risque d'inondation a été évalué à l'aide du modèle d'inondation HEC-RAS 2D, suivant les mêmes étapes utilisées pour la modélisation du scénario du rupture de barrage Taksebt et les données géospatiales de la zone d'étude : la moyenne vallée de Sébaou. Le traitement des données géométriques d'entrée et de sortie du modèle HEC-RAS 2D a été effectué dans l'environnement Arc-GIS. Les données d'entrée du modèle comprennent la géométrie 2D de la rivière, les berges, le modèle numérique de terrain (MNT) et les cartes d'occupation de sol, tandis que la sortie du modèle comprend les hauteurs d'eau, la propagation et la vitesse des crues. L'hydrogramme de l'événement d'inondation de Mars 1974 a été appliqué pour un coefficient rugosité de Manning « $n=0,04$ ». Par la suite, la réponse du modèle a également été évaluée par rapport aux incertitudes du modèle numérique de terrain (MNT) et à la taille de la grille (25mx25m). Enfin, il a été simulé pour des périodes de retour des crues de 10, 20, 50 et 100 ans. Des cartes des risques d'inondation pour les communautés et infrastructures vulnérables ont été préparées à l'aide d'images Google Earth ainsi que la propagation d'inondation et les hauteurs des crues pour les périodes de récurrence des crues (10, 20, 50 et 100 ans).

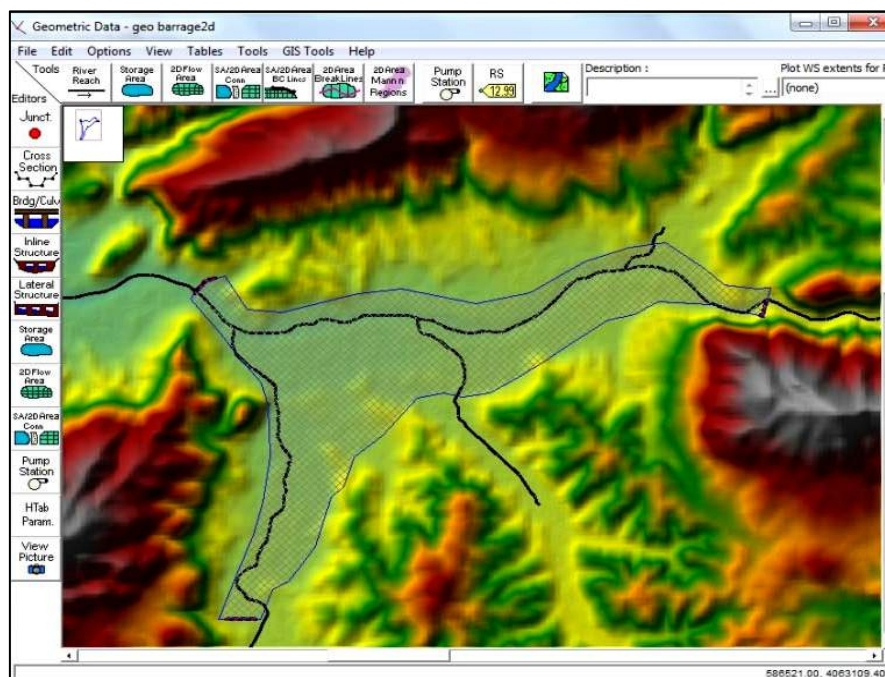


Figure.5.15. Géométrie et maillage du modèle adopté (25m*25m) pour le scénario de débordement de l'oued Sébaou

5.3. Les condition aux limites

L'hydrogramme général de la moyenne vallée du Sébaou est disponible grâce à la base des données de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (Algérie). Pour la simulation de l'écoulement in-stationnaire, les données de débits quotidiens pour les périodes du 28 mars 1974 au 31 mars 1974 ont été utilisées. La période de retour équivalente pour cet événement adopté sur 50ans , le débit maximum de la rivière ($Q=1888 \text{ m}^3/\text{s}$) ,s'est produit le 30 mars 1974. Par conséquent, il a été supposé que l'hydrogramme présumé correspondant au point où la condition limite amont est fixée suit les hydrogrammes réalisés par le (ANRH de Tizi Ouzou). La crue est supposée se produire sous la sollicitation de l'événement de crue de périodes de retour de (10, 20, et 100 ans), le débit de crue est de $180 \text{ m}^3/\text{s}$ pour 10ans. Les débits en 20ans et 100 ans sont de 900 et $3550 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement.

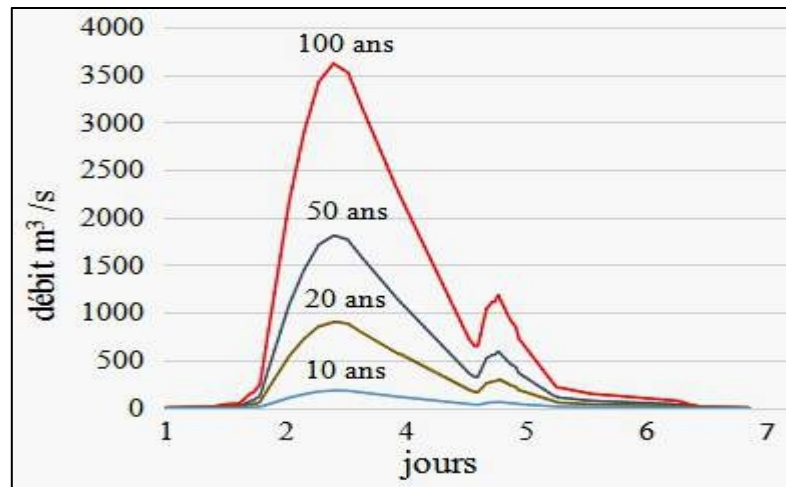
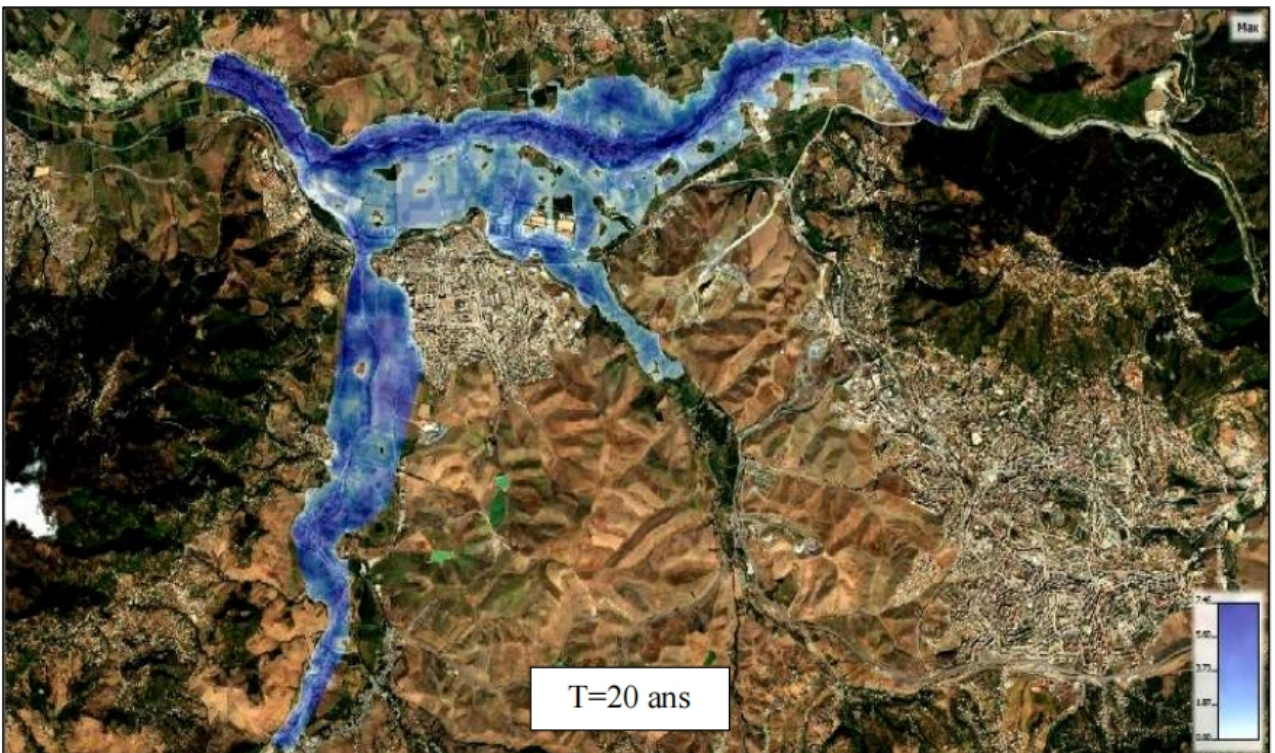
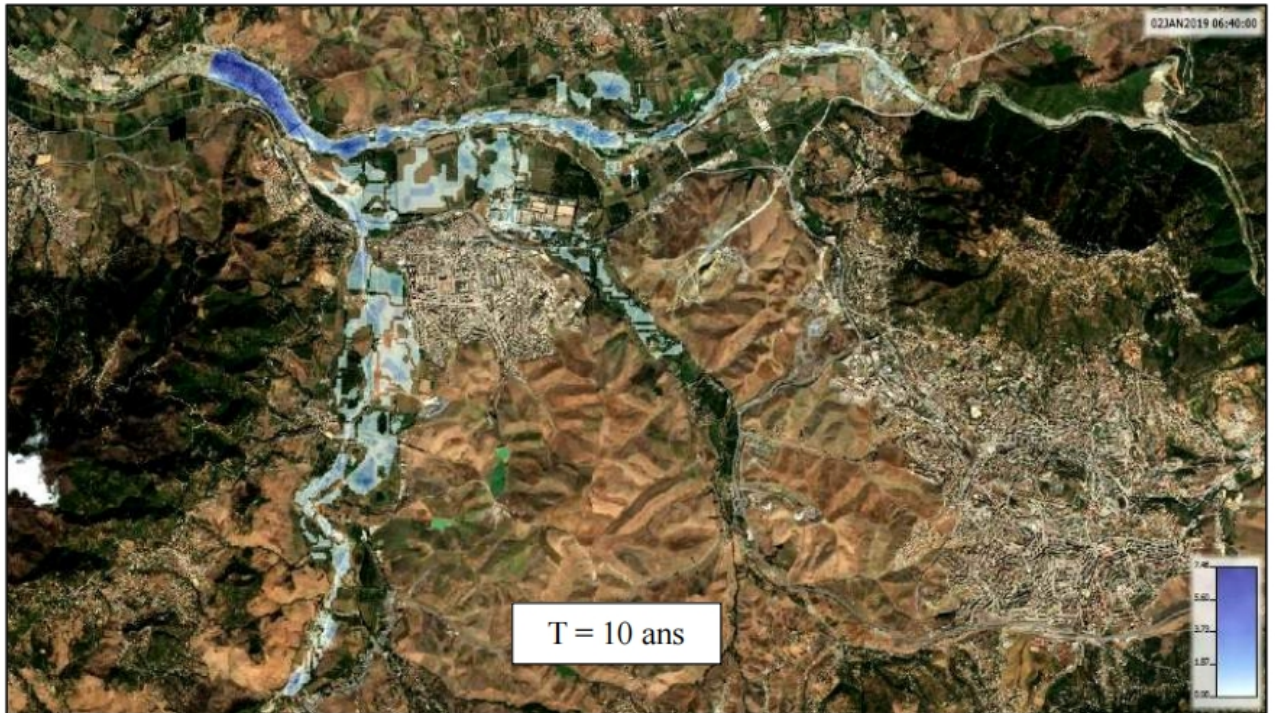


Figure.5.16. Hydrogrammes des différentes périodes de retour (source ANRH Tizi Ouzou)

5.4. Résultats et discussion

Le cartes de risques est projetée sur l'image satellitaire de Google Earth comme indiqué dans (figure 5.17) pour avoir une meilleure vue et compréhension de la nature de débordement de l'oued. Les carte de risques d'inondation a déterminé les zones inondables dans différentes régions de la commune de Draa Ben Khedda.



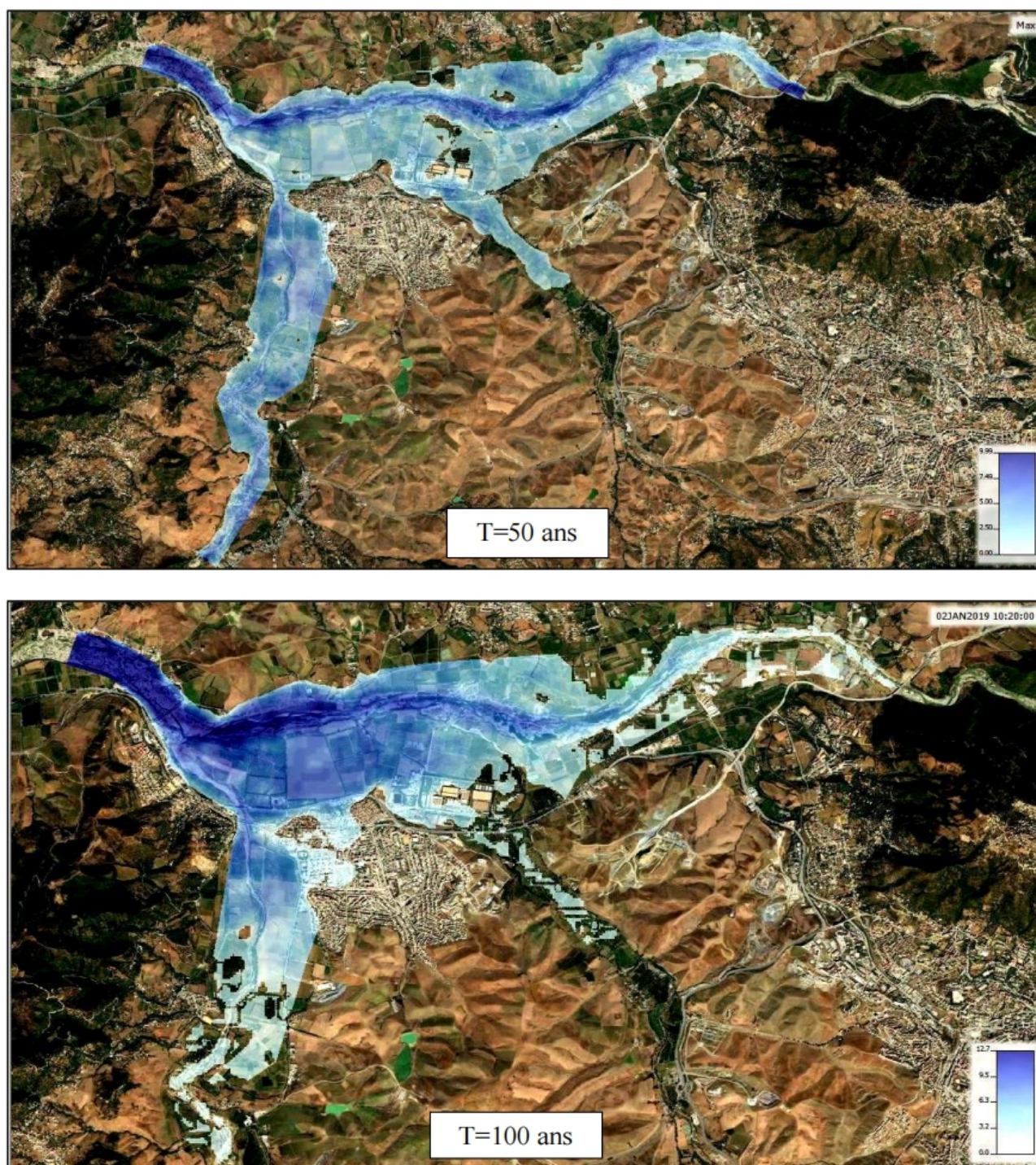


Figure 5.17: Plaines inondables obtenues pour des événements avec des périodes de retour (T10 ; T25; T50; et T100 ans) de débit sur la zone du DBK

Les résultats obtenus à partir de la modélisation bidimensionnelle de l'écoulement transitoire à l'aide du modèle HEC-RAS montrent que, dans une large mesure, la zone située sur la rive droite de l'Oued Bougdoura s'est avérée plus vulnérable à être inondée que la rive gauche. Le long de la vallée du fleuve, la ville la plus importante est Draa Ben Khedda, une ville de 30 889 habitants. Les zones couvertes par les flux sont principalement des zones agricoles car il y a peu de bâtiments couverts par l'eau. Les inondations peuvent menacer la vie humaine dans la ville de Draa Ben Khedda, environ 40 familles ont été identifiées comme étant à risque, dont 12 résultent à haut risque

et 28 à risque moyen. La ville de Draa Ben Khedda peut subir des pertes à la fois économiques, environnementales et humaines. HEC-RAS nous a donné un aperçu de la façon dont l'oued Bougdoura et l'oued Sébaou pourraient affecter les développements urbains dans un événement de l'ampleur du débit sortant, l'analyse de la carte de la plaine d'inondation de la période de retour de 100 ans a indiqué que 6,88 km² avec le pourcentage de 20,50% est susceptible d'être inondé. La profondeur prévue de l'inondation varie de plus de 0 à 14 m dans les plaines inondables et sur la rivière. La plage entre 0.5 et 1.5 m a été identifiée dans la zone urbaine de DBK, (Mirabeau) où les débits de retour correspondants que nous avons estimés ont été insérés.

