



Université Constantine 3 –Salah BOUBNIDER-  
Institut de Gestion des Techniques Urbaines  
Département Techniques Urbaines et Environnement.

**VULNERABILITE ET RISQUE D'INONDATION : VERS UNE  
STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION  
CAS DE LA VILLE DE CONSTANTINE**

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat L.M.D  
Spécialité « Gestion des risques naturels en milieu urbain »  
Filière Gestion des Techniques Urbaines

Par  
Manel YAKHLEFOUNE

Année Universitaire  
2023-2024





Université Constantine 3 –Salah BOUBNIDER-  
Institut de Gestion des Techniques Urbaines  
Département Génie Urbain et Environnement.

N° de Série :

N° d'Ordre :

**VULNERABILITE ET RISQUE D'INONDATION : VERS UNE  
STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION CAS DE LA VILLE  
DE CONSTANTINE**

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat L.M.D

Spécialité « Gestion des risques naturels en milieu urbain »

Filière Gestion des Techniques Urbaines

Par

Manel YAKHLEFOUNE

Devant le Jury Composé de :

Pr DEKOUMI Djamel	Président de jury	Professeur	Université de Constantine 3
Pr BENABBAS Chaouki	Directeur de thèse	Professeur	Université de Constantine 3
Pr GRECU Floare	Co-Directrice de thèse	Professeur	Université de Bucarest
Dr GHACHI Azzeddine	Examineur	MCA	Université de Constantine 3
Pr REDJEM Ali	Examineur	Professeur	Université de M'sila
Dr MOSTEPHAOUI Tewfik	Examineur	Directeur de recherche	CRSTRA Biskra

Année Universitaire

2023-2024



## REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu Dieu le Tout-Puissant qui m'a favorisé pour la réalisation de cette thèse. Je lui rends grâce pour m'avoir guidé et soutenu tout au long de ce travail. Sa grâce et sa sagesse m'ont permis de surmonter les défis et d'atteindre cet accomplissement important dans ma vie académique

Je tiens à exprimer ma plus sincère gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur BENABBAS Chaouki, pour avoir accepté de superviser cette recherche. Son soutien indéfectible, ses orientations éclairées et son encadrement rigoureux ont été des éléments clés tout au long de mon parcours doctoral. Sa vision et son expertise ont grandement contribué à la qualité et à la réussite de cette étude.

Mes remerciements s'adressent également à ma co-directrice de thèse, le Professeur GRECU Floare pour sa disponibilité, malgré la distance, elle a été exemplaire. Son accompagnement précieux, ses suggestions pertinentes et sa réactivité à mes nombreuses sollicitations ont été d'une grande aide. Son approche méthodique et ses encouragements constants ont enrichi ma réflexion et mon travail.

À vous deux, je témoigne ma reconnaissance pour votre esprit collaboratif et votre rigueur scientifique, qui m'ont permis d'avancer avec confiance. Vos conseils avisés, votre patience et votre engagement m'ont guidée dans ce chemin exigeant, et votre confiance en mes capacités a été une véritable source de motivation. Votre contribution a joué un rôle essentiel dans l'aboutissement de cette recherche, et je vous en suis profondément reconnaissante.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en examinant ce travail. Leur acceptation d'évaluer cette thèse et leurs remarques constructives sont d'une valeur inestimable pour moi.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements aux responsables des établissements que j'ai eu l'opportunité de visiter dans le cadre de mes recherches, pour leur coopération et leur aide précieuse dans l'obtention des informations et données brutes indispensables à la conduite de mes travaux. Leur engagement et leur appui ont significativement facilité le déroulement de mes recherches. Je suis également reconnaissant envers le personnel administratif et technique, dont l'assistance précieuse a grandement contribué à la réussite de ce travail.

Je souhaite nommer particulièrement M. Yazid, technicien au service hydraulique de l'entreprise Hydro Projet Est Constantine, M. KHALID Souhil, Directeur de l'Agence Nationale des

Ressources Hydrauliques, ainsi que M. El HadeF EIOKKI, ingénieur hydrologue à l'ANRH, pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer un stage enrichissant au sein de leurs institutions. Leur expertise, leur soutien attentif et leur disponibilité ont joué un rôle clé dans le développement de mes compétences et l'avancement de cette recherche.

Mes remerciements vont tout particulièrement à M. Kissma Abdesslem, chargé du service des risques naturels à la Direction Générale de la Protection Civile, ainsi qu'à M. Bellou, M. Achour, M. Yakoub de la Direction des Ressources en Eau, et enfin M. Said, ingénieur du Contrôle Technique Hydraulique. Je tiens également à exprimer ma gratitude au personnel administratif des services techniques des APC de Constantine et El Hamma Bouziane, dont le soutien a été d'une grande valeur pour la réussite de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mes parents, d'avoir toujours veillé à ce que je dispose de tout le nécessaire pour poursuivre et terminer cette thèse de doctorat. Votre soutien, qu'il soit matériel, moral ou affectif, a été une véritable bénédiction tout au long de ce parcours académique. Votre aide et vos encouragements ont été ma plus grande source d'inspiration.

Vous avez fait en sorte que je ne manque de rien, me permettant ainsi de me concentrer pleinement sur mes études et mes recherches. Merci pour vos sacrifices, votre patience, votre présence, votre générosité et votre amour inconditionnel, qui ont rendu cette étape de ma vie possible.

Un grand merci à ma belle-famille pour leur soutien chaleureux et leur encouragement constant. Votre gentillesse, vos mots d'encouragement, votre aide et votre bienveillance m'ont toujours donné de la force dans les moments difficiles. Vous avez été pour moi une deuxième famille, et je vous en suis profondément reconnaissante

À mon mari, mon âme sœur, mon pilier et ma plus grande source de motivation. Merci pour votre patience infinie, votre amour sans bornes, votre compréhension et votre soutien inlassable qui ont rendu possible cette réalisation tout au long de ce voyage parfois éprouvant. Vous avez toujours été à mes côtés, prêt à m'encourager et à me rappeler mes rêves lorsque la fatigue ou le doute m'envahissaient. Je vous dois une part immense de cette réussite, et je te remercie du fond du cœur pour tout ce que tu es et ce que tu fais pour moi chaque jour.

À mon bébé Ania Eline, que je porte dans mon ventre, tu es déjà ma plus belle source de motivation et de courage. Chaque instant passé à travailler sur cette thèse, je le fais en pensant à toi et à l'avenir que je souhaite t'offrir. Ton existence, bien qu'encore si discrète, a donné un sens profond à ces derniers mois. Tu m'as donné la force de persévérer et de terminer ce projet avant ton arrivée. Je

t'attends avec impatience, remplie de gratitude pour l'énergie et la lumière que tu apportes déjà dans ma vie.

A mes collègues chercheurs et mes amis qui m'ont aidé pendant les phases d'élaboration de cette thèse, je vous dis Merci. J'oublie certainement des personnes, mes sentiments de gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation cette recherche.

## **DEDICACE**

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents Affables, honorables, aimables : vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'ont pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

A mes chères sœurs : NIHED, IMENE, SARA et DALLEL, ainsi que mon frère MESSAOUD pour leurs soutien moral. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous, que dieu vous le garde toujours pour moi.

À ma belle-famille. À travers votre soutien inébranlable, votre compréhension et vos encouragements constants, je dédie ce doctorat.

Je dédie ce travail de recherche à ma moitié, mon Mari, mon âme sœur, pour son soutien indéfectible, ses encouragements constants et ses sacrifices sans mesure.

A ma future fille Ania Eline, je vous dédie ce travail.

A toutes mes amis et collègues de la formation doctorale, qui m'ont accompagné tout au long de la réalisation ce travail. En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail.

## TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ABREVIATIONS	x
RESUME	xii
1 Introduction générale	01
2 Problématique et contexte de la recherche	03
3 Cadre géographique et motivations de la recherche (Choix du site)	03
4 Objectifs de la thèse	06
5 Méthodologie de la recherche	07
6 Structure de la thèse	08
7 Contrainte de la recherche	10
<b>CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIÈRE DU RISQUE INONDATION</b>	
Introduction	11
1.1. Définition des concepts liés au risque d'inondation (Revue de littérature)	11
1.1.1. Aléa	12
1.1.2. Enjeux	13
1.1.3. Vulnérabilité	13
1.1.4. Résilience	16
1.1.5. Risque	18
1.1.6. Inondation	19
1.1.7. Prévention	20
1.1.8. Adaptation	20
1.2. Etude du risque d'inondation	20
1.2.1. Evaluation de l'aléa inondation	21
1.2.2. Evaluation de la vulnérabilité	25
1.3. Les inondations en Algérie	27
1.3.1. Typologie des inondations en Algérie	28
1.3.2. Les causes des inondations en Algérie	30
1.3.3. Les facteurs aggravant le risque d'inondation en Algérie	31
1.3.4. Synthèse des inondations catastrophiques en Algérie	31
1.3.5. Les inondations à Constantine	37
1.4. Changement climatique et risque d'inondation	44
1.4.1. Progrès mondiaux de lutte contre les changements climatiques	46
1.4.2. L'Algérie face aux changements climatiques : quelle stratégie d'adaptation	48
1.5. Innovations technologiques mondiales pour la gestion et la prévention des risques d'inondation	51
1.5.1. La télédétection spatiale	52
1.5.2. Les systèmes d'informations géographiques	52
1.5.3. L'utilisation des capteurs	53
1.5.4. La modélisation hydrologique et hydraulique	55
1.5.5. L'usage des drones	56
1.5.6. Les systèmes d'alerte précoce	56

1.5.7.	L'utilisation des techniques de l'information et de la communication (TIC) Application mobile	57
1.5.8.	L'utilisation du LiDAR	58
	Conclusion du chapitre	59
<b>CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)</b>		
	Introduction	60
2.1.	Présentations du cadre d'étude	60
2.1.1.	Situation du bassin versant d'Oued Rhumel	60
2.1.2.	Situation du bassin versant d'Oued Ziad	61
2.1.3.	Situation du bassin versant d'Oued Mgherouel	63
2.2.	Principaux traits physiques	64
2.2.1.	Caractéristiques physiographiques et morphométriques associées aux bassins versants	65
2.2.2.	Contexte Géomorphologique	99
2.2.3.	Contexte Géologique	104
2.2.4.	Le Couvert végétal	112
	Conclusion du chapitre	119
<b>CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE</b>		
	Introduction	121
3.1.	Contexte climatique du bassin versant d'Oued Rhumel	121
3.1.1.	Les domaines bioclimatiques	121
3.1.2.	Les Précipitations	122
3.2.	Contexte climatique des bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	125
3.2.1.	Température	126
3.2.2.	Tension de vapeur	126
3.2.3.	Evaporation	128
3.2.4.	Humidité de l'air	129
3.2.5.	Analyse des précipitations	130
3.3.	Analyse fréquentielle des données pluviométriques	138
3.3.1.	Présentation du logiciel Hyfran Plus	138
3.3.2.	Ajustement des pluies journalières maximales aux lois de probabilité	140
3.4.	Courbe d'intensité – durée – fréquence (courbe IDF)	146
3.4.1.	Détermination des pluies de courte durée	146
3.4.2.	Détermination des intensités maximales à différentes Fréquence	149
3.5.	Détermination des débits maximum	153
3.5.1.	Formule de Giandotti	153
3.5.2.	Formule de Turazza	153
3.5.3.	Formule de Mallet Gauthier	153
3.5.4.	Formule d'Alexeev	154
3.6.	Hydrogramme de crue	155
3.6.1.	Calcul du volume de la crue	156
3.7.	Estimation de l'apport moyen interannuel et la lame d'eau écoulée	160
3.7.1.	La formule de Samie	160

3.7.2.	La formule de Maillet Gauthier	160
3.7.3.	La formule de l'ANRH	160
3.7.4.	La formule de Medinger	161
3.7.5.	La formule de Goutagne	161
3.8.	Estimation de l'apport solide	163
Conclusion du chapitre		165

## **CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE**

Introduction		167
4.1.	Évaluation des zones vulnérables au risque d'inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel (Analyse multicritère hiérarchique)	167
4.1.1.	Méthodologie d'application du processus d'analyse multicritère hiérarchique (AHP)	169
4.1.2.	Analyse et discussion des résultats	171
4.1.3.	Synthèse	177
4.2.	Modélisation hydraulique de l'aléa inondation dans les bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	178
4.2.1.	Présentation du logiciel de simulation HECRAS	179
4.2.2.	Méthodologie de simulation de l'aléa inondation des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	179
4.2.3.	Cartographie de l'aléa inondation	180
4.3.	Analyse de la vulnérabilité au risque d'inondation	197
4.3.1.	Présentation des limites administratives du cadre d'étude	198
4.3.2.	Cartographie de la vulnérabilité au risque d'inondation dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	210
4.4.	Cartographie du risque inondation	219
4.5.	Analyse de la vulnérabilité fonctionnelle et évaluation des enjeux Vulnérables au risque d'inondation	221
4.5.1.	Synthèse et recommandations	223
4.6.	Evaluation des facteurs contribuant au déclenchement et à l'aggravation du risque inondation dans les deux bassins versants	223
Conclusion du chapitre		226

## **CHAPITRE IV : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE**

Introduction		228
5.1.	Système de gestion du risque inondation en Algérie	228
5.1.1.	Un volet juridique	229
5.1.2.	Un volet institutionnel	233
5.1.3.	Un Volet opérationnel	234
5.1.4.	La prévision	234
5.1.5.	La prévention	235
5.1.6.	L'information préventive et la sensibilisation	238
5.1.7.	Phase de préparation	239
5.1.8.	Annnonce et alerte	241

5.1.9.	Phase de réponse (gestion de crise)	242
5.1.10	Gestion poste catastrophe	248
5.2.	Analyse critique du système national de gestion du risque inondation : défis et insuffisance du cadre législatif et opérationnel	249
5.3.	Gestion intégrée du risque d'inondation vers une stratégie de prévention et d'adaptation au risque	252
5.3.1.	La connaissance du risque inondation	253
5.3.2.	La prévision	254
5.3.3.	La prévention	256
5.3.4.	La préparation	262
5.3.5.	La gestion de crise	264
5.3.6.	Après la Catastrophe : Évaluer, Indemniser et Reconstruire vers la Résilience	264
5.3.7.	Recommandations générales et les bonnes pratiques pour la gestion intégrée du risque d'inondation au niveau national	266
5.3.8.	Stratégie de gestion intégrée à Constantine	267
	Conclusion du chapitre	270
	Conclusion générale	271
	Recommandations	273
	Perspectives de la recherche	277
	Références bibliographiques	278
	Annexe A	290
	Annexe B	296

## LISTE DES FIGURES

Figure	Titre de la figure	Page
1	Organigramme des Méthodes et Outils Mobilisés pour la Recherche	08
1.1	Evolution du nombre annuel de morts par les inondations	28
1.2	L'ampleur des dégâts et le caractère torrentiel de l'inondation du 10/11/2001 à Bab El Oued	36
1.3	Inondation de Ghardaïa (Dégâts et gravité)	37
1.4	L'inondation exceptionnelle de Djebli Ahmed Ex (Cantoli) causée par le débordement d'Oued Ziad	42
1.5	Capteur de niveau radar VEGAPULS C21	54
2.1	Situation du bassin versant d'Oued Rhumel	61
2.2	Situation du bassin versant d'Oued Ziad A/ situation géographique par rapport à l'Algérie ; B/ situation géographique par rapport au bassin versant d'Oued Rhumel	62
2.3	C/ Situation du bassin versant d'Oued Mgherouel A/ situation géographique par rapport à l'Algérie ; B/ situation géographique par rapport au bassin versant d'Oued Rhumel	64
2.4	A) Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Rhumel ; B) Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Ziad ; C) Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Mgharouel.	72
2.5	A) Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Rhumel ; B) Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Ziad ; C) Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Mgharouel	76
2.6	Carte des pentes ; A) Bassin versant Oued Rhumel ; B) Bassin versant Oued Ziad ; C) Bassin versant Oued Mgherouel.	79
2.7	Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Rhumel et Ordre d'écoulement .A) bassin versant d'Oued Rhumel ; B) bassin versant d'Oued Ziad ; C) bassin versant d'Oued Mgharouel.	89
2.8	Carte géologique (Morpho structurale) du bassin versant d'Oued Rhumel digitalisé depuis la carte Structurale au 1/500000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens (Villa J M, 1980).	104
2.9	Carte et coupe structurale Schématique de la chaîne des Maghrébides montrant la disposition des zones internes et externes (Durand-Delga et Fontboté, 1980) in (Bourenane, 2017)	106
2.10	Cartes géologiques des bassins versants digitalisé depuis les cartes géologiques de 1/200000 de Constantine et d'El Aria ; A) Bassin versant Oued Ziad ; B) Bassin versant d'Oued Mgharouel.	112
2.11	Carte d'occupation du sol/ couverture du sol du bassin versant d'Oued Rhumel source : ESRI + traitement auteur	115
2.12	Carte d'occupation du sol/ couverture du sol ; A/ bassin versant Oued Ziad, B/ bassin versant d'Oued Mgharouel (source : ESRI + traitement auteur).	116
3.1	Les étages bioclimatiques au Nord-Est de l'Algérie (Source : Mebarki, 2005 in Kateb, 2020)	122

3.2	Répartition des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant d'Oued Rhumel	123
3.3	Histogramme de variation des températures moyennes mensuelle en °C	126
3.4	Histogramme de variation des valeurs de la tension de la vapeur moyenne mensuelle en millibars.	127
3.5	Histogramme de variation des valeurs de l'évaporation moyenne mensuelle en mm	128
3.6	Histogramme de variation du pourcentage de l'humidité relative moyenne à la station d'Ain El Bey	130
3.7	Variation des précipitations moyennes annuelles dans les trois stations : Constantine, Ain El Bey et Hamma Bouziane (1988 – 2017).	132
3.8	Variation des précipitations moyennes mensuelles en mm (Station de Constantine 1983 - 2021 et la station de Hamma Bouziane 1988 - 2008) (source A.N.R.H).	134
3.9	: Répartition saisonnière en pourcentage des précipitations moyennes annuelles ; a) station d'El Hamma Bouziane (1988-2017) ; b) station de Constantine (1983 – 2021).	135
3.10	Répartition des précipitations journalières maximales ; A) Station de Constantine ANRH (1984 - 2021) ; B) Station d'El Hamma Bouziane (1988 – 2021).	137
3.11	A et B) Observation de la probabilité au non dépassement de la station Hamma Bouziane et Constantine, C et D) Observations classées par valeur de la station Hamma Bouziane et Constantine.	140
3.12	Ajustement des pluies journalières maximales de la station Hamma Bouziane et la station de Constantine ANRH à la loi de Gumbel.	142
3.13	Ajustement des pluies journalières maximales de la station Hamma Bouziane et la station de Constantine ANRH à la loi de Gumbel.	143
3.14	Résultats de la comparaison par graphique pour les deux stations d'El Hamma Bouziane et Constantine.	144
3.15	Résultats de la comparaison par critères fait pour les deux stations d'El Hamma Bouziane et celle de Constantine.	145
3.16	Courbe de la pluie de courte durée pour les différentes fréquences étudiées ; A) Bassin versant d'Oued Ziad ; B) Bassin versant d'Oued Mgharouel.	148
3.17	Courbe Intensité-Durée-Fréquence (IDF) ; A) Station d'El Hamma Bouziane ; B) Station de Constantine ANRH	149
3.18	Hydrogramme de Crue ; A) bassin versant d'Oued Ziad ; B) Bassin versant d'Oued Mgharouel	159
4.1	Paramètres qui influent sur l'inondation : (A) densité de drainage, (B) distance à la rivière, (C) élévation, (D) occupation du sol, (E) pente, (F) précipitations moyennes annuelles, (G) indice d'humidité topographique, (H) Densité de la population, (I) distance aux routes	173
4.2	Carte finale de vulnérabilité au risque d'inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel.	177
4.3	Profil en long du bassin versant d'Oued Ziad	180
4.4	Cross sections transversales d'Oued Ziad	181

4.5	Résultat de simulation du débit centennal dans certaines sections transversales d'Oued Ziad qui présentent des débordements.	181
4.6	Carte de modélisation de l'aléa inondation du bassin versant d'Oued Ziad avec un débit centennal soit $Q=50.98 \text{ m}^3/\text{s}$ .	185
4.7	Profil en long du bassin versant d'Oued Mgharouel.	187
4.8	Cross section transversales d'Oued Ziad.	187
4.9	Résultat de simulation du débit centennal dans certaines sections transversales d'Oued Mgharouel qui présentent des débordements.	188
4.10	Carte de modélisation de l'aléa inondation du bassin versant d'Oued Ziad avec un débit centennal soit $Q=51.59 \text{ m}^3/\text{s}$ .	191
4.11	Conséquences des pluies intenses de courte durée sur la région d'étude prise le 24/05/2023 à 17h30	194
4.12	Localisation de la commune de Constantine	198
4.13	Evolution urbaine de la commune de Constantine	199
4.14	Réseau routier de la commune de Constantine	203
4.15	Situation de la commune d'El Hamma Bouziane.	204
4.16	Evolution urbaine de la Commune d'El Hamma Bouziane	205
4.17	Réseau Routier de la commune d'El Hamma Bouziane	209
4.18	Carte de vulnérabilité sociale ; A/Bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.	211
4.19	Carte de vulnérabilité physique et structurelle A/Bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.	214
4.20	Carte de la vulnérabilité globale A/Bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.	216
4.21	Cartographie du risque d'Inondation ; A/Bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.	219
4.22	Facteurs aggravant le risque d'inondation dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	224
5.1	Travaux d'aménagement et de calibrage des cours d'eaux menaçants (source : Conférence Nationale sur les risques majeurs CIC le 22-23 octobre 2018, Prise en charge de la problématique des inondations)	236
5.2	Des travaux de calibrage des Oueds Rhumel et Boumerzoug sur un linéaire de 9.95 km (source : Conférence Nationale sur les risques majeurs CIC le 22-23 octobre 2018, Prise en charge de la problématique des inondations)	237
5.3	Organigramme du dispositif du plan d'intervention en cas de catastrophe (source : protection civile de Constantine)	241
5.4	Le système national de gestion des catastrophes (Source : Protection civile de Constantine)	242
5.5	Organigramme de déclenchement du plan ORSEC	243
5.6	Chronologie d'activation des plans de secours en cas de catastrophe	246
5.7	Organigramme de gestion Poste-Catastrophe de la protection civile exemple de l'inondation de Bab El Oued	248
5.8	Organigramme des étapes d'une gestion intégrée du risque inondation	252

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre du tableau	Page
1.1	Classification des niveaux de risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité	21
1.2	Critères d'identification des niveaux d'aléa inondation et les zones à risque	25
1.3	Les niveaux de vulnérabilité en fonction de l'aléa	27
1.4	Statistiques des inondations catastrophiques en Algérie (1969-2015)	31
1.5	Historique des inondations qui ont survenue à Constantine (1956 - 2019)	37
1.6	Les zones inondées de la wilaya de Constantine	43
2.1	Caractéristiques géométriques des bassins versants étudiés	66
2.2	Corrélation entre le rapport de circularité et le stade du cycle de vie du B.V	68
2.3	Caractéristiques de forme des bassins versants	69
2.4	Répartition altimétrique des superficies selon les tranches d'altitude des bassins versants	74
2.5	Caractéristiques d'altitudes des bassins versants	77
2.6	Classification des pourcentages de pente des bassins versants étudiés.	81
2.7	Classification ORSTM du relief à partir de l'indice de pente globale	83
2.8	Classification des pentes selon le comité de l'union internationale des géographes.	84
2.9	Classification de l'O.R.S.T.O.M. Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer Selon dénivelé spécifique.	85
2.10	Caractéristiques du relief	86
2.11	Classification des valeurs de texture de drainage	92
2.12	Caractéristiques du réseau hydrographique	94
2.13	Résultat de calcul du temps de concentration	97
2.14	Vitesse moyenne de ruissellement des bassins versants	99
2.15	Répartition en surfaces des types d'occupation du sol/ couverture du sol dans le bassin versant d'Oued Rhumel	113
2.16	Répartition en surfaces des types d'occupation du sol/ couverture du sol dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel.	118
3.1	Précipitations moyennes annuelles des stations pluviométriques dans le bassin versant d'Oued Rhumel.	124
3.2	Caractéristiques des stations pluviométriques de la zone d'étude	125
3.3	Températures moyennes mensuelles à la station Ain El Bey (1968-1993)	126
3.4	Tension de la vapeur moyennes mensuelles à la station Ain El Bey (1968-1993)	127
3.5	Evaporation moyennes mensuelles à la station Ain El Bey (1968-1993)	128
3.6	Pourcentage de l'humidité relative moyenne à la station d'Ain El Bey (2007-2017)	129
3.7	Répartition des pluies moyennes interannuelles dans les trois stations (Hamma Bouziane, Constantine et Ain El Bey)	131
3.8	Répartition des pluies moyennes mensuelles de la station de Hamma Bouziane (1988 - 2008) et la station de Constantine (1983 – 2021)	133
3.9	Répartition saisonnière des pluies moyennes de la station de Hamma Bouziane (1988 - 2008) et la station de Constantine (1983 – 2021)	135

3.10	Caractéristique empirique des deux séries de données issues des deux stations pluviométriques d'El Hamma Bouziane et de Constantine	139
3.11	Résultat du test Khi carré de l'adéquation de l'ajustement dans les deux bassins versants	143
3.12	Résultats statistiques des ajustements des pluies obtenus par la loi de Log-normale en utilisant la méthode de maximum vraisemblance pour les deux stations étudiées.	145
3.13	Pluies de courtes durées correspondantes au temps de concentration "Tc" et à une fréquence "F" des bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	147
3.14	Valeurs des précipitations de courte durée et leurs intensités fréquentielle pour les deux stations d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	150
3.15	Débit de différentes fréquences des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	154
3.16	Le temps de montée et de descente de la crue ainsi que le temps de base pour les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	156
3.17	Volume de crue fréquentiel pour les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	156
3.18	Calcul des débits fréquentielles de la montée de la crue et de la décrue en fonction du temps pour l'hydrogramme de crue d'Oued Ziad	157
3.19	Calcul des débits fréquentielles de la montée de la crue et de la décrue en fonction du temps pour l'hydrogramme de crue d'Oued Mgharouel.	158
3.20	La lame d'eau écoulée et les apports liquides dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	161
3.21	Caractéristiques de l'écoulement pour les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	163
3.22	Estimation de l'apport solide des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel	164
4.1	Echelle de Saaty	170
4.2	Valeurs moyennes de l'indice de cohérence pour les comparaisons selon la taille de la matrice n	171
4.3	Valeurs de CI et CR	171
4.4	Matrice de comparaison	175
4.5	Résultat des calculs de la simulation hydraulique du débit centennale par HacRas	183
4.6	Résultat des calculs de la simulation hydraulique du débit centennale par HacRas	189
4.7	Evolution démographique de la population de Constantine de 1977 à 2023	202
4.8	Evolution démographique de la commune d'El Hamma Bouziane	208
4.9	Matrice des niveaux de risque d'inondation en fonction de l'aléa et la vulnérabilité	218
4.10	Statistiques des enjeux vulnérables au risque d'inondation dans les deux bassins versants	221
5.1	Synthèse des moyens de sauvetage en Algérie en cas d'inondation	239

## LISTE DES ABREVIATIONS

ANBT :	Agence nationale des barrages et des transferts
ANCC :	L'Agence nationale des changements climatiques
ANP :	Armée nationale populaire
ANRH :	L'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
APC :	Assemblée populaire communale
BAU :	<i>Business as usual</i>
BMS :	Bulletin Météorologique Spécial
BNRGC :	Le Bureau national de gestion des risques et des catastrophes
CC :	Changement Climatique
CCFM :	Camion-citerne forêt moyen
CCNUCN :	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CDN :	Contribution Déterminée au niveau National
CFPA :	Centre de formation professionnelle et d'apprentissage
CNC :	Comité national du climat
COP 21 :	<i>Conference of the Parties</i>
CPDN :	Contribution prévue déterminée au niveau national
DAPE :	Direction de l'assainissement et de la protection de l'environnement
DGPC :	Direction générale de la protection civile
DICRI :	Dossier d'information communaux pour le risque inondation
DPAT :	Direction de planification et d'aménagement du territoire
DRE :	Direction des ressources en eau
DTP :	Direction des travaux publics
DUAC :	Direction de l'urbanisme, de l'architecture et de la construction
EOSDIS :	<i>Earth Observing System Data and Information System</i>
ESRI :	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
ESA :	<i>European Space Agency</i>
FPT :	Fourgons pompe tonne
GES :	Gaz à effet de serre
GIEC :	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HECRAS:	<i>Hydrologic Engineering Center's River Analysis System</i>
HFA :	<i>Hyogo Framework for Action</i>
HPE :	Hydro Projet Est Engineering
IA :	Intelligence Artificielle
ISDR :	<i>International strategy for disaster reduction</i>
LiDAR :	Light Detection and Ranging
MNT :	Modèle numérique du terrain
MRE :	Ministère des ressources en eau
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
NOAA :	<i>National Océanique and Atmosphérique Administration</i>
OCDE :	L'organisation de coopération et de développement économique
ONA:	L'office National De L'assainissement
ONM :	L'Office National de la Météorologie

ONU :	Organisation des Nations Unies
ORSEC :	Organisation de la réponse de sécurité civile
ORSTM :	L'Office régional scientifique et technique d'Outre-Mer
PAPI :	Programme d'action de prévention des inondations
PCF :	Poste de commandement fixe
PCO :	Poste de commandement Opérationnel
PDAU :	Plan Directeur D'Aménagement et D'Urbanisme
PII :	Plan d'intervention interne
PNC :	Plan National Climat
PNUD :	Le programme des nations unies pour le développement
POS :	Plan Occupation du Sol
PPI :	Plan particulier d'intervention
PPM :	Plan de prévention multirisque
PPRI :	Plan de prévention du risque inondation
RGPH :	Recensement général de la population et de l'habitat
RRC :	Reduction des risques de catastrophes
SAP :	Système d'Alerte Précoce
SIG :	Systèmes d'informations géographiques
TIC :	Technologies de l'information et de la communication
USGS :	United States Geological Survey
UNDRO :	Organisation des Nations Unies pour le Secours en cas de catastrophe.
UNDRR :	<i>The United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>
UNESCO :	L'organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture

## RESUME

L'étude du risque d'inondation dans les villes algérienne est devenue indispensable au vu des multiples enjeux qui existent (urbanisation, extension urbaine, servitudes, infrastructures, structure du sol...), ainsi que sa fréquence et sa répétition dans le temps et dans l'espace Ceci est devenu une problématique pour la ville et l'environnement urbain, notamment dans les grandes métropoles telle Constantine qui de par sa situation bordière des oueds, est vulnérable au risque d'inondation, ce qui exige une meilleure connaissance du phénomène en vue d'arriver à des stratégies reposant sur l'idéologie de prévention, d'adaptation et d'atténuation du risque.

Cette étude porte sur la cartographie du risque inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel en utilisant le Processus d'Analyse Multicritère Hiérarchique (Analytical Hierarchy Process « AHP »). Cette approche intégrative permettra d'évaluer les différents facteurs géoenvironnementaux, urbains et structuraux à la fois influençant l'aléa et la vulnérabilité au risque d'inondation pour déterminer les zones a risque dans ce bassin, ensuite nous procéderont à cartographier le risque d'inondation dans les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel par croisement de l'aléa et de la vulnérabilité, ces derniers en été cartographié en utilisant la modélisation hydraulique par logiciel HECRAS en complémentarité avec les systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le but d'identifier et quantifier la vulnérabilité de la ville de Constantine face au risque d'inondations afin de réduire l'impact de ce dernier sur l'homme et ses bien, ainsi que sur l'environnement et les activités socio-économiques, pour assurer une ville résiliente en se basant sur une stratégie de prévention, d'adaptation et d'atténuation du risque qui s'inscrit dans une logique de développement durable de la ville. Il s'agit ici de proposer des cartes d'aide à la décision par l'élaborer d'un document scientifique et technique.

Mots Clés : Gestion du risque, Inondation, Aléa, Vulnérabilité, Prévention, Constantine, SIG, HECRAS

## **ABSTRACT**

The study of flood risk in Algerian cities has become essential given the multiple challenges involved (urbanization, urban expansion, easements, infrastructure, soil structure, etc.), as well as its frequency and repetition over time and space. This has become a major problem for both the city and the urban environment, particularly in large metropolises like Constantine, which, due to its location near rivers, is vulnerable to flood risk. This vulnerability requires a better understanding of the phenomenon in order to develop strategies based on prevention, adaptation, and risk mitigation.

This study focuses on flood risk mapping in the Oued Rhumel watershed using the Analytical Hierarchy Process (AHP). This integrative approach will enable us to assess the various geoenvironmental, urban and structural factors influencing both the hazard and vulnerability to flood risk, in order to determine the areas at risk in this basin, we then proceeded to map flood risk in the Oued Ziad and Oued Mgharouel watersheds by combining hazard and vulnerability. These areas have been mapped using hydraulic modeling through the HECRAS software, complemented by Geographic Information Systems (GIS) to identify and quantify the vulnerability of the city of Constantine to flood risk. This will help reduce the impact of floods on people, their property, the environment, and socio-economic activities, ensuring a resilient city based on a strategy of prevention, adaptation, and mitigation of risk, aligned with the city's sustainable development. The aim is to propose decision-support maps through the creation of a scientific and technical document.

**Keywords:** Risk management, Flood, Hasard, Vulnerability, Prevention, Constantine, GIS, HECRAS

## ملخص

دراسة مخاطر الفيضانات في المدن الجزائرية أصبحت ضرورية بالنظر إلى تعدد العوامل المؤثرة (التوسع العمراني والحضري، الفيود، البنية التحتية، تركيبة الأرض...)، وكذلك تكرارها وانتشارها عبر الزمن وفي مختلف الأماكن. أصبحت هذه المشكلة تحدياً للمدينة والبيئة الحضرية، خاصة في المدن الكبرى مثل قسنطينة التي بسبب موقعها المحاذي للأودية، تكون عرضة لخطر الفيضانات. هذا يستدعي معرفة أفضل بالظاهرة بهدف الوصول إلى استراتيجيات تعتمد على الوقاية، التكيف، والتخفيف من المخاطر.