5.4.1. Analyse des risques d'inondation dans la commune de Draa Ben Khedda

Grâce à cette modélisation, il est possible de déterminer la largeur et la hauteur de l'inondation autour de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura, qui est affectée par le scénario de débordement de les trois rivières (oued Sebt; oued Bougdoura; oued Sébaou). Les résultats de la modélisation de l'inondation de l'oued Sébaou et son affluent Bougdoura sont présentés dans les figures 5:18;19;20;21.

Les résultats de la modélisation a 'l'aide sur le HEC-RAS 2D montrent des différences dans les hauteurs et la largeur de l'inondation de chaque période de retour .

Lorsqu'il y a un débit de pointe dans la période de retour de 10 ans, zone touchée est de 117 hectares et la hauteur d'inondation est de 0,1 à 6 mètre. La surface des zones bâties touchée est de

10.6 hectares avec une hauteur de 0,15 à 0,3 mètre ; 62,8 hectares zone agricole avec une profondeur de 0,3 à 0.6 mètre ; et le reste superficie de lit mineur de l'oued avec une hauteur de 6 mètre.

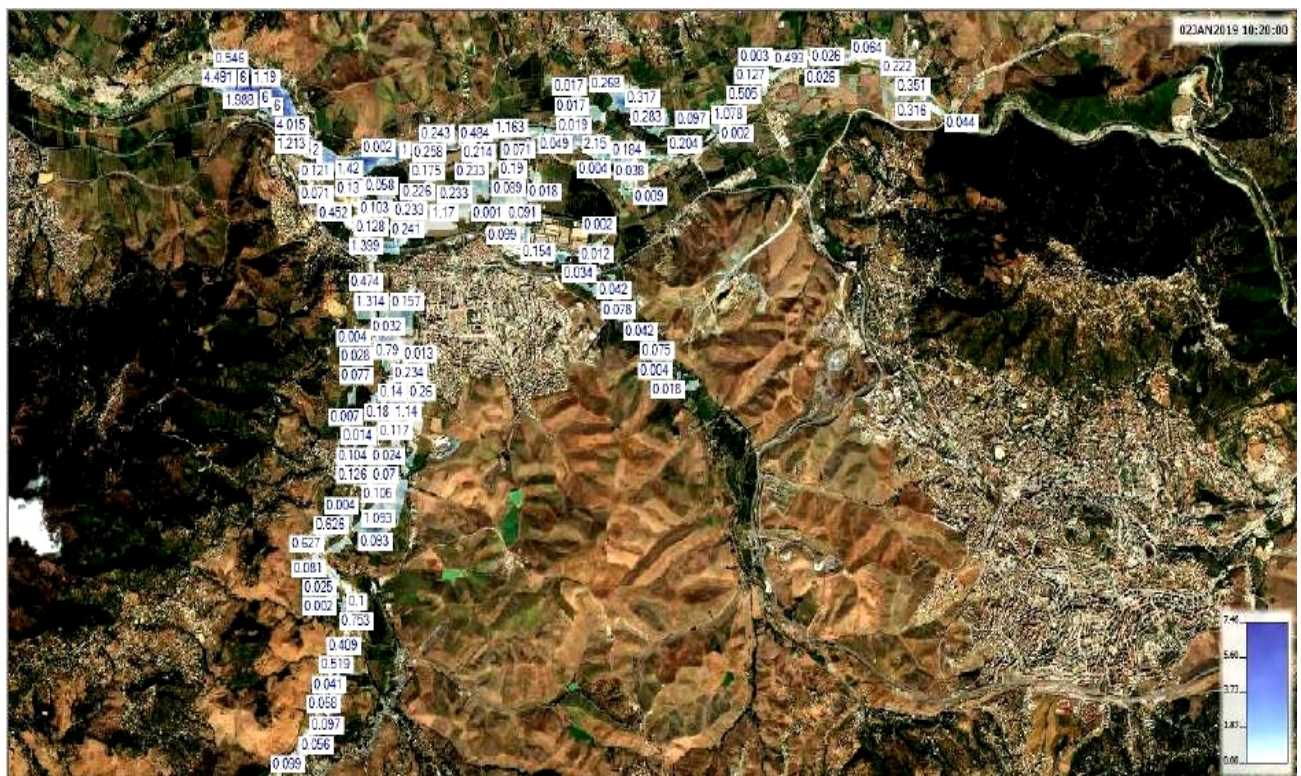


Figure 5.18. les hauteur d'eau pour une période de retour de T=10 ans

Dans le cas d'un débit de crue de la période de retour de 20 ans, la zone frappée par les inondations est de 387,17 hectares. La hauteur de l'inondation est de 0,1 à 8 mètre. Les caractéristiques de la propagation et de la hauteur de la submersion de cette période sont les suivantes : 0,1 à 0,4 mètre de hauteur sur une superficie de 19,43 hectares bâtie ; 0,4 à 1,8 mètre de hauteur sur une superficie de 75,05 hectares zone agricole ; 1,8 à 2,6 mètre de hauteur sur une superficie de 32,20 hectares de le lit major ; 1,6 à 8 mètre de hauteur sur une superficie de 17,49 hectares qui présenter le lit mineur de l'oued. La hauteur de l'inondation a été dominante pendant cette période, égale 0,2 à 0,4 mètre.

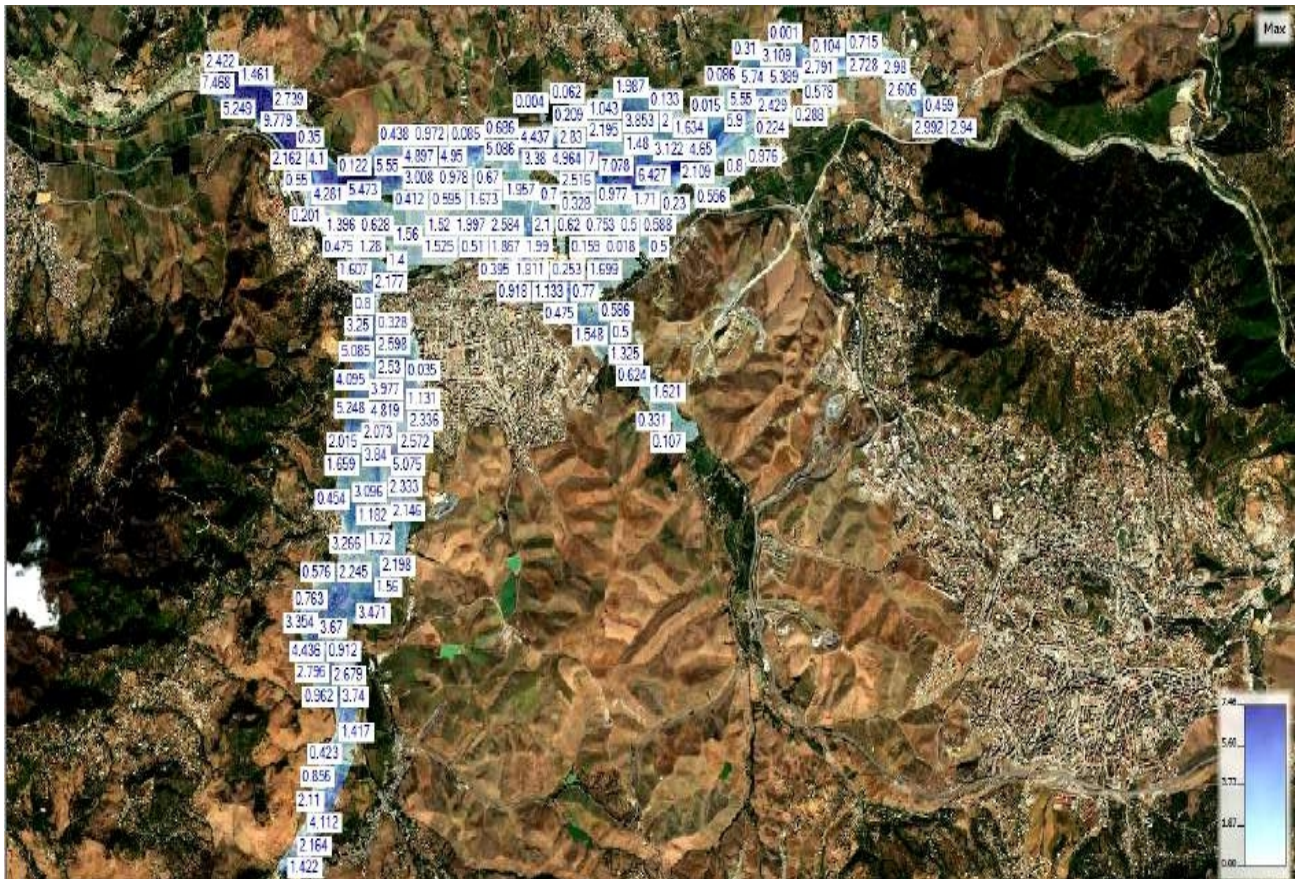


Figure 5.19. les hauteur d'eau pour une période de retour de T=25 ans

La superficie couverte au temps du déversement maximal pour la période de retour de 50 ans est de 564,23 hectares. La hauteur de submersion varie de 0,1 à 10 mètre. Les détails de la hauteur et de la largeur de la submersion pour cette période de retour, à savoir : Une profondeur de 0,1 à 0,4 mètre couvrant une superficie de 39,09 hectares zone d'habitation et industrielle ; une hauteur de 0,4 à 1,4 mètre couvrant une superficie de 60,31 hectares zone agricole ; une hauteur de 1,4 à 2,6 mètre touchant une collectivité de 33,49 hectares le plain inondable dans le lit major ; une hauteur de 2,6 à 10 mètre occupant une région de 20,95 hectares dans le lit mineur de l'oued ; une hauteur de 0,8 à 1 mètre touchant une région de 10,39 hectares. Les profondeurs de 0,4 à 1,4 mètre ont la zone la plus dominante dans cette période.

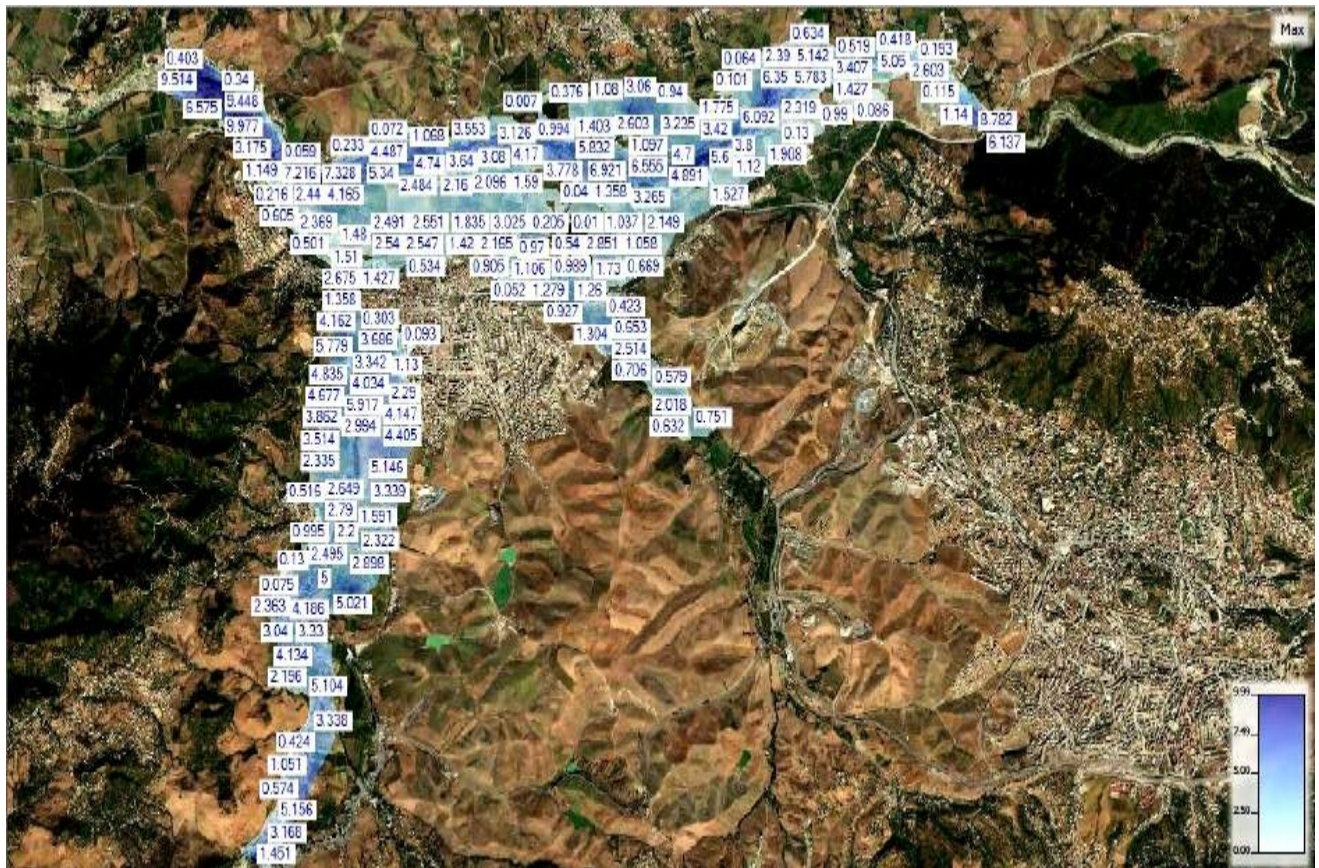


Figure 5.20. les hauteurs d'eau pour une période de retour de $T=50$ ans

Les résultats de la modélisation de l'inondation pendant le débit de crue de la période de retour de 100 ans ont montré que la zone inondée était de 770,12 hectares. La hauteur de la submersion varie de 0,1 à 14 mètres. Les caractéristiques de la hauteur et de la largeur de l'inondation sont les suivantes : Une hauteur de 0,1 à 0,2 mètre couvrant une région de 39,56 hectares ; une hauteur de 0,2 à 0,4 mètre couvrant une région de 62,44 hectares ; une hauteur de 0,4 à 0,6 mètre couvrant une région de 34,13 hectares ; une hauteur de 0,6 à 0,8 mètre couvrant une région de 22,56 hectares ; une hauteur de 0,8 à 1 mètre couvrant une région de 11,43 hectares. La zone inondable la plus dominante dans cette période de retour est d'une hauteur de 0,2 à 0,4 mètre.



Figure 5.21. les hauteurs d'eau pour une période de retour de $T=100$ ans

Les cartes d'inondation pour les périodes de retour concernées ont été élaborées et la zone inondée ainsi que les hauteurs d'inondation maximale, minimale et moyenne ont été indiquées dans les figures les **figures 5:18;19;20;21**.