تركز هذه الدراسة على إنتاج خرائط لمخاطر الفيضانات في حوض وادي الرمال باستخدام عملية التحليل الهرمي متعدد المعايير (AHP) تسمح هذه المقاربة التكاملية بتحديد المناطق المعرضة للخطر في هذا الحوض و تقييم العوامل الجغرافية والبيئية والعمرانية والهيكلية المختلفة التي تؤثر على خطر الفيضانات من أجل إتخاذ التدابير اللازمة عند إجراء مخططات التهيئة و التعمير المستقبلية. بعد ذلك، قمنا برسم خرائط لمخاطر الفيضانات في أحواض واد زياد وواد مغرول من خلال دمج خريطتي إحتمال وقوع الخطر والهشاشة، حيث تم رسم هذه الخرائط باستخدام النمذجة الهيدروليكية بواسطة برنامج HECRAS بالتكامل مع نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بهدف معرفة وقياس هشاشة مدينة قسنطينة تجاه خطر الفيضانات لتقليل تأثيره على الإنسان وممتلكاته، وكذلك على البيئة والأنشطة الاجتماعية والاقتصادية، مما يضمن مدينة مرنة تعتمد على استراتيجية للوقاية والتكيف والتخفيف من المخاطر بما يتماشى مع التنمية المستدامة للمدينة

تهدف هذه الدراسة إلى اقتراح خرائط مساعدة على اتخاذ القرار من خلال إعداد وثيقة علمية وتقنية.

الكلمات المفتاحية: تسيير الاخطار، فيضان، احتمال وقوع الخطر، الهشاشة، الوقاية، قسنطينة، نظم المعلومات الجغرافية،

HecRas



## **1. Introduction générale**

Durant les dernières décennies, le monde a été témoin des effets dévastateurs des catastrophes naturelles, dont les conséquences deviennent de plus en plus alarmantes. Le nombre de catastrophes naturelles et l'ampleur de leurs incidences sur le développement économique et humain augmentent chaque année, selon les estimations de (Munich Re, 2015 ; Bourenane, 2017). Entre 1980 et 2000, environ 75 % de la population mondiale a résidé dans des régions qui ont été exposé à des catastrophes naturelles (les tremblements de terre, les cyclones tropicaux, les inondations ou les sécheresses) (PNUD, 2004).

L'impact de ces catastrophes est souvent aggravé par une densité démographique, un développement urbain rapide et incontrôlé, changements environnementaux, le réchauffement climatique, et la pauvreté. (Munich Re, 2015) estime que le coût des pertes économiques à l'échelle mondiale au cours des dix dernières années est 7,3 fois plus élevé que durant les années soixante. Par ailleurs, l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement en 1983 d'une part, et surtout le GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) de l'autre part dès 2002 ; n'ont pas arrêté d'alerter l'opinion public sur l'augmentation de la fréquence des aléas naturels dans les années et décennies à venir. Cet accroissement est lié, d'une part, au développement anarchique de l'urbanisation dans les zones à risque, et d'autre part, au réchauffement climatique.

Dans le continent africain on a pu compter quelques 35 millions de personnes, soit 13% de la population, qui ont été victimes de catastrophes entre 2000 et 2001. Les statistiques révèlent une hausse de 25 catastrophes en moyenne chaque année sur le continent (PNUD, 2004).

La multiplication des événements extrêmes, combiné à un développement anarchique des territoires et des grandes villes rend de plus en plus pressante la nécessité de comprendre ces phénomènes naturels pour mieux prévenir les catastrophes qu'ils peuvent provoquer. Les séismes et les inondations sont reconnus comme les phénomènes les plus meurtriers (Ledoux, 1995), tandis que les mouvements de terrain causent d'importants dégâts matériels et peuvent être particulièrement coûteux pour les sociétés (Maquaire, 2002).

L'Algérie, pays méditerranéen, est fréquemment confrontée à plusieurs types de risques liés aux aléas naturels. Les séismes d'El Asnam en octobre 1980, celui de Boumerdès en mai 2003, les inondations de Bab El Oued en novembre 2001 et de Ghardaïa en octobre 2008, ainsi que les

nombreuses inondations de la ville de Constantine, témoignent de la vulnérabilité du pays face à ces menaces. La croissance démographique rapide, l'urbanisation anarchique, la dégradation de l'environnement et les dérèglements des écosystèmes exacerbent la fréquence et l'ampleur des catastrophes.

Ces problèmes sont amplifiés par l'absence quasi totale de système réglementaire pour suivre l'évolution de ces risques, le manque de cartographie conforme de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque, et l'urbanisation mal maîtrisée. Devant l'importance des risques, les pouvoirs publics ont la responsabilité de préparer le pays à une meilleure gestion des catastrophes par une politique de prévention adéquate. Des mesures préventives doivent être prises pour réduire les risques et sensibiliser le public aux dangers d'une urbanisation et industrialisation irréfléchies. Cependant, les autorités restent souvent démunies en matière de prévision, de prévention et de gestion des phénomènes naturels aux conséquences dramatiques. Cette prévention vise à améliorer les connaissances dans les différents aspects de l'ingénierie des risques naturels : identification, caractérisation, prévision, et définition des outils de cartographie et de gestion des risques.

En Algérie, le risque d'inondation représente un véritable enjeu environnemental, mettant en danger l'existence humaine ainsi que ses biens et infrastructures. Il se classe en deuxième position après les séismes et les risques géologiques dans le classement national des risques majeurs, vu l'ampleur des dommages matériels et immatériels qu'il engendre (Nouri et al., 2016).

Les territoires septentrionaux d'Algérie sont particulièrement vulnérables à cette menace. Ces régions, avec leurs caractéristiques physiques et naturelles (climat hostile, végétation fragile, imperméabilisation des terrains, nature et densité du réseau hydrographique), sont propices aux ruissellements rapides, favorisant les torrents et le débordement des cours d'eau.

L'étude du risque d'inondation dans l'Algérie nord-orientale est devenue une priorité dans un contexte de changement climatique et de récurrence des événements extrêmes. La grande concentration de la population dans ces territoires du Nord, marqués par une urbanisation accélérée et souvent mal contrôlée, pose des défis majeurs aux décideurs concernant les risques naturels en général, et le risque d'inondation en particulier.

L'analyse de la situation des inondations en Algérie révèle une augmentation préoccupante de la vulnérabilité, principalement due à l'urbanisation croissante et à l'expansion des activités humaines dans les zones inondables. Selon le classement de l'indice mondial sur les risques climatiques établi par la fondation allemande Germanwatch, l'Algérie est classée à la 123ème place. Entre

1998 et 2017, l'Algérie a perdu environ 101,133 millions de dollars en raison des risques climatiques, se classant 101ème pour les pertes économiques engendrées. À l'échelle nord-africaine, l'Algérie est mieux classée que le Maroc (124ème) mais derrière la Tunisie (96ème).

## **2. Problématique et contexte de la recherche**

Les risques naturels constituent un axe de recherche en développement constant, notamment en milieu urbain. En Algérie, le constat des risques naturels est alarmant, plusieurs villes restant sous la menace directe des aléas destructeurs. Ces aléas engendrent des pertes coûteuses pour l'économie nationale.

La forte croissance urbaine observée dans les pays en développement expose une grande partie de la population à des phénomènes naturels susceptibles de causer des dégâts. L'urbanisation rapide et souvent incontrôlée des zones à risque est un handicap majeur à la diffusion et à la mise en place de méthodes de prévention efficaces. Cette situation correspond bien à Constantine, troisième métropole en Algérie, où l'urbanisation des versants instables et des plaines alluviales inondables expose la ville à des risques accrus notamment les inondations, entraînant des dégâts chaque année. L'absence de réglementation spécifique des zones à risque aggrave cette situation.

Ce constat nous a poussé à poser les questions suivantes :

- Quelle est la vulnérabilité de la ville de Constantine face au risque d'inondation ?
- Quels sont les facteurs naturels et anthropiques qui aggravent ce risque ?
- Quelle stratégie de prévention et d'adaptation pour une gestion intégrée du risque et assurer une ville résiliente ?

Pour répondre à ces questions nous avons formulé l'hypothèse suivante :

La combinaison d'une évaluation intégrée de l'aléa et de la vulnérabilité permet de localiser avec précision les zones à risque d'inondation à Constantine, de mieux comprendre la nature, l'intensité et la fréquence des aléas naturels, de quantifier la vulnérabilité et de diagnostiquer les facteurs aggravants le risque. Cette approche contribue à la proposition d'une stratégie de prévention et d'adaptation, visant à réduire les impacts des inondations sur les populations et les infrastructures, tout en renforçant la résilience du territoire face aux risques climatiques.

### **Cadre géographique et motivations de la recherche (choix du site)**

L'Algérie septentrionale est un territoire montagneux par excellence. Dans les petits bassins versants des sommets de montagne, des pluies abondantes ou des orages violents accélèrent les courants sur les pentes fortes, causant la montée brusque des eaux, souvent dévastatrices et

meurtrières. Ce type d'inondation concerne souvent des villages isolés en haute montagne ou des agglomérations urbaines en aval, et pose des risques importants. En plus des crues torrentielles des petits bassins de montagne, l'Algérie subit des crues rapides des fleuves côtiers, des crues semi-rapides des moyens bassins de sortie de montagnes, et des crues lentes des grands cours d'eau. Le caractère orageux des précipitations rend ces inondations pluviales urbaines soudaines et violentes, particulièrement destructrices.

Notre recherche se concentre sur la région de Constantine, située dans le Nord-Est de l'Algérie. Cette zone a été choisie pour plusieurs raisons :

-Constantine est la troisième métropole d'Algérie et présente des enjeux importants. La ville est exposée à des inondations fréquentes par ruissellement urbain ou par débordement de ses cours d'eaux lors des orages et des fortes précipitations, avec une population estimée à 434 360 habitants en 2008 (RGPH, 2008).

-Constantine est située à la confluence de deux plaines et de trois sous bassins versants qui appartiennent au bassin du Kébir Rhumel, la rendant vulnérable aux inondations.

-Les études liées aux risques d'inondation sont peu fréquentes menées par les collectivités locales et les responsables des services de l'état.

-Les bassins versants drainants la région de Constantine sont caractérisés par des crues rapides accentués par une urbanisation accélérée, parfois anarchique occupent des versants instables et des plaines alluviales, augmentant le risque d'inondation dont les conséquences peuvent être catastrophiques

-Les extensions récentes de la ville

-Les autorités locales sont alertées sur la mauvaise gestion des risques naturels et la nécessité de politiques de prévention.

Pour l'ensemble de ces raisons, notre travail de recherche se concentre sur la cartographie du risque d'inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel et dans les zones périphériques de la ville de Constantine, représenté spécifiquement par les bassins versants d'Oued Ziad, et Oued Mgharouel. Plusieurs raisons expliquent ce choix :

- Le bassin versant d'Oued Rhumel qui est historiquement marqué par des crues dévastatrices, subit des pressions d'une urbanisation rapide, de l'imperméabilisation des sols et d'infrastructures insuffisantes. De plus, des facteurs aggravants tels que la déforestation, la dégradation des sols et les changements climatiques augmentent la fréquence et l'intensité des crues. Ce qui nécessite une

cartographie précise du risque inondation dans ce bassin pour limiter les futures extensions urbaines vers les zones à risque, ainsi que de produire des données fiables et développer des stratégies adaptées de gestion préventive à l'échelle du bassin versant.

- Les bassins versants choisis représentent des échantillons de caractéristiques physiques spécifiques et sont particulièrement vulnérables en raison de l'urbanisation réglementaire et anarchique implanté dans la partie aval surtout dans les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel.

- Oued Ziad et Oued Mgharouel prennent naissance dans les pieds de montagne, une zone caractérisée par de forte précipitation en amont, aussi ces mêmes cours d'eau ont débordé et ont causé des dégâts importants.

- Les principales inondations qui ont affecté la ville de Constantine sont essentiellement dues aux averses intenses qui ont généré des débits maximums parfois exceptionnels telle la crue exceptionnelle survenue à l'agglomération de Jebli Ahmed Ex (Cantoli) le 19 septembre 2018 lors du débordement d'Oued Ziad qui a causé la mort de deux personnes et des dégâts matériels important. Ce constat nous a motivé pour faire une étude hydrologique approfondie afin de comprendre les facteurs contribuant à ce type d'événements et prévenir sa répétition.

- A travers l'aperçu historique et l'inventaire des inondations de la ville de Constantine. Le risque hydrologique n'a pas été pris suffisamment en considération dans l'élaboration des aménagements urbains successifs. Puisque la ville continuait à se développer sur des terrains de grande inondabilité ces dernières décennies provoquant ainsi une limite aux capacités d'infiltration et accentuant le facteur de vulnérabilité (Cas du bassin versant d'Oued Mgharouel). Ce dernier malgré son calibrage, il continue de déborder lors des fortes précipitations entraînant des dégâts et un sentiment d'insécurité aux habitants à proximité de l'Oued, surtout que l'urbanisation ne cesse pas de s'accroître dans sa partie aval et tout près de ces rives.

- En Algérie, le risque naturel reste largement méconnu, malgré la promulgation de la loi cadre du 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable de 2004 jusqu'à nos jours il n'existe aucun plan de prévention pour les risques majeurs en Algérie. Aussi, les instruments d'urbanisme et d'aménagement existants, tels que le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme (PDAU) et les plans d'occupation des sols (POS), ne tiennent pas compte des aléas naturels et ne contiennent aucune information sur les risques naturels. De plus, la volonté politique d'instaurer et de diffuser une culture sociale du risque

est presque méconnue, laissant la population algérienne sans accès aux documents ou informations sur les risques encourus dans leur région. De ce fait, l'élaboration d'une carte des zones à risque d'inondation à Constantine permettrait de mettre en place une véritable politique de prévention. Cet outil serait précieux pour les gestionnaires de la ville ainsi que pour les décideurs et les planificateurs, contribuant ainsi à la protection de la ville de Constantine. La stratégie de prévention nécessite d'abord une connaissance approfondie des régions sujettes à ce risque, ensuite une identification des facteurs aggravant ce phénomène. C'est pourquoi ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre d'une politique de prévention et d'adaptation du risque.

### **3. Objectifs de la thèse**

Cette recherche vise à améliorer la compréhension des phénomènes d'aléa, d'enjeux et de vulnérabilité afin de gérer efficacement les zones exposées aux risques d'inondation et de contrôler l'expansion urbaine dans les zones à risque, tout en tenant compte des exigences de prévention et des besoins socio-économiques de développement.

L'objectif principal de cette recherche est de déterminer les zones à risque d'inondation dans le bassin versant de l'Oued Rhumel, afin de mettre en place des mesures de protection dans le cadre des futurs programmes d'aménagement et d'urbanisme. Elle vise également à connaître, identifier et quantifier la vulnérabilité de la ville de Constantine face au risque d'inondations, afin de réduire l'impact de ce dernier sur l'homme et ses biens, ainsi que sur l'environnement et les activités socio-économiques pour assurer une ville résiliente en se basant sur une stratégie de prévention, d'adaptation et d'atténuation du risque qui s'inscrit dans une logique de développement durable de la ville. Il s'agit ici de proposer des cartes d'aide à la décision par l'élaboration d'un document scientifique et technique à travers la cartographie du risque qui délimite les zones exposées et édicte des mesures de protection en termes d'aménagement.

Cette thèse vise aussi à compléter les initiatives internationales et régionales pour promouvoir la réduction des risques de catastrophe, surtout dans les zones urbaines où la croissance démographique rapide augmente la vulnérabilité. Donc l'objectif secondaire est de contribuer à une politique de prévention des risques permettant un développement durable tout en assurant une sécurité maximale des personnes et des biens.

#### **4.Méthodologie de la recherche**

Pour réaliser nos objectifs, nous avons opté pour une approche méthodologique structurée, incluant la collecte des données nécessaires des zones étudiés, l'utilisation des approches scientifiques, et outils (voir Figure 1).

-Tout d'abord, une étude bibliographique détaillé sur les risques naturels en général et le risque d'inondation particulièrement a été effectué, il s'agit de la collecte des données pour procéder à l'état de l'art (livres, thèses de référence, articles scientifique, revue de littérature, sites internet etc...)

- Collecte et élaboration des bases de données spatialisées représentatives des caractéristiques du site d'étude.

-De nombreuses sorties sur terrain, pour pouvoir étudier, analyser et caractériser notre zone d'étude, prendre des photos et réaliser des entretiens avec les personnes qui habitent près des cours d'eau étudiés.

- La visite de plusieurs directions et d'administrations au niveau de la wilaya de Constantine pour faciliter la collecte des données nécessaires aux besoins d'étude.

-La cartographie du risque inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel a été effectué par analyse multicritères hiérarchique (AHP) et le traitement a été effectué par ArcGis 10.8.

-L'évaluation et la cartographie de l'aléa inondation dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel a été effectué par modélisation hydraulique en prenant en considération les spécificités de chaque zone et en utilisant les approches convenables pour chaque site. Tandis que l'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité au risque d'inondation a été effectuée par l'analyse des facteurs socio-économiques et environnementaux qui augmentent la vulnérabilité des populations locales aux inondations. A la fin le risque final est obtenu par la superposition des cartes d'aléa et de vulnérabilité issues des résultats de la simulation et les données géospatiales.

Les données nécessaires pour effectuer cette recherche sont mise en œuvre sur une plateforme informatique intégrant un SIG, et un système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique en français (HEC RAS) en anglais (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) pour la simulation des inondations. (Voir la figure ci-dessous).

Pour mener à bien toutes ces opérations de ce modeste travail de recherche, qui nous a pris beaucoup de temps et d'effort, nous avons pu effectuer certains stages à Constantine (un minimum

de 30 jours dans les directions de l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH) et l'entreprise Hydro projet Est Engineering (HPE) de Constantine).

Aussi ; nous avons pu bénéficier d'une mobilité de trois mois dans le cadre d'ERASMUS+, ce stage de perfectionnement a été effectué à l'université de Bucarest (Roumanie), sous la conduite de Pr GRECU Florina.

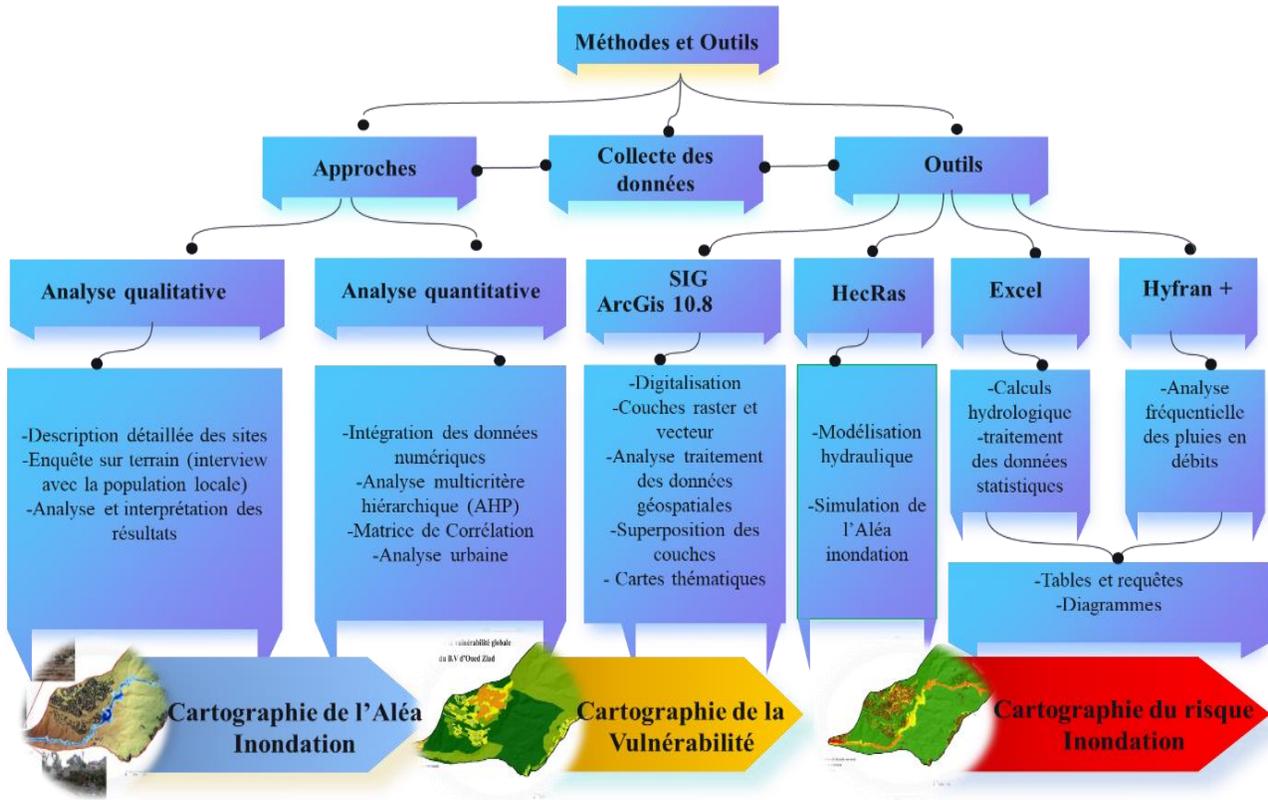


Figure.1 Organigramme des Méthodes et Outils Mobilisés pour la Recherche

## 5. Structure de la thèse

Pour atteindre les objectifs mentionnés ci-dessus, notre travail de recherche est organisé en cinq chapitres, dont la structure reflète la démarche adoptée et les étapes de l'analyse.

**-Le premier chapitre :** présente le cadre théorique de notre thématique de recherche. Il consiste à faire l'état de l'art et identifier les tendances émergentes de la recherche, il traite les questions clés qui doivent être abordées, notamment :

- Clarifier les concepts de base liés au risque d'inondation
- Étudier les différentes méthodes d'évaluation des composantes du risque (notamment les méthodes de cartographie de l'aléa et de la vulnérabilité)

- Fournir un aperçu général sur les inondations dans le monde et en Algérie, en mettant l'accent sur la relation des changements climatiques et le risque d'inondation

-Enfin explorer les nouvelles technologies utilisées à travers le monde pour réduire le risque d'inondation.

**-Le deuxième chapitre :** traite du cadre physique de la recherche. Il consiste à présenter les bassins versants à risque ainsi que leurs principaux traits physiques. Il s'agit de donner un aperçu général de leurs caractéristiques physiographiques, morphométriques, géologiques et géomorphologiques, couvert végétal afin de comprendre leurs spécificités locales et leur prédisposition aux aléas naturels en général, et aux inondations en particulier.

**-Le troisième chapitre :** présente l'étude hydro-climatique des bassins versants examinés. Il consiste en une analyse détaillée des facteurs climatiques et hydrologiques influençant le régime de ces bassins versants, Il s'agit de caractériser le climat de la région d'étude, de déterminer la capacité des bassins versants à générer des écoulements, et d'estimer les débits de pointe pour chaque période de retour, allant de 10 à 1000 ans.

**-Le quatrième chapitre :** se concentre sur l'étude du risque d'inondation dans les bassins versants examinés. Tout d'abord, nous procédons à la modélisation du risque d'inondation dans le bassin versant de l'Oued Rhumel en utilisant le processus de l'Analyse Multicritères Hiérarchique (Analytical Hierarchy Process - AHP). Ensuite, nous cartographions l'aléa inondation dans les bassins versants de l'Oued Ziad et de l'Oued Mgharouel en utilisant la modélisation hydraulique par HEC-RAS. Enfin, nous présentons le cadre géographique local de la ville de Constantine, puis nous effectuons une analyse urbaine détaillée pour cartographier la vulnérabilité sociale et structurelle, afin de réaliser la cartographie finale du risque. Nous examinons également les facteurs aggravants dans les deux bassins versants.

**-Le Cinquième chapitre :** consiste à présenter le système national de gestion du risque d'inondation en Algérie en mettant en lumière le cadre réglementaire qui régissent la gestion des risques naturels en générale et le risque d'inondation en particulier. Ensuite nous procédons à proposer une stratégie de gestion intégrée des risques inondation à Constantine, il s'agit d'une stratégie complète d'adaptation et d'atténuation du risque d'inondation pour parer aux lacunes du système actuel de gestion des risques afin de renforcer la résilience de la ville, face aux inondations et anticiper les futurs défis climatiques et hydrologiques. Ensuite nous proposons des recommandations générales spécifiques aux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel.

Enfin, **la conclusion générale** de la thèse présente une synthèse générale des résultats obtenus et de leur application à l'aménagement de la ville de Constantine.

## **6. Contraintes de la recherche**

-Nous avons rencontré plusieurs contraintes et obstacles tout au long de cette étude, notamment le manque de références nationales concernant notre zone d'étude, ainsi que la réponse limitée de certains organismes à nos demandes d'information.

-Le manque de données statistiques et cartographiques nécessaires pour mener à bien notre recherche nous a parfois contraints à utiliser des formules empiriques pour les calculs, en raison du manque de données observées sur le terrain.

-L'étude du risque hydrologique en général, et du risque d'inondation en particulier, requiert un levé topographique précis des bassins versants étudiés pour obtenir des résultats fiables et proches de la réalité. Malheureusement, cette donnée n'est pas disponible pour le bassin versant d'Oued Rhumel, ce qui a rendu l'opération de simulation un peu difficile et nous a obligés à choisir d'autres méthodes alternatives pour cartographier le risque d'inondation.

-Malgré ces obstacles, nous avons réussi à atteindre notre objectif final de produire des cartes de risque d'inondation pour les bassins versants d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel, afin d'aider les autorités publiques dans la gestion et la prévention des risques naturels.

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

## **Introduction**

Dans le présent chapitre, nous allons tracer le cadre théorique de notre thématique de recherche, afin de mieux cerner la problématique et de définir les principaux objectifs.

Aussi, l'analyse fine et exhaustive des travaux antérieurs permettra de suivre l'évolution des concepts et d'identifier les tendances émergentes de la recherche en relation avec cette thématique. Par ailleurs, cela nous aidera aussi à aborder les questions clés qui sont posées aujourd'hui.

Le concept de risque d'inondation a beaucoup évolué ces dernières années (Escaffre E, 2014, Haoues, 2017). En fait, cette évolution a été intimement liée à la mise en place de mesures de plus en plus efficaces de la gestion de ce risque.

À travers une lecture approfondie des références académiques et scientifiques en relation notre problématique (livres, monographie, thèses de doctorat et articles scientifiques), nous procédons dans ce chapitre en premier lieu à une clarification des concepts clés liés au risque, avant d'examiner les différentes méthodes d'évaluation de ce dernier, ainsi que ses principales composantes, à savoir l'aléa et la vulnérabilité des enjeux, nous étudierons également la relation entre les changements climatiques et le risque d'inondation, tout en fournissant un aperçu global des inondations survenues dans le monde, avec un focus particulier sur l'Algérie. Ensuite, nous analysons les différents types, causes et conséquences des inondations dans le pays, ainsi que les facteurs qui l'aggravent. Enfin, nous abordons les nouvelles technologies utilisées dans le monde pour la gestion des risques d'inondation. Ces avancées technologiques offrent en effet de nouveaux outils pour prévoir, surveiller, atténuer et gérer les inondations, et nous mettrons en lumière leur contribution à une meilleure compréhension et à une gestion efficace des risques.

### **1.1.Définition des concepts liés au risque d'inondation (Revue de littérature)**

La clarification des concepts constitue l'élément clé de la connaissance scientifique du phénomène étudié, c'est un travail réflexif qui a pour but de faire ressortir les différents sens et dimensions des mots-clés contenus dans la recherche scientifique, d'en préciser la genèse, l'évolution et parfois les contextes spécifiques de leur usage. Notre étude porte sur l'étude de la vulnérabilité au risque d'inondation vers une stratégie de prévention et d'adaptation, c'est pourquoi nous allons définir les concepts suivants : Aléa, vulnérabilité, enjeux, résilience, risque, inondation, prévention et adaptation qui constituent les concepts clés pour la compréhension de notre sujet de recherche par les scientifiques et les lecteurs de la thèse.

#### **1.1.1. Aléa**

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Le terme "aléa" est fréquemment utilisé dans la littérature dans différents domaines tel les risques naturels, la géologie, la climatologie, la météorologie, la sécurité civile et l'ingénierie. L'aléa est considéré généralement comme un événement aléatoire susceptible d'affecter ou d'endommager une zone géographique, une communauté ou un système (naturel ou humain).

Plusieurs auteurs ont essayé de donner des définitions du concept aléa, Dauphiné et Provitolo (2013) ont défini l'aléa comme un phénomène physique imprévisible d'origine naturel, c'est-à-dire issu de la dynamique terrestre tel que (inondation, séisme, ...etc) ou Technologique (anthropique) tel que (explosions d'usines chimiques, accident dans une centrale nucléaire, accident routier lors de transport de produits dangereux...), cet aléa est caractérisé par une intensité (hauteur d'eau, magnitude...) et une probabilité d'occurrence (période de retour). Ainsi, l'aléa est un événement qui se caractérise par son imprévisibilité, à la fois en termes d'intensité, de spatialité et de temporalité. Par ce que nous ne savons pas exactement combien de temps cela va durer, quand cela va se produire, quelle est l'étendue et quel territoire cela affectera (Defossez, 2009), l'aléa peut créer un risque lorsque les personnes et les biens sont exposés au danger qu'il constitue.

En matière du risque inondation, l'aléa d'inondation est une conséquence de la situation hydro-climatologique. Il est évalué selon la pluviométrie, la hauteur et la durée de submersion, la période de retour, le débit de crue, la vitesse d'écoulement et la torrencialité du cours d'eau.

Plus les hauteurs d'eau sont importantes plus l'aléa est fort. De même plus les vitesses sont élevées, plus l'aléa est fort. C'est souvent la vitesse importante ( $>1$  m/s) qui impose un aléa fort ou très fort, au-delà de 1 m/s, et même pour de petites hauteurs d'eau (quelques dizaines de centimètres), il devient difficile voire impossible de se déplacer pour un individu (Defossez, 2009).

Selon le programme des nations unies pour le développement (PNUD), les aléas naturels sont des phénomènes qui se produisent dans la biosphère susceptible de faire de différents dégâts, et qui peuvent être évités, si les activités humaines comme l'urbanisation arbitraire et la dégradation de l'environnement sont évitées. L'organisation de coopération et de développement économique (OCDE) à son tour a donné une définition pour les aléas naturels, il s'agit d'un phénomène provoqué par des forces naturelles, tels un séisme, une inondation, un cyclone, une tempête ou une éruption volcanique. D'après ces différentes définitions qu'on a vues on peut déduire que l'aléa est un phénomène naturel ou technologique, potentiellement dangereux et imprévisible.

### 1.1.2. Enjeux

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Le terme enjeu fait référence à la valeur des entités existantes sur le sol et menacées par un phénomène redoutable (Gleyze, 2002). Les enjeux sont les personnes, habitations, activités économiques, infrastructures, réseaux, patrimoine culturel, susceptible d'être exposés à des aléas naturels ou anthropiques. Ils constituent des facteurs de risque qui confèrent une dimension complexe quantitative et qualitative à la vulnérabilité. Ces derniers se caractérisent par leur importance (nombre, nature, etc.) et leur vulnérabilité.

### 1.1.3. Vulnérabilité

La vulnérabilité est un concept composite. Elle prend en compte différents paramètres socio-économiques et géographiques. Pour bien comprendre la vulnérabilité, plusieurs définitions sont données dans la littérature, nous les résumons ici dans cette partie.

Selon le ministère de l'écologie et de développement durable français : « la vulnérabilité est le niveau des conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux », tandis que l'administration nationale des océans et de l'atmosphère (NOAA)<sup>1</sup> l'a définie par : « la susceptibilité des ressources à être affectées par des aléas ». De ces deux définitions on déduit que la vulnérabilité représente le degré de dommages potentiels causés par un phénomène naturel (l'aléa), mais ces définitions n'intègrent pas la réactivité de la société, c'est pourquoi D'Ercole. R (1994) a donné une définition plus détaillée qui considère la vulnérabilité comme « la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique » Cette définition est complétée par celle de J-C Thouret (1996) qui définit la vulnérabilité par : « un système de facteurs structurels (socio-économiques, culturels, fonctionnels et institutionnels), conjoncturels (dysfonctionnements) et géographiques (caractéristiques d'impact) qui affectent la capacité de la société à réagir aux catastrophes en modifiant leurs effets sur les enjeux ». (Defossez, 2009)<sup>2</sup>

Deux approches ont été développées dans les recherches sur la vulnérabilité menées par R. D'Ercole et J-C Thouret (1996) : la première concerne les dommages potentiels aux biens et aux personnes à risque, tandis que la seconde se réfère aux conditions des dommages et la capacité de réaction de la société face au risque (Defossez, 2009).

Selon le projet «FLOODsite» qui est un projet de recherche financé par l'Union Européenne, à l'occasion du 6ème Programme-cadre (FP6), et réalisé entre mars 2004 et février 2009 par un

---

<sup>1</sup> NOAA : National Océanique and Atmosphérique Administration

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Consortium conduit par l'Institut Wallingford (Royaume-Uni) et adopté par 36 autres universités et établissements participant à la recherche relative à la gestion des inondations, aussi bien du Royaume-Uni que d'autres pays européens (Pays-Bas, Belgique, France, Portugal, Suède, Allemagne, Espagne, Italie, Confédération helvétique, Hongrie, Pologne, République tchèque et Grèce), la vulnérabilité dépend de l'exposition au risque et des moyens mis en œuvre pour diminuer les conséquences négatives d'une catastrophe naturelle donnée (capacité à anticiper, à faire face et à récupérer après une catastrophe naturelle), comme une inondation ou tempête.

Donc la vulnérabilité dépend de :

- L'exposition aux aléas, les enjeux (personnes habitant la zone inondable, les biens de toute nature, les cultures, les animaux d'élevage et les activités économiques).
- La sensibilité de l'impact.
- La capacité à récupérer suite aux sinistres (résilience).

L'organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), qui tient en compte les propositions de l'organisation des nations unies pour le secours en cas de catastrophe. (UNDRO)<sup>3</sup>, définit la vulnérabilité comme étant : le degré de perte d'un élément déterminé ou d'un ensemble d'éléments en danger résultant de la survenue d'un phénomène naturel d'une ampleur donnée. Il est identifié à une échelle allant de 0 (sans dommages) à 1 (perte totale).

Selon Dauphiné (2013), la vulnérabilité peut être classée selon trois approches différentes : La première, la plus ancienne mesure la vulnérabilité en quantifiant l'endommagement réel ou potentiel des enjeux menacés par une catastrophe. Il s'agit d'évaluer les dommages causés aux personnes, aux biens matériels, aux espèces et aux biens patrimoniaux, cette approche s'appelle la vulnérabilité biophysique. La deuxième analyse la vulnérabilité en termes de capacité de réaction d'une société aux perturbations, cette approche s'appelle la vulnérabilité sociale ; tandis que, la troisième qui est la plus récente, met l'accent sur les enjeux territoriaux, elle s'appelle la vulnérabilité territoriale, ces derniers deux types de vulnérabilité peuvent être évaluées indépendamment de l'aléa. (Dauphiné et Provitolo, 2013)

### **1.1.3.1. La vulnérabilité biophysique**

La vulnérabilité biophysique dépend essentiellement de trois facteurs : l'exposition des enjeux à l'aléa, leur résistance, et leur sensibilité (Adger, 2006).

---

<sup>3</sup> UNDRO : Organisation des Nations Unies pour le Secours en cas de catastrophe.

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

L'exposition est déterminée par la proximité entre l'aléa et les problèmes, permettant de prendre en compte le rôle de la proximité dans les mécanismes de dommages. La résistance d'un système est définie par sa capacité à résister aux perturbations sans subir de dommages. Il s'agit de la résistance physique d'une infrastructure lorsque les crues se heurtent la digue, ou mentale d'un individu ou d'un groupe. La sensibilité du système dépend de sa résistance, elle se traduit par la quantité de dommages qu'un enjeu peut subir. Ainsi, plus la perte est importante, plus la sensibilité est élevée.

### **1.1.3.2.La vulnérabilité sociale**

La vulnérabilité sociale est la capacité des personnes et des sociétés à anticiper, à faire face, à gérer un risque, et à surmonter la crise. Plus la capacité d'un système à se remettre d'une catastrophe est élevée, plus sa vulnérabilité est faible.

### **1.1.3.3.La vulnérabilité territoriale**

La vulnérabilité territoriale fait référence à de la zone capable d'endurer des dégâts importants, ainsi qu'à des endroits où les perturbations pourraient se propager à l'intérieur d'un territoire.

Six types de vulnérabilité sont identifiés par R. D'Ercole et P. Metzger (2003).

- L'affaiblissement des enjeux.
- Dépendance à l'égard d'un système autre que celui dans lequel s'intègre un enjeu donné.
- L'exposition aux aléas et la susceptibilité d'être endommagé.
- La capacité à contrôler les enjeux.
- Les alternatives de fonctionnement.
- La capacité à gérer une situation de crise.

Il est admis que la vulnérabilité dépend fortement de la présence humaine, si on prend par exemple un site avec un aléa fort, mais sans enjeux ou occupation humaine, ne présence aucun risque significatif, sauf pour les écosystèmes. C'est la raison pour laquelle la probabilité du risque est accrue dans les grandes villes (mégapoles) ou la densité de population est élevée.

Ce qui exige l'élaboration d'une carte de vulnérabilité à partir de la densité de population afin de cartographier les zones à risque.

Selon les définitions précédentes donné dans la littérature, on résume que la vulnérabilité est le niveau d'effet prévisible sur une population face à un risque et dépend essentiellement de plusieurs points : de l'environnement qui peut aggraver le phénomène naturel, si on est en ville ou en campagne, dans un espace urbain ou rural etc., elle dépend aussi de l'économie du pays, est ce

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

qu'on est dans un pays riche ou dans un pays pauvre, puisque une économie développée peut aggraver le cout des dégâts matériels, accroître les risques technologiques, mais aussi augmenter la capacité de résistance, elle dépend aussi de la population c'est-à-dire la densité de population exposée au risque, mais aussi la solidité ou la fragilité de l'habitat etc., et en fin elle dépend aussi des décisions politiques, c'est à dire est ce qu'il y'a des systèmes de prévention et de prévision mise par l'état , le degré de prévention de la population face aux risques encourus, organisation des secours et du système de soins, etc.. C'est pourquoi que tous les territoires ne sont pas vulnérables de la même façon, et même peut y avoir des conséquences très différentes selon le degré de vulnérabilité de la société, et sa capacité à résister et à se relever, donc la vulnérabilité ouvre ainsi la voie à la résilience.

### 1.1.4. Résilience

La résilience dans le domaine des risques naturels et catastrophes se définit par la capacité d'un système ou d'une société à faire face à une catastrophe, et à se remettre rapidement du choc (Dauphiné, 2013). Le bureau des nations unies pour la réduction des risques de catastrophes, Sendai a défini la résilience par la capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposée à des aléas à résister, absorber, accommoder, s'adapter, transformer et récupérer des effets d'un aléa de manière opportune et efficace, y compris la préservation et la restauration de ses structures et fonctions de base essentielles par le biais de la gestion des risques. (UNISDR, 2023), cette terminologie du cadre de Sendai sur la réduction des risques de catastrophe (UNISDR) ne se diffère pas de celle donnée par Dauphiné (2013) dans son livre intitulé « Risques et Catastrophes Observer, Spatialiser, Comprendre, Gérer »,

Ces deux définitions données affirment que les éléments clés de ce concept sont : la capacité d'adaptation, de résistance, de flexibilité et de réorganisation des systèmes techniques et sociaux. La résilience est fondée sur les concepts de systèmes et de leur résistance et de leur régénération, dans le domaine des risques et des catastrophes.

Ce concept d'origine physique a été transféré dans le domaine des sciences sociales suite à un passage par l'écologie, ce qui a conduit à une diversification et à une polysémie du concept. Avant d'introduire de nouvelles méthodes d'évaluation de la résilience des sociétés, nous présentons d'abord ses évolutions au fil du temps

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Mathieu en (1991) a défini la résilience autant que la capacité d'une structure à subir un choc ou une pression continue sans se fissurer ou se déformer. Ensuite, diverses disciplines l'ont adopté, enrichissant ce concept.

En écologie par exemple, la résilience est définie par la capacité d'un écosystème à faire face à une perturbation sans altérer sa structure qualitative.

Les cindyniques sont aujourd'hui très intéressés par la résilience. Elle sert également de base aux nouvelles politiques de gestion des risques naturels, à titre d'exemple dans le cadre de la stratégie internationale pour la réduction des catastrophes (ISDR)<sup>4</sup>, les Nations unies ont adopté en 2005 le cadre d'action de Hyogo (HFA)<sup>5</sup>, un plan de dix ans (2005-2015) afin de renforcer la résilience des nations et des communautés face aux catastrophes naturelles (building the resilience of nations and communities to disaster). Ce plan, adopté par 168 États, souligne la nécessité de suivre et d'examiner les progrès réalisés en matière de réduction des risques de catastrophe afin de documenter la mise en œuvre progressive du cadre d'action et d'alimenter la planification et la gestion des risques de catastrophe et effectuer une programmation éclairée aux niveaux national, sous-régional et régional. La résilience systémique a une dimension physique et sociale, ce qui la rend adaptée à la gestion des risques (Van Der Leeuw et Leygonie, 2001). Cependant, cette définition n'est pas distincte de celle de la vulnérabilité. Étudier la vulnérabilité des populations ou des systèmes implique également d'étudier indirectement leur résilience aux situations, leur capacité de récupération et leur capacité d'innovation pour se réorganiser. C. Gilbert (2009) souligne que la distinction entre vulnérabilité et enjeux est floue et qu'il existe des similitudes et des chevauchements entre les concepts de vulnérabilité et de résilience. En effet, la résilience est souvent utilisée comme un antonyme de la Vulnérabilité (Follke et al., 2002). La vulnérabilité est aussi définie comme négative (fragilité, incapacité, blessure, dommage). Un cadre conceptuel supplémentaire a récemment été proposé (Provitolo, 2012), dans lequel la résilience et la vulnérabilité des systèmes sont considérées comme un continuum (Dauphiné, 2013).

D'après les différentes définitions données par les différents auteurs cité au-dessus, on peut donner la définition suivante : La résilience c'est la capacité d'une société à être préparée aux chocs et aux crises, à les surmonter, c'est la capacité d'un pays à retrouver une vie normale après la survenance d'un risque, ainsi une résilience élevée compense une vulnérabilité élevée.

---

<sup>4</sup> ISDR: International strategy for disaster reduction

<sup>5</sup> HFA: Hyogo Framework for Action

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

## 1.1.5. Risque

Le risque est un mot complexe qui a plusieurs significations. Généralement, la définition la plus courante du risque est le croisement d'un aléa naturel ou anthropique et la vulnérabilité des enjeux (D'Ercole & Pigeon, 1999 ; Brugnot, 2001 ; Dauphiné, 2003 ; Ledoux, 2006 ; Défossez, 2009), cette définition se traduit par la formule suivante :  $\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité des enjeux}$ . Mais, cette formalisation se limite à ne pas inclure la résilience. Une nouvelle formalisation pourrait alors être proposée où le risque dépend de l'aléa, de la vulnérabilité des enjeux et de la résilience du système comme suit :  $\text{Risque} = (\text{aléa} \times \text{vulnérabilité des enjeux}, \text{résilience})$

Pour Cohen (2001, p. 321) : « le risque correspond à l'occurrence d'un fait imprévisible capable d'affecter les personnes, le patrimoine, les activités économiques d'une société et de modifier son patrimoine ». Cette définition reprend la définition courante du risque, en insistant néanmoins davantage sur les conséquences financières du risque (Plot-Vicard, 2010, p.89).

Pour (Monte et al. 2021), le terme « risque » évoque la notion d'incertitude (c'est-à-dire quelque chose qui peut ou non se produire) et est attaché au sens de la perte d'un actif matériel ou immatériel.

Le Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe (UNDRR)<sup>6</sup> définit le risque comme la perte potentielle de vies humaines, de blessures ou de biens détruits ou endommagés qui pourraient survenir à un système, une société ou une communauté au cours d'une période spécifique de temps, déterminé de manière probabiliste en fonction du danger, de l'exposition, de la vulnérabilité et de la capacité.

Les études menées sur le risque définissent souvent le risque comme le produit de la probabilité d'occurrence d'un événement et de son ampleur, tandis que les chercheurs en géographie et dans d'autres disciplines ont tendance à considérer cette relation comme incluant un exposant pour tenir compte des valeurs sociales ou des impacts sociétaux, bien que puisse être difficile à mesurer. Le risque n'est plus considéré comme une simple probabilité. Le risque intègre de multiples composantes, à savoir l'aléa, la vulnérabilité et, plus précisément, la résilience.

---

<sup>6</sup> UNDRR: The United Nations Office for Disaster Risk Reduction UNDRR. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. Geneva, Switzerland; 2016

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Le risque naturel ou d'origine anthropique est considérée comme risque majeur lorsqu'il provoque de nombreuses victimes, et des dégâts considérables qui dépassent la capacité de réaction des autorités (État et protection civile) dans la zone touchée. Le risque majeur se caractérise par sa faible probabilité d'occurrence (faible fréquence) et d'énormes conséquences, et peut se qualifier d'une catastrophe qui perturbe durablement le fonctionnement d'une société et son l'équilibre naturel et social à différents niveaux d'échelle. Selon les estimations des Nations unies, une catastrophe est définie par 30 décès ou plus.

### **1.1.6. Inondation**

La définition du concept inondation est indispensable pour bien comprendre les facteurs qui l'aggravent, ainsi que ses effets et ses conséquences sur l'homme, les biens, l'infrastructures, l'activité économique et les coûts financiers qu'elle peut entraîner pour mieux gérer ce phénomène, ces points vont être développés ci-après dans ce chapitre. Cependant plusieurs définitions existent dans la littérature pour le concept inondation, nous allons les résumer dans une seule définition commune. L'inondation est une submersion plus ou moins rapide d'une zone ordinairement hors d'eau. Elle correspond au débordement des eaux hors du lit mineur d'un cours d'eau à la suite d'une crue (augmentation du débit d'un cours d'eau) pour atteindre le lit majeur, ou bien aux remontées de nappes phréatiques, comme elle peut être aussi dû aux ruissellements résultant de fortes pluies ou la capacité d'évacuation des eaux ruisselées est insuffisante, ou bien par rupture d'ouvrages de protection (brèches dans les digues), ou encore les inondations estuariennes résultant de la conjonction de fortes marées, de situations dépressionnaires et de la crue des fleuves. Une inondation est caractérisée par : la hauteur de submersion, la durée de submersion, la vitesse de l'écoulement et le débit (mesuré en m<sup>3</sup>/s). L'inondation peut être bénéfique d'un point de vue géologique quand elle est lente et attendue, puisque elle joue un rôle important dans la formation des paysages et des écosystèmes, elle contribue également au transport des sédiments, et à la fertilité des sols lorsque elle apporte de limons fertilisants (le cas des bordures désertiques), ainsi elle aide à la création de plaines inondables, qui sont souvent des zones agricoles fertiles et sert à l'irrigation des champs etc..., comme elle peut être désastreuse quand elle est violente, elle ravine le sol et dépose des matériaux grossiers et stériles et causes des pertes humains et matériels importants qui se répercute négativement sur l'économie des pays.

### **1.1.7. Prévention**

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Pour réduire les risques naturels en général et le risque d'inondation en particulier, il faut mettre en place des mesures de prévention et d'adaptation au risque, c'est pourquoi il est important de connaître le concept de prévention afin de mieux arriver à une politique de gestion intégrée, et durable du risque.

La prévention désigne l'ensemble de moyens visant à empêcher ou à limiter les conséquences négative d'une catastrophe soit en les empêchant de se produire, soit en réduisant leur impact par la prévision de l'aléa, la réduction de la vulnérabilité, la planification d'urgence et la surveillance du risque... etc, cela nécessite la connaissance des risques afin d'identifier les zones concernées, d'évaluer l'aléa, la vulnérabilité des enjeux, les impacts potentiels, et les conditions susceptibles de générer les phénomènes naturels dévastateurs pour la mise en place des actions préventives et une meilleure gestion du risque.

## **1.1.8. Adaptation**

Dans la littérature, l'adaptation aux risques désigne l'ensemble des mesures mise en place pour s'adapter aux risques auxquelles elle est soumise afin d'atténuer les effets négatifs potentiels, minimiser la vulnérabilité et renforcer la résilience. Il s'agit d'utiliser des stratégies innovantes telles l'utilisation des nouvelles technologies, la planification urbaine adaptative qui intègre la sensibilisation et la participation des citoyens (Bethley, 2001), afin de renforcer la capacité d'adaptation de la société aux conséquences des risques naturels et renforcer sa résilience.

## **1.2. Etude du risque d'inondation :**

L'étude et l'évaluation du risque d'inondation a pour objectif de comprendre ce phénomène afin de mesurer ses conséquences sur les personnes, les biens, les activités économiques (Seddini, 2019) pour mieux gérer ce phénomène, cela implique l'étude et l'analyse de ses deux composantes principales qui sont l'aléa inondation et la vulnérabilité des enjeux, et des facteurs de prédispositions. Une fois la vulnérabilité et l'aléa définis, les deux paramètres sont combinés pour déterminer le risque (Panizza, 1987), ainsi une proposition des niveaux de risque selon le degré de gravité a été fait par Manche Y (1998) en combinant l'aléa et l'enjeux (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Classification des niveaux de risque en fonction de l'aléa et de la vulnérabilité

	Vulnérabilité forte	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité faible
Aléa fort	Risque fort	Risque fort	Risque moyen

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Aléa moyen	Risque fort	Risque moyen	Risque moyen
Aléa Faible	Risque moyen	Risque moyen	Risque faible

(Source : Manche, 1998)

Les méthodes d'estimation et de cartographie de l'aléa inondation, et la vulnérabilité des enjeux sont multiples et différents et sont résumé si dessous.

## 1.2.1. Evaluation de l'aléa inondation

Généralement, il existe plusieurs méthodes scientifiques pour l'évaluation et l'analyse de l'aléa inondation, le choix de la méthode adéquate dépend de la disponibilité des données brutes, des conditions de la dynamique fluviale, du climat notamment le régime des précipitations, et des caractéristiques géomorphologiques et environnementales, ainsi le calcul des probabilités d'occurrences des inondations se base sur l'appréciation de la crue génératrice de l'inondation, notamment sur la sévérité des événements météorologiques. Il existe quatre approches principales pour l'analyse, l'évaluation et la cartographie de l'aléa inondation : approche historiques, approche géomorphologique, approche hydrologique et enfin l'approche hydraulique.

### 1.2.1.1.L'approche historique :

Pour comprendre l'histoire des aléas naturels et leur intensité, l'approche de retour d'expérience est apparue dans de nombreuses recherches scientifiques (Hallil, 2023). Plusieurs définitions de retour d'expérience mettent l'accent sur l'importance de l'étude chronologique dit historique des risques, selon Wyho (2009) le retour d'expérience dans le domaine des risques est un examen approfondi d'un événement passé dans le but d'améliorer les connaissances et de renforcer la sécurité si nécessaire, ainsi (Mortureux, 2002) a défini le retour d'expérience comme une méthode ou un processus qui consiste à tirer des leçons de ce qui s'est passé, et de ce qui se passe, afin de mieux maîtriser l'avenir.

L'approche historique permet un retraçage du déroulement des inondations passées en collectant les informations sur les catastrophes observés (Hallil, 2023). Il s'agit d'analyser les traces d'anciennes des inondations ( variation spatiale et temporel des dépôts récents et actuels) par les laisses des crues, les érosions, les dépôts de sédiments dans le lit majeur puisqu'ils montre des traces de courant, il est souvent nécessaire de rafraichir les coupes dans le sol pour pouvoir étudier les textures, la couleur, la composition granulométrique et la disposition des matériaux, la granulométrie fournit une indication sur les vitesses de courant qui les ont déposées. Ainsi que, la collecte des observations archivées des Linnigrammes dans les stations automatisées qui mesurent

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

la hauteur d'eau en fonction du temps, ou encore le témoignage des habitants, des secouristes ou d'autres personnes sur le lieu de l'inondation fournit des informations importantes sur risque d'inondation survenu (Bourenane, 2017). Cette archive collectée permet de cartographier la variation spatiale et temporelle de l'inondation en se basant que sur les événements historiques. Cette approche dépend principalement de la disponibilité des données archivées, souvent non disponibles (Bourenane et Bouhadad, 2020)

## **1.2.1.2.L'approche hydro-géomorphologique**

L'approche hydro géomorphologique de détermination des zones inondables est une approche naturaliste qui consiste à cartographier les zones inondables en utilisant l'interprétation géomorphologique de la plaine inondable en se basant sur un certain nombre de critères tel : la morphologie du bassin versant pour connaître les talus, les ruptures de pente sur terrain, la micro topographie des contacts entre les différentes unités. La sédimentologie pour avoir une idée sur la granulométrie, et la couleur des formations superficielles des différents lits, les indices hydriques liés à la présence d'eau à la surface du sol ou à faible profondeur, l'occupation du sol pour étudier la végétation, dépendante de la nature des sols et de leurs caractéristiques hydriques profondes, traces d'inondation : des laisses de crue, érosions, atterrissements, sédimentation dans le lit majeur. Cette analyse s'effectue en 3 étapes :

-La première étape consiste à faire un travail bibliographique basé sur la collecte des données sur les crues historiques, de faire des statistiques hydrologiques sur les données pour savoir les périodes de retour et les facteurs déclenchants, et aussi l'estimation de la vulnérabilité

- la deuxième étape consiste à faire la photo-interprétation stéréoscopique pour reconnaître les structures topographiques identifiées sur la photographie aérienne (Talus, Rupture de pente, contacts entre les différentes unités) et vérifier la réalité du relief de la morphologie et de s'assurer du bon positionnement des objets sur le fond du plan et valide les interprétations des unités hydro-géomorphologique, ainsi que l'extension et les hauteurs de crues.

-la troisième étape consiste à faire des observations de la microtopographie sur terrain, Le géomorphologue procède à l'analyse de la sédimentologie in situ pour confirmer et identifier la nature des unités fonctionnels du cours d'eau (lit mineur, lit moyen, lit majeur), et les différentes unités spatiales de fonctionnement pour cartographier la susceptibilité spatiale et la vulnérabilité des enjeux. Cette méthode est utile dans les cas où les mesures hydrométriques sont incorrectes ou les bassins versants sont mal jaugés (Chachoua, 2010, Bekhira, 2020).

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

## **1.2.1.3. L'approche hydrologique (modélisation hydrologique)**

La modélisation hydrologique permet de transférer les données météorologiques d'un bassin versant (précipitations, évapotranspiration...etc) en données hydrométrique 'données hydrologiques' (débit, hauteur d'eau) représentée par un hydrogramme de crue (un graphique du débit en fonction du temps). Les modèles hydrologiques reproduisent les processus et les facteurs associés impliqués dans la génération et la propagation des inondations de manière proche de la réalité physique, en fonction du degré de complexité du modèle et des hypothèses (Olivier Laganier, 2014). Plusieurs modèles hydrologiques peuvent être utilisés pour simuler les débits de pointe des bassins versants basés sur diverses équations mathématiques qui nécessitent une variété de paramètres pour ajuster la simulation, ces modèles peuvent être déterministes (relation entre les données d'entrée et de sortie) ou stochastiques (probabilistes), il existe trois catégories principales des modèles hydrologiques déterministes qui sont Les modèles empiriques ou "boîte noire" basés principalement sur des équations mathématiques qui établissent une relation entre les données observées et les débits simulés (Anne-Marie Laroche et al., 2016), les modèles conceptuels, dits aussi « à réservoir » utilisent les transferts entre réservoirs pour représenter la relation pluie-débit sans tenir compte des caractéristiques physiques du bassin versant, ce modèle nécessite beaucoup de données d'observation et de mesure Les modèles physiques basés sur les propriétés physiques des bassins versants et les processus hydrologiques permettant ainsi une meilleure compréhension des réponses hydrologiques. Ces modèles sont calibrés en utilisant les caractéristiques mesurables des équations de transfert de masse et d'énergie dans les bassins versants.

Tandis que l'approche hydrologique s'appuie sur la connaissance des données pluviométrique pour déterminer le débit à l'exutoire d'un bassin versant tout en prenant compte les processus hydrologiques, une autre approche s'appuie sur les débits générés en amont du bassin versant pour étudier la propagation des ondes de crue et de prévoir les conditions futures à l'exutoire du bassin versant (Arthur Bourcet, 2022). Il s'agit de l'approche hydraulique

## **1.2.1.4. L'approche hydraulique (modélisation hydraulique)**

L'approche hydraulique est utilisée pour modéliser les caractéristiques des inondations se propageant sur toute la longueur du cours d'eau étudié, y compris les débits, les vitesses, les hauteurs d'eaux et la plaine inondable en cas de débordement. Il existe trois types de modèles hydrauliques : les modèles unidimensionnels (1D), les modèles bidimensionnels (2D), et des modèles tridimensionnels.

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Le modèle unidimensionnel permet davantage de calculer la vitesse et la profondeur d'écoulement, ainsi que la surface de l'eau et la contrainte de cisaillement. Par contre il a l'inconvénient de ne pas pouvoir simuler l'inondation sous la forme de chemins d'inondation ou de surfaces d'eau stagnante de (rétention). Tandis que le modèle bidimensionnel est nécessaire pour reproduire des conditions d'écoulement qui prennent en compte l'écoulement principal et latéral, ce modèle permet de calculer la ligne d'eau, la profondeur, la vitesse et le sens d'écoulement, donc de représenter le terrain environnant de manière plus précise. Ce modèle est particulièrement utile pour faire la cartographie des zones inondables et pour modéliser les débits dans le lit majeur. Cependant, ce modèle nécessite beaucoup plus de temps de calcul et d'argent que le modèle unidimensionnel. La composante verticale de la vitesse est également calculée par le modèle tridimensionnel de modélisation hydraulique, il permet de simuler des processus d'écoulement présentant de fortes caractéristiques tridimensionnelles, tel que les écoulements maritimes. Cependant, ce modèle est encore peu utilisé (Arthur Bourcet, 2022).

Pour la prévision des crues, parfois il est utile de faire un couplage entre les deux modèles de modélisation (hydrologique et hydraulique), ce couplage consiste à relier les deux modèles pour combler leurs lacunes. En effet, un modèle hydrologique ne permet pas une bonne propagation de l'onde de crue car la zone d'étude n'est pas suffisamment détaillée. Par ailleurs, il peut ajuster les débits en fonction des prévisions pluviométriques, ce qui n'est pas possible de le faire avec les modèles hydrauliques (Arthur Bourcet, 2022).

Selon le rapport de présentation du plan de prévention des risques de Saint Paul De Fenouillet, l'évaluation du risque d'inondation repose généralement sur le croisement de deux paramètres : la hauteur de submersion et la vitesse du courant.

La hauteur de submersion, déterminée par l'observation, les mesures ou la modélisation, elle peut être estimée avec une fiabilité d'environ 20 cm. Elle est donc considérée comme un critère de base.

Deux seuils sont à prendre en compte :

-Le seuil de 1 m, correspondant à la limite inférieure évidente de l'aléa fort (véhicules soulevés, accès des secours rendu impossible...).

-Le seuil de 0,50 m, dont l'expérience montre que même avec une vitesse faible, le déplacement d'un enfant ou d'une personne âgée devient impossible. En termes de sécurité, ce seuil de 0,50 m est donc un facteur essentiel à considérer. Quant à la vitesse d'écoulement, elle est plus difficile à évaluer avec certitude en pratique, car elle peut varier considérablement sur de courtes distances.

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Dans le cas des crues torrentielles, outre la modélisation, l'approche de la vitesse peut également être réalisée par l'intensité de la crue, mesurée par ses effets observés sur l'érosion des berges et le transport de solides.

Une fois qu'une évaluation fiable de la vitesse peut être réalisée sur un secteur, une crue rapide peut être catégorisée soit comme "crue semi-rapide" avec une vitesse d'écoulement inférieure à 0,5 m/s, soit comme "crue torrentielle" avec une vitesse d'écoulement élevée.

La direction de la protection civile de Constantine, ainsi que dans plusieurs plans de prévention du risque d'inondation (PPRI) des communes françaises ont adopté la caractérisation de l'aléa inondation pour la crue centennale en fonction des vitesses et des hauteurs d'eau, elle est définie dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.2. Critères d'identification des niveaux d'aléa inondation et les zones à risque

Vitesse Hauteur	$V < 0.50$ m/s Faible (Stockage) Crue lente	$0.50 \text{ m} < V < 1 \text{ m}$ Moyenne (Ecoulement) Crue semi-rapide	$V > 1 \text{ m}$ Forte (Grand écoulement) Crue torrentielle
$H < 0.50 \text{ m}$	Faible	Moyen	Fort
$0.50 \text{ m} < H < 1 \text{ m}$	Moyen	Moyen	Fort
$H > 1 \text{ m}$	Fort	Fort	Très fort

(Source : Direction de la protection civile de Constantine)

De ce tableau on voit que plus les hauteurs d'eau sont importantes plus l'aléa est fort. De même plus les vitesses sont élevées, plus l'aléa est fort. C'est souvent la vitesse importante ( $>1$  m/s) qui impose un aléa fort ou très fort.

### 1.2.2. Evaluation de la vulnérabilité

L'objectif d'une analyse de vulnérabilité est d'évaluer l'impact et les conséquences d'un phénomène naturel ou anthropique sur les enjeux. La vulnérabilité est un concept polysémique qui évolue au fil du temps et de l'espace, cependant, l'évaluation de la vulnérabilité paraît indispensable pour la gestion du risque. C'est pourquoi nous avons fait une synthèse pour les trois méthodes d'évaluations de la vulnérabilité trouvées dans la littérature (D'Ercole, 1994 ; Thouret et D'Ercole, 1996 ; Thouret et Léone, 2003 ; Gleyze, 2002 ; Léone et Vinet, 2006 ; Ledoux, 2006a ; Bourenane, 2017 ; Hafnaoui et al., 2020 ; Lamaury et al., 2021 ; Halil, 2023), nous les expliquerons ci-dessous.

#### 1.2.1.1. L'approche quantitative

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Cette approche permet d'analyser la vulnérabilité en termes de proportion de pertes possibles en cas de catastrophe, combinée à une analyse coûts-bénéfices (Bourenane, 2017). L'analyse quantitative permet de quantifier la vulnérabilité en termes de taux de dommages, ou de degré des pertes potentielles, causées par une catastrophe qui tendent à augmenter ou à diminuer la vulnérabilité aux inondations, entraînant des dommages physiques, sociaux ou environnementaux. En 1993 les nations unies ont développé une approche permettant d'indiquer l'étendue des dommages potentiels sous forme d'un indicateur compris entre 0 et 1 (Gleyze, 2002 ; Hallil, 2023).

## 1.2.1.2. L'approche semi-qualitative

Cette approche divise la société en deux groupes (groupes sociaux et groupes spatiaux) tout dépend du niveau d'exposition des personnes, des biens et des activités, ainsi que leur capacité à répondre à une activité donnée (Gleyze, 2002). Cette approche a pour finalité de construire une carte de vulnérabilité en combinant les éléments vulnérables (les résidents urbains et leurs activités et actifs) et les facteurs qui aggravent la vulnérabilité (Bourenane, 2017).

## 1.2.1.3. L'approche qualitative

L'approche qualitative consiste à analyser la vulnérabilité à travers l'analyse de ses facteurs qui conduisent à sa modification tel les facteurs socio-économique (l'âge, sexe, ..etc.), la croissance démographique, les modes d'occupations et d'utilisation du sol, l'habitat, urbanisation, facteurs sociaux historiques et physiques, facteurs institutionnelles, facteurs fonctionnels, facteurs culturels et historiques, et politico-administratives. La vulnérabilité ici est considéré comme la capacité d'une société à subir les conséquences d'un phénomènes naturel ou anthropique. (Gleyze, 2002). Puisque l'évaluation du niveau de la vulnérabilité est basée sur l'aléa, Manche (2000) a créé une échelle de quantification de la vulnérabilité en fonction de l'aléa présentée dans le tableau si dessous.

Tableau 1.3 : Les niveaux de vulnérabilité en fonction de l'aléa

	Vulnérabilité forte	Vulnérabilité Moyenne	Vulnérabilité faible
Aléa fort	Fort	Fort	Moyen
Aléa Moyen	Fort	Moyen	Moyen

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Aléa faible	Moyen	Moyen	Faible
-------------	-------	-------	--------

(Source : Manche, 2000)

### 1.3. Les inondations en Algérie

Les inondations figurent parmi les premiers risques naturels qui touchent nombreuses régions du monde, leur fréquence et intensité varient selon les caractéristiques physiques, naturels, et anthropiques de chaque région (topographie, précipitations, densité de population, urbanisation... etc), et leur capacité d'adaptation. Ce fléau majeur devient de plus en plus fréquent avec l'intensification du phénomène des changements climatiques qui est un sujet d'actualité inquiétant pour les responsables des pays du monde entier, ces inondations causent des dégâts importants (humains et matériels) et se répercute directement sur l'économie des pays, malgré les efforts fournis pour la prévention de ce risque par les états du monde chacun selon son moyen et son niveau de développement économique, mais ce dernier reste jusqu'à nos jours un phénomène immaîtrisable qui nécessite beaucoup de progrès scientifique et d'effort pour faire face, beaucoup de pays du monde ont subi des inondations dévastatrices à titre d'exemple l'inondation de

Les régions septentrionales de l'Algérie sont gravement menacées par les inondations, en effet, les caractéristiques géographiques, géologiques, physiques et naturelles prédominantes ainsi que la variété des conditions climatiques de ces régions favorisent l'écoulement torrentiel, ce qui conduit au débordement des lits des oueds. Aussi l'urbanisation accéléré qu'a connu le nord de l'Algérie face à l'accroissement de la population à favoriser le ruissèlement en milieu urbain et par conséquence l'augmentation du risque d'inondation.

Selon le rapport de la direction générale de la protection civile de Constantine sur les risques d'inondations en Algérie effectué en janvier 2019 localisées par commune, la direction de la protection civile a effectué un inventaire en se basant sur la base de données de la sous-direction des risques majeurs ainsi que les données recueillis auprès des directions de la protection civile des 48 wilayas ainsi que les directions des ressourcés en eau (DRE) des 48 willayas, ils ont établi un inventaire préliminaire des zones présentant des risques réelles d'inondation , les résultats obtenues montre que 493 communes sont menacées par le risque inondation dans le territoire algérien.

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

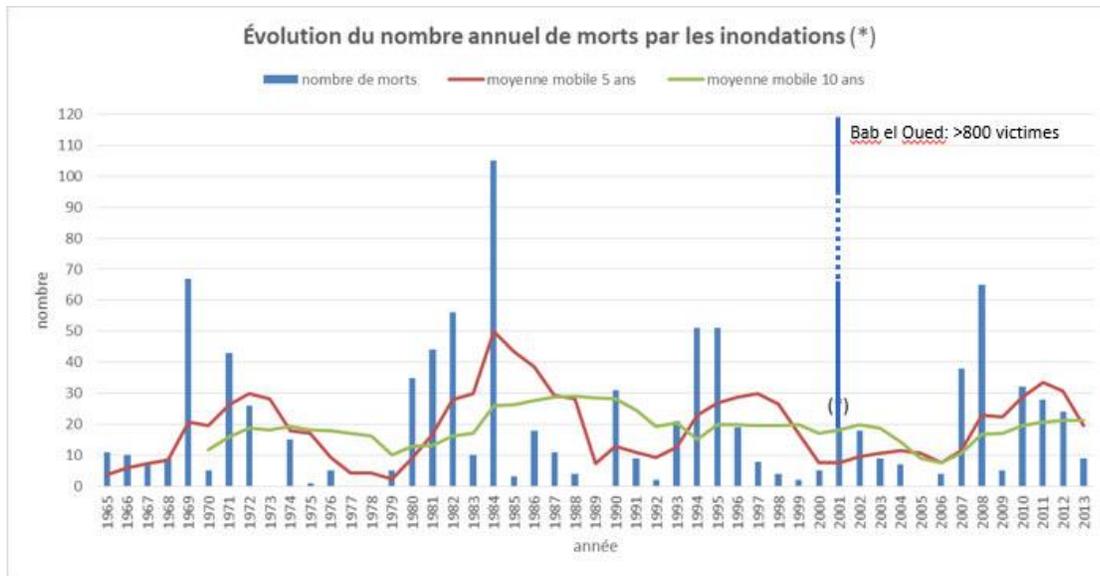


Figure 1.1 : Evolution du nombre annuel de morts par les inondations

(Source : Programme d'appui au secteur de l'eau et de l'assainissement EAU II, élaboration d'une stratégie nationale de lutte contre les inondations, Direction de l'assainissement et de la protection de l'environnement (DAPE))

## 1.3.1. Typologie des inondations en Algérie

Selon le rapport de la mission Eau II, élaboré dans le cadre du programme d'appui au secteur de l'eau et de l'assainissement (2014-2017). Le ministre des Ressources en Eau a identifié 8 types des inondations en Algérie en s'appuyant sur une analyse approfondie menée sur 50 sites à risque, répartis à l'échelle nationale et ayant fait l'objet de visites sur le terrain.