À partir de ces cartes de submersion, on peut déduire que les régions de basse altitude comme la zone industrielle (Cotitex DBK), la gare ferroviaire de DBK, cité Touares 3, cité El Talian, cité Frère Khellil, et cité LANDC sont fortement inondées, même si la période de retour est relativement faible. Les résultats de l'étude prouvent qu'il est nécessaire de construire un système d'alerte fiable pour le développement de la région, et de mettre en place des mesures de protection contre les inondations dans les quartiers vulnérables. (**Figure 5.22**)

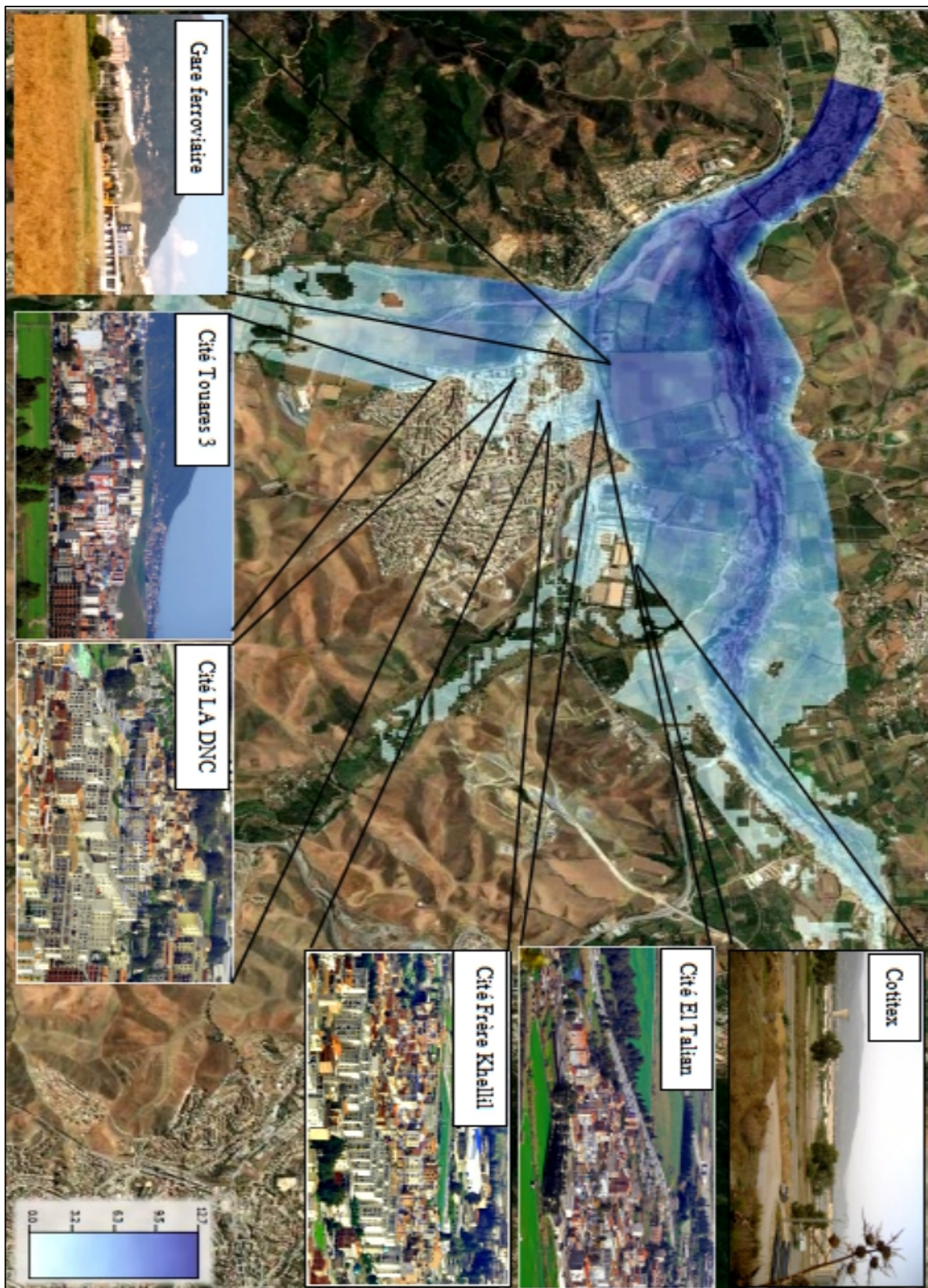


Figure 5.22. les quartiers vulnérables dans la période de retour T=100 ans

6. Conclusion

Dans ce chapitre la modélisation numérique bidimensionnelle à l'aide du modèle HEC-RAS 2D et l'utilitaire de SIG, a été présentée, d'une part pour déterminer les paramètres hydrauliques de l'onde de rupture du barrage ; d'autre part, ceux relatifs au débordement de l'oued Sébaou et ses affluents et d'exporter les résultats hydrauliques vers un système d'information géographique. Cette plate-forme a permis de produire de précieuses cartes illustrant l'étendue de la zone d'inondation et les heures d'arrivée de la vague déferlante du barrage aux endroits vulnérables en aval du barrage de Taksebt.

L'analyse des résultats montre que l'inondation causée par le bris du barrage de Taksebt affecterait gravement plusieurs agglomérations, ce qui pourrait entraîner des risques de pertes de vies humaines et des dommages matériels. La zone à risque en aval a ensuite été classée en trois niveaux de risque en fonction de l'heure d'arrivée de la vague de crue. Les cartes d'inondation fournissent une estimation des conséquences directes, mais les conséquences indirectes, également appelées conséquences à long terme, seront également énormes en cas de défaillance d'un barrage. Le développement des zones doit être planifié en tenant compte des cartes des risques d'inondation susmentionnées, qui garantissent une meilleure protection des personnes exposées au risque de défaillance d'un barrage, ainsi que la réduction des conséquences économiques et environnementales de la défaillance.

L'analyse des résultats finaux des risques d'inondation au niveau de la moyenne vallée de Sébaou est présentée sous forme des différentes cartes pour chaque période de retour à l'aide de Ras mapper. Ces différents résultats ont alors été pris en compte pour l'établissement d'une méthodologie spécifique pour la cartographie de risques des inondations. On s'est intéressé aux zones à très fort risque qui sont situées dans les secteurs à altitude moyenne ou faible, avec un couvert végétal plus ou moins dense. Les zones à très forts risques s'étendent principalement dans la partie centrale du bassin versant. Ces zones présentent un danger évident lors des crues. D'après la carte des zones à risques d'inondations, on remarque que le tronçon Bougdoura est le plus exposé au risque d'inondation à cause de la topographie du lit de l'oued qui se rétrécit au niveau de cette région ce qui le rend incapable à contenir le débit d'eau. Cette zone est caractérisée par des méandres qui favorisent le débordement.

Chapitre 6 : Élaboration d'un plan d'alerte et d'intervention pour la protection et l'évacuation des populations en cas de rupture du barrage de Taksebt

1. Introduction

Dans le monde entier, la plupart des population considérer les catastrophes naturelles (Tremblements de terre; incendies; inondations; ouragans et autres) avec fatalisme. Ils pensent qu'ils n'y peuvent rien. Cette attitude est compréhensible, mais erronée. Nous devons essayer de la changer. En fait, nous pouvons faire beaucoup pour protéger des vies et limiter les dégâts. (Dorge, et, al 2004)

Il importe de se préparer à tout mouvement de populations, prévu et non, avant, pendant et après une catastrophe. Dans ce chapitre on s'intéresse à l'élaboration d'un plan d'évacuation, les moyens utilisées pour communiquer, le système d'alerte adapté pour la protection des gens et sensibiliser la communauté sur le risque d'inondation induit par la rupture du barrage Taksebt. Ce chapitre met en évidence également notre stratégie de l'utilisation de cartes informatives fournies par le SIG (plan particulier d'intervention) pour présenter des différents niveaux de vigilance au niveau de la région vulnérable. Le rôle principal de la phase d'élaboration des plans est de générer des orientations de décision par rapport auxquelles les résultats de l'analyse des risques peuvent être comparés. Elle permet notamment d'accroître la sécurité publique, de réduire les difficultés personnelles, de limiter les dommages causés aux biens, à l'économie et l'environnement.

2. Alerte et évacuation

Pour assurer la sécurité de la population en aval du barrage Taksebt, étant donné que le débit maximal produit lors de la rupture du barrage est élevé depuis le site du barrage jusqu'à 45 km, il est obligatoire d'installer un système d'alerte précoce et d'évacuation en cas de rupture du barrage. Le choix de la solution pour avertir l'agglomération au niveau de la vallée moyenne de l'oued de Sébaou doit tenir compte de la dispersion géographique de la population, telle que les petites zones rurales, les zones urbaines densément urbanisées et les habitations dispersées. En outre, il doit également reposer sur la distance du site du barrage ainsi que sur la proximité des ressources des services de protection civile, et toutes les personnes disposant d'une autorité d'intervention

2.1. Le système d'alerte

Le système d'alerte consiste en une diffusion par les autorités en phase d'urgence d'un signal destiné à avertir des gens d'un danger, imminent ou en train de produire ses effets, susceptible de porter atteinte à leur intégrité physique et nécessitant un comportement réflexe de sauvegarde. L'information des populations consiste :

- ✓ Diffuser des consignes de comportements de sauvegarde, par anticipation ou concomitamment à un danger susceptible de porter atteinte à l'intégrité physique d'individus
- ✓ Notifier si nécessaire la fin de l'alerte
- ✓ Aviser les gens à risque de l'arrivée d'un événement d'une particulière gravité affectant la population, les biens ou l'environnement, sur la mise en place de mesures de soutien, en phase de stabilisation ou de retour progressif à la normale.

Dans le cas de rupture de barrage, la population est avertie au moyen du signal national d'alerte. En outre, un signal spécifique pour les structures hydrauliques est transmis au moyen de sirènes de type corne de brume.

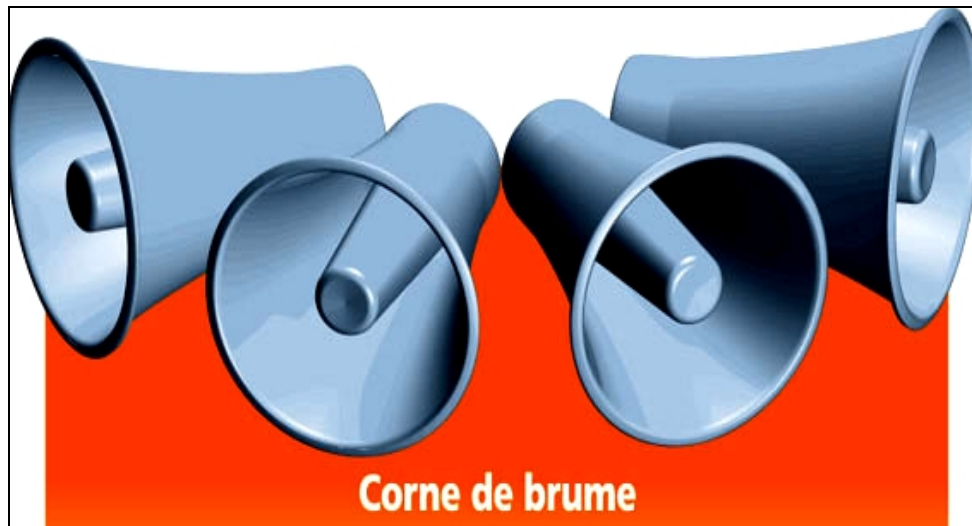


Figure.6.1. Signal d'alerte spécifique aux ouvrages hydrauliques

(source www.georisques.gouv.fr)

Les sirènes sonores sont les systèmes d'avertissement les plus couramment utilisés. Elles fournissent une notification immédiate en diffusant une tonalité composée d'un son de sirène ou d'un message vocal et peuvent inclure des options de diffusion de messages vocaux préenregistrés. Généralement, ce type de signaux a trois niveaux d'alerte différents:

➤ **Signal de pré-alerte:** Il se déclenche dès les premiers signes inquiétants menaçant la sécurité du barrage. Il consiste en une série de tonalités uniformes de 10 secondes d'une durée de 5 à 6 minutes, interrompues par une pause de 5 secondes. Un signal d'alerte spécifique, de type corne de brume, est réservé à la rupture de barrage. Pour le diffuser, un réseau de sirènes est installé dans la zone dite de "sécurité immédiate" (zone du premier quart d'heure). En aval de cette zone de "sécurité immédiate", les populations sont alertées par les pouvoirs publics au moyen des sirènes du réseau général d'alerte ou de véhicules équipés de haut-parleur (police; pompiers ; croissant rouge) .Ce signal ne concerne que la zone des 15 minutes et est destiné à initier les procédures d'évacuation, car il ne serait pas suffisamment long pour évacuer les résidents après la rupture du barrage.

➤ **Signal d'alerte haute :** Il est déclenché une fois que le barrage est en risque de rupture officielle. Il consiste en une série de 10 sons modulés à une fréquence très élevée qui dure de 5 à 6 minutes, interrompue par une pause de 5 secondes. Il s'agit de la zone d'alarme 1 et, à un degré moindre, de la zone d'alarme 2. Dans ce cas, les autorités locales doivent sauver la population touchée en l'aidant à atteindre des zones plus sûres, généralement composées de hauts bâtiments et de collines.

➤ **Fin de l'alerte:** Elle se déclenche lors du retour à la situation normale. Une sirène diffusant une tonalité continue de 30 secondes annonce ce niveau d'alerte. Les atouts de cette alternative d'alerte sont tels qu'ils permettent une communication instantanée avec toutes les

populations à risque, notamment en permettant une alerte rapide dans les zones très peuplées, en garantissant une bonne couverture (y compris dans des zones isolées) et un haut degré de crédibilité auprès du public. De plus, cette solution d'alerte peut avoir un faible coût de maintenance, elle est flexible et extensible pour le futur. Elle est équipée d'unités avec accumulateurs électriques et disponibles pendant les pannes téléphoniques et électriques.

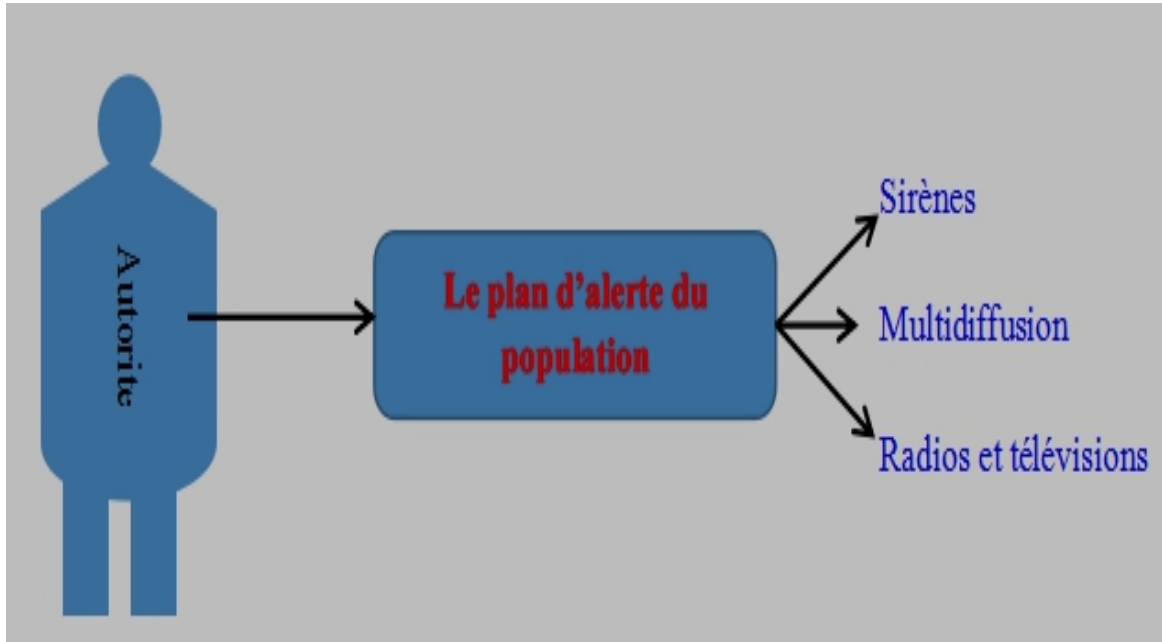


Figure.6.2. Architecture globale du plan d'alerte

Dans la zone 1 Comprenant les villages de Sidi Naàmane, Dràa Ben Khada et Tadmait, en raison d'un retard de l'heure d'arrivée de la première onde comme l'explique le chapitre précédent, l'alerte pourrait consister en un avertissement public utilisant des systèmes sonores, ainsi qu'en adoptant des systèmes visibles (lumières stroboscopiques et panneaux d'affichage); les notifications personnelles directes par téléphone ou par téléphone cellulaire, l'avertisseur de porte à porte, les haut-parleurs de mosquées et, de nos jours, l'utilisation d'un service de messages courts (SMS) dans les téléphones mobiles par diffusion cellulaire. Les émissions d'information de la télévision ou de la radio et les réseaux sociaux, peuvent être utilisées dans cette zones. (Viseu, 2006) Les diffusions par les radios et les télévisions, sont des moyens d'information très efficaces du public en cas d'urgence.

Les responsables du barrage Taksebt doivent informer directement les résidents à l'aval du barrage si les délais d'avertissement disponibles pour ces résidents sont inférieurs à ceux disponibles via le système d'alerte. Ces dispositions devraient découler d'un accord négocié entre les parties prenantes et consignées dans les plans d'évacuation des gens.

2.2. Le plan d'évacuation

L'évacuation est une stratégie de gestion des risques qui peut être utilisée pour atténuer les effets d'une menace réelle ou potentielle de danger. Cela implique le déplacement des gens vers un endroit hors la zone de risque et plus assuré. Cette stratégie peut être partielle, comme les évacuations de camping régulièrement pratiquées face au risque d'inondations dans les pays qui sont frappées par ce phénomène, ou évacuation totale.

Pour une évacuation largement efficace, elle doit être planifiée et mise en œuvre de manière

appropriée. Les défis posés par un déplacement massif de gens dans le cadre de gestion de risque sont cependant élevés :

- ✓ Risques liés avec la circulation en lien avec une augmentation de la densité du trafic,
- ✓ Regroupements de personnes augmentant les risques d'exposition,
- ✓ Incivilités ou refus de suivre les consignes,
- ✓ Manque de préparation pour des événements de protection civile.

Le plan d'évacuation peut être considéré comme une méthodologie cohérente basée sur une séquence d'actions qui doivent être entreprises de manière cyclique pour la protection des gens au niveau de la moyenne vallée du Sébaou à l'aval du barrage Taksebt.