### 1.3.1.1. Inondations engendrées par des crues torrentielles (crues- éclairs)

Affectant le plus souvent les petits bassins (pouvant couvrir une centaine de km<sup>2</sup>). Elles sont liées à des précipitations localement très intenses généralement observées en automne ou en été, ces phénomènes résultent de convections et se manifestent sous forme de tempêtes orageuses, leur danger réside dans leur caractère soudain (Azioune, 2022). En effet, les écoulements rapides et violents peuvent se produire quelques minutes seulement après la pluie, avec des débits d'oueds passant de quelques mètres cubes par seconde à plusieurs milliers de mètres cubes par seconde en un laps de temps très court (environ 2 à 3 heures). Ces situations sont extrêmement risquées, et les prévisions, fréquemment limitées en délai, ce qui offrent peu de marge de manœuvre pour une réaction rapide. L'exemple le plus illustratif est l'inondation de la ville d'Oued Rhiou le 20 octobre

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

1993, ou en seulement 20 mn l'inondation a causé 23 morts ,20 blessés et plusieurs disparus en plus des dégâts matériels importants.

### **1.3.1.2. Inondations lentes des grands bassins versants**

Elle se produit sur des grands bassins versants (de plus de 10 000 km<sup>2</sup>), avec des zones d'épandage des crues. Elles résultent le plus souvent de précipitations importantes généralisées sur de grandes étendues et caractérisées par leur longue durée et la quantité de leur écoulement. Le temps de montée dépasse les 12 heures généralement.

### **1.3.1.3. Crue-rapide**

Elle a lieu sur des moyens bassins versants (de plusieurs centaines à quelques milliers de km<sup>2</sup>), des affluents des grands oueds ou des oueds côtiers arrivant directement à la mer. Le temps de montée est compris entre 2 et 12 heures

### **1.3.1.4. Ruissellement pluvial urbain**

Écoulement rapide des eaux en provenance de la pluie directe sur les zones imperméabilisées de la ville et/ou des débordements de petits cours d'eau périurbains à travers la ville.

### **1.3.1.5. Écoulement en nappe**

Écoulement à faible vitesse et sous de faibles hauteurs dans des zones de faible pente. Ces écoulements peuvent provenir : de débordements en amont sur de grandes largeurs, de l'absence d'un réseau hydrographique marqué dans le sens de l'écoulement, et voire même du dysfonctionnement du réseau d'assainissement dans des zones plates (cas de la plaine de la Mitidja ou Annaba, etc..).

### **1.3.1.6. Crue avec transport solide significatif**

S'applique souvent à tous les types d'oued lorsque le bassin versant présente des pentes fortes et des massifs très dégradés (c'est-à-dire qu'il peut y avoir des crues lentes, rapides ou éclairs avec ou sans transport solide).

### **1.3.1.7. Remontée de la nappe phréatique**

La combinaison des pluies importantes et une nappe phréatique élevée peut provoquer que le niveau de la nappe atteigne la surface du sol en l'inondant.

### **1.3.1.8. Submersion marine**

Élévation du niveau de la mer (houles, marées d'ampleurs inhabituelles, onde de tempête, raz-de-marée, etc.). Cette élévation peut être concomitante avec de hautes eaux (crues) du cours d'eau débouchant en mer.

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

## 1.3.2. Causes des inondations en Algérie <sup>7</sup>

De manière globale, on peut catégoriser les origines des inondations en Algérie en trois types :

### 1.3.2.1. Causes Naturelles

Les causes naturelles sont liées aux conditions météorologiques exceptionnelles se manifestant par des fortes précipitations (orographiques et cycloniques, mousson saharienne, pluies orageuses de forte intensité), ou aux caractéristiques naturels du bassin versant et de son cours d'eau principale (insuffisance du lit d'écoulement, géomorphologie, évolution du lit de l'oued, type de cours d'eau : grand cours d'eau à faible pente, petit cours d'eau à forte pente), largeur du lit majeur, cours d'eau encaissé), Bande de sable côtière ; Cône de déjection, Canal au-dessus de niveau de la plaine.

### 1.3.2.2. Causes Anthropiques

- Ouvrages de franchissement au gabarit insuffisant, embâcles, entrave au flux (déchets solides), la réduction de la surface mouillée du lit mineur et majeur, occupation de zones inondables.
- Imperméabilisation des sols (zones urbaines).
- Déforestation, absence d'une couverture végétale protectrice. Utilisation inappropriée des sols.
- Sous-dimensionnement, conception technique inadéquate des réseaux d'assainissement et d'eaux pluviales, des ouvrages de franchissement et hydrauliques en général.
- Manque d'entretien des ouvrages et des lits des oueds (ouvrages de franchissement colmatés, réseau d'assainissement bouché, rejet d'objets encombrants dans les lits, végétation trop dense sur berges ou dans le lit, etc.).
- Rupture de digues.
- Gestion incorrecte des barrages : lâchés d'eau sans prévention et/ou alerte

### 1.3.2.3. Les inondations surviennent dans des régions caractérisées par un environnement topographique défavorable

Particulièrement dans des villes traversées par des cours d'eau telles que Constantine, Bordj Bou Arreridj, Oued R'Hiou, et Sidi Bel. Ces zones urbaines, caractérisées par une densité de population élevée et soumises à une urbanisation anarchique et non réglementée, présentent d'importants risques. À chaque inondation, même de faible ampleur, ces agglomérations encourent des dangers considérables, entraînant des pertes humaines et des dommages structurels (Yahiaoui, 2012)

## 1.3.3. Les facteurs aggravant le risque d'inondation en Algérie :

Ils sont presque toujours dus à l'intervention humaine et correspondent essentiellement à :

---

<sup>7</sup> Direction de la protection civile de Constantine.

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

-La concentration des personnes et l'implantation des biens dans le champ d'inondation. (Cas des inondations de Bab El Oued du 10 novembre 2001).

-La défaillance des dispositifs de protection : (digues, déversoirs).

-Le transport et dépôt de produits indésirables : Tels que des produits polluants, des matières toxiques ou des germes pathogènes. Ces produits sont particulièrement abondants en zones urbaines ou industrielles.

-La formation et la rupture d'embâcles : Les matériaux flottants transportés par le courant (arbres, buissons, mais aussi caravanes et véhicules divers) s'accumulent en amont des passages étroits et s'y enchevêtrent au point de former des embâcles qui surélèvent fortement le niveau de l'eau. La rupture éventuelle de ces embâcles provoque une onde puissante et dangereuse en aval.

-La surélévation de l'eau en amont des obstacles : Tout obstacle à l'écoulement (pont, remblai, mur) provoque une surélévation de l'eau en amont et sur les côtés des cours d'eau.

### 1.3.4. Synthèse des inondations catastrophiques en Algérie

Les inondations catastrophiques en Algérie ont laissé des marques profondes sur le paysage et la société du pays, en engendrant des pertes humaines, des dégâts matériels considérables et des perturbations socio-économiques significatives. La période de 1969 à 2015 a été particulièrement marquée par une série d'événements climatiques extrêmes qui ont mis en évidence la vulnérabilité de diverses régions face à ces phénomènes naturels. Cette synthèse vise à offrir un aperçu des principales inondations survenues au cours de cette période

Tableau 1.4 : Statistiques des inondations catastrophiques en Algérie (1969-2015)

Date de l'inondation	Dégâts			Lieu des inondations	Causes des inondations
	Matérielle	Sinistrés (Famille)	Mort et Blessés		
09/10/1969	495 millions de Da	5014	27 morts et 44 blessés	Inondations catastrophiques généralisées aux bassins de l'Est	Pluies torrentielles généralisées à l'est du pays
12/10/1971	Des centaines	-	40	Inondation catastrophiques	Fortes pluies orageuses

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

	d'habitations détruites			localisées à Azazga	localisées (pluies journalières de 182.6mm)
Du 28 au 31/03/1974	4570 maisons détruites et 27millions de DA et la destruction de 13 ponts	18000 sinistrés	52 morts à Tizi Ouzou	Dans les bassins versants des côtières Algérois, la Sabaou, l'Isser, la Soumame	Des précipitations exceptionnelles sur les bassins cotiers (688mm et 529mm de pluies respectivement sur les cols de Sakamody et Ain El Hammam en 3 jours)
01/09/1980	44 morts Et 50 blessés	365	-	Pluies très violentes Localisées sur un rayon de 15 km à la ville (40mm en l'espace de 15 mn) provoquant la crue de l'Oued Djehadi	Des inondations catastrophiques sur un rayon de 15 km à la ville d'El Eulma
11/11/1982	21 morts	-	Plusieurs habitations détruites	Inondations dans la ville de Annaba (Localisées)	Fortes pluies orageuses localisées aux monts de l'Edough sur quelques km2 (167 mm à l'Edougues et 160mm à Séraïdi et ce pendant 24 h)

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

					provoquant les crues des Oueds (Bouhdid, Forcha, Zied et Aneb
Du 29/12/1984 Au 01/01/1985	29 morts à Jijel	11000 Personnes Sinistrés	-	Des précipitations exceptionnelles sur les bassins versants : Côtiers Constantinois, de la Seybouse et du Kebir Rhummel (plus de 250 mm en 04 jours et 195 mm en 01 journée)	Des inondations généralisées sur les wilayas de : Jijel, Constantine, Skikda, Guelma, Annaba et El Taref.
20/10/1993	D'importants dégâts matériels	21	23 morts et 20 blessés	Inondation dans la ville de Oued R'hiou wilaya de Relizane	Pluies orageuses intenses pendant 20min causant des crues violentes d'Oued Grigra, petit cours d'eau situé en amont de la ville de Oued R'hiou
08/10/1995	D'importants dégâts matériels	-	40 morts	Des inondations catastrophiques sur la wilaya de Laghouat	Crues des oued, M'zie ET Sidi Bouzide suite à des pluies violentes et généralisées

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

10/11/2001	-1800 bâtisses fortement sinistrées - plus de 1000 véhicules emportés	Plus de 10000	750 morts et 120 personnes disparues	Inondations catastrophiques s'abattant sur Alger (le bassin versant d'Oued Koriche et les communes a savoir Alger centre, Elbiar, El-Hammamet, Rais Hamidou, Ain El Benian)	Des pluies exceptionnelles et intenses, sur un étendu de 40 km <sup>2</sup> , de l'ordre de 214 mm à Bouzarea pendant 24h, ce qui a engendré des crues brusques et brutaux surtout à Bâb El Oued
Du 29 au 30/09/2008	-6500 bâtisses inondées dont 1200 détruites et entre 2000 et 3000 sinistrés -8 communes décrétées zones sinistrées	48 blessés	34morts	Inondations catastrophiques sur la wilaya de Ghardaïa en particulier les communes de (Ghardaia, Metlili ,Dhaia Ben Dhahoua et Guerrara)	Pluies orageuses intenses pendant 20 minutes plus de 100mm de pluies causant des crues violentes dans la vallée de M'zab avec un débit de 900 m <sup>3</sup> /seconde avec des hauteurs d'eau 08 mètres par endroits
01/10/2011	400 familles Sinistrées		18 morts	El Bayadh	
15/09/2015			12 morts	Tamanrasset	

(Source : Direction de la protection civile de Constantine)

Selon le tableau (1.4), l'inondation de Bab El Oued (2001) et celle de Ghardaia (2008) sont classé parmi les inondations les plus meurtrières et dévastatrices durant la période analysé (Abdi, 2022).

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

En effet, l'inondation de Bab El Oued a été déclenchée par un événement pluviométrique notable, de nature orageuse, avec un noyau centré dans la région de Bouzaréah. Cet épisode inondant se distingue par son caractère exceptionnel en raison de la quantité de pluie précipitée, des intensités élevées et répétées, ainsi que des crues soudaines et brutales. Selon les données de l'Office national de météorologie (ONM) au niveau de Bouzaréah, la pluviométrie enregistrée a atteint 290 mm du 9 au 10 novembre (dont 260 mm pour la seule journée du 10). En revanche, à Baraki, seules 33 mm ont été enregistrées, et aux stations des barrages du Hamiz et de Keddara, la pluviométrie n'a été que de 23 mm à Réghaia, légèrement plus élevée à 55 mm.

Selon le rapport<sup>8</sup> établi suite aux travaux de terrain réalisés par les ingénieurs hydrologues de l'Agence nationale des ressources hydrauliques, des traces de crues ont été identifiées sur le terrain au niveau des passerelles et des habitations situées juste avant le Triolet et après la confluence des oueds descendant de l'Oued Sidi-Medjbar, de l'Oued Frais Vallon, de l'Oued Scotto, et de l'Oued Beau-Fraisier. Ces traces de crues permettent d'estimer le débit de crue maximal par le biais de calculs hydrauliques, d'évaluer l'ampleur des volumes écoulés, et de suivre leur évolution le long de la voie rapide depuis l'amont du bassin (Chevalley) jusqu'au Triolet.

Au niveau du Triolet, l'accumulation des eaux a entraîné des débits très élevés. Le niveau d'eau maximum mesuré, correspondant à la trace de crue, s'élève à 2,45 m (Lakache, 2022 ; Azioune, 2022), induisant un débit de crue maximal de 730 m<sup>3</sup>/s et un apport total de 2 600 000 m<sup>3</sup>. L'estimation empirique des sédiments charriés a révélé un volume de 800 000 m<sup>3</sup>.

-En ce qui concerne les pertes économiques Des milliard de dinars de dégâts ayant touché tous es secteurs (Secteur de l'habitat 27000 logements endommagés dont 7000 environ à reconstruire et 800 immeubles endommagés dont 19 totalement détruits)<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Le Rapport de Bahlouli ingénieur en chef hydrologue à l'agence nationale des ressources en eau (ANRH) intitulé Crues et inondation en Algérie.)

<sup>9</sup> Direction de la protection civile de Constantine.

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION



Figure 1.2 : A/B/C/D l'ampleur des dégâts et le caractère torrentiel de l'inondation du 10/11/2001 à Bab El Oued

(Source : direction de la protection civile de Constantine)

Quant à l'inondation de Ghardaïa, elle s'est produite à l'aube du 1er octobre 2008 à la suite d'une averse de 28,2 mm entre 3h et 4h du matin, avec une intensité de 28,2 mm/h. Cette pluie a engendré une crue dévastatrice sur l'oued M'zab. Le débordement de l'écoulement a submergé les berges, affectant tout ce qui se trouvait à proximité, y compris les constructions et autres infrastructures (plusieurs quartiers, ponts et installations de base ont été inondés).

Selon les calculs hydrauliques basés sur les traces de crues, le débit de la crue est estimé à 1250 m<sup>3</sup>/s, surpassant ainsi celle de 1991 qui était de 1120 m<sup>3</sup>/s. Il est important de noter qu'aucune crue n'avait atteint Sebket Sofiane depuis 1901.

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION



Figure 1.3 : Inondation de Ghardaïa (dégâts et gravité)

(Source : direction de la protection civile de Constantine)

Selon la communication effectuée avec le capitaine Touati Abdelbacet qui est ingénieur hydrogéologue au bureau des risques majeurs de la direction générale de la protection civile, l'inventaire des inondations catastrophiques pour la période allant de 1921 à 2016, révèle qu'il n'existe pas de régions prémunies contre ce risque et que ces événements sont imprévisibles dans le temps et dans l'espace.

### 1.3.5. Les inondations à Constantine

Constantine, l'une des villes du pays confrontée de manière alarmante aux phénomènes de crues et d'inondations, constituant ainsi un obstacle majeur au développement économique et social. Ces inondations représentent les catastrophes naturelles les plus dévastatrices et fréquentes. Plusieurs zones sont régulièrement menacées par ces événements hydrologiques, dont les conséquences sont souvent aggravées par une urbanisation anarchique sur des zones inondables et même le long des rives des oueds. Le bilan des dommages causés par les inondations du XIXe siècle n'ont pas été enregistré de manière exhaustive. Les données disponibles se limitent aux inondations à partir de l'année 1958, indiqué par Zebiri en (1994) et Lakache (2022), on se basant sur ces données, et les données obtenues de la direction générale de la protection civile de Constantine nous avons regroupées l'ensemble des inondations de la période (1956 – 2019) dans le suivant (tableau 1.5).

Tableau 1.5 : Historique des inondations qui ont survenue à Constantine (1956- 2019)

Date	Lieu	Cause	Bilan et dégats
19/01/1958	-Oued Rhumel en amont des gorges de	Des précipitations	-la destruction du pont d'Arcole - 7 décès, 1 disparu et 1500 familles

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

	Constantine (quartier du Bardo)	intenses	déplacées.
29/11/1967	- débordement du lit majeur d'Oued Rhumel dans la zone industrielle Palma	-	- Des dégâts importants dans la zone industrielle Palma affectant des dépôts de sociétés nationales et de petites unités industrielles. - le débit a atteint 1236m <sup>3</sup> /s et la hauteur d'eau s'élevait à 8.3 m au niveau de la station d'Oued El Athmania
Du 24 au 26 septembre 1973	-toute la section amont d'Oued Rhumel, jusqu'au village de Ain Smara	Averses exceptionnelles	-les eaux ont atteint 5 m à la station d'Oued Athmania et 3.6 m à la station d'Ain Smara - des dégâts en milieu rural (les eaux ont débordé sur des parcelles de jardins et quelques maisons récemment construites à proximité de l'Oued ont été détruites.
Du 13 au 16 avril 1979	- Chaabet Erssas -quartier Bardo	-	-le débordement d'Oued Rhumel et Oued Boumerzoug a causé des dégâts importants sur la section de Chaabet Erssas et le quartier du Bardo à l'entrée des gorges de Constantine.
Du 28 au 30 décembre 1984	-Zone industrielle Palma -Quartier du Bardo	Violentes pluies de l'hiver 254.2 mm	-la montée rapide d'Oued Rhumel et Oued Boumerzoug endommageant sérieusement les installations de la zone industrielle Palma et Provoquant l'évacuation de 250 familles du quartier du Bardo.

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

3 Octobre 1994	La Vallée du Rhumel	Des pluies intenses	-La vallée du Rhumel juste avant la confluence avec Oued Boumerzoug a emporté des constructions très récentes constituant un quartier spontané -le nombre de familles évacuées s'élève à 57 d'après les sapeurs-pompiers.
13 Novembre 2004	-	Averses violentes 89 mm en 24h	-dégâts humains et matériels considérables
06/08/2008	-Commune d'Ain Abid 07 quartiers inondés.	Pluies abondantes	-73 Maisons touchées par l'inondation
24/08/2015  Daira d'El Khroub	-quatre chemins -cité 400 Logts N.ville Ali Mendjeli -Lieu dit el karia el beida, el baaraouia -L'ancien siege de daiira, Cité : 250 Logts, 1013 Logts Cmn El Khroub -Cité 550 Logts N.Ville Massinissa, Route mènant vers Salah Darradji	Importante précipitation qui atteint 97.8mm Le niveau d'eau a atteint 1m	-03 décès -44 Opérations d'Epuisement d'eaux pluviales
30/05/2017  Commune de Ouled Rahmoune	-Centre ville de la commune de ouled rahmoune -Gare ferroviaire de ouled rahmoune -Cité SNTF et cité Zaamta	Pluies torrentielles pendant 40 min qui à causées une montée d'eau de oued de 40	-Dégâts matériels qui à toucher 13 maisons individuelles +03immeubles d'habitations

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

		à 70 Cm.	
26/08/2017  Commune de Constantine	-La trémie de la cité 05 juillet sur la RN05 -RN05 vers Boussouf au niveau de la Cité Mimoza -Entrée pont Sidi Rached -Intersection TramWay à L'entrée de la Zone Industrielle Palma -Gare Routière Est -Siege régional de ENTV	Importante precipitation pendant 40 min	- Routes coupés
07/09/2017  Commune d'ibn Badis	-Cité djaafarou -Cité Tayouche	Des Averses orageuses dont la monté d'eau qui à dépassé 01 mètre	-57 Maisons inondées
11/08/2018	-Commune d'elkhroub (Ali Mendjeli, Salah derradji, cité Beau Séjour, UV07,UV01). -Commune de Constantine (Cité Kouhil Lakhdar). -Commune de Didouche Mourad (Ksar Lakhal).	Pluies torrentielles Montées d'eaux entre 10 et 40 Cm	-Surveillance. -Assistance au citoyen. -Epuisement D'eaux .

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

	-Commune de Hamma bouziane (Ain Sdara). -Commune D'Ain Smara (13 <sup>ème</sup> Km sur RN05)		
19/09/2018	-Cité Djebli Ahmed lieu-dit Kantoli situé sur la RN27, entre El Ménia et la commune de Hamma Bouziane.	pluies torrentielles	-le débordement d'Oued Ziad a causé 02 morts et 19 blessés. -45 véhicules et 02 Bus transporter par les eaux
04/10/2018	-Commune de Constantine (Cité Boussouf, Frères Abbas, Cité les Combattants) -Commune de hamma bouziane. -Commune de ain smara. -Commune de ain abid (centre ville, RN05 khalcha kbar).	Importante précipitation	-Surveillance. -Assistance au citoyen. -Epuisement d'eaux.
25/08/2019	Commune de Constantine (Cité Ben Chargui, Cité 05 juillet au niveau de la trémie sur RN05, Cité boudraa Salah, Cité Amaziane, RN03 Cité kouhilelakhdar)	Importante précipitation	-01 mort(Cité ben chergui emporter par les ravine vers oued rhumel ) -Routes coupés. -Surveillance. -Assistance au citoyen. -Epuisement D'eaux .

(Source : Direction de la protection civile de Constantine)

### 1.3.5.1. Synthèse de l'inondation du 19/09/2018 à Djebli Ahmed (Aperçu historique)

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

L'inondation historique qui a eu lieu le 19/09/2018 à l'agglomération de Djebli Ahmed, due principalement au débordement du cours d'eau Oued Ziad suite à des précipitations intenses, causant d'importants dégâts à la population (décès de deux personnes, et 19 autres blessées), et aux biens matériels (de nombreuses voitures ont été emportées par la crue de l'oued), ainsi qu'aux infrastructures (routes bloquées, perturbation de l'activité économique). Lors de cette averse exceptionnelle, le pluviomètre de la station de Hamma Bouziane, la plus proche d'Oued Ziad, a enregistré 33,5 mm en seulement 40 min, entraînant un débit très important de 60 m<sup>3</sup>/s et une intensité égale à 139. 6 l/s/h selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), ce fort débit a collecté plusieurs troncs d'arbres et blocs et les a déposés dans la section aval, où ils ont bloqué le ponceau et l'eau a débordé sur la route nationale 27 (Fig 1.3). Cet événement souligne l'importance d'étudier le risque d'inondation dans les petits bassins versants urbains à caractère torrentiels (Yakhlefoune et al., 2023).



Figure 1.4 : L'inondation exceptionnelle de Djebli Ahmed Ex (Cantoli) causée par le débordement d'Oued Ziad (Constantine).

(Source : protection civile de Constantine).

La réduction des dommages causés par ces catastrophes nécessite d'abord une parfaite identification des zones présentant le risque d'inondation, pour faire cela la direction générale de la protection civile de Constantine ainsi que l'agence nationale des ressources en eau de Constantine ont effectué un travail sur terrain chacun de sa part pour identifier les zones vulnérables au risque d'inondation dans la wilaya de Constantine, ce travail est basé sur un ensemble des données à savoir ( une enquête sur terrain, des observations et des constats, historique des inondations, identification des laisses des crues anciennes etc...) les résultats obtenus ce travail nous les résumons dans le tableau ci dessous

Tableau 1.6 : Les zones inondées de la wilaya de Constantine <sup>10</sup>

<sup>10</sup> Rapport sur les risques d'inondation en Algérie, direction générale de la protection civile, Janvier 2019

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Daïra	Commune	Zone Inondées	Oueds et Barrages menaçants
Constantine	Constantine	-Les Cités : Bardo, Boumarzoug, Benchergui, Sissaoui, Boudra Saleh, Ben Chiko, Serkina, Boussouf (7eme Km, les chalets Soutracho dans la cité des frères Arrafa), Bab El Kantra, Oued El Had, la gare routiere de l'Est, Chaabat erssass) -Zone industrielle Palma	-Oued Rhumel traverse la ville -Oued Boumarzoug -Oued Malah -Oued El Kelab -Oued Mherwal
El Khroub	El Khroub	-Le secteur Sud Est de la ville - Silo grains (CCLS) -Ain el bey (quatre chemins)	-Oued Boumarzoug -Oued Hmimim -Oued Fentaria
	Ain Smara	-Village de Kikaya	-Oued Rhumel -Oued Berla
	Ouled Rahmoun	-UDI- NAFTAL de Bounouara -Gar de triage et la cité évolutive d'Elgourzi	
Ain Abid	Ain Abid	-Siège daïra	-Oued Berda
	Ibn Badis	-Un vallon traverse la partie Nord – Est de la ville et déborde en période de fortes crues	-Oued Berda
Zighoud Youcef	Zighoud Youcef	-Le chef-lieu de Zighoud Youcef	-Oued Smendou
Hamma Bouziane	Hamma Bouziane	-Le Sud -Est de Hamma Bouziane	-Oued Rhumel et oued Malah -Oued Ziad
	Didouche	-Cité Oued El Hadjer	

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

	Mourad	- Cité Rabah Djaifri -La zone industrielle	-Oued El Hadjer
5 Dairas soumises au risque d'inondation	09 communes soumises au risque d'inondation	25 sites ou zones Inondées dans la Wilaya	14 cours d'eaux menaçants

(Source : direction de la protection civile de Constantine)

Le résultat des travaux effectués par la direction de la protection civile de Constantine et l'agence nationale des ressources hydrauliques montrent que les deux cours d'eau concernés par cette étude (Oued Ziad et Oued Mgharouel) figurent parmi la liste des cours d'eaux menaçants, ce qui justifie et renforce le choix de notre zone d'étude

### 1.4. Changement climatique et risque d'inondation

Les risques d'inondation à l'échelle du monde entier sont fortement influencés par les changements climatiques, L'augmentation de ces risques se renforce chaque jour par plusieurs facteurs liés au changement climatique, ce qui pose des défis majeurs pour les gestionnaires des risques d'inondation. Les effets du changement climatique sur le risque d'inondation sont multiples.

- En effet le réchauffement planétaire induit à l'augmentation de la température du globe ce qui entraîne la fonte des glaciers du pôle nord et des calottes glaciaires par conséquence, l'augmentation du niveau de la mer et des océans. Cela provoque des inondations fréquentes dans les zones côtières mettant la population, les infrastructures, l'environnement et les ressources naturels en danger.

-Ainsi, l'intensification des événements météorologiques extrêmes pluies torrentielles, tempêtes et vents violents, et d'autres événements météorologiques extrêmes. Ces événements météorologiques augmentent le risque d'inondation, et favorisent la génération des précipitations intenses pendant des périodes très courtes.

- Aussi, les changements climatiques augmentent la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les ouragans et les cyclones affectant ainsi le cycle hydrologique et modifiant la distribution spatiale des ressources en eau, la variation des températures induit également à des épisodes de sécheresse souvent prolongées suivies parfois par des pluies intenses, ce qui augmente le risque d'inondation puisque la capacité des sols secs à absorber les pluies se réduit.

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les températures moyennes mondiales ont beaucoup augmenté entre 1850 et 2020, les années les plus chaudes à l'échelle du globe depuis 1850 sont les années 2016, 2019, 2020 tandis que les années les plus froide des deux dernières décennies sont pour leur part plus chaudes que n'importe quelle année de la période 1850 – 1990. Ainsi, les projections climatiques publiées notamment par le GIEC prévoient une poursuite de cette augmentation de température à l'avenir

Les effets du changement climatique diffèrent selon le niveau de développement économique, la capacité d'adaptation et les particularités géographiques des régions touchées. Toutefois, les conséquences peuvent être plus importantes dans les régions déjà exposées aux risques environnementaux.

Les impacts des changements climatiques sont ressentis à l'échelle mondiale, mais ils se manifestent de manière inégale. Les pays développés, en raison de leur contribution significative aux émissions de gaz à effet de serre résultant de leurs activités industrielles historiques, portent une grande responsabilité dans ce phénomène. À l'inverse, les pays en développement font face à des conditions climatiques souvent plus extrêmes et à des défis accrus pour s'adapter aux conséquences du changement climatique, ces derniers sont plus vulnérables aux répercussions des changements climatiques en raison de leurs ressources financières et technologiques limitées pour atténuer et s'adapter à ces effets. Les conséquences du changement climatique, telles que la montée du niveau de la mer, l'augmentation des températures et la variabilité des précipitations, peuvent avoir des conséquences graves sur des aspects cruciaux tels que la sécurité alimentaire, la santé, la sécurité et la qualité de vie des populations dans ces pays.

Selon le 6<sup>ème</sup> rapport du (GIEC) qui est un nouveau rapport synthétisant de tous les autres rapports, le premier constat des experts et scientifiques du climat de l'ONU confirme que les activités humaines ont sans équivoque provoqué le réchauffement de la planète. En effet, les températures se sont déjà réchauffées de 1.1°C degré par rapport à 1850, les scientifiques de l'ONU estiment que le réchauffement passible de dépasser 1.5°C autour de 2030/2035

Le deuxième constat c'est que 3.3 à 3.6 milliards de personnes vivent dans des zones hautement vulnérables au changement climatique, ils affirment que dans tous les scénarios, de nombreux risques liés au climat sont plus élevés que ce qui a été estimé par leur précédent rapport en 2014, les catastrophes climatiques vont se multiplier et s'intensifier et l'impact sur la population de même. Pour faire face et pour s'adapter aux changements climatiques, le GIEC propose deux

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

solutions majeures, la première solution consiste à limiter au maximum les conséquences sur la population à travers la réforme des systèmes de santé, préparer les infrastructures aux événements extrêmes (vague de chaleur, inondation, feu de forêt...etc.) pour armer les pays du monde à faire face lors des catastrophes naturelles, la deuxième solution consiste à s'attaquer à la cause c'est-à-dire de réduire énormément les gaz à effet de serre, selon GIEC pour limiter le réchauffement à 1.5 degré, d'ici 2050 il faudrait diminuer l'utilisation du charbon de 95%, du Pétrole de 60%, et du Gaz de 45% par rapport aux niveaux de 2019, cela par l'utilisation des énergies renouvelable et de limiter la production de l'Energie, ce qui représente un enjeu majeur pour les pays du monde. En somme, les changements climatiques représentent un défi commun nécessitant une action collective de tous les pays, qu'ils soient développés ou en développement. Les nations développées doivent prendre l'initiative en réduisant leurs émissions de gaz à effet de serre et en fournissant un soutien financier et technologique aux pays en développement pour les aider à faire face aux impacts du changement climatique. Simultanément, les pays en développement doivent également assumer leurs responsabilités en limitant leurs propres émissions de gaz à effet de serre tout en poursuivant leur développement économique.

### **1.4.1. Progrès mondiaux de lutte contre les changements climatiques**

À l'échelle mondiale, les nations ont mis en œuvre plusieurs stratégies pour lutter contre le changement climatique, en fonction de leurs propres politiques, des engagements mondiaux et de leurs capacités personnelles.

À partir des années 1990, les mesures de prévention font leur apparition dans les organisations et les législations internationales. L'accent est désormais mis sur l'identification et la prévention des causes fondamentales des catastrophes, plutôt que sur la simple gestion des situations d'urgence, comme souligné par Wisner, Blaikie, Cannon et Davis en 2004. La décennie internationale pour la prévention des catastrophes naturelles (1990-2000) symbolise ce changement de perspective en suscitant une réflexion et une mobilisation de la communauté internationale autour de la prévention et de la réduction des risques naturels.

En 2000, l'Organisation des Nations Unies (ONU) a prolongé cette décennie en lançant la Stratégie internationale pour la réduction des catastrophes (ISDR, Stratégie internationale pour la réduction des risques de catastrophe). Ces initiatives ont conduit le Bureau des Nations Unies pour la réduction des risques de catastrophe (UNISDR) à publier divers ouvrages, tels que "Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives" en 2004 et "How to Make Cities More

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Resilient: A Handbook for Local Government Leaders" en 2012. Ce dernier comprend un premier chapitre dédié à expliquer l'importance d'investir dans la réduction des risques. Par ailleurs, les conférences de Johannesburg, Kyoto, Copenhague et Cancun ont clarifié le rôle essentiel de la prévention des risques dans le contexte du développement et de l'adaptation des sociétés et des territoires face au changement climatique. En 2005, dans le cadre de la Stratégie internationale pour la réduction des risques de catastrophes (ISDR), les Nations Unies ont adopté le Cadre d'action de Hyogo (HFA), un plan décennal (2005-2015) visant à "rendre le monde plus résilient face aux catastrophes naturelles". Ce cadre énonce cinq priorités :

- Faire de la réduction des risques de catastrophes une priorité aux niveaux local et national, intégrée dans un cadre institutionnel.
- renforcer les systèmes d'alerte rapide, pour évaluer et surveiller les risques et les catastrophes.
- mettre en place une culture qui vise à la sécurité et à la résilience grâce à la formation, à la connaissance et à l'éducation.
- Réduire les facteurs responsables de risque.
- Assurer une intervention rapide et efficace lorsqu'un événement se produit par le renforcement de la préparation.

Néanmoins, l'Accord de Paris, adopté en 2015 lors de la COP21<sup>11</sup>, a largement remplacé le Protocole de Kyoto. Cet accord oblige tous les pays, qu'ils soient développés ou en développement, à contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'Accord de Paris est un accord mondial historique qui vise à limiter le réchauffement à 1,5 degré Celsius, idéalement moins, par rapport aux niveaux préindustriels. Pour y parvenir, les nations ont envoyé leurs contributions nationales, qui contiennent leurs promesses de réduction des émissions. De nombreux pays tentent d'abandonner les combustibles fossiles au profit des sources d'énergie renouvelables. Afin d'encourager les comportements respectueux du climat, certains pays ont également mis en œuvre des politiques d'atténuation des émissions, telles que des taxes sur le carbone, des réglementations sur les émissions industrielles et des incitations fiscales. Étant donné que la déforestation augmente considérablement les émissions de gaz à effet de serre, la protection des forêts est également une priorité. D'une manière générale, ces activités montrent à quel point le monde est engagé dans la lutte contre le changement climatique et ses effets.