Lors de l'élaboration d'un plan d'évacuation, il est important de connaître le processus de planification d'urgence car les étapes impliquées sont cohérentes avec celles utilisées dans la planification de l'évacuation. Le succès de l'évacuation dépendra fortement d'une bonne organisation, de la préparation et des tests, ainsi que d'une information publique efficace dans un contexte de crise. La planification de l'évacuation est un processus qui comprend les étapes suivantes :

- ✓ La planification des évacuations doit être bien préparée et doit être effectuée par un personnel qualifié et dans presque tous les cas réels.
- ✓ L'alarme doit être activée dès qu'une défaillance est détectée, afin d'évacuer un grand nombre d'habitants. ([Viseu, 2006](#))
- ✓ Identifier les moyens disponibles pour alerter les autorités et émettre des avertissements publics à l'aide de systèmes de surveillance avancés avec une capacité en temps réel afin de prédire un accident de barrage avec plus de précision.
- ✓ Assurer une bonne coordination entre les propriétaires de barrages, les responsables de la sécurité des barrages et les agents de la protection civile et identifier leurs responsabilités et missions.
- ✓ Fournir de bonnes informations au public afin de développer et de coordonner les opérations, garantissant ainsi une bonne réponse aux crises d'inondation.
- ✓ Les stratégies de communication des risques doivent être sélectionnées, testées et efficacement mises en œuvre.

L'efficacité de l'évacuation dépend de nombreux facteurs tels que l'efficacité de l'alerte et la qualification du personnel formé, la répartition par âge, la disponibilité en temps et les voies d'évacuation disponibles. En revanche, l'évacuation de plusieurs centaines de milliers de personnes constitue une opération particulièrement complexe, dépassant très largement les capacités de la majorité des communes, même parmi les plus importantes, et nécessitant une approche intercommunale voire interdépartementale ainsi que, souvent, la mobilisation d'importants moyens humains et matériels extérieurs au territoire. Ces informations devront être immédiatement mises à la disposition des coordonnateurs des interventions. Le personnel doit être formé et capable de les mettre à jour régulièrement lors d'une intervention. ([CEPRI, 2014](#))

3. Les types d'évacuation

Les agglomérations exposées à un risque imminent de rupture de barrage quel que soit son origine, peuvent se préserver, soit en quittant la zone susceptible d'être inondée, soit en rejoignant un lieu situé à une hauteur supérieure au niveau attendu des eaux au sein de la zone inondée. Ces deux types de comportements individuels face au risque inondation sont à la base des deux grandes stratégies d'évacuation que les spécialistes anglo-saxons et néerlandais de la gestion de crise distinguent sous les termes d'évacuation dite "horizontale" et d'évacuation dite "verticale". Chaque type d'évacuation présente des objectifs, des avantages, des conditions de mise en oeuvre, des inconvénients et des risques qui lui sont propres.(CEPRI, 2014)

3.1. L'évacuation horizontale

L'évacuation horizontale constitue probablement la stratégie d'évacuation la mieux connue et la plus plébiscitée. Le plan d'évacuation horizontale face à un risque imminent de rupture du barrage Taksebt, vise à ce que les gens se mettent à l'abri du danger en quittant, pour une durée plus ou moins longue, la zone susceptible d'être inondée.(CEPRI, 2014) Les personnes ainsi évacuées sont alors provisoirement relogées, soit par leurs propres moyens (dans la famille, chez des proches...) ou pris en charge dans des hébergements collectifs provisoires (hôtels, salles polyvalentes, résidences universitaire ...).

Cette évacuation peut s'effectuer loin de la zone inondée au moyen d'une délimitation des voies de circulation générales et la définition des mesures de contrôle de la circulation. Ce modèle a donné le choix : «Les autorités, devraient-elles ordonner l'évacuation massive de toute la zone inondée ? Mais ce n'est pas facile. C'est un autre risque très important de mettre sur la route nationale _RN12_ et les autres raccourcis routiers comme présentés dans les cartes précédentes, des milliers de véhicules sur cette route, par ce que la seule route utilisée par les gens concernés par ce risque malgré qu'il y ait d'autres raccourcis.

3.2. L'évacuation vertical

L'évacuation verticale peut être définie comme le mouvement de personnes à l'intérieur de la zone inondée ou susceptible de l'être, , dans le but d'atteindre un endroit relativement sûr au-dessus du niveau de l'eau.

L'évacuation verticale constitue la réponse spontanée de personnes surprises par l'inondation et tentant d'atteindre un bâtiment disposant d'étages, ou un autre moyen , tel que des arbres ou des îles , point haut, coteau.(CEPRI, 2014)

Ce type d'évacuation peut également être considérée comme une stratégie planifiée lorsque l'évacuation horizontale n'est pas une option réalisable ni pertinente. C'est dans le cas de la rupture de barrage Taksebt où moins de 30% de la population devrait être en mesure d'être évacuée avant le début d'une inondation dans certaines zones d'aval de barrage Taksebt, notamment Oued Aissi; Rehahlia; Timizar n'Leghvar; Tazmalt. Ce type d'évacuation comprend néanmoins une dimension "horizontale" dans la mesure où elle nécessite généralement un déplacement des gens pour se rendre sur le site hors de l'eau. Ce trajet est normalement plus court qu'en cas d'évacuation horizontale. L'évacuation verticale est souvent mise en oeuvre de manière spontanée et en urgence lorsque les individus se retrouvent pris par les eaux.

3.3. La mise en œuvre d'évacuation dans les cas de rupture de barrage Taksebt

3.3.1. La mise en œuvre d'une évacuation horizontale

La mise en œuvre d'une évacuation horizontale n'est cependant possible que sous certaines conditions. Le délai entre les premiers départs et la survenue de la première onde de submersion doit être suffisant pour que tous les gens concernés puissent être évacués à temps. Dans notre cas l'évacuation horizontale est applicable dans la zone 1, qui comprend les communes de Drâa ben khadaa; Tadmait; Sidi Naâmane; et la zone 2 qui s'étend de Baghlia -Sid Daoud à la mer

Les autorités au niveau de ces communes doivent pouvoir apporter un soutien particulier aux populations les plus vulnérables qui pourraient ne pas pouvoir évacuer par leurs propres moyens (personnes hospitalisées, résidents de maisons de retraite, personnes ne disposant pas de véhicule, touristes étrangers...).[\(Fujiki, Kenji et al, 2019\)](#)

De manière générale, une attention particulière doit être portée aux habitants déjà fragilisés sur le plan économique et financier, isolés socialement, installés dans le lit majeur de l'oued Sébaou et Bougdoura (urbanisation sauvage), qui pourront rencontrer des difficultés pour assurer leur propre évacuation. Les habitants ayant eu pour consigne d'évacuer mais qui ne pourraient pas trouver un hébergement temporaire alternatif par leurs propres moyens, auprès de leur famille par exemple, doivent pouvoir être accueillis et hébergés dans des conditions de confort et de dignité minimales dans les écoles ; les hôtels; les maisons de jeunes ; les résidences universitaires qui se trouvent au niveau des communes de la wilaya de Tizi Ouzou.

La gestion d'une évacuation horizontale massive nécessite des moyens humains, techniques et logistiques très importants pour accompagner le processus d'évacuation et plus particulièrement pour accompagner les personnes qui ne peuvent pas se déplacer (résidents à l'hôpital, détenus, personnes sans moyen de transport) et qui ne le sont pas capables de reloger par leurs propres moyens.[\(CEPRI, 2014\)](#)

3.3.2. La mise en œuvre d'une évacuation verticale

L'évacuation verticale vers des résidences collectives situées au sein de la zone de 15 minute constitue une solution intéressante pour les populations qui ne pourraient ni rester en sécurité chez elles ni évacuer de manière horizontale. Pour que les gens puissent vivre dans des conditions décentes et dignes, le nombre de personnes accueillies doit être limité et adapté aux capacités d'accueil du site et les lieux doivent être aménagés et équipés en rapport avec la durée prévisible du séjour ; Ce qui peut amener les autorités publiques à prévoir plusieurs bâtiments et les Tours réparties sur la zone de 15 minute qui comprend Oued Aissi et Rehahlia; pour éviter la saturation liée au caractère massif de l'évacuation. Plus la durée de séjour est longue et plus les besoins en termes de confort de la population seront importants.

La mise en œuvre de ce type d'évacuation nécessite une bonne préparation et une organisation minutieuse afin d'éviter autant que possible que la concentration de la population dans des sites non adaptés, La promiscuité et l'isolement au sein de la zone inondée créent les conditions d'une crise humanitaire telle que celle qu'ont connue les populations au sein de la zone de Oued Aissi et Rehahlia; Timizar; Tazmalt; après le passage de la première vague de rupture du barrage Taksebt.

Plusieurs conditions doivent être réunies pour que l'évacuation verticale vers un ou plusieurs

bâtiments collectifs soit réalisable dans des conditions de relative sûreté : l'espace d'hébergement des populations doit être situé à une hauteur supérieure aux plus hautes eaux attendues. (Fujiki, Kenji et al, 2019) Le délai entre l'alerte et le temps d'arrivée de la vague de la zone doit être suffisant pour que les personnes puissent rejoindre le bâtiment prévu à cet effet. Plus la vague susceptible d'être inondée est vaste, plus il sera nécessaire de multiplier les bâtiments afin que chaque personne, où qu'il se trouve, puisse rejoindre un bâtiment avant l'arrivée de l'inondation.(CEPRI, 2014)

Dans le cas présent, dans la zone de 5 km à l'aval du barrage de Taksebt c'est-à-dire les agglomérations de Oued Aissi et Rehahlia; Timizar; Tazmalt , il est impossible d'évacuer les populations en dehors de la zone de danger au moment où la rupture du barrage est inévitable et certaine, c'est-à-dire au moment où l'état d'alerte générale est déjà déclenché, parce qu'il n'y a pas suffisamment de temps. Dans ce cas, la seule possibilité est de faire une évacuation préventive, immédiatement après le déclenchement du signal de l'état de pré alerte

4. Consignes à respecter par la population

- ✓ Renseignez-vous sur le risque d'inondations dans votre zone.
- ✓ Conservez propres les environs de votre maison, en éliminant les feuilles mortes, les branches et tout objet pouvant être emporté par l'eau, afin d'éviter la formation d'embâcles.
- ✓ Vérifiez régulièrement l'état de la maison, spécialement les tuyaux d'écoulement, afin d'éviter ou de réduire les effets d'une inondation dans la maison.
- ✓ Ne stationnez pas votre voiture dans un ravin sec : une crue subite peut l'emporter.
- ✓ Ne campez pas près d'une rivière ou dans un ravin sec : vous risquez d'être surpris par une montée subite des eaux ou par une crue éclair.
- ✓ Ne construisez pas dans une zone comportant un risque d'inondation.

Préparez un 'kit' d'urgence contenant : une lampe de poche avec des piles en réserve; une corde; une boîte d'allumettes; des aliments (non périssables); une trousse de secours; la photocopie de vos papiers d'identité; un canif; un crayon et du papier; un sifflet; une radio à piles.

Il y a lieu d'éviter de :

- ✓ Rester à la maison.
- ✓ Rester dans les véhicules si la circulation est encombrée.
- ✓ Téléphoner (libérer les lignes pour les secours en urgence) .
- ✓ Aller chercher les enfants à l'école pour ne pas les exposer au danger l'évacuation des écoles est une priorité.
- ✓ Allumer le feu.

5. Mesures d'action pendant la crise

- ✓ Si la maison est inondée, coupez l'électricité et le gaz, et abandonnez les étages inférieurs.

- ✓ Ne quittez pas la maison à moins d'être en grand danger ou de suivre les ordres des autorités.
- ✓ Si nécessaire, calfeutrez l'espace existant entre les portes donnant à l'extérieur et le sol, en utilisant une serviette ou des torchons, afin d'éviter l'entrée d'eau.
- ✓ Mettez les animaux en sécurité.
- ✓ Mettez les appareils électroménagers sur les armoires ou à l'étage supérieur.
- ✓ Protégez les produits toxiques afin d'éviter qu'ils ne se répandent.
- ✓ Si la maison est inondée, réfugiez-vous dans les étages supérieurs et appelez au secours par les fenêtres.
- ✓ Évitez de prendre la voiture.
- ✓ Si vous êtes à la campagne, éloignez-vous des zones où s'écoule l'eau et dirigez-vous vers les points élevés.
- ✓ Soyez attentif aux câbles électriques tombés et aux écroulements.
- ✓ Si vous ne pouvez pas éviter de rester à l'extérieur, mettez des chaussures résistantes.
- ✓ Emportez avec vous un bâton ou un manche à balai ainsi que des vêtements bien visibles, une lampe de poche... tout ce qui peut faciliter votre repérage.

Le retour de la population dans la zone touchée ne sera autorisé qu'après la fin de l'état d'alerte générale ou de l'état de pré alerte.

6. Conclusions

En règle générale, il n'existe pas un système d'alerte unique capable de répondre à toutes les exigences de notification souhaitées. Chaque système a ses avantages et ses inconvénients. Cependant, il y a des aspects assez importants à prendre en compte ; principalement pour être sûr que le message est facilement compris du public et pour garantir la fiabilité du système : il faut éviter les fausses alarmes et assurer une maintenance efficace.

Dans ce chapitre des mesures d'alerte et d'évacuation ont été suggérées pour les trois zones à risque d'inondation suite à la rupture du barrage de Taksebt selon la propagation de l'onde afin d'atténuer les pertes. Les cartes d'inondation fournissent non seulement une estimation des conséquences directes, mais aussi les conséquences indirectes, également appelées conséquences à long terme, qui sont également énormes en cas de défaillance d'un barrage. Le développement des zones doit être planifié en tenant compte des cartes des risques d'inondation, qui garantissent une meilleure protection des personnes exposées au risque de défaillance d'un barrage, ainsi que la réduction des conséquences économiques et environnementales.

L'intérêt d'un plan d'évacuation, pour les autorités planificatrices : permet d'une part, d'identifier des espaces prioritaires dans le processus d'évacuation ; d'autre part, d'anticiper l'impact du plan d'évacuation sur les besoins des populations, entre autres dans la prise en charge de leur hébergement. Un plan d'évacuation horizontal conduit évidemment à des besoins plus élevés. Les populations et les organisations locales peuvent également obtenir de l'aide pour développer les compétences nécessaires pour assurer une bonne application du plan de l'évacuation en cas de

rupture de barrage (planification communautaire de la gestion des risques, opérations de recherche et de sauvetage, premiers soins, gestion des abris d'urgence, évaluation des besoins, distribution des secours d'urgence). Ces interventions sont généralement plus rapides que les interventions externes et moins coûteuses et plus durables à long terme

Conclusion générale et perspectives

L'analyse des risques naturels d'inondations dues aux débordements des cours d'eau ou à la rupture d'infrastructures hydrauliques (barrage) est basée essentiellement sur trois volets concepts: hydrologique, hydraulique et cartographique.

Le concept hydrologique permet d'alimenter le modèle hydraulique par les conditions aux limites amont à l'aide de l'hydrogramme.

Le concept hydraulique permet de faire un modèle hydraulique nécessaire afin de déterminer les zones inondables. Cette modélisation de l'écoulement à surface libre non permanent est décomposée en écoulement d'eau dans le chenal principal et en écoulement d'eau dans les plaines inondables

Enfin ,le concept cartographique sert à représenter les résultats de l'hydraulique, c'est-à-dire que la variable aboutit à une carte de répartition spatiale du risque le long du cours d'eau à l'aide de SIG.

Le modèle hydraulique bidimensionnel (HEC RAS 2D) et le système d'information géographique (SIG) ont été d'un apport indéniable dans la réalisation de cette étude. Ils s'imposent comme de véritables outils de traitement et d'analyse de l'information spatiale.

Le scénario de la rupture du barrage de Taksebt modélisé à l'aide de ce modèle a montré la formation d'une onde de crue se traduisant par une élévation brutale de la hauteur d'eau à l'aval du barrage Taksebt. Cette modélisation fournit un portrait assez précis des écoulements qui doivent se propager vers l'aval du barrage et déterminer les caractéristiques de l'onde de submersion en tout point de la moyenne vallée du Sébaou : la hauteur d'eau, la vitesse d'écoulement et le temps que devrait mettre cette onde pour arriver aux villages de Oued Aissi ; Ait Ottomane; Sidi Naàmane; Draa Ben Khada; Tadmaït; et Baghlia.

L'exploitation des résultats a permis l'élaboration et l'organisation d'un système d'alerte et d'un plan d'évacuation préventive de la population. Le modèle HEC RAS 2D et le SIG sont bien adaptés pour aider à la réalisation d'analyses de la rupture du barrage Taksebt. L'analyse des risques associés à une rupture du barrage aidera à développer notre plan d'évacuation pour la sécurité des populations riveraines qui dépendent de la qualité de l'information qu'elles reçoivent. Ce travail présente la méthodologie utilisée pour interpréter le scénario de rupture du barrage Taksebt, pour assurer un bon système d'alerte et une bonne organisation du plan d'évacuation ainsi que les options disponibles sur les cartes de risques.

Ce travail a mis en lumière et a explicité un certain nombre d'éléments clés quant aux différentes stratégies d'évacuation des populations leur planification ainsi qu'aux outils complémentaires concourant à faciliter l'organisation et la mise en œuvre d'une évacuation massive.

Plusieurs acteurs étatiques ; Privés; Associations civiles; et l'armée nationale, peuvent avoir à jouer un rôle majeur dans la mise en œuvre du plan d'évacuation dans toutes les zones touchées par l'onde de rupture du barrage Taksebt.