### **1.4.2. L'Algérie face aux changements climatiques : quelle stratégie d'adaptation**

---

<sup>11</sup> Conference of the Parties

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

En raison de sa densité démographique élevée, de son urbanisation importante et de sa localisation géographique, l'Algérie se trouve particulièrement exposée aux catastrophes naturelles et aux effets du changement climatique.

Les autorités publiques algériennes ont adopté une approche volontariste visant à lutter contre les changements climatiques, tout en s'adaptant aux conditions climatiques nouvelles du pays. Pour atteindre ce but le décret exécutif n°05-375 du 26 septembre 2005 a institué l'Agence nationale des changements climatiques (ANCC) dont la mission est de promouvoir l'intégration de la problématique du changement climatique dans l'ensemble des plans de développement et de contribuer à la protection de l'environnement<sup>12</sup>. L'Agence s'est installée en 2014 et a commencé à travailler en 2015. Il paraît maintenant souhaitable de prévoir une adaptation de ses statuts, ce qui lui permettrait d'assurer une meilleure coordination horizontale et transversale de tous les secteurs concernés (déchets, agriculture, forêt). Le lien avec la direction générale de la protection civile DGPC et d'autres ministères intéressés reste par ailleurs encore limité et devrait également être approfondi<sup>13</sup>.

Sur le plan stratégique, le gouvernement algérien exprime sa volonté d'accélérer la concrétisation de l'Accord de Paris en confirmant sa Contribution Déterminée au niveau National (CDN). Conformément à cet accord,

Selon un rapport des réunions sur la participation de la direction de la protection civile de Constantine effectué en 2019, l'Algérie a accepté l'accord de Paris et s'est engagée à mettre en place des politiques ambitieuses visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à faire face au changement climatique. L'accord de Paris, qui prendra effet en 2020, a été ratifié par plus de cinquante-cinq pays, exige que chaque pays déploie une contribution prévue déterminée au niveau national tous les cinq ans. La contribution de l'Algérie dans le cadre de l'Accord de Paris couvre la période 2021-2030 et se concentre sur des secteurs tels que l'énergie, l'industrie, les transports, l'agriculture et l'agriculture, la construction et l'environnement. L'Algérie s'engage à réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) en établissant des objectifs nationaux de -7% d'ici 2030 par rapport au scénario de référence (« business as usual » (BAU)), en mobilisant ses propres ressources, et de -22% en cas de financement international<sup>14</sup>. Sous l'autorité du ministre de

---

<sup>12</sup> Revue par les pairs Algérie, Programme 2018-2019 de revue par les pairs dans le cadre de la coopération de l'Union Européenne en matière de protection civile et de gestion des risques de catastrophe.

<sup>13</sup> Idem

<sup>14</sup> Idem

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

l'Environnement, un groupe de travail sur la contribution prévue déterminée au niveau national (CPDN) (Programme de changement climatique pour le développement durable) a été créé dans le pays. Les membres du groupe de travail comprennent des représentants de 14 départements ministériels et du Conseil national économique et social. Avant l'entrée en vigueur de l'accord en 2020, l'Algérie a fait sa contribution finale.

Les résultats préliminaires des travaux du groupe ont été soumis au Conseil interministériel sur le climat pour examen et décision. Un Comité national du climat (CNC) a été créé, placé sous l'autorité du ministre de l'Environnement. Le CNC est composé de représentants des ministères concernés et du Conseil économique et social national. Ce comité renforce le dispositif de coordination, de suivi et d'évaluation des politiques et programmes nationaux liés aux changements climatiques, et propose des mesures pour mettre en œuvre les engagements de l'Algérie dans le cadre de la CCNUCC et des décisions internationales en matière de changement climatique. Dans ce but, l'Algérie a commencé à élaborer un plan national d'adaptation aux changements climatiques, visant à promouvoir une société et une économie plus résilientes aux effets des changements climatiques. Les objectifs spécifiques du Plan National Climat (PNC) sont les suivants :

- Informer sur les connaissances climatiques en Algérie.
- Recenser les impacts des Changements Climatiques (CC) sur l'économie nationale et la société.
- Identifier les vulnérabilités du développement national face aux Changements Climatiques.
- Repérer les plans, programmes et politiques liés aux CC, et évaluer dans quelle mesure les stratégies nationales et sectorielles existantes intègrent la question des Changements Climatiques.
- Proposer une stratégie de lutte contre les CC et détailler cette stratégie sous forme d'un ensemble de mesures.
- Prioriser des mesures d'adaptation capables d'anticiper et de faire face aux risques, tout en réduisant les vulnérabilités liées aux CC.<sup>15</sup>
- Proposer des mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, en mettant l'accent sur leur rentabilité économique et/ou sociale pour le pays. Cela inclut la promotion des énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la participation aux mécanismes internationaux.

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

-Identifier les conditions et les modalités de mise en œuvre des mesures, ainsi que les mécanismes de suivi et d'évaluation associés.

-Faciliter l'accès aux financements internationaux, qu'ils soient publics ou privés, tout en encourageant les partenariats technologiques et financiers étrangers.

L'Algérie prend des mesures proactives pour s'adapter au changement climatique et recherche un soutien international sous forme de financement, de renforcement des capacités et de transfert de technologie. Ces mesures sont décrites dans le Plan National Climat (PNC) et comprennent :

- l'adaptation du cadre institutionnel et réglementaire
- le renforcement des capacités humaines et institutionnelles
- la mise en place d'un système de surveillance et d'alerte précoce
- la création de plans régionaux et locaux d'adaptation au changement climatique.

L'Algérie a pour objectif de finaliser et d'adopter son PNC avant la Conférence des Parties (COP) de 2020. Le Plan National Climat a été développé avec l'assistance de la GIZ<sup>16</sup> et a impliqué différents représentants sectoriels, dont le Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire, et la Direction Générale de la Protection Civile.

Dans le cadre du Plan Climat National, la Direction Générale de la Protection Civile met l'accent sur la prévention et la gestion des risques climatiques tels que les inondations et les incendies forestiers. Conformément aux missions qui lui sont dévolues à savoir la prévention et la gestion des risques majeurs en coordination avec les autres secteurs dans le cadre du système national de prévention et de gestion. Pour améliorer l'efficacité du système national de prévention des risques majeurs, il est crucial d'évaluer et de coordonner les actions menées, de mettre en place un système de veille et d'alerte, d'élaborer des plans de prévention des risques majeurs, de créer des cartes de vulnérabilité, d'acquérir des moyens matériels appropriés, de mettre en place un plan de secours pour faciliter le retour à la normale après une catastrophe.

L'Algérie a été parmi les premiers pays d'Afrique à ratifier toutes les sections des accords internationaux relatifs à la protection de l'environnement, englobant le Protocole de Kyoto et la Convention de Barcelone. Cependant, la mise en œuvre et la surveillance de ces accords s'avèrent inadéquates. En effet, le ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme organise régulièrement des conférences et des séminaires pour discuter des problèmes écologiques. Bien que des accords, des lois et des projets soient envisagés, leur application reste

---

<sup>16</sup> Coopération allemande Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

très limitée en termes de territoire (souvent confinée à la capitale Alger) et de durée. L'Algérie est fortement engagée dans les enjeux du "réchauffement mondial et écologiques" sur les plans politique et économique. Cependant, les actions entreprises pour remédier à la situation sont presque inexistantes.

L'Algérie est confrontée à plusieurs défis liés au changement climatique en raison de son climat méditerranéen, de ses ressources en eau limitées et de sa dépendance aux combustibles fossiles. Pour s'adapter à ces défis, le pays a pris plusieurs mesures. Il s'agit notamment de diversifier les sources d'énergie en encourageant les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne. L'Algérie a également mis en place des programmes de reboisement pour lutter contre la déforestation et la désertification, ainsi que des parcs nationaux et des zones protégées pour préserver les écosystèmes naturels. La gestion de l'eau est également un enjeu important, avec des investissements dans l'irrigation intelligente, la réutilisation de l'eau et l'agriculture durable pour réduire la consommation d'eau. Des campagnes de sensibilisation sont menées pour informer le public sur le changement climatique, et des programmes éducatifs ont été mis en place pour intégrer l'éducation climatique dans les programmes scolaires et développer des infrastructures résilientes aux conditions météorologiques extrêmes. Cependant, malgré ces efforts, la coopération mondiale est nécessaire pour lutter efficacement contre le changement climatique en Algérie.

### **1.5. Innovations technologiques mondiales pour la gestion et la prévention des risques d'inondation**

De nos jours, avec le développement du progrès scientifique, l'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique, des nouvelles technologies de lutte contre les inondations ont été apparues pour aider mieux les autorités locales et les gestionnaires à la prévention des inondations, en effet ces avancées technologiques fournissent des outils plus développés et des méthodes plus inventives pour prévenir, contrôler et atténuer les effets des inondations, parmi ces technologies qui peuvent être utilisées pour améliorer les stratégies de prévention et d'adaptation au risque d'inondation:

#### **1.5.1. La télédétection spatiale**

Les systèmes de télédétection spatiales par images satellites sont classés parmi les nouveaux moyens de surveillance des conditions météorologiques en temps réel, ils permettent de détecter les changements dans le régime hydrologique et d'identifier les zones exposées au risque d'inondation. Ces modèles de prévision hydrologiques utilisent des algorithmes complexes pour

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

simuler le comportement de l'eau et prévoir son niveau, ce qui permet de donner des informations importantes pour une meilleure planification. Ces modèles sont parfois intégrés dans les systèmes d'information géographiques pour cartographier les zones inondables et évaluer les dommages potentiels. Le système d'information et de données du système d'observation de la Terre 'The Earth Observing System Data and Information System '(EOSDIS) de la NASA<sup>17</sup> permet d'accéder à un large éventail de données satellitaires pour la détection et la surveillance des inondations.

### **1.5.2. Les systèmes d'informations géographiques**

L'une des meilleures technologies développées pour l'inventaire, la planification, la gestion, la prévision et le développement des ressources naturelles sont les systèmes d'informations géographiques (SIG), ces systèmes informatiques sont composé de matériel, de logiciel, et d'outils de traitement spatial de l'information géographique, pouvant être utilisé pour collecter, créer, gérer, manipuler, analyser, modifier et afficher des données géographiques de référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes de gestion et d'aménagement, et les présenter sur des cartes thématiques d'aide à la décision.

Selon la thématique et les besoins, les SIG s'appliquent pratiquement à différents domaines entre autre à l'urbanisme ( la planification urbaine, gestion et aménagement du territoire), protection civile (gestion et prévention des catastrophes), transport (planification des transports urbains, optimisation d'itinéraires), hydrologie (analyse hydrologique du réseau hydrographique, cartographie de l'aléa inondation), risques naturels et technologiques (Identification et cartographie des zones à risque).

Depuis qu'ils ont été introduits, les SIG continuent d'être utilisés pour cartographier tous types de risques, ils sont de plus en plus utilisés dans les études environnementales et ils ont montré leur efficacité dans nombreuses études hydrologiques liées aux inondations, en effet, la complexité de gestion des ressources en eau implique de nombreux acteurs et opérateurs et en fonction d'une multitude de révélateurs, traits et facteurs (physiques, naturels, climatiques, socio-économiques etc.)

Cela permettra d'analyser et de cartographier les risques hydrologiques à différentes échelles en fonction de leurs caractéristiques spatiales et temporels (modélisation des bassins fluviaux, la modélisation des eaux souterraines et la prévision des crues), (Dauphiné, 2003).

Pour notre part, nous pensons que cet outil précieux pourrait être utilisées à plusieurs fins :

---

<sup>17</sup> National Aeronautics and Space Administration

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

- la cartographie des zones inondables en intégrant un ensemble de données topographiques, météorologiques et hydrologiques pour obtenir une carte d'aléa inondation
- l'analyse de la vulnérabilité des zones sujettes aux inondations en intégrant les statistiques de la densité de population, les équipements existants et les infrastructures et grâce à la superposition des différentes cartes on obtient la carte de vulnérabilité
- la modélisation des inondation, l'utilisation des SIG en conjonction avec des modèles de simulation hydrologique et hydrauliques permet d'estimer les débits des différentes périodes de retour (Laurent, 1996 ; Hadan, 1997), ainsi l'utilisation des données météorologiques, hydrologiques et topographiques permet de simuler des scénarios d'inondation et prévoir l'étendu du risque, et d'évaluer les impacts possibles sur les habitants, leurs bien et l'environnement.
- la planification d'urgence grâce à l'utilisation des données géospatiales, cela permet aux gestionnaires des risques et aux responsables de l'état de planifier les sites pour évacuer la population menacée, les abris d'urgence, les chemins d'accès pour les opérations de secours.
- la sensibilisation du public à travers l'élaboration des cartes informatives qui sert à sensibiliser la population aux zones à risque et aux mesures de préventions pour renforcer leur résilience.

### **1.5.3. L'utilisation des capteurs**

L'installation des réseaux de surveillance et des capteurs en temps réel le long des cours d'eaux, des barrages et des zones à risque vise à donner des informations continues servant au dépistage précoce du changement des hauteurs d'eau permettant une intervention rapide. En outre, les systèmes d'alerte précoce mise en œuvre dans ces réseaux de surveillance et des capteurs ont la capacité d'envoyer des alertes immédiates des informations collectées aux responsables des collectivités locales et aux personnes touchées, facilitant à la fois la prise de décision en matière de gestion du risque d'inondation pour les responsables de l'état et améliorant les capacités de réponse et de préparation au risque pour les populations affectées.

Pour prévenir les inondations, la ville de Gerstheim dans l'est de la France a mis en place un système de détection du niveau de la rivière utilisant la technologie innovatrice VEGA. Le village de Gertheim, qui se trouve le long du Rhin et de plusieurs rivières, a déjà subi des inondations et des coulées de boue. En cas d'orage ou de fortes pluies, le Muhlbach peut dépasser. Les autorités locales ont installé un capteur de niveau radar VEGAPULS C21 à proximité d'un moulin afin de surveiller les éventuels débordements. Ce capteur mesure la hauteur du cours d'eau en continu et, grâce à la plateforme de supervision du Système d'Inventaire VEGA (VIS), surveille le niveau

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

d'eau en temps réel. En cas d'élévation anormale, le système envoie des notifications aux destinataires préalablement identifiés par email ou SMS. Cela permet aux résidents de Gerstheim d'être prévenus rapidement afin de les aider à prendre des mesures préventives afin d'éviter des événements graves et de réduire les dommages potentiels



Figure 1.5 : Capteur de niveau radar VEGAPULS C21

La plateforme de surveillance du système d'inventaire VEGA (VIS) permet d'accéder aux données de mesure transmises par le capteur à distance et en temps réel depuis un ordinateur, une tablette ou un smartphone. La plateforme est opérationnelle 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

Un système de seuils intégré permet de configurer différents niveaux d'alerte et de déclencher des notifications à des contacts préétablis par email ou SMS. Prenons un exemple pour éviter les inondations :

Alerte de niveau 1 : Notification (seuil de surveillance)

Alerte de niveau 2 : possibilité d'inondation.

Alerte de niveau 3 : Seuil critique nécessitant l'évacuation des personnes et des biens.

Le système d'inventaire VEGA a plusieurs avantages pour la prévention des inondations, notamment :

- Améliorer la compréhension et le suivi de l'environnement grâce à la surveillance continue des cours d'eau et de leurs points de contrôle, avec archivage de l'historique des données.

- Capacité d'alerter et d'anticiper les mesures nécessaires en cas de risque d'inondation en temps réel.

- Contribuer à la protection et à la sécurité des personnes et des biens.

- Les résidents sont informés en temps réel du niveau des cours d'eau.

# CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

## **1.5.4. La modélisation hydrologique et hydraulique**

La modélisation d'inondation grâce aux techniques nouvelles d'informatique aide à évaluer les scénarios possibles d'aléa inondation et à préparer des plans d'urgence appropriés en cas de catastrophe. En effet, dans le contexte actuel des changements climatiques, l'intensité et la fréquence des inondations sont de plus en plus augmenté, aussi la mise en place des mesures et des actions politiques de prévention a monté en puissance, et la modélisation hydrologique ou/et hydraulique du risque d'inondation a pris beaucoup d'importance dans le dispositif de gestion des politiques publiques.

La modélisation des inondations est le processus de simulation du comportement des eaux de crue à l'aide de données statistiques et des logiciels (modèles informatiques), elle est utilisée pour évaluer les risques d'inondations à travers la simulation des scénarios d'inondation potentiels et estimer l'étendu de l'inondation, la profondeur de l'eau et la vitesse d'écoulement afin de prévoir les inondations futures. Elle vise à prédire les processus complexes qui contrôlent les événements d'inondation tel que le ruissellement, les précipitations, pendant les différents périodes de retour, ce qui fait appel à voir un rôle de plus en plus important pour l'évaluation, la planification et la gestion préventive du risque associé aux développements proposés.

Plusieurs modèles de modélisation hydrologique et hydraulique sont utilisés pour faciliter les décisions de gestion des plaines inondables y compris l'identification des zones sujettes aux inondations et le développement des cartes d'inondabilité (carte d'aléa), la réalisation des plans d'intervention d'urgence en fournissant des informations détaillées sur les risques d'inondations nécessaires et en facilitant les plans d'évacuations des eaux de crue et la gestion du risque. Ces modèles de simulation évaluent l'impact potentiel des inondations en tenant compte de variables telles que la topographie, les précipitations et les infrastructures existantes ainsi que les statistiques du traitement des données hydrologiques, pour prendre des décisions éclairées sur la gestion et l'atténuation du risque.

Les logiciels de modélisation des inondations sont multiples HecRas, HecHms, Mic, Infoworks, Micro drainage, Info grainage...etc. ces logiciels peuvent être utilisé à divers fins scientifiques et techniques, tel que la planification et la conception de système de drainage durables et de système de gestion des eaux pluviales ou la conception et la planification de systèmes de protection contre les inondations, identifier les zones vulnérables au risque d'inondation.

## **1.5.5. L'usage des drones**

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

Les drones sont employés afin d'évaluer les dommages post-catastrophe, et de surveiller l'inondation, ils pourraient avoir des capteurs spéciaux et des caméras pour recueillir des informations importantes sur l'ampleur des dommages contribuant ainsi d'une manière efficace et rapide à la planification de secours. La photogrammétrie par drone sert aussi comme outil d'aide pour l'élaboration des plans de prévention, puisque on peut l'utiliser pour obtenir un levé topographique plus correcte (précision en mm) et dans un intervalle de temps réduit, afin de générer un modèle numérique de terrain pour simuler les inondations futures.

En chine, le matériel de haute technologie, comme les drones et les robots de sauvetage, a également contribué de manière significative à sauver des vies pendant la saison des inondations.

De 2019 à 2021, la Gambie a collaboré avec l'UNESCO pour instaurer un système de prévention des inondations de pointe, entièrement intégré et reposant largement sur l'utilisation de drones

Les drones sont de plus en plus utilisés pour la surveillance des niveaux d'eau et la lutte contre les inondations, fournissant des données en temps réel et contribuant à une cartographie précise des zones sujettes aux inondations. Aux Pays-Bas, les drones sont utilisés depuis 2017 pour surveiller le vaste réseau de rivières et de canaux. En capturant des images détaillées du paysage et des niveaux d'eau, ces drones aident à identifier les risques d'inondation à un stade précoce et à détecter les menaces potentielles avant qu'elles ne s'aggravent. Cette application des drones à la surveillance des niveaux d'eau et à la lutte contre les inondations s'est avérée cruciale pour améliorer les opérations de gestion des inondations et garantir la sécurité du public.

### **1.5.6. Les systèmes d'alerte précoce**

Les systèmes d'alerte précoce avertissent rapidement les citoyens locaux en cas de risque d'inondation (Didier et al.,2017) en les envoyant des SMS, e-mail, ou encore notification push en utilisant des technologies de communication innovantes. Grace à leur réponse rapide et efficace les systèmes d'alertes jouent un rôle très important dans la prévention du risque d'inondation (Forest, 2019).

Dans le comté de Shimen, en Chine, le système de navigation par satellite BeiDou (BDS) a été utilisé comme système d'alerte précoce pour les catastrophes géologiques causées par les inondations. Les autorités locales ont pu évacuer les habitants des zones à risque en identifiant des anomalies dans les points de danger géologiques cachés grâce aux informations fournies par le BDS. Le 6 juillet, un glissement de terrain important s'est produit, mais grâce aux avertissements préalables, la zone avait été évacuée et personne n'a été blessé. Le BDS a déjà joué un rôle

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

important dans la prévention des pertes humaines. Wang Dunlei, qui a été chargé de prévenir les inondations et la sécheresse dans la ville de Changde, a souligné l'importance de cette tâche.

Depuis 2014, le Bénin a mis en place le Système d'Alerte Précoce (SAP) dans 21 communes à risque d'inondation. Cet outil vise à réduire les risques de catastrophes en diffusant des alertes permettant de prendre des mesures de prévention et de réponse pour atténuer les impacts.

Le SAP comprend plusieurs mécanismes et actions de surveillance pour collecter des informations sur les risques potentiels, notamment les inondations, dans une région donnée. Ces informations déclenchent des réponses coordonnées et rapides. Un SAP efficace nécessite quatre éléments clés : une cartographie des risques et des vulnérabilités aux inondations, une surveillance et une communication des alertes, le renforcement de la capacité de réaction de la communauté, et la synergie entre les parties prenantes à différents niveaux, communautaire, communal et national.

Ces quatre éléments garantissent une approche cohérente et complète pour anticiper et réagir aux variations des niveaux d'eau.

### **1.5.7. L'utilisation des techniques de l'information et de la communication (TIC) : Application mobile**

De nos jours, avec le développement des technologies de l'information et de la communication (TIC), de nombreuses applications mobiles sont créées pour informer les populations des rapports en temps réel sur le risque inondation en leur offrant la possibilité d'accéder à des informations actualisées sur les prévisions météorologiques et les zones exposées aux risques, ces outils offrent aussi des conseils sur les démarches à suivre en cas d'inondation.

À Madagascar, en raison de la limitation de l'accès aux prévisions météorologiques actualisées, les communautés locales utilisent des méthodes technologiques plus développées, il s'agit de la mise en place d'un système d'alerte par SMS ciblant les personnes équipées de téléphones portables (le pays ayant plus de 300 téléphones pour 1 000 habitants selon des estimations), le BNRGC (le Bureau national de gestion des risques et des catastrophes) envoie des messages aux chefs locaux et aux fournisseurs de services de téléphonie mobile pour qu'ils alertent les citoyens de l'approche imminente de cyclones et d'inondations. Les SMS sont utilisés à la fois pour diffuser des alertes et pour collecter des informations sur les effets des catastrophes.

D'autres initiatives similaires existent également, comme le projet "Taarifa", une application mobile utilisée en Ouganda et au Zimbabwe qui permet aux citoyens de signaler aux gouvernements les problèmes locaux liés à l'assainissement et au drainage. De plus, l'initiative

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

"Map Tandale" en Tanzanie offre aux résidents locaux des appareils GPS afin qu'ils puissent cartographier leur communauté.

### **1.5.8. L'utilisation du LiDAR**

La technologie LiDAR (détection et mesure de la lumière) utilise des impulsions laser pour mesurer avec précision les distances et créer des modèles d'élévation à haute résolution (en cm). Elle est utilisée pour analyser la topographie, cartographier les zones inondables et évaluer les risques d'inondation. Les données LiDAR sont fournies par l'United States Geological Survey (USGS) pour faciliter la modélisation, la cartographie des zones inondables et l'évaluation des risques.

### **Conclusion**

La compréhension du risque inondation est complexe, elle implique la définition et l'analyse des différents concepts liés au sujet, ces concepts définis restent polysémiques, cette polysémie résulte de la nature multidimensionnelle de ces idées, de leur complexité, des différents niveaux d'acceptabilité des risques et de la façon dont diverses disciplines les ont utilisés.

La diversité des causes et facteurs aggravant le risque d'inondation souligne l'importance d'évaluer scientifiquement ses deux composantes principales qui le constituent à savoir (l'aléa et la vulnérabilité).

## CHAPITRE I : ETAT DE L'ART EN MATIERE DU RISQUE D'INONDATION

L'Algérie est un pays menacé par les inondations catastrophique et impacté aussi par les changements climatiques. Cette situation appelle à des actions globales au niveau local, national et international afin de proposer des approches durables et surtout résilientes face aux nombreux défis climatiques actuels et futurs.

Il est important d'aller vite vers une recherche innovante, technologies avancées, intelligence artificielle et aussi, oser des politiques efficaces surtout adaptées au contexte de Constantine.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMÉTRIQUE)

### **Introduction**

Nous introduisons dans le présent chapitre les bassins versants concernés par cette recherche, il s'agit des bassins versants d'Oued Rhumel et les sous d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel qui en font partie.

Notre démarche vise à analyser les principaux traits physiques de ces entités hydrographiques, incluant les paramètres physiographiques et morphométriques, la topographie, le réseau hydrographique, la géomorphologie, la géologie, le couvert végétal et sa perméabilité influençant le comportement hydrologique des bassins. L'analyse se déroulera à deux échelles distinctes. Dans un premier temps, à l'échelle régionale, nous étudierons le bassin versant d'Oued Rhumel dans son ensemble. Ensuite, à l'échelle locale, nous nous concentrerons sur les sous-bassins d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel.

Cette approche multiscalaire nous permettra d'analyser le comportement hydrologique spécifique à chaque bassin selon la disponibilité des données afin de mieux comprendre notre zone d'étude.

### **2.1. Présentations du cadre d'étude**

Puisque Les sous-bassins d'Oued Ziad et Oued Mgharouel font partie du bassin versant d'Oued Rhumel, nous allons commencer par présenter le bassin versant d'Oued Rhumel, puis nous mettrons en avant ses deux sous-bassins.

#### **2.1.1. Situation du bassin versant d'Oued Rhumel**

Le bassin versant d'Oued Rhumel se situe dans la partie orientale du bassin versant Kébir-Rhumel situé en Algérie nord orientale, entre les latitudes  $36^{\circ} 34'$  et  $35^{\circ} 53'$  Nord et  $7^{\circ}02'$  et  $5^{\circ}44'$  Est, d'une superficie totale de  $5336.79\text{km}^2$ , soit plus 60% de la superficie totale du bassin Kébir Rhumel. Il est caractérisé par un réseau hydrographique dense, drainé principalement par Oued Rhumel, ce dernier a une longueur d'environ 150 km, un débit égal à  $1\text{ m}^3/\text{s}$ , et un débit spécifique de  $(1.03\text{ l/s/km}^2)$ .

Le bassin versant d'Oued Rhumel est limité au nord par celui, du Kébir maritime et la frontière de partage des eaux que forme l'Atlas Tellien et la mer méditerranée ; et par le bassin des côtiers Constantinois, bordé au sud par le bassin des hauts plateaux telliens et des sebkhas, à l'Ouest par le bassin versant d'Oued Endja et la montagne de la petite Kabylie, à l'Est par le bassin versant Seybouse (fig 2.1). Le climat est semi-aride, les précipitations sont modérées et la topographie est

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

relativement régulière et douce (500 mm/an en moyenne), le terrain s'élève jusqu'à 1300 m (fig. 2.1).

Le bassin comprend 20 communes entièrement incluses et 22 partiellement, avec une population totale de 1 467 394 habitants selon l'office national des statistiques (ONS Constantine, 1998). Les principales villes incluent Constantine, Mila, Chelghoum el Aid et Tajanet.

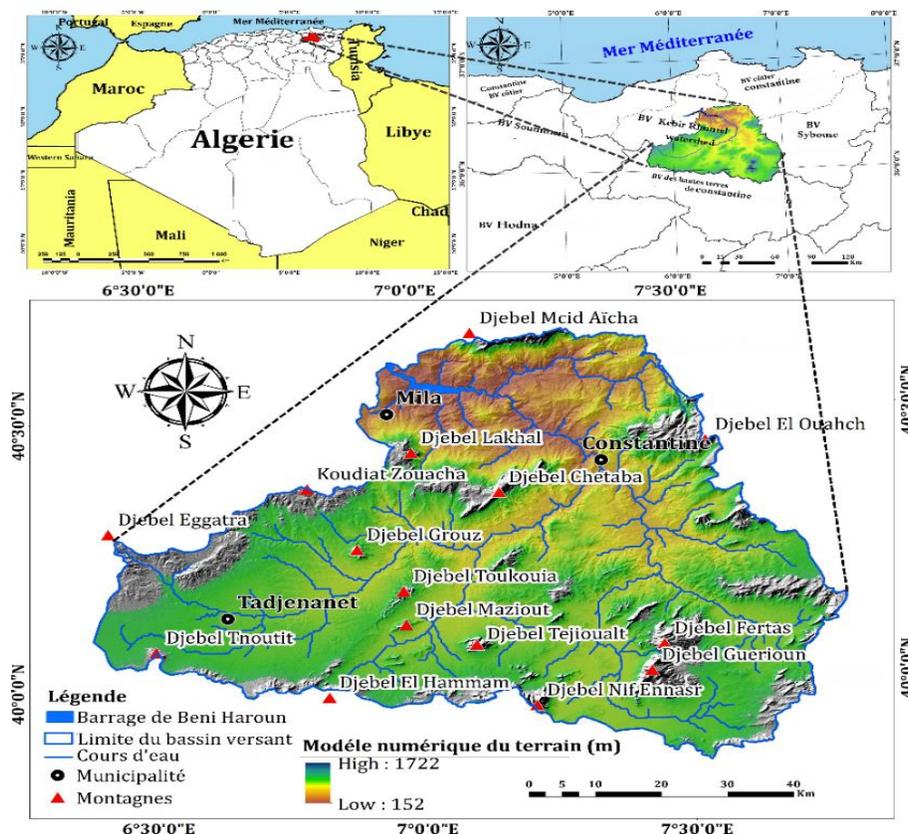


Figure. 2.1 Situation du bassin versant d'Oued Rhumel

(Source : Auteure)

### 2.1.2. Situation du bassin versant d'Oued Ziad

Géographiquement, le bassin versant d'Oued Ziad fait partie du bassin versant Kébir Rhumel (Benabbas, 2006), se trouvant précisément au Nord-Est du bassin versant d'Oued Rhumel portant le code 10 de l'A.N.R.H comme illustré sur la figure (2.2.B), c'est un affluent direct d'Oued Rhumel, avec une surface de 12.09 km<sup>2</sup> et un périmètre de 16.42 km, drainé principalement par Oued Ziad.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Aussi, il est dit montagneux, car il est marqué par un relief accidenté variant entre 350 à 991.61 mètres et caractérisé par des pentes fortes à moyennes (Yakhlefoune et al., 2023) ; il prend naissance au niveau des monts de Djebel El Wahch environ (1000m) d'altitude.

D'un point de vue administratif, le bassin versant d'Oued Ziad se localise dans la partie nord-ouest de la ville de Constantine. C'est un bassin versant semi urbain, la surface bâtie occupe 29.36 % de la surface totale, qui appartiennent en grande partie aux agglomérations de Djebli Ahmed communément appelée « El-Cantoli», et Bekira relevant de la commune de Hamma Bouziane, ainsi qu'une partie de l'agglomération de Djebel El Wahch et du centre-ville de Constantine et quelques zones éparses. Il est aussi traversé par deux routes nationales, la RN03 et la RN27, il rejoint Oued Rhumel en aval près de l'agglomération Djebli-Ahmed, située à 5 km du centre-ville de Constantine.

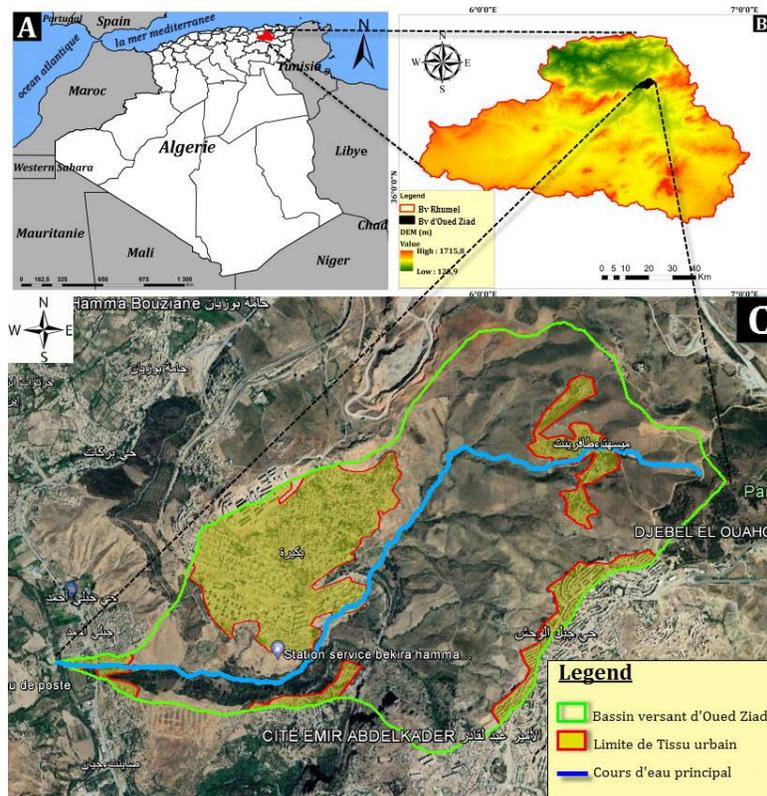


Figure 2.2. C/ Situation du bassin versant d'Oued Ziad A/ situation géographique par rapport à l'Algérie ; B/ situation géographique par rapport au bassin versant d'Oued Rhumel ;

(Source : Auteure)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.1.3. Situation du bassin versant d'Oued Mgherouel

Géographiquement, le bassin versant d'Oued Mgherouel fait partie du bassin versant Kébir-Rhumel, et se localise dans sa partie Sud-Est, il est affluent direct d'Oued Rhumel (Fig. 2.3), Il couvre une superficie de 9,25 km<sup>2</sup> et un périmètre de 16.95 Km, drainé principalement par Oued Mgherouel, il est délimité par les sous-bassins suivants :

- Au nord, par le sous-bassin Rhumel-Amont
- À l'est, par le sous-bassin Rhumel-Boumerzoug
- Au sud et au sud-ouest, par le sous-bassin Rhumel-Seguin

Il prend naissance des monts de Djebel Ben Ouataf et Djebel Sidi Slimane (1091 m), il s'agit d'une région montagneuse marquée par des fortes pentes présentant et un relief irrégulier avec des altitudes oscillant entre 537 m et 1091 m.

Administrativement, la partie amont du bassin versant d'Oued Mgharouel se situe dans la commune d'Ain Smara tandis que sa partie avale se situe dans la commune de Constantine. Oued Mgherouel traverse la route nationale N° 05 et se jette dans Oued Rhumel en aval près de l'agglomération dite du point kilométrique 07 (Boussouf) près de la zone industrielle Palma.