Le modèle hydraulique de débordement de l'Oued Sébaou et son affluent l'oued Bougdoura fournit une évaluation des limites des zones menacées lors des crues dans les différents secteurs analysés et des exemples concrets pour la Commune de Draa Ben Khedda.

Les résultats fournis par ce modèle sont particulièrement intéressants du fait de la précision obtenue dans la représentation du modèle numérique de terrain (MNT). Les images satellitaires (Google Earth) permettent donc de déterminer avec une grande précision l'étendue des inondations, améliorant ainsi la cartographie des inondations déjà existantes sur le plan d'occupation des sols (POS) de la commune de Draa Ben Khedda. Les résultats obtenus avec la modélisation des niveaux d'eau débordés pourraient donc être utilisés par plusieurs autres agglomérations riveraines. Toutefois, les cartes réalisées permettent d'identifier avec précision les infrastructures touchées en fonction de différentes périodes de retour. Il devient ainsi possible de cibler les résidences et bâtiments publics à évacuer, et donc d'agir efficacement en identifiant les zones d'évacuation prioritaires. De plus, les communes doivent identifier leurs zones inondables, les données d'élévation utilisées dans la modélisation des niveaux d'inondation sur le débordement de l'Oued Sébaou et son affluent l'oued Bougdoura pourraient également être utilisées pour délimiter les zones inondables.

D'autres efforts peuvent être réalisés afin d'augmenter la précision des résultats, en disposant d'un modèle numérique de terrain (MNT) de meilleure qualité.

Toutefois, l'application du modèle hydraulique Hec Ras 2D pour la rupture du barrage Taksebt fournit ici un exemple concret des possibilités de ce modèle, qui pourrait d'ailleurs être appliqué au futur barrage de Souk Tleta à Tizi Ouzou pouvant être affecté par ce risque.

L'importance du SIG en aménagement, le plan d'occupation des sols est avéré non seulement pour la construction de bases de données précises des zones inondables mais aussi la possibilité de mener des analyses complexes pour obtenir une cartographie relativement simple à comprendre pour les décideurs de la wilaya de Tizi Ouzou. Il est nécessaire de développer des bases de données géo-référencées dans de nombreux domaines allant de l'hydrologie à l'hydraulique et la géotechnique. Ces bases de données doivent être compatibles à différentes échelles et être conservées dans le temps. Les SIG constituent un outil puissant pour la compilation, les calculs, les analyses et la visualisation, visant à la compréhension de phénomènes complexes comme la rupture des barrages.

Concernant la modélisation hydraulique le risque naturel d'inondation au niveau de la moyenne vallée du Sébaou, nous avons essayé d'orienter les futures recherches sur les aspects à prendre en considération pour parer aux risques d'inondations au niveau de la commune de Draa Ben Khedda si des mesures de précautions ne sont pas prises en compte. Ce travail reste toujours à actualiser et à enrichir au fur et à mesure que l'on dispose de données climatiques et hydrauliques et d'extension de l'agglomération.

Références bibliographique

1. Abednego, B., Caloz, R., & Collet, C. (1990). L'utilisation des SIG dans la modélisation en hydrologie de surface. *Geographica helvetica*, 45(4), 161-167.
2. AMELIE, AMANEJIEU. Analyse temporelle de la représentation du risque d'inondation de 1980 à 2018 à Douala-Cameroun. 2018.
3. ANRH (agence nationale des ressources hydriques), (2010). Données pluviométriques, pluviographiques et climatologiques, direction régionale du Blida. Algérie.
4. Arthur, H. G. (1977). Teton dam failure. In *Evaluation of Dam Safety; Proceedings of the Engineering Foundation Conference*.
5. Behloul L., 2004 : Note technique sur l'évènement pluvieux du 09 au 10 novembre 2001. Région d'Alger. Services des études et de prévisions, 15 p.
6. Bekhira, A., Habi, M., & Morsli, B. (2018). Hydrological modeling of floods in the Wadi Bechar watershed and evaluation of the climate impact in arid zones (southwest of Algeria). *Applied Water Science*, 8(6), 1-8.
7. Benhassaine, M. (1980). Recherche sur les modèles de relief et les formations superficielles dans la vallée de l'oued Sébaou. These 3eme cycle, Université Paris VI, France, 282.
8. Bentekhici, N., Benkesmia, Y., Berrichi, F., & Bellal, S. (2018). Évaluation des risques de la pollution des eaux et vulnérabilité de la nappe alluviale à l'aide des données spatiales. Cas de la plaine de Sidi Bel Abbès (Nord-Ouest Algérien). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 31(1), 43-59.
9. Bertoni, J. C. (2006). Urban floods in Latin America: reflections on the role of risk factors. *Frontiers in flood research*, 123-141.
10. BRACHET, Ch et BOLO, P. Système d'information géographique et de visualisation de l'aléa inondation. Application aux crues de la Marne. *La Houille Blanche*, 1997, no 8, p. 61-63.
11. Brunner G. W., (2016) HEC-RAS river analysis system hydraulic reference manual, Ver. 5.0," Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, cpd-69.
12. CALOZ, R., ABEDNEGO, B., MEYLAN, P., & COLLET, C. (1986). Description of a methodology for biomass change mapping with the use of Landsat TM data. In *International geoscience and remote sensing symposium* (pp. 1471-1476).
13. Cannata, M., & Marzocchi, R. (2012). Two-dimensional dam break flooding simulation: a GIS-embedded approach. *Natural hazards*, 61(3), 1143-1159.
14. CEPRI, 2014, L'évacuation massive des populations : Les territoires face à l'inondation. Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation, 100 p., https://www.cepri.net/actualites/items/Nouveau_guide_Evacuation_massive_des_populations.html
15. Chocat, B. (1997). Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation: l'exemple de l'Yseron à Lyon/The potential role of urbanization in increasing the risk of flooding: the example of the Yzeron in Lyon. *Géocarrefour*, 72(4), 273-280.

16. Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 131-142.
17. Derdous, O., Djemili, L., Bouchened, H., & Tachi, S. E. (2015). A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard—A case study of Zardezas reservoir “Skikda, Algeria”. *Journal of Water and Land Development*, (27), 15-20.
18. Desrochers, N. (2017). Calage d'un modèle hydraulique 1D d'un segment de la rivière Athabasca, Alberta, Canada, à l'aide d'images satellitaires Radarsat-2 haute résolution (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke).
19. Djemai, M. (1985). Hydrologie du bassin versant du haut Sébaou; hydrogéologie des formations alluviales (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat d'Ingénieur, Université de Grenoble 1).
20. DJEMAÏ, M., & MESBAH, M. (2008). Caractéristiques Physico-chimiques Et Bactériologiques Des Eaux Du Bassin Versant De L'oued Aïssi (grande Kabylie, Algérie). *Bull. Serv. Géol. Nat.* Vol, 19(1).
21. Djemili, L. (2006) Critères de choix de projet des barrages en terre: étanchéité par le masque en béton bitumineux. Thèse de doctorat. Université El Hadj Lakhdar de Batna.
22. Doussin, N. (2009). Mise en oeuvre locale d'une stratégie globale de prévention du risque d'inondation: le cas de la Loire moyenne (Doctoral dissertation, Université de Cergy Pontoise).
23. Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000-1024.
24. Froehlich, D. C. (2008). Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 1708-1721.
25. Fujiki, K., & Laleau, M. (2019). Une approche géographique pour spatialiser les besoins en hébergements d'urgence en situation de crise: une étude appliquée au cas d'une évacuation massive provoquée par une crue majeure de la seine en région francilienne. *La Houille Blanche*, (3-4), 75-83.
26. Garg, P. K. (2015). The role of satellite derived data for flood inundation mapping using gis. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(3), 235.
27. Gee, D. M. Comparison of dam breach parameter estimators. In *World Environmental and Water Resources Congress (2009) Great Rivers* (pp. 1-10).
28. Geoffroy, L., Aubourg, C., Callot, J., & Barrat, J. (2007). Mechanisms of crustal growth in large igneous provinces: the North Atlantic province as a case study. *SPECIAL PAPERS-GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, 430, 747.
29. González B, R. Effect of the sub-grid geometry on two-dimensional river flow models.. Thèse de baccalauréat. Universitat Politècnica de Catalunya (2017).

30. Hadeid, M., Bellal, S. A., Ghodbani, T., & Dari, O. (2018). L'agriculture au Sahara du sud-ouest algérien: entre développement agricole moderne et permanences de l'agriculture oasienne traditionnelle. *Cahiers Agricultures*, 27(1), 15005.
31. Haltas, I., Elçi, S., & Tayfur, G. (2016). Numerical simulation of flood wave propagation in two-dimensions in densely populated urban areas due to dam break. *Water Resources Management*, 30(15), 5699-5721.
32. Heino, P., & Kakko, R. (1998). Risk assessment modelling and visualisation. *Safety Science*, 30(1-2), 71-77.
33. Izambart, G. (2011). Retour d'expérience et vulnérabilité, L'apport de la pratique de retour d'expérience pour comprendre la vulnérabilité face aux inondations. Mémoire de Master 2 Recherche mention Géographie et Aménagement, Université de Toulouse Le Mirail, 241.
34. Jonkman, S. N., & Kelman, I. (2005). An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *Disasters*, 29(1), 75-97.
35. Khan, A. N. (2011). Analysis of flood causes and associated socio-economic damages in the Hindukush region. *Natural hazards*, 59(3), 1239.
36. Kovacs, Y., Doussin, N., Gaussens, M., Pacoud, C. L., & Afd, O. G. (2017). Flood risk and cities in developing countries. French Development Agency, Paris.
37. Kumar, R. (2019). Flood inundation and hazard mapping of 2017 floods in the Rapti River basin using Sentinel-1A synthetic aperture radar images. In *Applications and Challenges of Geospatial Technology* (pp. 77-98). Springer, Cham.
38. Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28.
39. Linh, N. T. M., Tri, D. Q., Thai, T. H., & Don, N. C. (2018). Application of a two-dimensional model for flooding and floodplain simulation: Case study in Tra Khuc-Song Ve river in Viet Nam. *Lowland Technology International*, 20(3, Dec), 367-378.
40. MAALEL, K., & HAFSIA, Z. (2012). OUVRAGES HYDRAULIQUES.
41. Macchione, F. (2008). Model for predicting floods due to earthen dam breaching. I: Formulation and evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(12), 1688-1696.
42. Marche, Claude. Barrages: crues de rupture et protection civile. Presses inter Polytechnique, 2008.
43. MAREF, N. (2019). Démarche méthodologique d'adaptation d'un système de prévision aux risques d'inondation en Algérie, cas du bassin versant de l'Oued Mekerra (NW Algérie) (Doctoral dissertation).
44. Mason, D. C., Schumann, G. P., Neal, J. C., Garcia-Pintado, J., & Bates, P. D. (2012). Automatic near real-time selection of flood water levels from high resolution Synthetic Aperture Radar images for assimilation into hydraulic models: A case study. *Remote Sensing of Environment*, 124, 705-716.

45. Matgen, P., Schumann, G., Henry, J. B., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2007). Integration of SAR-derived river inundation areas, high-precision topographic data and a river flow model toward near real-time flood management. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(3), 247-263.
46. Mekerta, B., Semcha, A., Rahmani, F., & Troalen, J. P. (2008). Erosion spécifique et caractérisation de la résistance au cisaillement des sédiments du barrage de Fergoug. *Xèmes Journées Nationales Génie Civil–Génie Côtier*, 1, 14-15.
47. Menescal, A. K. (2005). Changing WIPO'S Ways: The 2004 Development Agenda in Historical Perspective. *J. World Intell. Prop.*, 8, 761.
48. Mériaux, P., Royet, P., & Folton, C. (2004). Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations: guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires. Cemagref.
49. Natale, L., Petaccia, G., & Savi, F. (2008). Simulation of Sella Zerbino catastrophic dam-break. In *Proc., Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, River Flow 2008* (pp. 601-607). Ankara, Turkey: Kubaba Congress Dept. and Travel Services.
50. Néelz, S., & Pender, G. (2013). Delivering benefits thorough evidences: Benchmarking the Latest Generation of 2D Hydraulic Modelling Packages. Report—SC120002.
51. NOURI, Myriem, OZER, André, et OZER, Pierre. Etude préliminaire sur le risque d'inondation en milieu urbain (Algérie). *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 2016, vol. 40, no 3, p. 201-208.
52. Oueslati, A. (1999). Les inondations en Tunisie. A. Oueslati.
53. Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O., & Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature communications*, 9(1), 1-12.
54. Paquier, A. (2002). Modélisation des écoulements en rivière en crue: pour une utilisation adaptée des équations de Saint Venant (Doctoral dissertation, Habilitation à diriger des recherches, Université Claude Bernard Lyon 1).
55. Pilotti, M., Maranzoni, A., Tomirotti, M., & Valerio, G. (2011). 1923 Gleno dam break: Case study and numerical modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(4), 480-492.
56. Poulard, C., Chastan, B., Royet, P., Degoutte, G., Grelot, F., Erdlenbruch, K., & Nedelec, Y. (2008). Prévention des inondations par ralentissement dynamique: principe et recommandations. Aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues. *Ingénieries EAT special*, (14), 5-24.
57. QUIROGA, V. M., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Changes in the Hydrologic Design Discharges due to Climate Change: Bolivian Amazonia. *土木学会論文集 G (環境)*, 72(5), I_247-I_252.
58. Roche, P. A., Miquel, J., & Gaume, E. (2012). *Hydrologie quantitative: Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Science & Business Media.

59. Rogers, K. L., Neuhoﬀ, P. S., Pedersen, A. K., & Bird, D. K. (2006). CO₂ metasomatism in a basalt-hosted petroleum reservoir, Nuussuaq, West Greenland. *Lithos*, 92(1-2), 55-82.
60. Salomon, J. N. (1997). *L'homme face aux crues et aux inondations*. Presses Univ de Bordeaux.
61. Saxena, K. R., & Sharma, V. M. (2004). *Dams: Incidents and accidents*. CRC Press.
62. Scarwell, H. J., & Laganier, R. (2004). *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires* (Vol. 916). Presses Univ. Septentrion.
63. Seker, D. Z., Kabdasli, S., & Rudvan, B. (2003). Risk assessment of a dam-break using GIS technology. *Water Science and Technology*, 48(10), 89-95.
64. Seker, D. Z., Kabdasli, S., & Rudvan, B. (2003). Risk assessment of a dam-break using GIS technology. *Water Science and Technology*, 48(10), 89-95.
65. SEMCHA, A., MEKERTA, B., & TROALEN, J. P. (2008). CONSEQUENCES ENVIRONNEMENTALES DU DRAGAGE DU BARRAGE DE FERGOUG (ALGERIE). *Actes des journées scientifiques du LCPC*, 449-456.
66. ShahiriParsa, A., Noori, M., Heydari, M., & Rashidi, M. (2016). Floodplain zoning simulation by using HEC-RAS and CCHE2D models in the Sungai Maka river. *Air, Soil and Water Research*, 9, ASWR-S36089.
67. Tanguy, M. (2012). *Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise: Analyse préliminaire*.
68. Touaibia, B., Gomer, D., & Aidaoui, A. B. D. E. L. L. A. H. (2000). Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro bassins expérimentaux de l'Oued Mina en Algérie du Nord. *Bull. Réseau Erosion*, 20, 478-484.
69. UNISDR, C. (2015). *The human cost of natural disasters: A global perspective*.
70. Veale, B., & Davison, I. (2013, November). Estimation of gravity dam breach geometry. In *Multiple use of dams & reservoirs: needs, benefits & risks. Proceedings of the NZSOLD/ANCOLD Conference, Rotorua, New Zealand* (pp. 613-626). IPENZ Proceedings of Professional Groups Wellington.
71. Viseu, T. *Dams and safety of downstream valleys. Development of risk management support methodologies* (Doctoral dissertation, PhD Thesis. Technical University of Lisbon, 2006 (in Portuguese)).
72. Vojinovic, Z., & Tutulic, D. (2009). On the use of 1D and coupled 1D-2D modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas. *Urban water journal*, 6(3), 183-199.
73. Vos, T., Carter, R., Barendregt, J., Mihalopoulos, C., Veerman, L., Magnus, A., ... & Wallace, A. (2010). *Assessing cost-effectiveness in prevention: ACE-prevention September 2010 final report* (Doctoral dissertation, University of Queensland).
74. Wahl, T. L. *Dam breach modeling—an overview of analysis methods*. In *Joint federal interagency conference on sedimentation and hydrologic modeling* (Vol. 27) (2010).

75. Werner, M., (2004). Spatial flood extent modeling: a performance-based comparison. (Thèse de doctorat) Accessible par Pro Quest Dissertations & Theses.
76. Yahiaoui, A. (2012). Inondations torrentielles. Cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès) (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat: École Nationale Polytechnique El Harrach, Alger (Algérie))
77. Yanmaz, A. M., & Bulut, F. (2001). Computer aided analysis of flow through river bridges. In *Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges* (pp. 1-9).
78. Yerramilli, S. A hybrid approach of integrating HEC-RAS and GIS towards the identification and assessment of flood risk vulnerability in the city of Jackson, MS. *American Journal of Geographic Information System*, 1(1)(2012) 7-16 <https://doi.org/10.5923/j.ajgis.20120101.02>

Annexe

pluies mensuelles en mm

Code station : 021801

Nom station : BOUASSEM M.F.**Annexe de chapitre 3:** les précipitations de la zone d'étude

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	15	35	100,5	40.4	123	257.6	49.2	63.8	12.6	1.8	1	0	599.4
1974	88	122.4	31.4	234.9	120.4	71.6	567	31.7	113	22.5	11.1	0	1414
1975	60.1	42.8	112.7	65.1	71.2	113.4	250.3	60.2	10.4	28.6	8.2	3.3	826.3
1976	40.6	110.6	17.6	17.1	151.2	45	102.3	189.1	76.4	11.5	5.2	0	766.6
1977	20.1	64.7	119.8	215.2	48.9	78.9	132	115.9	40.9	0.1	0	8.5	845
1978	18.8	96.2	128.5	95.8	138.1	98.6	130.6	25.8	35.2	8.7	0	1.1	777.4
1979	57.4	89.3	139.2	72.3	141.1	53.0	119.6	174.5	19.6	3.8	0.0	5.6	875.4
1980	2.1	59.8	121.6	404.3	52.4	83.5	98.2	92.5	32.8	7.7	0.0	43.1	998.0
1981	5.5	79.6	44.6	96.3	229.2	165.5	54.0	43.7	73.4	2.0	0.0	8.2	802.0
1982	109.0	104.5	214.0	205.9	5.6	94.2	52.6	42.4	2.9	0.0	0.0	28.5	859.6
1983	0.3	29.3	97.6	37.4	116.1	157.6	79.2	43.8	120.6	13.8	1.3	0.0	697.0
1984	27.4	122.4	31.4	234.9	120.4	71.6	307.0	31.7	99.6	2.5	1.1	0.0	1050.0
1985	54.1	42.8	112.7	65.1	71.2	113.4	250.3	60.2	10.4	28.6	8.2	3.3	820.3
1986	19.9	72.7	102.6	241.9	178.9	283.0	79.0	25.1	31.8	11.7	0.2	2.7	1049.5
1987	7.4	35.9	133.8	61.5	86.2	59.1	78.0	86.4	49.6	28.4	16.1	0.0	642.4
1988	66.2	7.9	80.6	246.8	63.2	53.5	61.1	134.3	9.4	24.2	2.3	15.8	765.3
1989	53.1	33.7	118.0	38.4	85.0	0.0	50.9	66.7	130.0	13.2	24.4	0.0	613.4
1990	13.1	65.4	75.0	250.0	105.4	134.2	108.7	39.8	64.2	2.2	1.4	8.9	868.3
1991	35.6	110.6	17.6	17.1	151.2	45.0	102.3	189.1	76.4	31.5	5.2	0.0	781.6
1992	15.6	64.7	119.8	215.2	48.9	78.9	32.0	115.9	40.9	0.1	0.0	8.5	740.5
1993	73.6	44.2	87.7	118.3	99.5	70.5	1.1	53.3	3.7	1.5	0.0	0.0	553.4
1994	136.5	91.8	22.5	109.3	267.1	48.1	111.3	20.0	0.0	21.1	0.9	20.1	848.7
1995	11.6	22.1	50.3	94.5	152.2	304.2	50.9	196.1	67.6	24.7	8.5	10.9	993.6
1996	36.3	114.3	69.0	96.4	46.7	23.2	27.4	99.2	34.8	7.0	4.3	22.2	580.8
1997	48.3	125.8	206.3	128.7	57.4	151.0	74.5	108.9	262.4	5.7	0.0	0.8	1169.8
1998	13.8	96.2	128.5	95.8	138.1	98.6	100.6	25.8	35.2	8.7	0.0	1.1	742.4
1999	39.8	15.7	130.7	243.8	21.9	8.7	7.6	39.0	83.6	1.7	0.0	0.0	592.5
2000	6.5	59.7	73.6	71.8	306.9	89.3	0.9	59.6	54.0	0.0	0.0	9.2	731.5
2001	41.6	3.7	47.4	56.5	86.5	56.9	55.3	58.3	49.1	4.2	18.6	29.9	508.0
2002	26.1	36.2	238.9	318.0	333.5	104.6	30.0	216.0	49.0	2.5	14.8	0.6	1370.2
2003	69.7	76.2	64.5	183.6	124.4	57.0	41.4	112.1	153.1	7.0	4.1	2.5	895.6
2004	29.5	44.1	109.0	233.6	155.8	139.1	29.2	43.2	2.5	0.0	3.8	0.0	789.8
2005	23.4	49.7	78.7	120.2	153.2	197.9	37.9	26.9	84.2	1.5	0.0	6.6	780.2
2006	24.0	12.2	13.0	192.8	12.3	72.4	273.2	227.6	19.1	4.1	4.5	7.5	862.7
2007	56.9	235.9	217.3	88.2	7.4	26.1	123.1	40.7	118.6	14.0	16.1	0.0	944.3
2008	70.3	31.3	184.5	89.6	220.1	32.9	76.5	139.0	40.3	0.0	0.0	12.3	896.8

* :

pluies mensuelles en mm

Code station : 021804

Nom station : DRAA BEN KHEDDA

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	101.3	36.6	96.1	104.8	181.8	190.9	64.4	44.5	120.4	12.2	1	0	954
1974	85.6	124.8	31.7	199.6	107.1	73.7	399.4	14.9	85	1	0.6	0	1123.4
1975	63.1	62.4	175.8	83.3	106.7	81.4	223.7	43.8	1.3	12.8	5.1	4	863.4
1976	122.6	70.3	127.6	268	162.6	218.5	54.9	14.1	7.3	11.9	0	0	1057.8
1977	99.5	26.2	92.3	46.2	41.3	56	91	60.3	20.5	26.7	21.1	1	582.1
1978	59	6	93.8	268.2	70	33.1	41.3	82.5	1	13.2	0.5	13.3	681.9
1979	94.5	80.3	150.1	37.3	137.2	32.3	143.0	121.7	21.0	0.0	0.0	2.5	819.9
1980	2.0	52.7	82.3	267.2	35.6	65.7	97.3	73.5	31.2	0.0	0.0	44.3	751.8
1981	2.3	52.2	25.3	116.0	224.9	152.2	29.5	20.0	43.0	7.6	0.0	2.6	675.6
1982	135.0	96.0	201.2	181.5	2.0	62.9	44.9	12.4	11.5	0.0	0.0	32.7	780.1
1983	0.5	38.4	77.6	56.0	123.5	138.1	78.0	31.7	72,2*	0.0	0.0	0.0	616,0*
1984	48.5	108.8	26.7	180.6	118.5	33.5	241.4	11.3	70.4	0.0	3.0	0.0	842.7
1985	37.2	76.0	70.5	63.5	81.4	110.3	112.2	49.7	2.0	18.6	4.6	3.1	629.1
1986	11.8	41.0	26.8	224.7	183.5	213.2	68.1	3.2	17.9	5.5	0.0	3.6	799.3
1987	31.0	49.8	113.6	47.0	46.8	56.1	72.9	60.1	10.1	29.3	25.0	0.0	541.7
1988	54.4	8.6	74.4	261.8	46.7	37.9	15.7	107.6	2.6	13.8	5.2	9.2	637.9
1989	21.7	20.0	74.2	33.7	65.7	0.0	33.3	55.3	68.7	21.8	26.8	0.0	421.2
1990	6.2	55.0	43.3	167.6	103.9	130.5	67.3	38.8	20.0	2.7	0.0	1.5	636.8
1991	4.8	131.7	36.7	13.7	143.8	51.4	86.5	138.4	52.1	22.7	2.9	0.0	684.7
1992	2.8	58.0	111.3	160.0	37.9	34.4	20.2	103.6	47.6	0.0	0.2	5.8	581.8
1993	57.3	35.6	63.2	93.3	99.5	70.2	3.8	46.9	7.3	0.6	0.0	20.1	497.8
1994	77.3	77.2	29.4	121.1	251.2	56.2	98.2	33.4	1.2	16.5	0.2	25.4	787.3
1995	10.5	27.1	36.6	63.2	174.1	200.7	62.4	140.0	46.3	19.2	6.4	9.9	796.4
1996	34.4	97.0	54.4	51.4	38.1	14.2	26.0	79.9	21.7	4.6	0.0	10.7	432.4
1997	45.6	79.7	215.8	127.8	43.3	129.5	64.1	103.7	243.8	0.3	0.0	3.6	1057.2
1998	22.7	76.5	113.1	88.5	116.6	102.8	75.1	16.7	24.0	0.1	0.0	1.5	637.6
1999	22.7	21.2	141.1	235.5	18.3	7.1	5.4	29.5	32.3	7.0	0.6	0.0	520.7
2000	5.9	71.7	83.5	56.6	252.4	74.8	2.5	31.7	30.0	0.0	0.0	1.7	610.8
2001	16.3	1.6	25.1	57.7	76.9	26.8	42.0	54.0	35.3	1.2	0.0	19.2	356.1
2002	13.0	33.4	192.3	259.7	271.7	90.2	55.4	120.8	32.4	0.0	0.0	0.0	1068.9
2003	18.7	46.5	72.3	181.0	115.3	48.9	96.9	74.0	134.7	6.7	1.3	7.3	803.6
2004	35.1	30.8	86.9	167.0	140.1	115.8	23.6	55,5*	1.8	0.0	0.6	2.8	660,0*
2005	16.8	52.9	71.1	94.3	121.0	168.8	31.1	20.0	61.6	2.7	1.5	2.7	644.5
2006	36.8	27.0	6.3	166.8	13.0	55.6	283.3	195.2	21.2	4.8	2.6	0.5	813.1
2007	60.4	216.4	218.9	63.6	7.4	26.1	85.3	25.5	83.5	7.3	5.6	0.0	800.0
2008	25.5	46.9	224.2	135.5	235.1	32.6	85.1	131.3	45.6	0.0	0.0	5.1	966.9

pluies mensuelles en mm

Code station : 090506

Nom station : DRAA-EL-MIZAN

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	93.5	85.3	186.3	45.6	134.2	54.8	95.7	127.2	16.2	0.4	0.0	0.0	839.2
1974	0.8	52.1	81.9	282.4	52.8	60.1	76.8	88.1	46.1	5.7	0.0	16.7	763.5
1975	2.9	48.7	21.6	128.6	180.8	118.6	28.7	15.1	36.3	7.6	0.0	8.3	597.2
1976	41.2	73.8	227.1	132.2	3.0	75.6	63.8	17.6	12.8	0.0	4.4	37.4	688.9
1977	3.4	31.6	71.4	71.7	82.8	123.8	38.2	28.5	88.8	10.1	0.0	0.0	550.3
1978	93.5	85.3	186.3	45.6	134.2	54.8	95.7	127.2	16.2	0.4	0.0	0.0	839.2
1979	54.1	101.0	123.6	74.1	118.4	35.6	134.1	137.7	37.2	2.7	0.0	0.0	818.5
1980	0.0	66.2	115.4	206.2	42.8	67.0	68.6	106.4	42.8	6.9	0.0	28.9	751.2
1981	1,5*	55.8	24.2	83.4	215.0	147.3	49.9	23.7	53.8	6.5	0.0	11.5	672,6*
1982	71,8*	112,1*	156,3*	122,4*	14,9*	65,5*	28,3*	40,3*	8,1*	0,6*	3,7*	33,3*	657,3*
1983	0.1	35.6	55.9	66.2	106.6	191.3	66.1	36.7	107.5	17.8	0.0	0.0	683.8
1984	25.9	147.1	33.0	205.0	115.9	38.9	270.6	21.0	107.0	0.2	0.0	0.0	964.6
1985	52.5	41.6	51.4	55.9	55.0	84.9	242.8	41.8	5.3	30.2	6.1	0.4	667.9
1986	21.8	44.0	85.1	250.7	141.4	218.3	41.2	20.4	22.3	8.9	0,7*	5,9*	860,4*
1987	19.1	33.1	101.2	60.1	60.2	63.4	66.6	62.6	43.6	27.6	0.6	0.0	538.1
1988	36.3	5.1	52.6	231.7	58.5	39.5	92.4	111.0	5.8	10.1	2.9	21,4*	667,3*
1989	6.0	28.4	45.4	29.4	110.0	0.0	58.5	41.4	132.2	11.1	32.5	0.0	494.9
1990	11.5	37.9	52.7	180.2	94.9	100.4	78.0	31.0	38.7	0.0	1.5	2.1	628,9*
1991	27.5	104.2	38.0	8.6	148.8	39.9	85.8	142.8	75.2	23.9	4.5	0.0	699.2
1992	17.4	51.4	131.3	146.4	33.4	98.2	28.8	83.2	35.1	0.0	0.0	3.2	628.4
1993	86.4	54.4	60.6	120.6	78.0	46.1	8.5	48.7	3.6	0.0	0.0	0.0	506.9
1994	82.2	76.1	31.0	82.8	232.5	48.9	98.0	16.5	0.0	10.2	0.0	19.6	697.8
1995	14.0	23.5	22.5	47.1	127.6	186.9	40.8	95.9	36.0	19.7	5.3	11.3	630.6
1996	46.6	36.8	37.6	55.5	27.9	16.7	39.8	91.3	18.2	5.1	7.6	12.0	395.1
1997	65.4	59.9	118.7	96.1	39.2	102.8	58.3	105.4	209.1	4.0	0.0	1.9	860.8
1998	34.6	71.7	119.7	68.6	78.2	100.6	70.8	18.9	20.2	2.2	0.4	5.0	590.9
1999	35.9	15.3	71.1	191.2	10.8	4.5	5.7	29.0	48.9	0.0	0.5	0.0	412.9
2000	7.0	57.4	51.2	53.0	223.2	109.8	0.8	53.2	36.0	0.0	0.0	0.7	592.3
2001	26.2	8.3	41.5	49.2	63.4	27.6	67.5	40.6	30.8	8.3	9.0	43.3	415.7
2002	14.7	43.9	151.5	236.6	238.6	104.0	27.5	155.9	15.0	0.8	15.2	5.0	1008.7
2003	31.4	66.0	89.9	97.8	100.6	41.6	55.4	75.8	117.1	3.1	2.6	0.6	681.9
2004	28.1	22.9	93.4	182.9	168.5	95.2	29.2	34.6	0.0	1.5	0.0	0.0	656.3
2005	29.2	68.1	82.1	126.6	106.4	148.1	42.5	12.7	62.1	1.5	1.6	6.1	687.0
2006	89.8	5.6	11.8	172.8	3.0	54.8	266.4	133.9	27.4	0.0	0.0	1.1	766.6
2007	84.9	146.4	167.3	89.0	4.9	11.5	104.7	47.6	47.8	7.9	13.9	0.0	725.9
2008	46.7	54.4	144.7	142.1	199.8	31.0	60.4	118.6	37.5	0.0	0.0	0.0	835.2