La surface bâtie occupe 8.65 % de la surface totale.

Les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel sont caractérisés par un climat semi-aride de type méditerranéen (des hivers froids et des étés chauds et sec).

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITES PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

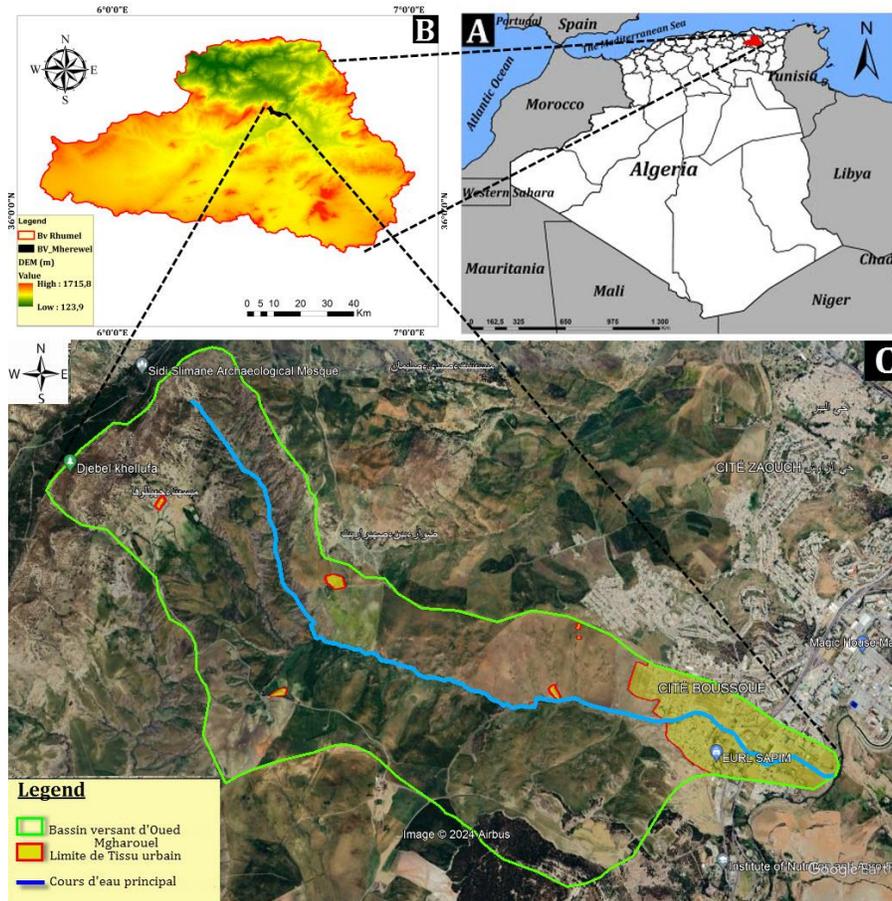


Figure. 2.3 : C/ Situation du bassin versant d'Oued Mgherouel A/ situation géographique par rapport à l'Algérie ; B/ situation géographique par rapport au bassin versant d'Oued Rhumel ;  
(Source : Auteure)

### 2.2. Principaux traits physiques

Les principaux traits physiques d'un bassin versant ont un impact significatif sur la nature de sa réponse hydrologique, son temps de concentration et le régime des écoulements durant les périodes de crue ou d'étiage, tout en déterminant en partie la vitesse et l'intensité de sa réaction face aux précipitations. Ces réactions sont façonnées par plusieurs caractéristiques physiographiques et morphométriques, telles que la superficie du bassin, sa forme, son altitude, sa pente et les spécificités du réseau hydrographique. À cela s'ajoutent la géomorphologie, la géologie, la nature du sol, le couvert végétal. Ces propriétés physiques influent sur la dynamique de l'écoulement et jouent un rôle essentiel, souvent de manière conjointe, c'est pourquoi il est primordial de les définir dès le commencement de toute recherche.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### **2.2.1. Caractéristiques physiographiques et morphométriques associées aux bassins versants**

Si nous voulons développer les caractéristiques physiques des bassins versants, il est indispensable d'analyser en premier lieu les caractéristiques physiographiques et morphométriques, ces dernières affectent de manière significative le ruissellement ainsi que d'autres processus hydrologiques. Les principales caractéristiques étudiées sont groupées en quatre classes qui sont : les caractéristiques géométriques, les caractéristiques de forme, les caractéristiques du relief et d'altitude et enfin les caractéristiques du réseau hydrographique.

Pour aborder cette phase d'étude, l'utilisation d'outils spécifiques a été mise en œuvre, comprenant notamment :

- le modèle numérique du terrain (MNT) d'une résolution de 30 m est utilisé pour étudier le bassin versant d'Oued Rhumel, nous l'avons téléchargé gratuitement depuis le site United States Geological Survey (USGS)

- le modèle numérique du terrain de 10 m de résolution pour étudier les sous bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgherouel, qui a été extrait depuis la digitalisation des courbes de niveaux de la carte topographique de (1/25000), ensuite nous avons convertis par la suite les altitudes des courbes de niveaux en fichier raster sous ArcMap 10.8 et généraliser le modèle numérique du terrain, afin d'avoir des résultats plus proche de la réalité en évitant les erreurs générées par le MNT de 30m de résolution.

- le traitement des données a été effectué à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8.

Il est à noter que la pertinence de niveau de signification des résultats obtenues est conditionnée par la résolution des Modèles Numériques de Terrain (MNT) employés.

#### **2.2.1.1. Caractéristiques géométriques**

Les caractéristiques géométriques du bassin versant sont déterminées par sa surface ainsi que par son périmètre, ces derniers constituent le fondement essentiel de l'analyse morphométrique, puisqu'ils interviennent dans le calcul de plusieurs autres paramètres et jouent un rôle essentiel en influençant différents processus hydrologiques tels que l'irrigation, la quantité de précipitations et aussi l'infiltration.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.2.1.1.1. La surface

La délimitation de la surface topographique du bassin versant est indispensable pour l'étude et le calcul de certaines caractéristiques fondamentales du bassin versant en matière d'analyse hydrologique, ainsi dans le cas du bassin versant d'Oued Rhumel nous avons délimité la surface topographique en utilisant le MNT de 30 m de résolution, ensuite nous avons calculé la surface de manière automatique sur ArcMap 10.8, les résultats obtenus montrent que le bassin versant a une surface de 5336.79 km<sup>2</sup>.

Pour les bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel, les limites des bassins ont été effectuées sur le fond de la carte topographique au 1/25000 et calculé automatiquement sur ArcMap, les résultats obtenus montrent que le bassin versant d'Oued Ziad a une surface de 12.09 km<sup>2</sup>, tandis que celle d'Oued Mgharouel est de 9.25 km<sup>2</sup> (Tableau. 2.1).

### 2.2.1.1.2. Le périmètre

Les périmètres des trois bassins versants d'Oued Rhumel, Oued Ziad et Oued Mgharouel sont calculés automatiquement sur ArcMap, les résultats obtenus sont respectivement 405.22 km, 16.42 km et 16.95 km (Tableau. 2.1).

Tableau 2.1 : Caractéristiques géométriques des bassins versants étudiés.

Caractéristiques Géométriques	B.V Oued Rhumel	B.V Oued Ziad	B.V Oued Mgharouel
Surface (Km <sup>2</sup> )	5336.79	12.09	9.25
Périmètre (Km)	405.22	16.42	16.95

(Source : Auteure)

### 2.2.1.2. Caractéristiques de forme

Les bassins versant ont une variété infinie de formes, cependant, la forme d'un bassin versant est censée refléter la manière dont les eaux de ruissellement vont s'accumuler en aval, c'est pourquoi un certain nombre de paramètres relatifs aux formes des bassins versants ont été développés pour déterminer la forme des bassins versants étudiés.

Il s'agit de : l'indice de compacité, le rectangle équivalent, le rapport d'allongement, le rapport de circularité et le facteur de forme, ces paramètres sont importants pour définir la forme des bassins versants, et sont examinés ci-dessous.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### **2.2.1.2.1. L'indice de compacité (Kc)**

L'indice de compacité également connu sous le nom d'indice de forme ou "Kc" est un indice qui caractérise la morphologie du bassin versant et mesure son allongement. Selon les travaux de Gravilius (1914), le coefficient de compacité est employé pour exprimer la relation d'un bassin hydrologique avec celui d'un bassin circulaire ayant la même superficie. L'indice de compacité est égal à 1.57 pour le bassin versant d'Oued Rhumel, et 1.32 et 1.56 pour les sous bassins d'Oued Ziad et Oued Mgharouel respectivement (Tableau.2.2). Ces valeurs indiquent que les trois bassins étudiés ont une forme allongée.

### **2.2.1.2.2. Le rectangle équivalent**

Il est calculé pour évaluer et comparer les sous-bassins en fonction de l'impact de leurs écoulements. Il s'agit d'une transformation purement géométrique en un rectangle caractérisé par une longueur (L) et une largeur (l), et qui garde la même superficie que le bassin versant.

Les trois bassins versants étudiés ont un rectangle ayant une longueur de 171.82 m, 6.20 m, 7.11 m et une largeur de 31.52 m, 1.95 m et 1.30 m respectivement, ce qui confirme leur forme allongée.

### **2.2.1.2.3. Le rapport d'allongement**

Conformément aux travaux de Schumm (1956), le rapport d'élongation (Re) se définit comme le rapport ou la relation entre le diamètre d'un cercle ayant la même surface que le bassin de drainage et sa longueur. D'après les travaux de Reddy et al. (2004) et Mesa (2006), un coefficient d'allongement inférieur à 0,55 suggère un bassin versant de forme allongée, et c'est le cas de ceux d'Oued Ziad et Oued Mgharouel qui ont un rapport d'élongation de 0.47 et 0.52 respectivement, tandis qu'un coefficient d'allongement supérieur à 0,70 indique une structure plus large, doté d'une capacité d'infiltration élevée et d'un faible ruissellement (Abdedaim, 2019). C'est le cas aussi de celui d'Oued Rhumel avec une valeur qui est égale à 0.93.

En général, les faibles valeurs de rapport d'élongation indiquent qu'un bassin spécifique est plus étiré que d'autres. À mesure que le rapport d'élongation approche la valeur 1, sa forme se rapproche de celle d'un cercle

### **2.2.1.2.4. Le Rapport de Circularité**

Il représente en fait, le rapport entre la surface du bassin et celle d'un cercle partageant la même circonférence que son périmètre (Miller, 1953). Il est en outre, soumis à l'influence de divers

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

facteurs tels que la longueur, la fréquence des flux, la tectonique, la nature lithologique, le climat, l'occupation du sol, la pente, et le couvert végétal (Benzougagh et al., 2016). Les valeurs du rapport de circularité présentent des corrélations établies (comme indiqué dans le tableau 2.2) avec les stades du cycle de vie du bassin, comme observé par Magesh et Chandrasekar en (2012).

Tableau 2.2 : Corrélation entre le rapport de circularité et le stade du cycle de vie du bassin versant

Valeurs du rapport de circularité	Stade du cycle de vie du bassin
Faible	Jeune
Moyenne	Mature
Elevée	Vieux

(Source : Magesh et Chandrasekar, 2012)

Le rapport de circularité du bassin versant d'Oued Rhumel est égal à 0.41, alors que ceux, d'Oued Ziad et Oued Mgharouel ont respectivement les valeurs de 0.56 et 0.40.

Ces valeurs font de nos entités hydrographiques des structures matures. Une faible valeur du rapport de circularité implique une forme de bassin allongée, tandis qu'une valeur du rapport de circularité élevée indique une forme presque circulaire (Soni, 2017).

### 2.2.1.2.5. Facteur de Forme

Ce facteur offre un aperçu de la relation entre la surface du bassin versant et sa longueur.

Par ailleurs, il permet de prédire l'intensité de l'écoulement en aval. C'est en outre, un indicateur de la formation et du déplacement des crues, du degré d'érosion et des capacités de transport de la charge sédimentaire dans un bassin versant.

Aussi, la valeur de du facteur de forme varie de 0 (forme très allongée) à 1 (forme circulaire parfaite) (Soni,2017).

Pour le bassin versant d'Oued Rhumel le facteur de forme est égal à 0.69. Cette valeur indique que la gestion des flux d'inondation s'avère plus complexe dans ce bassin.

En outre, les valeurs du facteur de forme des deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel sont respectivement 0.17 et 0.21, ces valeurs faibles signifient que les deux bassins versants sont plus étendu avec un pic plus plat de faible débit durant une période plus longue.

### 2.2.1.2.6. L'indice de sinuosité

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMÉTRIQUE)

L'indice de sinuosité est un paramètre morphométrique utilisé pour caractériser la forme et le relief d'un bassin versant. Il est calculé en mesurant la longueur du cours d'eau principal d'un bassin et en la divisant par la distance la plus courte entre l'amont et l'aval du cours d'eau.

Dans le contexte des paramètres morphométriques d'un bassin versant, l'indice de sinuosité fournit des informations sur la forme et la tortuosité du réseau hydrographique. Un indice de sinuosité proche de 1 indique un cours d'eau rectiligne, tandis qu'un indice supérieur à 1 suggère un cours d'eau plus tortueux ou méandré.

La signification des valeurs de l'indice de sinuosité peut être interprétée comme suit :

Un indice de sinuosité proche de 1, suggère un cours d'eau rectiligne, typique des zones où l'érosion linéaire domine et où le relief est peu marqué comme si le cas du bassin versant d'Oued Mgharouel.

Un indice de sinuosité supérieur à 1, indique un cours d'eau plus méandré, typique des zones où l'érosion latérale est plus prédominante, souvent associée à des reliefs plus marqués ou à des matériaux géologiques plus résistants à l'érosion. C'est le cas des deux bassins versant d'Oued Rhumel et Oued Ziad (Tableau 2.3).

L'indice de sinuosité reste donc un outil utile pour comprendre la dynamique d'érosion et de transport sédimentaire au sein d'un bassin versant, ainsi que pour évaluer l'influence du relief et de la géologie sur la morphologie du réseau hydrographique.

Tableau 2.3 : Caractéristiques de forme des bassins versants

Caractéristiques de forme	Formule	Référence	B.V Oued Rhumel	B.V Oued Ziad	B.V Oued Mgharouel
Indice de compacité	$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi} \times S}$ <p>P : périmètre du B.V S : surface du B.V</p>	Gravelius (1914)	1.57	1.33	1.57

**CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS :  
PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE,  
GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)**

Rectangle Equivalent	Longueur (L) (Km)	$L = \frac{Kc \times \sqrt{S}}{1.128} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right)$ <p>S: surface du B.V Kc : indice de compacité</p>	Gravelius 1914	171.82	6.20	7.11
	Largeur (l) (Km)	$l = \frac{Kc \times \sqrt{S}}{1.128} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right)$ <p>S: surface du B.V Kc : indice de compacité</p>	Gravelius 1914	31.52	1.95	1.30
Rapport d'allongement		$Re = \frac{1.128\sqrt{S}}{L}$ <p>S : surface du B.V L : longueur du rectangle équivalent</p>	Shumm (1956)	0.94	0.47	0.52
Rapport de circularité		$Rci = \frac{(4 \times \pi \times S)}{P^2}$ <p>S : surface du B.V P : périmètre du B.V</p>	Miller (1959)	0.41	0.56	0.40
Facteur de forme		$Ff = \frac{S}{(L_{bv})^2}$	Horton (1945)	0.69	0.17	0.21

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

	S : surface du B.V $L_{bv}$ : Longueur du BV				
Indice de sinuosité (Is)	$Is = L / l$ L : longueur du cours d'eau principal l : longueur de la distance en ligne droite entre les deux extrémités du cours d'eau	Schumm, (1969)	1.47	1.33	0.99

(Source : Auteure)

### 2.2.1.3. Caractéristiques du relief

Il est aussi important de relever que le relief influence fortement la réaction du bassin versant à travers les caractéristiques d'altitudes la topographie, l'hypsométrie et la pente.

#### 2.2.1.3.1 Topographie et Altitude

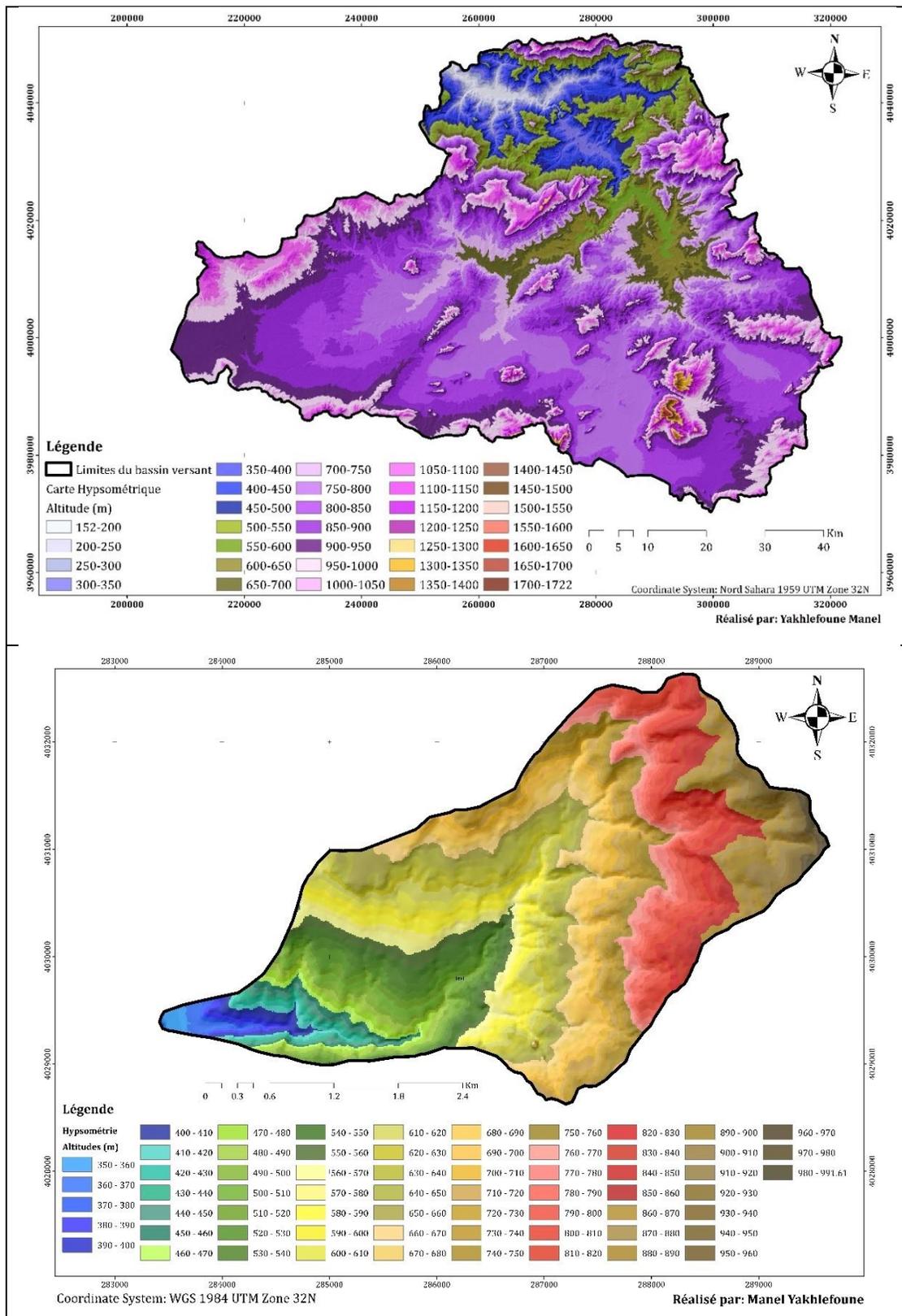
La topographie d'un bassin versant est souvent représentée par la courbe hypsométrique qui offre une vision globale du relief du bassin en montrant comment l'aire du bassin est réparti en fonction de l'altitude (Musy, 2005 ; Mardy et al., 2023).

Par ailleurs, l'altitude a un impact sur le régime des précipitations (quantité totale de précipitations, intensité et variation des précipitations). Ces paramètres hydrométéorologiques changent en fonction de l'altitude, ainsi que de la morphologie du bassin.

De plus, l'altitude peut également avoir un impact sur la nature de la couverture végétale, ce qui en fait un indicateur (Sanchez and Thiery, 1981).

La carte d'altitude des bassins versant étudiés a été réalisé par la classification du model numérique de terrain pour chaque bassin versant sur Arcmap en différents classes (Fig.2.4)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITES PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)



## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

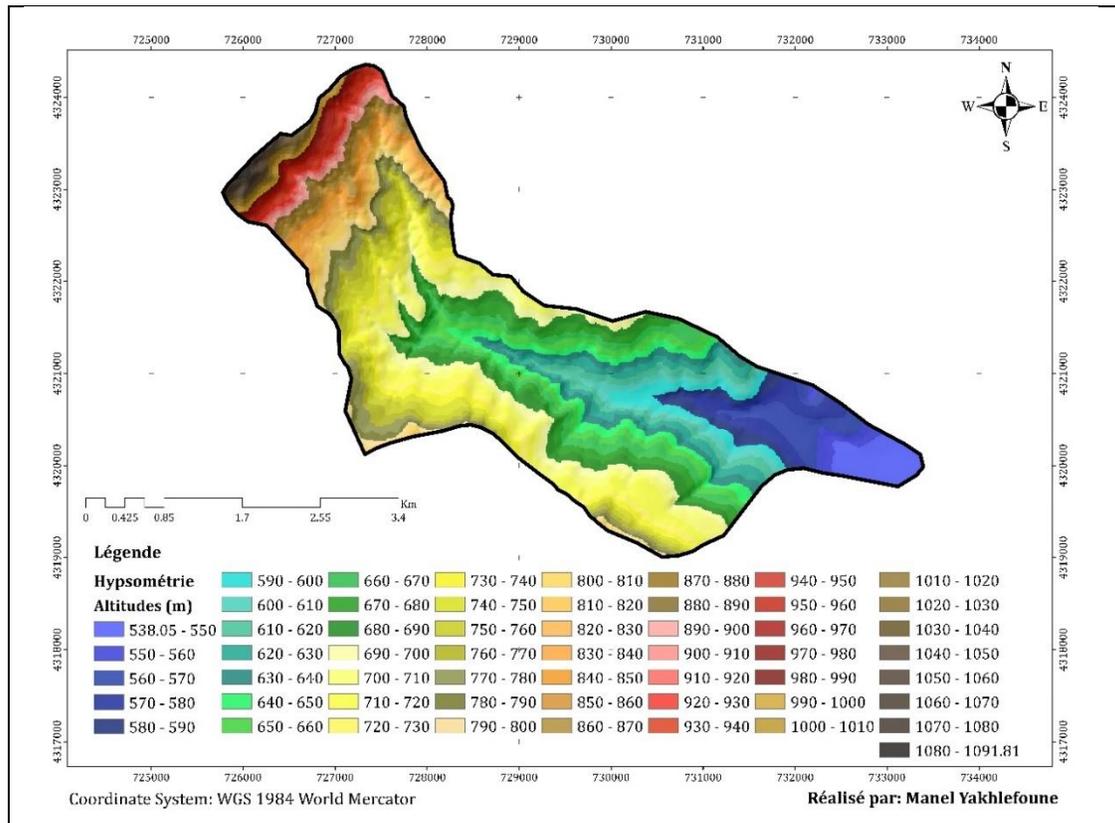


Figure. 2.4 : A/ Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Rhumel; B/ Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Ziad ; C/ Carte hypsométrique du bassin versant d'Oued Mgharouel.

(Source : Auteure)

La carte hypsométrique représente la répartition d'altitudes de chacun des bassins versants étudiés dont le réseau hydrographique est fortement influencé, elle permet de déterminer l'altitude maximale qui correspond au point le plus élevé et l'altitude minimale qui correspond au point le plus bas qui est généralement l'exutoire du bassin versant (Mardy et al., 2023). Les altitudes extrêmes des trois bassins versants étudiés, telles que l'altitude minimale et maximale sont obtenues depuis le model numérique du terrain de chaque bassin et sont respectivement (152 m – 1722 m) pour le bassin versant d'Oued Rhumel, (350 m – 991.61 m) pour le bassin versant d'Oued Ziad et (537.96 m – 1091.81 m) pour le bassin versant d'Oued Mgharouel (Fig. 2.4). Ces valeurs déterminent l'amplitude altimétrique d'un bassin versant et permettent de calculer la pente.

La courbe hypsométrique du bassin versant, qui illustre la répartition de la surface en fonction des classes d'altitude (Tableau 3), a été établie en se basant sur le MNT généré.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Pour faciliter le travail de calcul on a classé le bassin versant d'Oued Rhumel en 8 classes, tandis que ceux d'Oued Ziad et Oued Mgharouel en 13 classes et 11 classes respectivement.

En utilisant les classes d'altitude et le pourcentage de la surface cumulée. Cela a permis d'évaluer les caractéristiques d'altitudes des bassins versants étudiés.

Tableau 2.4 : Répartition altimétrique des superficies selon les tranches d'altitude des bassins versants

B.V Oued Rhumel			B.V Oued Mgharouel			B.V Oued Ziad		
Altitude (m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Altitude (m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Altitude (m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)
152 - 300	87.34	1.64	538.05 - 590	1.09	11.82	350 - 400	0.27	2.24
300 - 500	369.05	6.92	590 - 640	1.28	13.82	400 - 450	0.43	3.58
500 - 600	253.97	4.76	640 - 690	1.95	21.05	450 - 500	0.69	5.71
600 - 750	730.07	13.68	690 - 740	1.92	20.78	500 - 550	1.11	9.22
750 - 950	2954.02	55.35	740 - 790	1.20	12.95	550 - 600	1.24	10.25
950 - 1050	598.31	11.21	790 - 840	0.58	6.32	600 - 650	1.62	13.37
1050 - 1150	255.67	4.79	840 - 890	0.44	4.73	650 - 700	1.67	13.79
1150 - 1722	88.37	1.66	890 - 940	0.29	3.15	700 - 750	1.37	11.34
			940 - 990	0.23	2.45	750 - 800	1.23	10.18

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

			990 - 1040	0.17	1.87	800 - 850	1.14	9.39
			1040 - 1091.81	0.10	1.07	850 - 900	0.82	6.78
						900 - 950	0.38	3.17
						950 - 991.61	0.12	0.98
Total	5336.79	100.00	Total	9.25	100.00	Total	12.09	100.00

(Source : Auteure)

L'altitude moyenne d'un bassin versant représente la moyenne arithmétique des valeurs des altitudes maximale et minimale d'un bassin versant. L'altitude moyenne d'un bassin versant est souvent utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques, elle est calculée selon la formule sur le tableau (2.5). Les valeurs de l'altitude moyenne des bassins versants d'Oued Rhumel, Oued Ziad et Oued Mgharouel sont respectivement (808.95 m, 671.49 m, 714.47 m).

L'altitude Médiane, l'altitude à 5% et l'altitude à 95% correspondent à l'altitude au point 50%, 5% et 95% de la courbe hypsométrique, et sont respectivement (827m, 1052m, 377m pour le bassin versant d'Oued Rhumel ; 670m, 890m, 450m pour celui d'Oued Ziad ; et enfin 698m, 940m, 558m pour celui d'Oued Mgharouel). Les altitudes hautes correspondent aux zones de montagnes et sont situés généralement dans la partie amont des bassins versants, tandis que les faibles altitudes se trouvent généralement dans la partie aval des bassins versant où se situe les villes et les agglomérations. Elle peut également donner une indication sur le niveau d'érosion.

Ainsi, à partir de son apparence, nous pouvons évaluer la maturité du relief, c'est-à-dire s'il s'agit d'un relief jeune, stable (en équilibre) ou ancien (Vieux). (Mussy, 2005 ; Mardy et al., 2023). Elle donne aussi, un aperçu de l'équilibre dynamique potentiel, comme décrit par Schumm en 1956. La courbe hypsométrique permet de donner une synthèse sur la pente du bassin. Elle facilite en outre, la comparaison entre les sous-bassins, permettant de préciser l'âge et le niveau d'évolution de l'érosion hydrique, tout en déterminant l'état du bassin versant en termes d'érosion.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITES PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

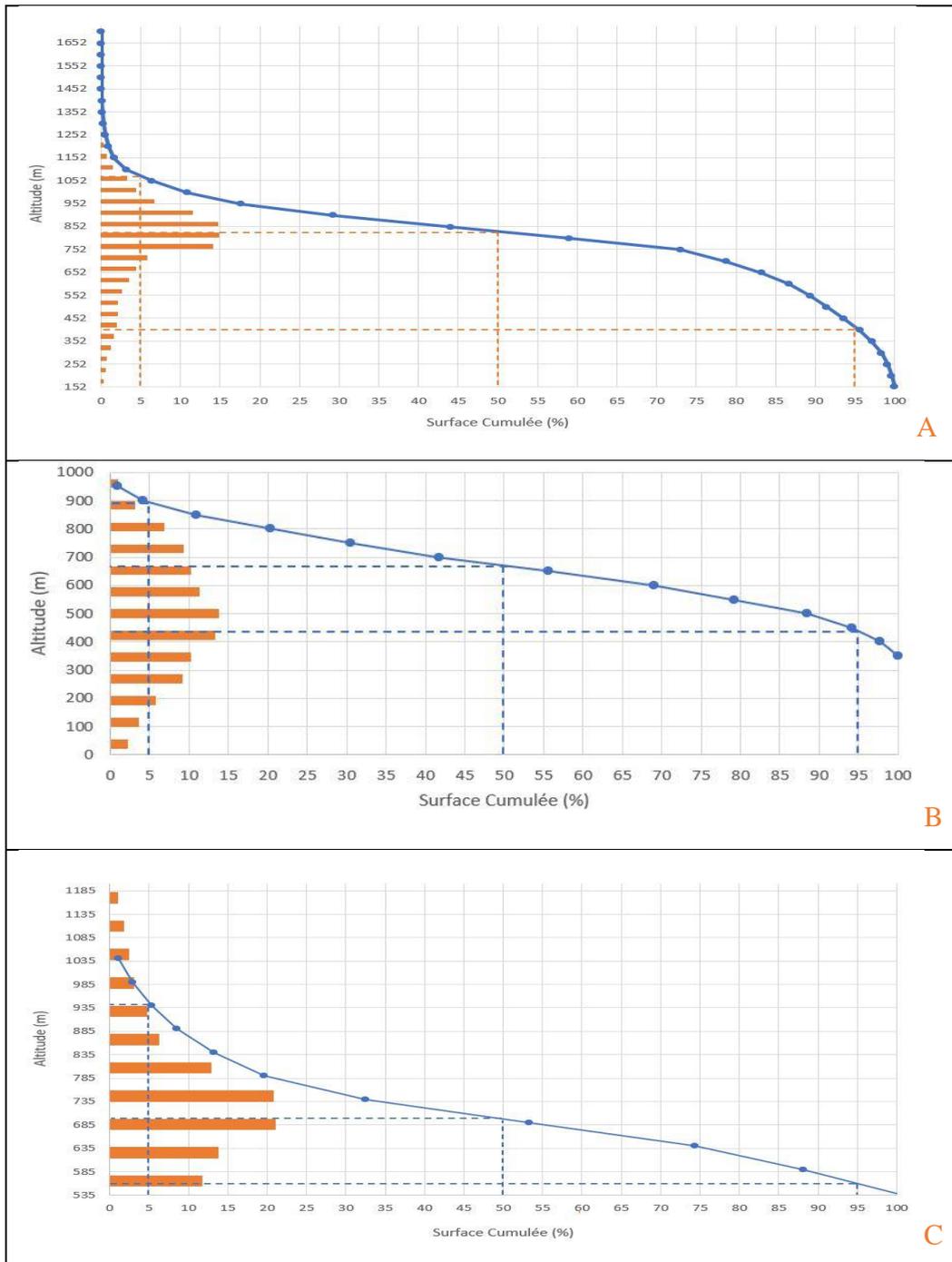


Figure 2.5 A/ Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Rhumel ; B/ Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Ziad ; C/ Courbe hypsométrique du bassin versant d'Oued Mgharouel.  
(Source : Auteure)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

La courbe hypsométrique de chacun des bassins versants étudiés (Fig 2.5) illustre la distribution des altitudes en relation avec l'accumulation de leurs surfaces.

Selon la figure 2.5.A et 2.5.C, la courbe hypsométrique des bassins versants d'Oued Rhumel et Oued Mgherouel présente une forme concave dans la partie amont du bassin versant (zone de 0% - 50% de la surface cumulée), cette forme correspond à un vieux relief, les vieux bassins sont constitués par des pentes très faibles, c'est-à-dire présentant une altimétrie plus ou moins uniforme, à ce moment, le phénomène érosif est moins élevé. Donc le niveau d'érosion relié à l'âge du bassin versant qui est indiqué par la forme que prend la courbe hypsométrique (Strahler, 1952 ; Banister, 1980 ; Laabidi et al., 2016 ; Mardy et al., 2023)

A partir du milieu jusqu'à la partie aval du bassin versant la courbe hypsométrique tend vers la convexité (zone 50% - 100% de la surface cumulée). Cette forme convexe caractérise un relief jeune où la dégradation du milieu est importante. Les bassins jeunes ont une aire moins importante au regard de l'altitude originelle, ce qui est spécifique aux bassins ayant de fortes pentes.

Le bassin versant d'Oued Ziad (Fig 2.5.B) est en état de maturité, puisqu'il dessine une faible concavité en amont et une faible convexité en aval, donc il est considéré comme un bassin intermédiaire.

Tableau 2.5 : Caractéristiques d'altitudes des bassins versants

Caractéristiques d'altitudes (m)	Formules	B.V Oued Rhumel	B.V Oued Ziad	B.V Oued Mgharouel
Altitude à 5%	Elle correspond à l'altitude au point 5% de la courbe hypsométrique	1052	890	940
Altitude à 95%	Elle correspond à l'altitude au point 95% de la courbe hypsométrique	377	450	558

**CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS :  
PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE,  
GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)**

Altitude maximale (Hmax)	Déterminé à partir de la courbe Hypsométrique (hauteur maximal)	1150	991.61	1091.81
Altitude minimale (Hmin)	Déterminé à partir de la courbe Hypsométrique (hauteur minimal)	152	350	537.96
Altitude Moyenne (Hmoy)	$H_{moy} = \sum \frac{A_i \times h_i}{A}$ <p>Ai : aire comprise entre deux courbes de niveau en (km<sup>2</sup>)            hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m)            A : superficie totale du bassin versant en (Km<sup>2</sup>)</p>	808.95	671.5	714.47
Altitude médiane	Elle correspond à l'altitude au point 50% de la courbe hypsométrique	827	670	698

(Source : Auteure)

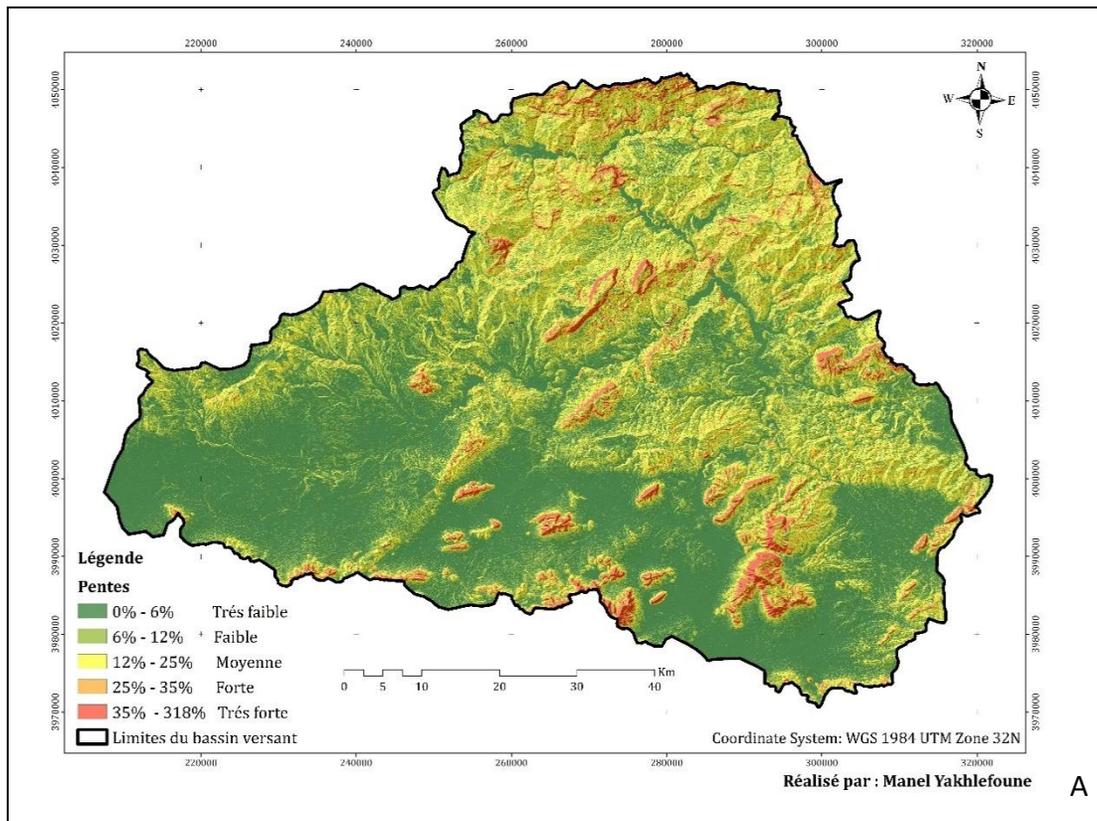
**2.2.1.3.2. La pente**

Les pentes jouent un rôle crucial dans toute étude hydrologique. Elles permettent de déterminer les types d'écoulements et leurs caractéristiques, elles influent significativement sur le ruissellement superficiel au sein d'un bassin versant.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITES PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

L'analyse de ce paramètre revêt une importance capitale pour connaître les problèmes liés aux risques naturels tels que les inondations, la dégradation des sols, l'érosion hydrique etc.

Pour générer la carte des pentes des trois bassins versants étudiés, nous avons utilisé le modèle numérique du terrain spécifique pour chaque bassin, ensuite nous avons fait le traitement par le logiciel (solution Software) ArcGis en utilisant la commande pente de l'outil d'analyse spatiale sous Arctoolbox (Fig. 2.6).



## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITs PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

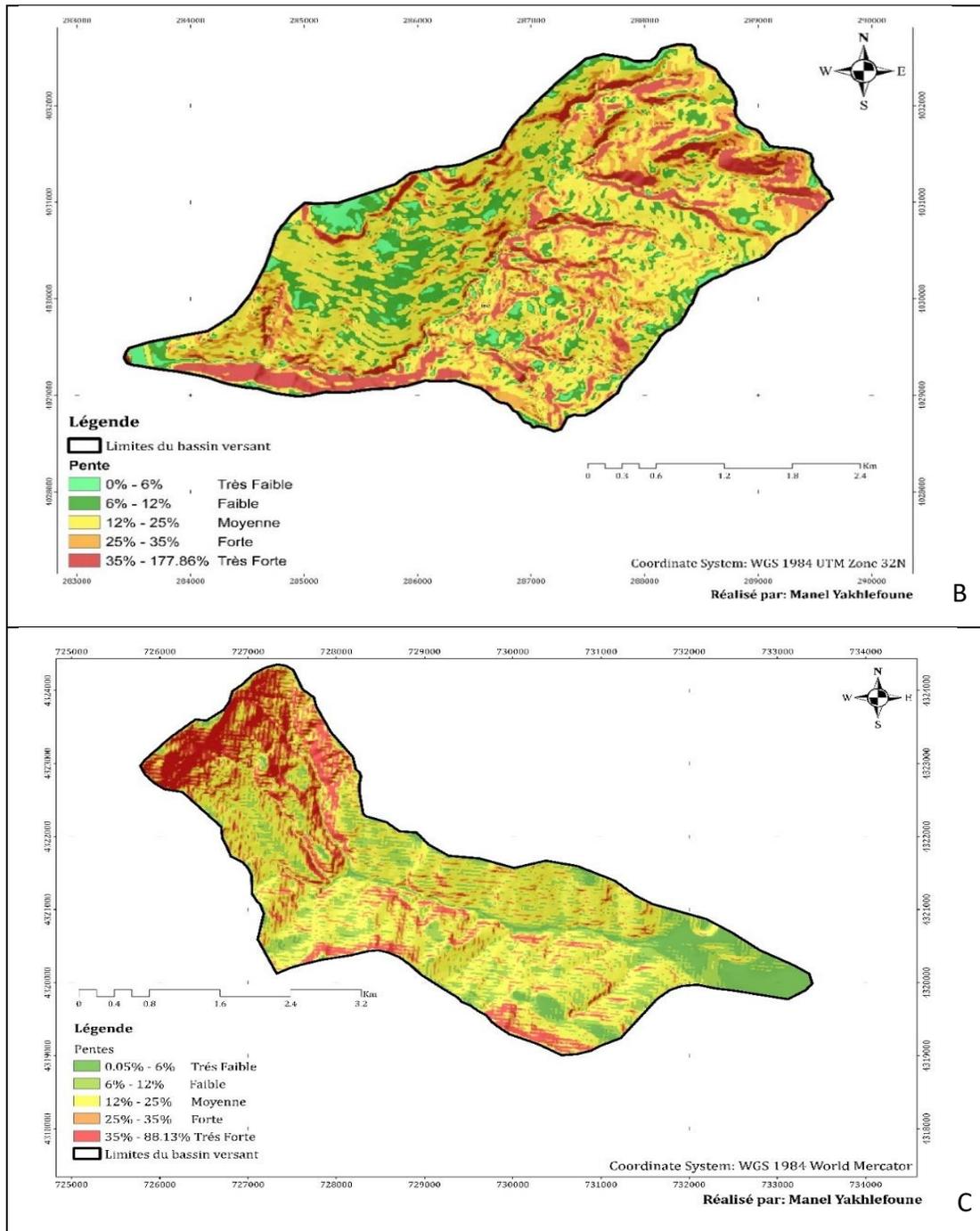


Figure 2.6 : Carte des pentes ; A) Bassin versant Oued Rhumel ; B) Bassin versant Oued Ziad ;  
C) Bassin versant Oued Mgherouel.

(Source : Auteure)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Dans l'objectif de faciliter l'interprétation visuelle des résultats, nous avons classifié les pentes de chaque bassin en 5 classes (tableau 2.6). Les superficies en kilomètres carrés (km<sup>2</sup>) et en pourcentage (%) des différentes classes de pentes, calculées à l'aide du logiciel ArcGIS, sont récapitulées ci-dessous :

Tableau 2.6 : Classification des pourcentages de pente des bassins versants étudiés.

B.V Oued Rhumel			B.V Oued Mgharouel			B.V Oued Ziad		
Pentes (%)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Pentes (%)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Pentes (%)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Surface (%)
0 - 6	2164.71	40.56	0 - 6	0.78	8.45	0 - 6	0.46	3.76
6 - 12	1375.35	25.77	6 -12	1.55	16.71	6 -12	1.91	15.82
12 - 25	1321.28	24.76	12 - 25	4.28	46.22	12 - 25	5.52	45.64
25 - 35	286.86	5.38	25 - 35	1.44	15.58	25 - 35	2.32	19.18
35-318	188.59	3.53	35-318	1.21	13.04	35-318	1.89	15.60
Total	5336.79	100.00	Total	9.25	100.00	Total	12.1	100.00

(Source : Auteure)

Les résultats obtenus de l'analyse et de l'étude de la carte des pentes montrent que les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgherouel sont dominés par des pentes moyennes qui varient entre 12 % et 25 %, ils représentent 45.64 % et 46.22 % de la surface de chaque bassin respectivement (tableau 2.6). Les pentes fortes et très fortes (supérieur à 25 %) favorisent l'accélération de la vitesse d'écoulement, ce qui entraîne une diminution dans le temps de concentration. Elles correspondent aux reliefs plus ou moins élevés, elles sont observées dans la partie amont, elles correspondent aussi aux zones de montagnes (Djebel el Wahch et djebel kellal) pour le bassin versant d'Oued Ziad, et des Djebels sidi Slimane et Ben Ouataf pour celui d'Oued Mgherouel ; ainsi les zones à faible et très faible pente sont enregistrées dans la partie aval des deux bassins versants (zone d'accumulation des eaux pluviales).

Pour le bassin versant d'Oued Rhumel, les zones à forte pente et très forte pente représentent 8.91 % de la surface du bassin versant, ils correspondent à la partie centrale au nord et au sud du bassin , ainsi les zones qui présentent une pente moyenne occupent 24.75 % de la surface du bassin versant, ils correspondent aux parties supérieure au Nord du bassin versant, tandis que les zones à

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMÉTRIQUE)

faible et très faible pente occupent 66.33% de la surface du Bassin versant, ils correspondent aux parties inférieures ( au sud ) du bassin versant (Fig 2.6). Plus de la moitié de la surface du bassin est caractérisé par des pentes faibles à très faible tandis que le pourcentage global des pentes moyennes à très forte représente 33.67 % de la surface du bassin versant ce qui signifie que le relief est contrasté.

Cette répartition variée des classes de pentes dans les entités hydrographiques étudiés met en évidence la variété topographique de la région, influençant le flux d'eau et le processus hydrologique dans chaque bassin.

### **2.2.1.3.3. La pente du cours d'eau principal**

La pente du cours d'eau est un indicateur clé de la topographie, elle a un effet profond sur la vitesse d'écoulement influençant ainsi le temps de concentration et le potentiel d'érosion. En effet, les fortes pentes favorisent l'écoulement rapide de l'eau vers l'aval entraîne une durée de concentration plus courte des eaux de ruissellement. Par conséquent, le bassin réagit plus rapidement aux précipitations intenses, ce qui peut engendrer des écoulements torrentiels en amont du bassin, conduisant à des crues dévastatrices en aval (Faye, 2018) et provoquer l'érosion. En revanche, les faibles pentes permettent une infiltration plus importante de l'eau dans le sol ce qui favorisera la recharge des nappes phréatiques et la croissance de la végétation.

Ce paramètre est déterminé par la différence d'altitude entre les extrémités du cours d'eaux principal divisée par la longueur du cours d'eau principal. Oued Ziad et Oued Mgharouel sont caractérisés par des pentes moyennes soit 7.66 %, et 7.79 % respectivement, tandis que la pente d'Oued Rhumel est faible 0.9 %.

### **2.2.1.3.4. Indice de pente globale**

Cet indice permet d'évaluer l'impact du relief sur le bassin versant. L'Office régional scientifique et technique d'Outre-Mer (L'ORSTM) a établi une classification du relief en se basant sur les valeurs de l'indice de pente globale (IG) (voir tableau 2.7).

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Tableau 2.7 : Classification ORSTM du relief à partir de l'indice de pente globale

Classe	Nature du relief	Valeurs d'IG (m/m)	Valeurs d'Ig (m/km)
R1	Relief très faible	$Ig < 0.002$	$Ig < 2$
R2	Relief Faible	$0.002 < Ig < 0.005$	$2 < Ig < 5$
R3	Relief Assez faible	$0.005 < Ig < 0.01$	$5 < Ig < 10$
R4	Relief modéré	$0.01 < Ig < 0.02$	$10 < Ig < 20$
R5	Relief Assez fort	$0.02 < Ig < 0.05$	$20 < Ig < 50$
R6	Relief Fort	$0.05 < Ig < 0.5$	$50 < Ig < 100$
R7	Relief Très fort	$Ig > 0.5$	$Ig > 100$

(Source : ORSTM)

L'indice de pente globale du bassin versant d'Oued Rhumel est égal à 3.89 m/km soit 0.39 % ce qui signifie que le relief du bassin est faible selon la Classification d'ORSTM. L'indice de pente des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel est respectivement 70.94 m/km soit 7.09 % et 53.73 m/km soit 5.37%. Ces valeurs indiquent que les deux bassins se distinguent par un relief fort toujours selon cette classification.

### 2.2.1.3.5. Indice de pente de Roche (Ip)

Cet indice renseigne sur l'importance de la pente sur le fonctionnement de l'écoulement dans le bassin (Berhail, 2015).

Aussi, L'indice de pente de Roche caractérise la pente moyenne du bassin versant et se calcule à partir du rectangle équivalent (Laabidi et al., 2016). Il reflète la forme générale du bassin (Faye, 2018). Il est 0.31 pour le bassin versant d'Oued Ziad et 0.26 pour celui d'Oued Mgharouel, nous relevons cependant que pour celui d'Oued Rhumel, cet indice est égal 0.07.

### 2.2.1.3.6. Indice de pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne d'un bassin versant est un élément clé qui reflète la topographie du bassin. Elle offre une bonne estimation du temps nécessaire au ruissellement direct, donc du temps de concentration ( $t_c$ ), elle a une influence directe sur le débit de pointe lors de fortes précipitations (Musy, 2005 ; Laabidi et al., 2016).

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Elle contrôle la rapidité du ruissellement, ce qui par conséquent impacte sa capacité érosive et son aptitude à transporter des sédiments (Young et al., 1996 ; Laabidi et al., 2016). La pente moyenne du bassin versant est étroitement associée aux propriétés morpho-structurales du bassin hydrographique, influence aussi le style fluvial observé le long des rivières actuelles. Pour les bassins versants étudiés d'Oued Rhumel, Oued Ziad et Oued Mgharouel la pente moyenne de chaque bassin versant est respectivement 9.05 m/km soit 0.90 %, 103.44 m/km soit 10.34 % et 77.90 m/km soit 7.79 %. Ces valeurs indiquent que la pente du bassin versant d'Oued Rhumel est légèrement inclinée, tandis que celle du bassin versant d'Oued Ziad est fortement inclinée, pour le bassin versant d'Oued Mgharouel la pente est moyennement inclinée (tableau 2.8).

Tableau 2.8 : Classification des pentes selon le comité de l'union internationale des géographes.

Classe de pente (m/km)	Caractéristique du relief
0 – 35	Pente légèrement inclinée
35 – 90	Pente moyennement inclinée
90 – 270	Pente fortement inclinée
270 – 360	Pente raide à très raide

(Source : Comité de l'union internationale des géographes)

### 2.2.1.3.7. Dénivelée utile

La "dénivelée utile" se réfère généralement à la différence d'altitude au point 5 % et le point 95 % de la courbe hypsométrique. Il indique la variation nette d'altitude.

La dénivelée utile du bassin versant Oued Rhumel est égale à 975 m, pour le bassin versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel la dénivelée utile est respectivement 440 m et 382 m.

### 2.2.1.3.8. Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique est un indicateur important dans l'analyse topographique, hydrologique et géomorphologique, car elle peut influencer les processus d'écoulement de l'eau, l'érosion et d'autres phénomènes liés au relief. Selon la classification d'ORSTM (Tableau 2.9), le relief du bassin versant Oued Rhumel est fort, la dénivelée spécifique est égale à 414.19 m, pour le bassin versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel la dénivelée spécifique est respectivement 246.16 m et 163.34 m. ces valeurs signifient que le relief est assez fort.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Tableau 2.9 : Classification de l’O.R.S.T.O.M. Office de Recherche Scientifique de Territoire  
d’Outre-Mer Selon dénivelé spécifique.

R1	Relief très faible	$Ds < 10m$
R2	Relief faible	$10 < Ds < 25m$
R3	Relief assez faible	$25 < Ds < 50m$
R4	Relief modéré	$50 < Ds < 100m$
R5	Relief assez fort	$100 < Ds < 250m$
R6	Relief fort	$250 < Ds < 500m$
R7	Relief très fort	$Ds > 500m$

(Source : ORSTM)

### 2.2.1.3.9. Relief du bassin (Rb)

Le relief du bassin est un indice important pour appréhender les caractéristiques d'érosion du bassin. Il exerce une influence majeure sur le façonnement des formes du relief, le réseau hydrographique, le débit des eaux de surface et souterraines, la perméabilité du sol, ainsi que les propriétés érosives du terrain (Magesh N.S et Chandrasekar N., 2012 ; Benzougagh, 2019). Le relief du bassin versant d'Oued Rhumel est égal à 1570 m. tandis que celui d'Oued Ziad et Oued Mgharouel est égale à 641.61 m et 533.85 m respectivement.

### 2.2.1.3.10. Rapport du relief (Rr)

Le rapport de relief permet de mesurer l'inclinaison globale du bassin versant, il indique l'intensité de l'érosion dans un bassin versant (Schumm, 1956 ; Strahler, 1964), Une valeur élevée de Rh est indicative des particularités propres à une zone montagneuse. Le rapport du relief du bassin versant d'Oued Rhumel, Oued Ziad et Oued Mgharouel est égale à 0.017, 0.099, et 0.085 respectivement, les valeurs élevées sont ceux du bassin versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel ce qui signifie que la pente est raide, tandis que la valeur du bassin versant d'Oued Rhumel indique de faibles degrés de pente.

### 2.2.1.3.11. Relief relatif (Rr)

Le relief relatif représente une mesure morphométrique cruciale employée dans l'évaluation des traits morphologiques globaux du terrain (Umair et Syed, 2014). Les bassins versants qui ont une valeur élevée du relief relative présentent un potentiel de ruissellement supérieur par rapport à

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

ceux ayant des valeurs moins élevées (Umair et Syed, 2014). Le relief relatif du bassin versant d'Oued Rhumel est égal à 3.87 tandis que celui des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel est égale à 39.07 et 33.03 respectivement, ces valeurs indiquent que les deux bassins versants ont un potentiel de ruissellement élevé par rapport au bassin versant d'Oued Rhumel.

### 2.2.1.3.12. Nombre de Rugosité (Rn)

Pour fusionner les caractéristiques de la pente et de la longueur de pente, on forme un nombre de rugosité sans dimension en multipliant le relief du bassin (Hmax - Hmin) par la densité de drainage, exprimée dans la même unité (Strehler, 1957 ; Melton, 1958).

Par ailleurs, la croissance et l'augmentation de la valeur de la densité de drainage tout en maintenant constant le relief du bassin (Hmax - Hmin) induit une réduction de la distance horizontale moyenne entre les divisions et le canal adjacent, provoquant ainsi une augmentation de la pente. À l'inverse, lorsque le relief du bassin augmente tout en maintenant la densité de drainage constante, la disparité d'altitude entre les divisions et les canaux adjacents s'accroît également, entraînant une augmentation de l'inclinaison de la pente.

Lorsque les deux variables atteignent des valeurs significatives, le résultat du nombre de rugosité affiche une valeur extrêmement élevée, signalant la présence de pentes qui sont à la fois prononcées et étendues. (Benzougagh, 2019)

Le nombre de rugosité du bassin versant d'Oued Rhumel est égal à 0.96, Oued Ziad 2.62 et Oued Mgharouel 2.67 (Tableau 2.10), les résultats obtenus montrent que les valeurs élevées sont ceux enregistré dans le bassin versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel.

Tableau 2.10 : Caractéristiques du relief

Caractéristiques du relief	Formules	Références	B.V O. Rhumel	B.V O. Ziad	B.V O. Mgharouel
La pente du cours d'eau principale (%)	/	/	0.64	0.76	0.78
Indice de pente de Roche	$I_p = \frac{1}{\sqrt{Leq}} \times \sum_{1}^n \sqrt{a_i \times d_i}$	Roche, (1963)	0.0747 7.47%	0.3079 30.79%	0.2550 25.50%

CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS :  
PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE,  
GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

	<p>Leq : Longueur du rectangle équivalent (m)</p> <p>ai : représente la fraction de la surface totale A du bassin versant comprise entre deux courbes de niveau (%)</p> <p>di : la distance entre deux courbes de niveau</p>				
Indice de pente moyenne du bassin versant	$I_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{Leq}$ <p>Leq : longueur du rectangle équivalent</p>		9.05m/km 0.009 m/m 0.90%	103.44 m/km 0.103 m/m 10.34%	77.897 m/km 0.0779 m/m 7.79%
Indice de pente globale (Ig) (m / km)	<p><math>I_g = Du / Leq</math></p> <p>Du : dénivelée utile</p> <p>Leq : longueur du rectangle équivalent</p>		3.93	7.09	5.37
Dénivelée utile (Du) en (m)	Du= H5 - H95		975	440	382
Dénivelée spécifique (Ds) en (m)	<p><math>D_s = I_g \sqrt{S}</math></p> <p>Ip: indice de pente globale</p> <p>A: surface du B.V</p>		414.19	246.16	163.34
Relief du bassin (Rb) en (m)	<p>Rb= Hmax – Hmin</p> <p>Hmax : hauteur maximale</p> <p>Hmin : la hauteur minimale</p>	Hadley et Schumm, 1961	1570	641.61	533.85

**CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS :  
PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE,  
GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)**

Rapport du relief (Rr)	$Rr = R/L$ R : relief du bassin L : longueur du bv	Schumm, 1963	0.017	0.099	0.085
Relief relatif (Rr)	$Rr = H \times 100/P$ H : relief du bassin P : périmètre du bassin.	Schumm, 1963	3.87	39.07	33.03
Nombre de Rugosité	$Rn = H \times Dd/1000$ H : relief du bassin Dd : densité de drainage	Schumm, 1963	0.96	2.62	2.67

(Source : Auteure)

**2.2.1.4. Caractéristiques du réseau hydrographique**

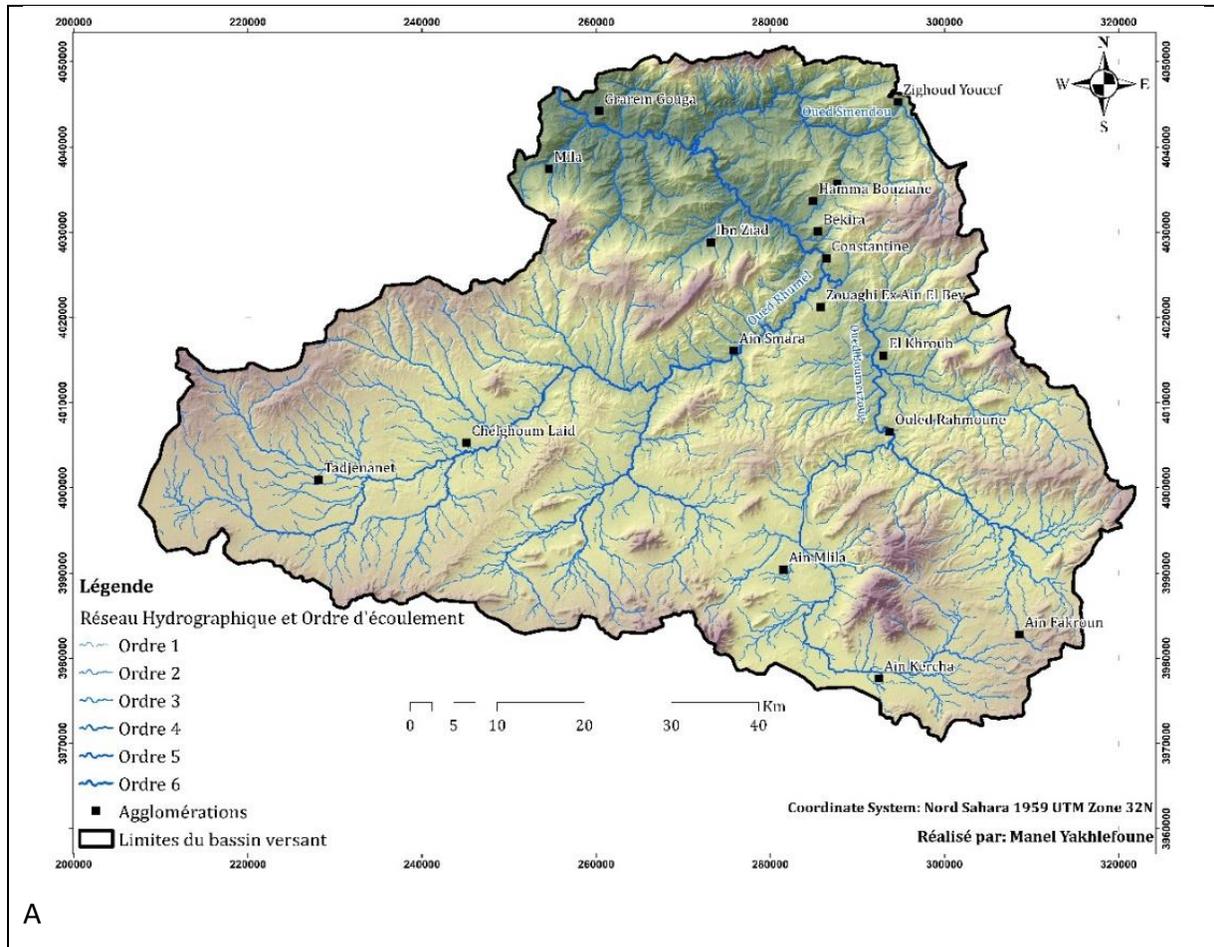
La première étape dans n'importe quelle analyse hydrologique, morphométrique, ou géomorphologique est de hiérarchiser le réseau hydrographique. La classification hiérarchique des cours d'eau a été développée par Horton (1945) et Strahler (1952, 1957, 1964) afin de décrire quantitativement le réseau de drainage du bassin versant.

L'ordre d'écoulement indique le lien hiérarchique entre les segments de flux, il consiste à mesurer la manière dont les cours d'eau se ramifient dans les bassins versants. La loi de Horton conduit à classer les flux non ramifiés comme des écoulements de premier ordre, quand deux flux de premier ordre sont reliés entre eux, ils sont classés comme des flux de deuxième ordre, de même, la jointure de deux flux de deuxième ordre les classe comme des flux de troisième ordre, et ainsi de suite.

Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de Strahler (1957) pour classer l'ordre d'écoulement de chaque bassin versant, pour le bassin versant d'Oued Rhumel nous avons utilisé le MNT de 30m de résolution pour faire ressortir le réseau hydrographique à l'aide d'ArcGIS en utilisant la condition 2000 m (pour faire ressortir les cours d'eaux d'une longueur égale ou supérieur de 2 km pour que le réseau hydrographique soit compatible avec celui qui existe en réalité ), tandis que pour les deux bassins d'Oued Ziad et Oued Mgharouel, nous avons fait la digitalisation du réseau hydrographique depuis la carte topographique de 1/25000, ensuite nous avons classé les cours d'eaux manuellement sur ArcMap, en tenant compte de l'ordre de drainage.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITs PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Le bassin versant de l'Oued Rhumel est classé comme un bassin de sixième ordre, avec un réseau de drainage s'étendant sur une longueur d'environ 157 km. Tandis que celui d'Oued Ziad est classé comme un type de 5ème ordre, et enfin celui d'Oued Mgharouel est classé comme un type de 4ème ordre (Fig 2.7). Cette classification permet d'indiquer que la région étudiée pourrait être sous l'influence d'un contrôle tectonique.



A

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITES PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

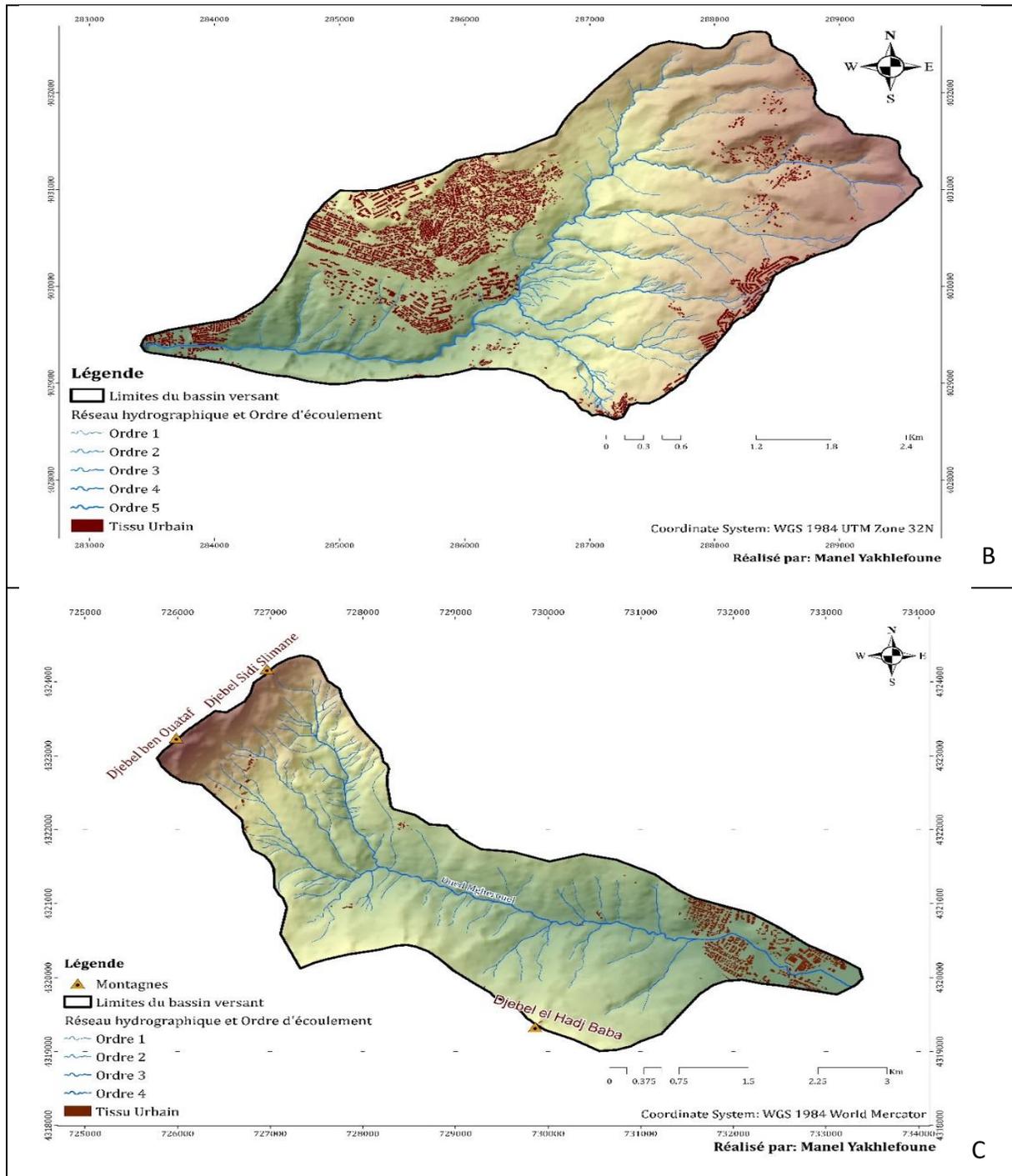


Figure 2.7: Réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Rhumel et Ordre d'écoulement.

A) bassin versant d'Oued Rhumel ; B) bassin versant d'Oued Ziad ; C) bassin versant d'Oued Mgharouel.

(Source : Auteure)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Le bassin versant d'Oued Rhumel se distingue par un réseau dense et ramifié (Fig. 2.7.A). Son évolution a été influencée par plusieurs facteurs, qu'ils soient internes tels que la nature lithologique et les structures et éléments tectoniques, externes comme le couvert végétal, le climat et l'impact anthropique, ou encore des facteurs composites tels que les aspects hydrologiques des terrains drainés et la topographie

Le réseau hydrographique du bassin versant d'Oued Ziad est bien développé, il prend sa source des monts de Djebel Kellal et Djebel El Wahch (des zones d'altitude de 991 m), pour arriver à la fin à son exutoire (la Route National N27) à 350 m d'altitude. Son cours d'eau principal (Oued Ziad) a un caractère torrentiel et une longueur estimée à 8.38 km.

Pour le bassin versant d'Oued Mgharouel, le réseau hydrographique prend ses sources des monts de Djebel Sidi Slimane et Djebel Ben Ouataf avec des altitudes qui dépassent 1000 m, il est bien développé en amont, constitué de trois thalwegs principaux qui reçoivent beaucoup d'affluents constituant ainsi des micro-bassins versant, son cours d'eau principal à un caractère torrentiel et une longueur estimée à 7.11 km.

### **2.2.1.4.1. La Densité de drainage (Dd)**

La densité de drainage est une caractéristique très importante du bassin versant car elle influence la texture du système de drainage. Elle traduit la dynamique du bassin versant, la stabilité du réseau hydrographique et la nature du ruissellement en surface. Plusieurs éléments la gouvernent, parmi lesquels figurent la composition géologique des sols, leur capacité d'infiltration, le couvert végétal ainsi que les conditions climatiques du bassin versant (Humbert, 1990).

selon plusieurs études de recherche (Strahler, 1964, Melton, 1957, Nag, 1998, Messa, 2006 ; Thomas et al 2011 et Benzougagh et al 2016 et 2017) les faibles valeurs (0 – 1.75) de la densité de drainage indiquent que le sol et le sous-sol sont très perméables, tandis que les hautes valeurs (densité de drainage supérieur à 3.5) montrent que les terrains sont imperméables, alors que les valeurs modérées de la Densité de drainage (1.75 – 3.5) indiquent que le bassin a une couverture végétative et un sous-sol hautement perméables

Le bassin versant d'Oued Rhumel est caractérisé par une faible densité de drainage qui correspond à  $0.61 \text{ km} / \text{km}^2$ , ce qui signifie que le sol est très perméable, tandis que les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel ont des fortes valeurs de densité de drainage qui sont respectivement 4.08

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

km / km<sup>2</sup> et 4.77 km / km<sup>2</sup>. Ces valeurs indiquent que le sol des deux bassins versant est imperméable.