pluies mensuelles en mm

Code station : 021503

Nom station : DJEMAA SAHARIDJ

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	65.5	86.3	193.2	75.3	144.6	87.3	201.2	178.0	45.2	0.0	1.6	2.9	1081.1
1974	3.6	90.5	138.3	395.9	97.6	137.7	127.2	94.5	49.0	24.1	0.0	36.7	1195.1
1975	13.9	82.3	39.1	201.0	332.5	194.6	82.2	38.0	125.9	1.6	0.0	15.8	1126.9
1976	68.2	209.6	265.5	277.5	12.2	84.8	91.1	54.2	7.7	0.0	0.0	24.0	1094.8
1977	6.8	70.7	99.5	106.3	237.4	302.1	109.1	82.7	175.8	13.0	21.6	4.2	1229.2
1978	65.5	86.3	193.2	75.3	144.6	87.3	201.2	178.0	45.2	0.0	1.6	2.9	1081.1
1979	52.5	74.5	144.1	46.1	87.3	53.4	101.8	131.2	30.7	5.8	0.0	0.2	727.6
1980	2.8	66.7	108.0	351.9	59.7	104.8	85.3	76.4	51.5	13.6	0.0	30.2	950.9
1981	6.3	45.5	22.9	107.9	234.4	161.0	45.4	36.9	63.1	2.8	0.1	2.3	728.6
1982	44.5	100.1	171.5	146.6	2.3	91.0	54.6	48.7	11.1	0.0	0.0	29,3*	699,1*
1983	5.5	60.9	68.9	76.5	146.6	148.7	56.4	40.5	116.1	12.5	10.3	0.2	743.1
1984	40.1	131.7	31.4	214.2	105.1	73.2	278.2	31.6	96.1	0.6	0.0	0.0	1002.2
1985	57.6	66.7	88.3	73.0	93.9	113.4	238.2	65.6	4.8	45.5	3.7	3.6	854.3
1986	31.2	64.6	109.2	230.1	141.0	197.9	59.9	16.0	16.3	10.7	1.1	11,1*	888,0*
1987	28.8	60.0	142.0	46.3	47.7	49.5	80.5	83.2	36.9	24.7	5.4	0.0	605.0
1988	47.0	5.7	64.9	212.4	58.2	29.9	57.0	131.6	5.4	24.0	12.0	21.1	669.2
1989	17.0	19.3	76.5	26.9	91.0	0.0	45.7	87.0	95.2	13.4	14.4	0.0	486.4
1990	4.5	26.5	50.0	209.7	81.0	159.8	55.5	29.2	39.6	3.2	0.0	10.0	669.0
1991	16.8	182.9	53.3	19.0	119.7	35.5	119.6	186.4	46.5	32.8	4.4	0.0	816.9
1992	31.3	90.2	76.7	208.4	60.9	79.9	35.5	128.1	85.1	1.3	0.0	7.7	805.1
1993	65.5	74.9	88.9	131.7	94.7	72.5	5.0	71.6	12.8	0.6	0.0	0.0	618.2
1994	93.2	79.6	12.4	128.9	292.0	43.2	157.0	40.5	2.0	28.8	0.7	22.9	901.2
1995	13.3	71.9	38.4	69.2	177.2	323.1	76.6	125.5	62.6	15.0	6.8	9.7	989.3
1996	46.5	73.4	97.8	109.6	58.5	15.7	33.2	88.0	34.0	7.0	2.9	22.3	588.9
1997	52.5	135.4	198.5	124.6	51.0	106.2	61.5	92.8	261.9	4.1	0.0	8.3	1096.8
1998	45.0	88.3	160.1	100.3	132.5	81.4	67.1	29.2	32.9	13.3	0.0	0.0	750.1
1999	41.7	21.1	146.4	225.3	24.2	9.4	11.5	47.2	56.5	10.1	0.3	1.2	594.9
2000	18.3	52.5	65.5	90.4	284.4	87.5	46.5	63.3	55.2	0.0	0.3	6,6*	770,5*
2001	21,8*	14,4*	63,2*	75,8*	76,7*	57,3*	47.8	60.8	41.6	5.3	18.2	55.1	538,0*
2002	23.3	36.0	241.6	341.4	235.0	97.2	43.6	169.8	43.6	3.8	5.4	4.2	1244.9
2003	49.1	80.2	66.8	226.4	83.5	36.3	16.0	69.8	170.5	15.8	2.1	7.9	824.4
2004	42.5	46.9	131.6	159.9	185.4	158.7	48.6	71,3*	4.6	2,3*	3.1	2.6	857,7*
2005	17.3	40.7	42.1	138.2	52.6	172,8*	40.0	20.9	70.7	0.0	1.5	5.6	602,4*
2006	23.3	21,3*	15.2	169.7	18.1	45.9	250.9	195,5*	38,7*	13,6*	3.0	0.0	795,2*
2007	26.5	263.6	122.6	133,1*	21,3*	32.9	143.2	49.5	88.1	13.9	9.6	0.7	905,0*
2008	38.9	51.0	110.3	134,7*	154.4	57,6*	99,4*	124,4*	46,8*	0.0	1.3	5.4	824,2*

pluies mensuelles en mm

Code station : 021712

Nom station : BENI YENNI

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	122.8	60.3	17.1	168.6	343.2	71.1	139.4	37.3	1.1	21.8	0.0	13.4	996.1
1974	21.2	31.4	44.5	86.3	169.2	285.5	91.5	183.3	60.9	37.0	9.6	11.1	1031.5
1975	86.8	107.9	91.9	72.8	99.4	19.4	39.1	100.7	21.4	3.6	1.4	20.9	665.3
1976	66.0	206.4	210.1	135.5	81.3	106.8	107.8	188.9	301.9	2.7	0.0	13.7	1421.1
1977	30.0	97.3	231.0	193.9	161.0	130.8	72.3	24.4	38.6	5.6	0.0	0.0	984.9
1978	13.7	13.9	221.1	315.3	32.3	7.1	9.7	48.4	43.8	17.2	0.0	4.8	727.3
1979	63.6	81.5	148.1	47.5	94.5	79.7	142.2	153.6	43.6	3.3	0.0	0.0	857.6
1980	6.8	71.7	122.0	367.4	74.6	104.9	139.7	87.5	45.1	17.3	0.0	0.0	1037.0
1981	28.0	66.2	21.7	101.2	313.4	193.3	63.2	40.2	73.0	12.7	1.4	0.0	914.3
1982	71.3	122.8	232.7	184.0	2.4	73.7	49.2	2.9	18.7	4.3	1.4	18.7	777.1
1983	2.9	49.2	92.6	51.3	170.1	231.7	80.5	63.2	125.8	14.3	4.0	0.0	892.6
1984	41.5	131.6	24.5	253.9	85.5	70.5	328.9	42.2	68.2	2.7	0.0	0.6	1050.1
1985	76.2	39.9	89.5	84.8	71.8	83.2	314.9	64.0	10.9	31.6	1.7	0.0	868.5
1986	42.4	74.2	94.7	230.3	150.5	284.7	77.3	31.0	29.1	6.6	9.2	0.0	1030.0
1987	19.4	51.1	132.1	51.7	84.8	82.9	97.2	82.3	51.2	26.2	12.3	0.0	691.2
1988	45.5	4.5	79.9	235.2	66.0	47.3	64.9	149.2	11.2	33.0	4.3	19.7	760.7
1989	30.2	30.9	100.8	28.3	87.8	0.0	43.5	91.1	51.4	27.6	29.4	0.5	521.5
1990	8.6	54.6	82.0	221.9	98.1	160.0	101.5	35.7	61.6	9.5	1.4	6.9	841.8
1991	19.1	120.0	40.5	18.2	128.2	30.5	98.4	169.8	59.8	36.7	4.4	0.0	725.6
1992	31.8	92.9	113.7	188.8	52.2	68.5	26.7	88.0	42.2	2.5	0.1	3.4	710.8
1993	68.9	84.2	87.2	110.4	105.3	81.1	0.4	72.8	4.2	3.5	0.0	0.9	618.9
1994	97.0	132.9	34.7	101.6	298.2	54.4	121.7	29.6	0.7	31.5	0.0	20.2	922.5
1995	18.3	38.9	32.1	67.6	162.9	216.8	70.1	146.8	75.4	26.3	10.2	18.4	883.3
1996	36.3	79.6	66.3	66.5	41.0	20.2	27.7	100.7	20.9	10.8	0.6	34.9	505.5
1997	69.6	125.3	192.6	146.5	53.1	115.3	47.9	158.7	273.2	3.8	0.0	6.3	1192.3
1998	37.9	96.2	165.7	91.1	116.6	71.4	86.2	23.1	54.0	14.7	0.2	11.3	768.4
1999	46.0	17.6	109.5	258.4	18.6	11.6	17.1	50.2	93.8	1.1	0.3	0.0	624.2
2000	61.3	77.9	57.1	67.3	319.3	60.1	8.5	79.7	46.2	0.0	0.3	7.3	785.3
2001	32.0	3.8	33.2	43.0	87.7	61.6	75.3	49.2	37.3	1.3	17.9	7.3	449.6
2002	18.0	38.8	233.7	301.7	323.2	109.0	36.3	278.7	62.4	2.5	10.3	3.1	1417.2
2003	31.6	96.2	58.7	200.0	125.9	54.2	48.5	102.2	157.6	7.7	7.1	13.9	903.6
2004	34.3	45.7	152.9	226.3	134.4	163.1	36.4	48.8	8.0	1.2	1.1	3.4	855.6
2005	39.6	35.1	70.8	123.7	133.0	165.4	40.4	27.7	106.9	5.7	2.4	3.5	754.2
2006	47.8	11.1	15.2	142.6	12.0	64.0	311.2	27.9	45.4	3.7	2.5	14.8	698.2
2007	53.7	274.7	147.1	90.5	13.6	38.5	128.6	51.2	134.1	15.8	6.1	1.1	955.0
2008	53.2	66.0	216.4	138.3	298.3	58.5	99.8	194.3	58.0	2.8	0.2	12.1	1197.9

pluies mensuelles en mm

Code station : 021712

* : D

pluies mensuelles en mm

Code station : 021701

Nom station : OUADHIAS

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	86.8	107.9	91.9	72.8	99.4	19.4	39.1	100.7	21.4	3.6	1.4	20.9	665.3
1974	66.0	206.4	210.1	135.5	81.3	106.8	107.8	188.9	301.9	2.7	0.0	13.7	1421.1
1975	30.0	97.3	231.0	193.9	161.0	130.8	72.3	24.4	38.6	5.6	0.0	0.0	984.9
1976	13.7	13.9	221.1	315.3	32.3	7.1	9.7	48.4	43.8	17.2	0.0	4.8	727.3
1977	13.9	63.1	76.4	81.1	337.3	90.8	27.3	65.6	42.9	0.0	0.0	17.1	815.5
1978	33.1	0.7	117.6	90.6	110.1	64.0	52.1	61.4	22.7	0.0	15.4	33.7	601.4
1979	68.7	60.1	176.4	44.7	116.5	36.6	150.6	118.7	78.3	1.5	0.0	0.0	852.1
1980	0.0	57,5*	113.6	313.1	43.6	76.5	93.5	91.7	36.0	11.9	0.0	39.9	877,3*
1981	0.0	53.3	22.4	112.4	277.4	156.7	77.5	32.7	75.2	0.0	0.0	3.3	810.9
1982	75.4	110.8	230.7	159.5	0.5	46.1	65.5	50.8	10.7	0.0	0.0	14.5	764.5
1983	0.0	44.2	79.1	65.8	173.2	205.7	66.8	53.5	88.2	12.5	9.5	0.0	798.5
1984	35.1	109.5	41.1	245.3	75.1	51.9	338.6	35.0	70.3	0.0	0.0	0.1	1002.0
1985	80.8	35.1	90.7	72.7	87.5	119.9	252.4	62.7	13.3	32.7	6.1	4.6	858.5
1986	24.0	49.1	77.1	22.4	142.4	293.7	66.9	17.4	25.5	15.1	6.1	0.2	739.9
1987	11.7	45.7	89.8	33.1	92.1	50.9	92.4	80.8	41.4	19.9	13.3	0.0	571.1
1988	39.3	0.8	58.0	200.9	63.5	42.1	42.8	106.5	9.7	20.9	2.8	15.1	602.4
1989	26.8	25.3	75.0	29.4	78.8	0.0	43.0	43.8	108.5	62.5	29.2	0.0	522.3
1990	1.8	42.2	57.1	194.7	87.2	113.1	89.6	39.9	51.7	1.9	0.0	7.6	686.8
1991	21.4	112.5	27.0	17.4	144.7	33.3	91.3	188.3	67.8	16.2	0.5	0.0	720.4
1992	18.4	80.7	100.1	197.6	46.4	87.1	18.0	80.4	31.0	0.0	0.0	8.0	667.7
1993	44.5	89.2	82.8	83.0	102.7	97.4	4.0	60.1	4.7	0.0	0.0	0.0	568.4
1994	119.0	88.3	31.9	131.0	254.9	46.7	121.7	40.4	0.0	24.2	0.0	6.8	864.9
1995	8.4	44.5	33.1	64.8	159.6	273.2	83.8	41.5	59.9	24.8	5.3	14.8	813.7
1996	21.8	57.5	51.7	63.4	47.1	16.1	20.3	107.5	19.8	8.9	0.0	15.9	430.0
1997	64.9	71.1	157.4	125.8	55.3	112.6	54.2	100.6	225.5	2.3	0.0	5.1	974.8
1998	45.3	86.7	116.9	87.5	11.0	85.4	93.1	23.1	55.3	5.7	1.9	2.7	614.6
1999	84.2	15.1	20.0	222.0	17.7	6.6	14.1	49.4	72.5	0.0	0.0	0.0	465.6
2000	5.0	55.5	77.0	61.4	153,2*	91.4	103,8*	66,7*	55.1	0.0	0.0	0.0	699,1*
2001	11.8	0.0	29.9	28.8	92.0	53.8	48.6	71.6	37.8	0.0	11.3	0.0	385.6
2002	18.4	13.2	209.3	380.4	262,9*	168,4*	200.4	122,7*	0.0	0.0	0.0	0.0	1375,7*
2003	14.6	86.7	132.0	92.8	17.5	83.2	90.1	28.9	58.2	3.7	1.7	1.2	610.7
2004	5.4	42.1	48.1	88.9	148.8	198.7	93.2	71.1	56.5	38.7	8.2	11.4	811.1
2005	2.8	92.8	89.9	162.7	98.9	87.3	72.5	42.3	28.1	10.1	3.7	0.0	691.1
2006	12.3	82.3	121.8	87.8	48.7	94.8	101.2	25.5	63.2	7.2	1.2	0.9	646.9
2007	1.8	52.2	62.1	180.4	92.3	123.1	84.2	52.8	48.9	7.9	0.5	0.4	706.6
2008	2.3	73.1	102.5	165.1	85.6	72.1	64.7	22.4	42.5	5.7	0.2	1.2	637.4

pluies mensuelles en mm

Code station : 021705

Nom station : LARBA NATH IRATHEN

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	82.4	76.6	128.0	143.1	128.0	97.5	2.3	69.7	25.9	2.0	0.0	2.5	758.0
1974	85.5	116.2	19.8	151.7	244.1	57.8	192.6	53.5	2.4	35.5	5.2	21.2	985.5
1975	22.5	54.8	56.3	102.3	179.3	390.2	87.3	163.2	70.5	43.7	3.7	7.3	1181.1
1976	57.1	87.4	129.4	111.2	82.5	18.7	31.7	118.2	26.8	20.0	1.6	32.3	716.9
1977	57.3	153.4	284.4	190.9	74.2	114.8	85.7	175.3	381.0	3.1	0.0	13.9	1534.0
1978	68.5	82.0	208.4	167.9	135.5	90.5	88.1	29.3	46.8	4.9	0.0	3.7	925.6
1979	66.2	73.6	162.3	67.4	101.4	56.1	104.4	183.0	37.5	4.6	0.0	0.0	856.5
1980	0.2	74.5	133.7	374.3	72.7	106.4	123.0	103.2	37.1	21.3	0.0	30.8	1077.2
1981	6.7	61.1	26.3	114.8	266.5	208.4	60.1	38.7	61.9	2.1	0.0	2.5	849.1
1982	63.7	143.1	237.1	187.8	1.3	83.8	63.9	54.0	8.7	0.0	1.2	18.8	863.4
1983	0.0	57.5	108.8	51.3	178.9	190.0	79.9	58.8	142.3	14.3	0.0	0.0	881.8
1984	38.8	113.3	27.5	246.4	180.7	87.3	318.1	44.1	96.0	0.0	0.8	0.0	1153.0
1985	73.6	35.3	90.6	83.1	67.7	103.9	331.5	63.8	8.9	27.8	3.2	5.4	894.8
1986	35.4	41.4	112.3	215.1	144.5	290.0	65.5	33.2	26.9	16.4	0.0	7.5	988.2
1987	30.0	51.8	122.8	56.0	72.4	64.9	70.7	87.6	49.8	25.3	7.6	0.0	638.9
1988	45.2	8.7	63.8	157.0	64.8	29.6	40.5	175.2	8.6	22.2	8.3	17.7	641.6
1989	38.4	27.4	108.1	33.9	67.1	0.0	46.6	113.3	126.2	23.9	22.9	0.0	607.8
1990	10.2	68.6	72.1	201.8	99.9	157.9	95.9	41.6	71.0	3.2	0.0	9.0	831.2
1991	31.4	166.5	50.6	19.3	124.5	29.7	113.9	168.0	56.2	41.5	19.8	0.0	821.4
1992	13.7	103.6	107.5	213.1	48.8	82.7	25.7	125.3	59.2	1.5	0.0	5.9	786.8
1993	84.0	57.8	113.6	128.7	128.8	81.3	7.6	63.4	2.0	0.2	0.1	0.2	667.7
1994	105.4	103.6	28.4	131.0	252.4	45.7	134.2	37.6	2.0	36.8	0.0	22.8	899.9
1995	23.7	39.2	47.2	99.5	176.8	270.6	83.7	173.9	72.8	85.4	14.9	13.2	1100.9
1996	42.6	95.1	105.5	92.2	52.0	19.8	29.8	135.7	22.7	10.0	0.0	58.9	664.3
1997	77.4	118.9	227.8	149.4	70.9	101.5	52.9	165.9	308.2	3.2	0.0	11.2	1287.3
1998	31.4	101.1	176.4	102.7	144.6	89.9	84.0	24.7	70.7	27.2	0.8	5.0	858.5
1999	48.8	20.4	138.8	248.4	20.8	6.5	14.2	42.1	56.7	5.8	0.3	3.0	605.8
2000	7.2	63.9	68.0	64.5	287.2	69.6	9.3	63.0	66.1	0.0	0.0	7.2	706.0
2001	16.2	0.0	50.1	47.5	76.5	57.8	76.2	68.9	71.0	3.4	21.9	33.2	522.7
2002	29.7	30.7	243.3	337.3	364.1	99.9	34.3	193.4	50.8	0.6	14.7	0.4	1399.2
2003	32.8	28.2	112.1	38.9	78.3	111.2	130.2	42.0	70.4	40.8	11.0	22.0	717.9
2004	45.9	5.7	178.0	64.8	67.3	214.9	124.8	114.1	132.1	22.0	5.0	8.4	983.0
2005	58.2	113.8	120.2	198.9	66.8	41.2	22.6	117.2	55.1	9.4	2.0	18.8	824.2
2006	18.4	27.8	130.8	23.9	108.8	55.3	141.2	156.7	90.1	4.4	8.3	0.0	765.7
2007	29.8	82.3	148.1	58.2	101.2	78.5	140.8	156.3	44.6	2.8	0.0	2.1	844.7
2008	44.0	48.9	172.0	63.2	79.8	83.1	87.1	77.6	53.2	26.2	17.2	0.9	753.2

pluies mensuelles en mm

Code station : 021703

Nom station : AIN-EL-HAMMAM

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	33.0	113.2	101.0	269.0	135.0	65.2	30.6	115.9	217.3	12.9	3.3	8.2	1104.6
1974	36.6	50.6	155.0	270.7	190.3	171.2	37.2	311.2	6.6	1.0	0.4	0.0	1230.8
1975	47.0	39.8	119.6	175.4	143.3	171.0	97.4	30.7	119.6	2.1	0.9	1.9	948.7
1976	28.7	3.7	27.1	156.2	20.5	95.9	370.2	311.2	41.1	20.0	6.0	13.1	1093.7
1977	55.9	284.2	174.9	142.4	32.3	25.7	161.4	65.0	157.1	6.2	8.4	6.5	1120.0
1978	62.5	69.0	242.3	180.2	379.8	99.7	137.2	211.0	94.0	1.9	3.3	30.1	1511.0
1979	82.6	88.4	188.7	65.4	143.2	99.4	171.0	187.5	63.5	2.6	0.0	3.6	1095.9
1980	26.4	81.9	153.6	469.8	112.1	176.2	97.5	101.3	47.2	15.6	0.0	36.3	1317.9
1981	15.5	82.7	23.5	149.9	253.0	147.9	87.4	50.4	74.3	3.3	1.0	5.2	894.1
1982	87.2	134.1	328.1	232.7	6.2	98.4	88.1	49.5	13.8	1.1	4.4	27.2	1070.8
1983	6.7	74.8	144.2	74.8	217.1	323.1	126.0	103.1	158.9	16.8	2.3	3.4	1251.2
1984	38.0	127.6	30.1	296.5	107.3	103.8	308.7	48.8	104.2	0.8	0.0	1.4	1167.2
1985	75.6	65.1	121.3	93.3	108.2	120.7	347.3	81.9	8.0	38.1	3.4	6.9	1069.8
1986	51.3	90.8	131.5	269.9	155.0	387.1	74.6	44.6	39.8	12.0	8.5	51.0	1316.1
1987	33.0	48.1	168.7	53.9	91.2	103.0	93.5	105.6	84.5	23.4	11.3	3.5	819.7
1988	58.9	10.3	82.9	261.0	89.7	42.6	92.9	182.3	12.3	32.6	4.5	6.2	876.2
1989	42.0	39.6	109.8	49.2	113.5	0.0	63.5	106.8	171.0	65.6	23.2	0.0	784.2
1990	5.8	72.0	119.9	271.3	115.7	187.8	126.7	82.1	84.9	10.4	1.5	14.9	1093.0
1991	25.8	182.0	72.1	19.9	150.0	46.8	143.3	273.9	68.0	37.5	4.3	0.0	1023.6
1992	83,4*	119,5*	122,9*	252,9*	65,6*	114,9*	34,8*	149,3*	59,9*	3,3*	1,7*	15,8*	1024,0*
1993	101,8*	71,6*	128,9*	153,3*	130,9*	113,4*	14,2*	78,7*	20,4*	4,5*	1,7*	6,4*	825,8*
1994	95,3*	119,7*	43,8*	156,0*	368,2*	75,3*	158,5*	49,3*	16,8*	38,2*	1,7*	34,4*	1157,2*
1995	31,6*	52,1*	62,6*	118,8*	201,8*	315,9*	100,9*	204,7*	94,4*	31,2*	8,2*	18,3*	1240,5*
1996	47,8*	110,7*	120,9*	110,2*	51,9*	47,4*	39,5*	161,1*	37,8*	13,3*	2,0*	33,6*	776,2*
1997	87.3	144.7	200.7	153.8	38.4	101.5	69.2	166.2	275.2	4.1	0.0	11.2	1252.3
1998	45.5	99.3	175.7	106.3	135.0	107.0	96.1	32.7	32.7	5.2	0.0	18.2	853.7
1999	39.2	13.7	85.2	243.2	22.8	12.4	27.0	42.5	89.4	5.1	0.0	0.0	580.5
2000	11.6	67.5	52.8	56.1	240.5	65.6	28.2	98.8	15.6	0.0	0.0	10.6	647.3
2001	56.0	2.9	35.4	33.0	91.2	34.4	62.6	51.1	46.3	5.8	20.1	30.2	469.0
2002	62.8	128.3	82.8	152.8	289.1	181.8	118.7	114.5	82.8	16.2	12.3	14.2	1256.3
2003	17.8	92.7	42.4	157.9	271.0	143.3	84.1	55.4	72.3	7.8	3.5	2.2	950.4
2004	13.5	53.7	134.5	248.2	172.3	162.8	117.1	68.5	64.2	13.5	2.3	1.3	1051.9
2005	23.4	78.2	43.1	152.8	232.3	155.8	102.7	68.3	66.3	5.2	1.2	3.5	932.8
2006	33.8	72.3	78.9	82.8	141.3	121.0	92.4	98.7	82.5	26.4	1.0	1.4	832.5
2007	63.2	70.4	161.3	55.2	132.4	82.4	153.2	170.2	67.5	2.6	0.9	2.8	962.1
2008	28.5	108.4	178.2	182.8	42.8	152.3	87.8	58.2	50.4	7.2	3.2	0.0	899.8

pluies mensuelles en mm

Code station : 021703

pluies mensuelles en mm

Code station : 021504

Nom station : AZAZGA ECOLE

Année	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Annuelle
1973	16.0	56.3	82.3	91.4	209.1	258.0	102.8	39.7	128.3	10.7	0.0	0.0	994.6
1974	23.7	189.2	24.9	339.1	168.0	99.5	415.8	37.7	116.0	0.0	0.0	0.7	1414.6
1975	61.4	66.5	173.7	96.0	144.1	138.3	270.1	46.4	8.7	20.3	20.0	2.0	1047.5
1976	20.3	76.9	172.2	286.7	179.5	325.1	102.1	30.4	15.0	9.9	0.0	3.6	1221.7
1977	31.1	38.4	147.9	59.7	68.9	88.0	109.0	61.5	37.1	23.5	4.5	0.0	669.6
1978	76.0	5.2	121.7	277.4	105.1	31.6	55.9	136.3	0.8	14.0	3.3	14.0	841.3
1979	58.6	86.3	147.3	55.7	117.0	56.0	132.8	128.9	29.6	3.9	2.2	0.0	818.3
1980	2.7	83.9	58.2	351.6	55.7	109.8	108.1	81.4	47.6	11.9	0.0	28.7	939.6
1981	12.0	51.9	34.2	143.0	330.1	166.4	52.3	38.8	60.3	0.0	2.1	3.8	894.9
1982	35.1	135.5	259.1	226.1	5.1	65.6	56.7	51.8	9.3	0.5	0.8	19.9	865.5
1983	12.7	51.6	101.0	97.6	175.4	212.9	78.3	50.0	128.7	10.7	4.8	0.4	924.1
1984	56.8	186.1	21.0	343.5	112.2	72.6	323.8	29.5	87.8	1.1	1.7	0.0	1236.1
1985	87.9	55.2	124.4	91.5	104.0	120.6	258.6	51.9	3.5	22.3	8.3	2.5	930.7
1986	33.5	71.4	114.6	338.9	171.0	233.9	82.8	20.1	19.6	6.9	5.7	7.6	1106.0
1987	42.1	51.3	146.3	44.6	80.0	81.9	97.3	82.2	25.1	24.1	0.7	0.7	676.3
1988	77.0	3.8	81.5	271.9	81.0	49.1	61.9	134.9	22.4	21.7	4.7	9.3	819.2
1989	33.9	39.9	65.1	34.3	83.6	0.0	48.1	75.3	150.6	13.8	24.4	0.0	569.0
1990	1.2	62.4	56.3	285.8	91.5	142.4	115.5	60.3	63.1	1.8	0.0	9.7	890.0
1991	24.1	152.2	62.4	19.9	176.0	54.0	118.7	148.4	40.5	29.2	2.8	0.0	828.2
1992	15.4	101.4	129.8	252.1	66.1	78.9	19.7	144.6	55.2	3.1	0.0	1.4	867.7
1993	67.6	63.7	104.1	127.7	120.0	87.5	2.4	89.4	11.9	1.2	0.0	3.5	679.0
1994	91.0	83.2	27.6	155.2	309.5	69.1	183.1	42.8	0.7	24.0	0.0	15.0	1001.2
1995	12.3	47.7	41.2	89.0	173.3	372.8	105.5	152.1	58.5	32.5	10.7	2.5	1098.1
1996	83.0	83.2	77.7	91.0	75.6	22.1	45.7	69.1	23.4	8.6	1.2	11.2	591.8
1997	78.2	143.2	246.0	147.3	83.2	115.8	78.7	125.2	291.2	3.9	0.0	5.2	1317.9
1998	23.6	64.1	177.3	137.5	162.9	105.3	86.2	35.2	49.8	13.4	0.0	0.0	855.3
1999	28.7	17.8	211.7	362.0	36.7	7.5	10.0	54.7	42.9	8.6	0.0	0.0	780.6
2000	10.1	65.9	68.7	114.7	337.5	85.6	15.5	80.2	43.8	0.0	0.0	4.6	826.6
2001	22.0	0.9	64.6	87.3	96.9	67.0	65.3	56.6	24.1	4.0	10.5	21.8	521.0
2002	25.8	36.1	271.0	361.5	365.4	87.3	40.4	292.0	52.9	0.0	1.9	1.5	1535.8
2003	56.7	81.5	61.2	258.5	180.8	57.2	47.8	119.2	119.8	10.9	0.0	6.0	999.6
2004	31.9	35.4	154.1	245.8	197.6	209.0	34.1	80.2	5.9	1.0	2.5	3.0	1000.5
2005	55.3	39.8	86.8	154.3	159.5	228.7	39.5	17.5	110.5	1.3	2.4	1.3	896.9
2006	72.5	10.3	5.2	166.1	15.0	66.0	362.2	260.6	38.8	12.8	11.3	7.9	1028.7
2007	55.1	365.8	211.3	164.6	16.0	40.1	183.7	73.7	94.4	22.6	6.4	7.8	1241.5
2008	50.2	73.0	317.0	166.7	336.0	67.4	121.9	158.0	48.1	0.5	0.0	9.4	1348.2

Annex de chapitre 5: Hydrogamme de crue de projet de barrage dz Taksebt (source ANBT TIZI OUZOU)

T(h)	Q(m³/s)	T(h)	Q(m³/s)	T(h)	Q(m³/s)	T(h)	Q(m³/s)	T(h)	Q(m³/s)	T(h)	Q(m³/s)	T(h)	Q(m³/s)
0	0	13.2	445.295	27.4	2094.09	42.4	742.158	52.4	340.3	52.4	340.3	67.2	96.28
0.2	0.11	13.4	481.4	28	2057.985	43	722.1	53	332	53	332	67.4	94.62
0.4	0.563	14	529.54	28.2	2021.88	43.2	702.042	53.2	323.7	53.2	323.7	68	92.96
1	1.12	14.2	577.68	28.4	1985.775	43.4	681.983	53.4	315.4	53.4	315.4	68.2	91.3
1.2	1.598	14.4	625.82	29	1949.67	44	661.925	54	307.1	54	307.1	68.4	89.64
1.4	2.135	15	673.96	29.2	1913.565	44.2	641.867	54.2	298.8	54.2	298.8	69	87.98
2	2.5	15.2	722.1	29.4	1877.46	44.4	621.808	54.4	290.5	54.4	290.5	69.2	86.32
2.2	3	15.4	818.38	30	1841.355	45	601.75	55	282.2	55	282.2	69.4	84.66
2.4	3.32	16	914.66	30.2	1805.25	45.2	581.692	55.2	273.9	55.2	273.9	70	83
3	3.526	16.2	1010.94	30.4	1769.145	45.4	561.633	55.4	265.6	55.4	265.6	70.2	81.34
3.2	4.02	16.4	1107.22	31	1733.04	46	541.575	56	257.3	56	257.3	70.4	79.68
3.4	4.814	17	1203.5	31.2	1700.947	46.2	521.517	56.2	249	56.2	249	71	78.02
4	5.0066	17.2	1299.78	31.4	1668.854	46.4	501.458	56.4	240.7	56.4	240.7	71.2	76.36
4.2	5.1992	17.4	1396.06	32	1636.76	47	481.4	57	237.490	57	237.490	71.4	74.7
4.4	5.3916	18	1492.34	32.2	1604.667	47.2	473.1	57.2	231.072	57.2	231.072	72	73.04
5	5.5842	18.2	1588.62	32.4	1572.573	47.4	464.8	57.4	224.653	57.4	224.653	72.2	71.38
5.2	5.7768	18.4	1684.9	33	1540.48	48	456.5	58	218.234	58	218.234	72.4	69.72
5.4	9.4354	19	1757.11	33.2	1508.387	48.2	448.2	58.2	211.816	58.2	211.816	73	68.06
6	13.094	19.2	1829.32	33.4	1476.293	48.4	439.9	58.4	205.397	58.4	205.397	73.2	66.4
6.2	16.752	19.4	1901.53	34	1444.2	49	431.6	59	198.978	59	198.978	73.4	64.74
6.4	20.411	20	1973.74	34.2	1412.107	49.2	423.3	59.2	192.56	59.2	192.56	74	63.08
7	24.07	20.2	2045.95	34.4	1380.013	49.4	415	59.4	188.548	59.4	188.548	74.2	61.42
7.2	25.033	20.4	2098.90	35	1347.92	50	406.7	60	184.536	60	184.536	74.4	59.76
7.4	25.996	21	2151.85	35.2	1315.827	50.2	398.4	60.2	180.525	60.2	180.525	75	58.1
8	26.958	21.2	2204.81	35.4	1283.733	50.4	390.1	60.4	176.513	60.4	176.513	75.2	56.44
8.2	27.921	21.4	2257.76	36	1251.64	51	381.8	61	172.501	61	172.501	75.4	54.78
8.4	28.884	22	2310.72	36.2	1219.547	51.2	373.5	62	168.49	61.2	168.49	76	53.12
9	47.177	22.2	2329.97	36.4	1187.453	51.4	365.2	63	164.478	61.4	164.478	76.2	51.46
9.2	65.47	22.4	2349.23	37	1155.36	52	356.9	63.2	160.466	62	160.466	76.4	49.8
9.4	83.764	23	2368.48	37.2	1123.267	52.2	348.6	63.4	156.455	62.2	156.455	77	48.14
10	102.05	23.2	2387.74	37.4	1091.173	52.4	340.3	64	152.443	62.4	152.443	77.2	45.733
10.2	120.35	23.4	2407	38	1059.08	53	332	64.2	148.431	63	148.431	77.4	38.512
10.4	156.45	24	2397.37	38.2	1026.987	53.2	323.7	64.4	144.42	63.2	144.42	78	31.291
11	192.56	24.2	2387.74	38.4	994.893	53.4	315.4	65	140.408	63.4	140.408	78.2	24.07
11.2	228.66	24.4	2378.11	39	962.8	54	307.1	65.2	136.396	64	136.396	78.4	20.4114
11.4	264.77	25	2368.48	39.2	942.742	54.2	298.8	65.4	132.385	64.2	132.385	79	16.7528
12	300.87	25.2	2358.86	39.4	922.683	54.4	290.5	66	128.373	64.4	128.373	79.2	13.094
12.2	336.98	25.4	2320.34	40	902.625	55	282.2	66.2	124.361	65	124.361	79.4	9.4354
12.4	373.08	26	2281.83	40.2	882.567	55.2	273.9	66.4	120.35	65.2	120.35	80	5.7768
13	409.19	26.2	2243.32	40.4	862.508	55.4	265.6	66.6	116.338	65.4	116.338	80.2	5.5842

Annexe de chapitre 3 : Caractéristiques des stations pluviométriques

Nom de la station	Code	Équipement	X	Y	Z (m)
AZAZGA ECOLE	021504	PV.PG	649.600	383.900	430
OUADIA	021701	PV	625.300	362.500	400
AIN EL HEMMAM	021703	PV	645.500	365.000	1220
LARBA NATH IRATHEN	021705	PV	634.900	370.800	980
AIT DJEMAA	021717	PV	621.450	356.850	840
BOU ASSEM	021801	PV.PG	620.000	371.500	620
D B K	021804	PV	615.200	382.450	90
MAKOUDA	021805	PV	622.650	390.125	520
TIZI OUZOU	021810	PV.PG	620.850	380.300	205
DRAA EL MIZAN	021902	PV	600.950	359.200	530
BOGHNI	021903	PV	612.550	361.650	250