### 2.2.1.4.2. La Fréquence de drainage

Elle est basée sur la lithologie du bassin versant reflétant ainsi la texture du réseau de drainage. Ce paramètre constitue un indicateur des diverses phases de l'évolution du relief dans le bassin (Hajam et al., 2013).

Plusieurs facteurs, notamment la perméabilité, la topographie (pente), le relief, les précipitations et la capacité d'infiltration des matériaux du bassin versant, influencent la fréquence de drainage (Montgomery et Dietrich, 1989), la fréquence de drainage du bassin d'Oued Rhumel est de 0,23 tandis que la fréquence de drainage des deux bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel est respectivement 16.21 et 16.64.

### 2.2.1.4.3. La Texture de drainage

La texture du drainage est conditionnée par divers éléments naturels tels que le climat, la végétation, les précipitations, la lithologie des roches, la capacité d'infiltration, le type de sol et le relief. Elle reflète l'espacement des cours d'eau dans un terrain fluvial disséqué (Smith, 1950 ; Vincy et al., 2012). En effet, Smith (1950) a identifié cinq catégories distinctes de textures de drainage (tableau 2.11).

Tableau 2.11 : Classification des valeurs de texture de drainage

Classe	Valeur de texture de drainage	Type de texture
01	Inférieur à 2	Très élevé
02	(2-4)	Elevée
03	(4-6)	Modérée
04	(6-8)	Fine
05	Supérieur à 8	Très fine

(Source : Smith 1950)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Suivant la classification effectuée par Smith (1950), Le bassin versant d'Oued Rhumel a une texture modérée avec une valeur égale à 3.1. Tandis que les bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel ont des textures très fines avec des valeurs respectivement de 11.94 et 9.09.

### **2.2.1.4.4. Le Coefficient de Torrentialité (Ct)**

Ce paramètre est un indicateur sur la torrentialité des cours d'eaux, il désigne le produit de la densité de drainage par la fréquence de cours d'eau d'ordre élémentaire. Plus la valeur du coefficient de torrentialité est élevée plus la torrentialité et les précipitations agressives augmentent. Pour le bassin d'Oued Rhumel, le coefficient de torrentialité est de 0.1 ce qui indique une faible torrentialité, tandis que pour le bassin versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel est égale respectivement 48.63 et 57.78 ce qui indique une torrentialité élevée dans les deux bassins versant et un ruissellement des eaux important.

### **2.2.1.4.5. Le Rapport de bifurcation (Rb)**

Le rapport de bifurcation constitue un élément essentiel influençant le degré de ramification d'un réseau de drainage, ainsi que la complexité et le niveau de dissection d'un bassin versant. (Grecu 1992, 2004 ; Grecu et al., 2005 ; 2007, 2011 ; Grecu , 2018 ; Bharadwaj et al, 2014, Grecu et al., 2021).

Le rapport moyen de bifurcation du bassin versant d'Oued Rhumel et Oued Ziad est respectivement 3.99, et 3.48, selon Strahler (1964), le rapport de bifurcation qui varie entre 3 et 5 signifie que le bassin versant n'est pas influencé par des structures géologiques et que le type de roche est homogène. Pour les bassins versant d'Oued Mgharouel la moyenne du rapport de bifurcation est égal à 5.10, Cette valeur indique que le schéma de drainage est contrôlé par des structures géologiques, ce qui peut augmenter le risque d'inondation.

### **2.2.1.4.6. Le Rapport des longueurs (Rl)**

Selon la loi d'Horton 1945, le rapport de longueur de flux (RL) des cours d'eau est le rapport entre la longueur moyenne d'un ordre (Lu) et d'un ordre inférieur (Lu-1) qui tend à être constante pendant les ordres successifs d'un bassin.

Un rapport de longueur de flux plus élevé indique une activité érosive élevée et c'est le cas pour le bassin versant d'Oued Rhumel qui est égale à 449.52, tandis que pour le bassin versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel il est égale à 2.18 et 3.64 respectivement.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.2.1.4.7. Le Maintien constant du canal

Selon Schumm (1956), il est défini comme l'inverse de la densité de drainage, exprimé en  $\text{km}^2$  et calculé par la division de la superficie du bassin versant par la longueur totale de tous les cours d'eaux. Différents éléments influencent le maintien constant du canal, tels que le type de roche, le relief, la durée de l'érosion, la couverture végétale, la perméabilité, et les conditions climatiques. Schumm (1956) a catégorisé le Maintien constant du canal ( $\text{km}^2/\text{km}$ ) en cinq niveaux : plus érodables ( $<0,2$ ), modérément érodables ( $0,2$  à  $0,3$ ), modérément peu érodables ( $0,3$  à  $0,4$ ), peu érodables ( $0,4$  à  $0,5$ ) et moins érodables ( $>0,5$ ) (Faye Cheikh, 2021). Le maintien constant du canal d'Oued Rhumel est égale à  $1.64 \text{ km}^2$ , ce qui signifie que le bassin versant est moins érodable, tandis que celui des bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel est égale à  $0.24 \text{ km}^2$  et  $0.21 \text{ km}^2$  respectivement. Ces valeurs indiquent que les deux bassins versant sont modérément susceptibles à l'érosion.

Tableau 2.12 : Caractéristiques du réseau hydrographique

Caractéristiques du réseau hydrographique	Formules	Références	B.V. O. Rhumel	B.V. O. Ziad	B.V. O. Mgharouel
Densité de drainage ( $\text{Km}/\text{Km}^2$ )	$Dd = Lx \times S$ Lx : longueur totale des cours d'eaux. S : surface du B. V	Horton, 1945	0.60	4.08	4.77
Fréquence de drainage	$F = N/S$ N : nombre total des cours d'eaux de tous les ordres S : surface du bassin versant	Horton, 1945	0.24	16.21	16.65
Texture de drainage	$T = N/P$	Horton, 1945	3.1	11.93	9.09

**CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS :  
PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE,  
GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)**

	N : nombre total des cours d'eaux de tous les ordres P : périmètre du bassin versant				
Coefficient de torrentialité	$Ct = Dd \times (N/S)$ N : nombre des cours d'eaux d'ordre 1 S : surface du B.V Dd : densité de drainage	Horton, 1945	0.14	48.63	57.78
Rapport de bifurcation	$Rb = \frac{Nu}{Nu + 1}$ Nu : Nombre total des cours d'eau d'ordre "u". Nu+1 : Nombre de segments d'ordre supérieur	Shumm (1956)	Ordre 1= 3.41 Ordre 2= 4.98 Ordre 3= 4.91 Ordre 4= 3.67 Ordre 5 =3 Moyenne = 3.99	Ordre 1= 3.89 Ordre 2= 3.36 Ordre 3= 3.67 Ordre 4= 3 Moyenne = 3.48	Ordre 1=3. 11 Ordre 2=7. 2 Ordre 3= 5.00 Moyenne= 5.10
Rapport des longueurs	$Rl = \frac{Lu}{Lu - 1}$ Lu: la longueur moyenne des talwegs d'ordre u	Horton, 1945	Ordre 1= 1.63 Ordre 2= 1.92 Ordre 3= 2.67	Ordre 1= 1.88 Ordre 2= 2.13 Ordre 3= 2.41	Ordre 1=1. 04 Ordre 2=2. 76 Ordre 3= 7.12

**CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS :  
PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE,  
GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)**

	Lu-1: la longueur moyenne des talwegs d'ordre u-1		Ordre 4 = 0.002 Ordre 5= 2241.37 Moyenn e = 449.52	Ordre 4 = 2.29 Moyenn e = 2.18	Moyenne= 3.64
Maintien constant du canal	C= 1/Dd Dd : densité de drainage	Horton, 1945	1.66	0.24	0.21

(Source : Auteure)

**2.2.1.4.8. Calcul du temps de concentration (Tc)**

Cet indice correspond à la durée maximale nécessaire pour qu'une goutte d'eau suive le trajet hydrologique entre n'importe quel point du bassin et son exutoire. Il est considéré comme l'un des éléments les plus importants pour la modélisation de l'aléa inondation et la création d'un modèle de prévision des inondations dans le logiciel Hec Ras (Tout, 2023), puisqu'il intervient dans le calcul des débits de pointe et le façonnement de l'hydrogramme de crue. Le temps de concentration peut être déduit à partir d'observations sur le terrain ou calculé en appliquant généralement des formules empiriques. Plusieurs formules existent à cet égard. Dans cette étude, différentes formules empiriques qui s'adapte aux caractéristiques de nos bassins versant sont utilisé pour calculer le temps de concentration (Tableau), il s'agit des différentes formules : (la Formule de Giandotti, de Turazza, de Passini, de l'ANRH (Sogreah), et celle de Temez), ensuite nous avons calculé la moyenne des valeurs obtenues afin de sélectionner la valeur la plus appropriée à retenir.

**CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS :  
PRINCIPAUX TRAITIS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE,  
GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)**

Tableau 2.13 : Résultat de calcul du temps de concentration

Formules Empiriques	Equation	Tc du B.V Oued Ziad	Tc du B.V Oued Mgharouel	Tc du B.V Oued Rhumel
Giandotti Tc (h)	$Tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5Lp}{0.8\sqrt{Hmoy - Hmin}}$ <p>S : surface du bassin versant (km<sup>2</sup>) Lp : Longueur du thalweg principal (km) Hmoy : Altitude moyenne (m) Hmin : Altitude minimale (m)</p>	1.85	2.15	25.74
Turazza Tc (min)	$Tc = 0.108 \frac{\sqrt[3]{S \times L}}{\sqrt{P}}$ <p>S : surface du BV (Ha) L : Longueur du thalweg principal (m) P : Pente moyenne du thalweg principal (m/m)</p>	1.32	1.14	18.50
Passini Tc (h)	$Tc = 0.108 \times \left( \frac{(S \times L)^{\frac{1}{3}}}{P^{0.5}} \right)$ <p>S : surface du BV (km<sup>2</sup>) L : Longueur du thalweg principal (km) P : Pente moyenne du thalweg principal (m/m)</p>	1.77	1.53	54

**CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS :  
PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE,  
GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)**

ANRH (Sogreah) Tc (h)	$Tc = 3 \left( \frac{S \times L}{(10 \times I)^{1.5}} \right)^{0.25}$ S : surface du BV (km <sup>2</sup> ) L : Longueur du thalweg principal (km) I : Pente moyenne du thalweg principal (%)	1.87	1.67	47.89
Témez Tc (h)	$Tc = 0.3 \left( \frac{L}{I^{0.25}} \right)^{0.76}$ L : Longueur du thalweg principal (km) I : Pente moyenne du thalweg principal (m/m)	2.45	2.16	37.74
La moyenne		1.85	1.73	36.77
Tc adopté		1.85	1.67	37.74

(Source : Auteure)

La valeur adoptée est le résultat le plus proche de la moyenne des résultats des cinq formules utilisées. Pour le bassin versant d'Oued Ziad, le temps de concentration adopté est égal à 1.85h (Tableau 2.13), cette valeur correspond à la formule de Giandotti, tandis que pour le bassin versant d'Oued Mgharouel le temps de concentration adopté est égale à 1.67h et qui correspond à la formule de l'ANRH développé par Sogreah en (1986). Elle a été testée et conseillée pour les petits bassins versants en Algérie. Pour le bassin versant d'Oued Rhumel la valeur adoptée est celle issue de la formule de Témez 37.74h.

Ces résultats obtenus montrent un temps de concentration relativement court dans les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel, ce qui peut accentuer les effets du ruissellement dans les deux bassins versants et causer des inondations intenses affectant ainsi l'agglomération urbaine en aval et ses infrastructures environnantes. Le temps de concentration du bassin versant d'Oued Rhumel est plus long vu sa forme plus allongée et sa taille plus grande, cette valeur élevée peut être influencé aussi par la pente et la couverture végétale du bassin versant.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.2.1.4.9. Calcul de la vitesse moyenne de ruissellement

La vitesse de ruissellement donne une idée sur cadence de circulation des eaux de pluie au sein d'un bassin versant et à quelle vitesse, ce qui nous permet de planifier une gestion efficace des crues. Cette vitesse est donnée par la formule de (Podgorski, 2000), suivante :  $V_R = \frac{L_P}{T_C}$

Avec :  $L_P$  : Longueur du thalweg principal en (km).

$T_C$  : temps de Concentration en (heure).

Les vitesses de ruissellement des bassins versants étudiés sont mentionnés dans le tableau suivant.

Tableau 2.14 : Vitesse moyenne de ruissellement des bassins versants

Bassin versant	$L_P$ (Km)	$T_C$ (h)	$V_R$ (Km/h)
Oued Ziad	8.38	1.85	4.53
Oued Mgharouel	7.11	1.67	4.26
Oued Rhumel	157	37.74	4.16

(Source : Auteure)

Selon le Tableau 2.14, la vitesse de ruissellement des 3 bassins versants étudiées est supérieur à 4 km/h, ce qui signifie que l'eau ruisselle assez rapide, cette valeur pourrait être justifié par les caractéristiques des bassins versants étudiés, la pente, l'évolution urbaine dans chaque bassin versant et aussi le climat et l'intensité des précipitations.

### 2.2.2. Contexte Géomorphologique

#### 2.2.2.1. Cadre morphologique régional

Le bassin versant d'Oued Rhumel s'étend au sein de l'Atlas tellien oriental montagneux. Son relief accidenté évolue à travers des chaînes de montagnes alignées parallèlement, avec une orientation générale NW-SE, délimitant des bassins et des plaines successifs du Nord au Sud.

##### 2.2.2.1.1. La zone montagneuse

Elle concerne les massifs montagneux élevés de la chaîne numidique d'orientation sensiblement Nord-Ouest-Sud Est qui forment des arrêtes suffisamment allongées dans l'étendue de Tell Nord-Constantinois (l'atlas tellien littoral) : les monts de Constantine, de Guelma et de la Haute Medjerda (Souk Ahras) en culminant à des altitudes variables allant de 1000 et 1600m.

La chaîne numidique est composée essentiellement de massifs calcaires (Dj. M'Sid Aicha 1462 m ; Dj. Sidi Driss 1364m ; Kef Sidi-Dris 1276 m), les massifs gréseux (chaîne du Zouagha 1229 m ;

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Djebel de Tamezguida 1620m) et les massifs anciens de la petite Kabylie, formés de terrain métamorphiques (micaschistes, gneiss, phyllades) recouverts de lambeau oligomiocène (argilo-gréseux).

Ce sont des terrains très accidentés et fortement marqués par l'importance des pentes, souvent supérieures à 20 % et par l'ampleur des dénivellations.

La chaîne Numidique est traversée par la cluse étroite de l'Oued El-Kebir, équivalent de la percée de l'Oued-Agrioun dans la chaîne des Babors.

### **2.2.2.1.2 La zone des bassins intérieurs (bassin néogène de Constantine)**

Le bassin de Constantine représente une dépression géographique localisée entre les massifs du Tell et les hautes plaines Constantinoises Cette grande dépression lacustre est caractérisée par des collines basses aux contours doux affichant des altitudes variant entre 500 et 600 mètres S'étendant sur une largeur de 10 à 20 kilomètres elle couvre une distance de 70 à 90 kilomètres d'ouest en est allant de Ferdjioua dans la wilaya de Mila à l'ouest jusqu'à Zighoud Youcef à l'est Les hautes plaines marquent sa frontière sud Au nord des reliefs orientés est ouest la séparent des massifs côtiers comprenant les reliefs du chaînon du Zouagha à l'ouest les Djebels M'Cid Aicha et Sidi Dris se prolongeant vers l'est par la région du Col des Oliviers Au sud les massifs des Djebels Grouz et Chettabah à l'ouest ainsi que du Djebel Ouahch à l'est délimitent la frontière avec les hautes plaines constantinoises sur lesquelles le bassin de Constantine s'étend dans sa partie méridionale Les reliefs situés au sud de Ferdjioua Mila à l'ouest et les Djebels Ouahch et Oum Settas à l'est délimitent respectivement ses frontières occidentales et orientales.

C'est l'emplacement d'une dépression lacustre qui s'est formée au cours de l'époque tertiaire, au sud de la chaîne Numidique. Cette dépression a été progressivement comblée par des dépôts sédimentaires datant de l'Oligocène et du Miocène inférieur, comprenant des argiles gypseuses, des poudingues et des conglomérats rouges, ainsi que des argiles à lignites. Ces dépôts néogènes, caractérisés par leur relief accidenté et leurs ravins profonds, constituent la couverture d'un substratum composé d'une superposition de nappes de flysch, en général d'origine allochtone selon Villa J-M (1980).

D'un point de vue hydrographique, le bassin de Constantine est parcouru par le Rhumel, débutant de sa source au confluent des oueds Tadjenennet et El Méhari (à l'est de Chelghoum El Aïd) jusqu'à

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

sa jonction avec l'Oued Endja (au nord de Mila), à partir de laquelle il adopte le nom d'Oued El Kebir. Les oueds Boumerzoug et Smendou, déversant leurs eaux dans le Rhumel à hauteur de Constantine, contribuent également au réseau hydrologique du bassin de Constantine. Il devient ainsi évident que l'utilisation du terme "bassin", justifiée sur le plan géologique, ne correspond pas pleinement à la configuration d'un bassin hydrologique.

### **2.2.2.1.3. La région des Hautes Plaines Constantinoises**

La zone des hautes plaines correspond à une plate-forme crotonisée, recouverte par des sédiments secondaires déposés à faible profondeur et généralement d'une épaisseur modérée. Ces couches sédimentaires dissimulent un socle rigide, et par conséquent, les mouvements de poussée alpine qui ont donné naissance aux Maghrébides au Miocène ne peuvent être considérés comme expliquant la formation des Atlas, principalement anté-miocènes (Villa J-M., 1980).

Les hautes plaines constantinoises se définissent comme une cuvette d'effondrement caractérisée par de vastes surfaces planes situées entre les chaînes internes de l'Atlas tellien oriental au nord et les monts du Hodna du Belezma et de l'Aurès au sud. Ces plaines s'étendent à des altitudes comprises entre 750 et 900 mètres dominées par des reliefs en horst isolés et abrupts notamment des massifs calcaires d'orientation SW NE tels que le Dj Guerioun 1729 m le Dj Fortas 1477 m et le Dj Nif en N'Ser 1540 m. Elles résultent principalement de l'accumulation de sédiments continentaux depuis les plissements du Miocène moyen subissant par la suite des déformations post villafranchiennes. Ces hautes plaines sont caractérisées par des ensembles d'îlots montagneux plissés ou fracturés alignés en continu des chaînes du sud (Villa J M 1980).

À l'est l'ample étendue des hautes plaines constantinoises révèle une structure robuste sujette à une tectonique cassante. Les massifs calcaires isolés en horsts témoignent en surface de formations carbonatées épaisses désignées sous le nom de "nappe néritique constantinoise" dont l'origine allochtone a été établie par Villa J M 1980.

En descendant vers le sud depuis ces plateaux élevés les vastes dépressions du Hodna et du Chott Chergui remplies de sédiments néogènes sont interprétées comme des avant fosses locales de la chaîne des Maghrébides.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### **2.2.2.1.4. La région des vallées (terrasses alluviales)**

Les vallées dont le degré d'encaissement varie entourent le noyau central et forment un point de convergence pour quatre vallées distinctes la vallée du Rhumel supérieur - Ain Smara au Sud-Ouest la vallée du Boumerzoug au Sud Est El Khroub la vallée du Rhumel inférieur au Nord-Ouest Ibn Ziad et la dépression de Hamma Bouziane et Didouche Mourad au Nord Est. Ces vallées s'ouvrent en de larges versants caractérisés par de fortes pentes avec des terrasses alluviales d'âge quaternaire, très exposées au risque inondation. Le réseau hydrographique en amont est alimenté par deux cours d'eau majeurs le Boumerzoug prenant son origine au Djebel Fortas et se dirigeant vers Constantine où il se rejoint le Rhumel Ce dernier prend sa source dans la région d'El Eulma. Les deux cours d'eau se rencontrent aux niveaux des Arcades Romaines à Constantine

### **2.2.2.2. Cadre morphologique local des bassins versants Oued Ziad et Oued Mgharouel**

Il s'agit de la morphologie du relief existant dans les deux bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel et qui sont localisés entre les communes de Constantine et Hamma Bouziane et Constantine et Ain Smara respectivement.

#### **2.2.2.2.1. Les ensembles montagneux**

Les massifs montagneux entourent une grande étendue de plateaux, buttes et vallées composés principalement d'une série de reliefs montagneux et de canyons profondément encaissés. Ils se situent à l'extrémité septentrionale de la commune de Constantine et d'El Hamma Bouziane, dominée principalement par la chaîne numidique qui s'étend vers le nord-est avec le massif de Djebel El Ouahch (1281m), Djebel Chettaba à l'ouest (1316m) et Djebel Oum Settass (1326m) au sud-est.

#### **2.2.2.2.2. Les Plateaux**

Les plateaux dominent principalement le centre et le sud de la cité, affichant une topographie quasi-horizontale à faible inclinaison, divisée en bandes par des oueds dont les altitudes oscillent entre 100 et 700 m. Voici quelques-uns des plateaux :

-Le plateau de Mansourah, localisé au Nord-Est de Constantine, dépasse les 650 m d'altitude et s'incline du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Il est fortement marqué par une série de dépressions et par des rivières comme Oued El Kleb, Oued Rhumel et Oued Boumerzoug.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMÉTRIQUE)

-Le plateau du Coudiat, avec une altitude de 600m, présente une pente abrupte vers l'Est en direction du boulevard Belouizdad.

-Le plateau d'Ain El Bey, au sud, culmine à 732 m avec une forme tabulaire, bien que ses bords soient parfois érodés (Bad lands). Il se prolonge vers le sud par des pentes raides orientées est-ouest.

-Le plateau de Salah El Bey, de forme tabulaire et situé au sud de la ville, culmine à 732m, se distingue par sa stabilité géologique par rapport aux autres zones.

-Le rocher central-nord de la ville, sur lequel repose la vieille cité, la médina, atteint plus de 700m. Il présente une morphologie tabulaire à faible inclinaison, entaillée par les gorges profondes du Rhumel formant d'imposantes falaises. Ces gorges varient en profondeur, de 75m à l'entrée de l'Oued Rhumel (Sidi Rached) à 175m à sa sortie (au niveau du Kef Chekara). La pente générale varie entre 5 et 10%, mais atteint des valeurs jusqu'à 60% sur les falaises rocheuses.

### **2.2.2.2.3. Les zones de collines**

La région collinaire, qui englobe plus de la moitié de la superficie urbaine de Constantine, présente des inclinaisons allant de 10 à 30% et des altitudes moyennes oscillant entre 600m et 800m. Les collines de l'Oued Mellah, Boufrika, Belle Vue, Sidi Mabrouk et Boussouf déprimées représentent des zones synclinales qui ont été remplies au cours du tertiaire, datant du mio-pliocène. Composées principalement de sols meubles tels que les argiles et les marnes intercalées de gypse, ces régions se distinguent par une morphologie distincte : un réseau hydrographique dense, des versants aux apparences chaotiques marqués par des phénomènes d'érosion, de ravinement et de glissements de terrain.

### **2.2.2.2.4. Les vallées du Rhumel et du Boumerzoug**

Les vallées désignent les régions basses où les altitudes vont de 50 mètres à 200 mètres. Elles s'appliquent aux terrasses alluviales du Rhumel et du Boumerzoug qui se distinguent par des pentes faibles (de 0 à 10%). Au niveau de leur confluence, les vallées se divisent en de vastes versants à fortes pentes, formés par des formations d'âge quaternaire, qui sont les plus vulnérables aux inondations.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.2.3. Contexte Géologique

La géologie a un effet qui s'étend au-delà de la régulation du flux fluvial, affectant également l'érosion et le déplacement des particules solides. Il est crucial d'analyser les différentes structures géologiques existants dans les bassins versants étudiés pour voir la perméabilité des sols à explorer à partir des cartes géologiques.

#### 2.2.3.1. Cadre géologique régional (Bassin versant d'Oued Rhumel)

La région étudiée a connu une histoire géologique et tectonique mouvementé est complexe caractérisé par la superposition des nappes de charriage.

Le bassin versant d'Oued Rhumel s'inscrit au sein des zones externes de la chaîne des Maghrébides dans le nord-est de l'Algérie Auboin et Durand Delga 1971 Cette chaîne s'étirant de Gibraltar à la Sicile sur plus de 2 000 km constitue un domaine allochtone caractérisé par des nappes de charriage majoritairement orientées vers le sud, élaborées lors des phases tectoniques de l'orogénèse alpine. En Algérie, la chaîne des Maghrébides prend forme grâce à l'assemblage de trois secteurs géographiquement disparates et stratigraphiquement superposés (Durand-Delga, 1971) (Fig 2.8).

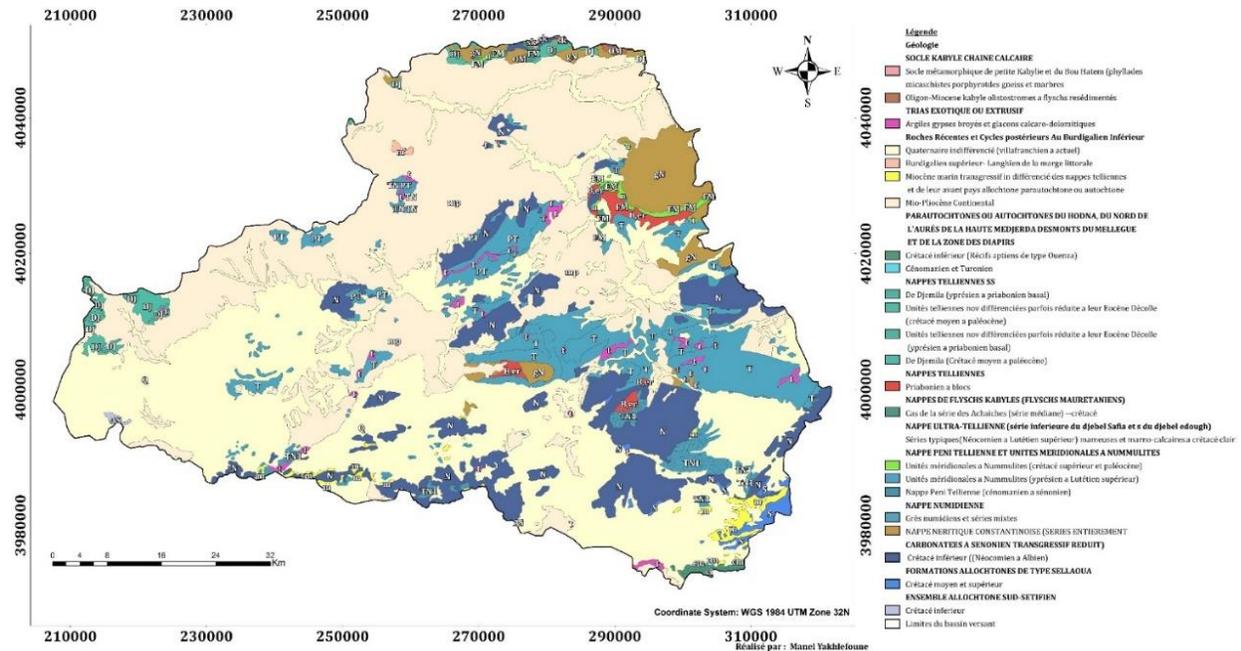


Figure 2.8 : Carte géologique (Morpho structurale) du bassin versant d'Oued Rhumel (Source : digitalisé depuis la carte Structurale au 1/500000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens (Villa J M, 1980)).

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### **2.2.3.1.1 La région interne**

Ce secteur se compose d'un socle métamorphique kabyle (précambrien et/ou hercynien, alpin) associé à une couverture mésozoïque à cénozoïque adoptant un faciès de plate-forme carbonatée, donnant ainsi lieu à la chaîne calcaire ou dorsale kabyle.

Le socle kabyle présente un substratum gneissique méso-catazonique, surmonté de schistes et phyllades peu ou non métamorphiques, dont l'âge s'étend de l'Ordovicien au Carbonifère (Durand-Delga, 1971 ; Bouillin J.P., 1977 et Raoult J.F., 1974).

La dorsale kabyle ou chaîne calcaire est caractérisée par des dépôts de plate-forme principalement carbonatés, divisés en trois unités : internes, médianes et externes (Durand Delga M., 1969 ; Raoult J.F., 1974 ; Vila J.M., 1980). Initialement partie intégrante de la couverture sédimentaire mésozoïque et tertiaire du socle kabyle, les unités externes et médianes se sont par la suite dissociées de leur substratum, subissant ultérieurement des plissements et des chevauchements provoqués par le socle kabyle et la dorsale interne.

### **2.2.3.1.2. La région des Flyschs**

Cette zone désigne une aire océanique profonde et mobile, s'étendant du Jurassique moyen au Burdigalien. Jusqu'à l'Éocène supérieur, elle est associée à la bordure méridionale de la plaque d'Alboran.

Pendant le Crétacé inférieur, des flyschs terrigènes relativement proches se déposent dans la partie nord du bassin (flysch Maurétanien) selon Gélard J.P. (1969), tandis que des flyschs distaux apparaissent dans le Sud (flysch Massylien) d'après Raoult J.F. (1969). À l'Oligocène et au Miocène basal, un flysch grésomarneux (le flysch Numidien) se dépose en discordance sur les premiers contacts tectoniques séparant les unités du domaine interne de la nappe du flysch Maurétanien.

Les flyschs reposent sur les zones internes avec des structures variées et occupent une position allochtone par rapport aux zones externes. La nappe numidienne se distingue par des formations moins affectées sur le plan structural.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.2.3.1.3 La région externe

Le secteur externe englobe les unités telliennes parautochtones, étalées le long de la paléomarge africaine (Bouillin, 1986). Cette zone se divise en deux catégories majeures de séries selon Vila JP., 1980 : les séries telliennes et les séries de l'avant-pays.

Les nappes telliennes ont été morcelées par les phases tectoniques tertiaires en trois entités distinctes, délimitées approximativement par les lignes paléogéographiques du Crétacé, du Paléocène et de l'Éocène. Elles se caractérisent principalement par des terrains marno-calcaires (Wildi W., 1983 ; Vila J.M., 1980).

Quant au para-autochtone, affleurant dans les massifs de Cheliff, Boumâd, Blida, Babors, il est constitué de terrains paléozoïques et mésozoïques souvent fragmentés et métamorphisés au cours du Crétacé (Leikine, 1971 ; Kirèche, 1993 et Obert, 1981).

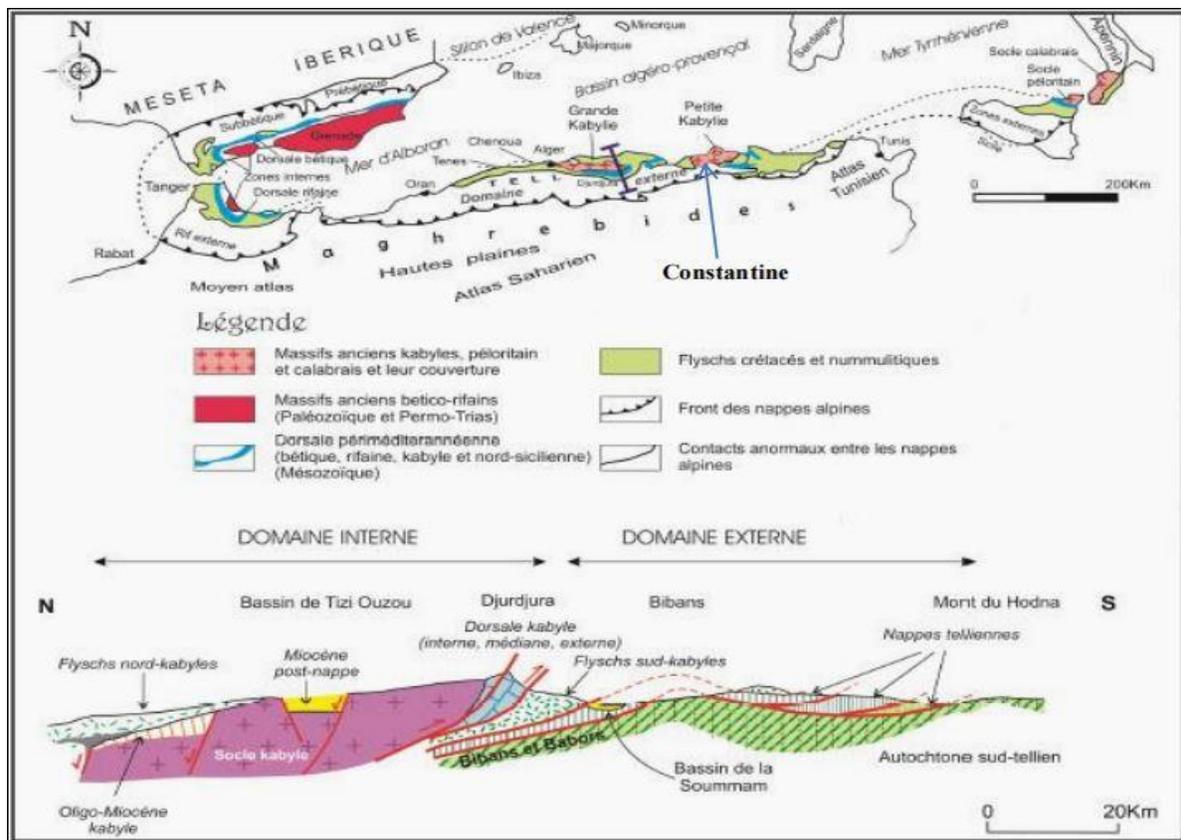


Figure 2.9 Carte et coupe structurale Schématisée de la chaîne des Maghrébides montrant la disposition des zones internes et externes

Source : (Durand-Delga et Fontboté, 1980 in Bourenane, 2017)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.2.3.2. La tectonique

Les régions externes enregistrent des altérations sous l'influence de l'héritage structural pré-Tertiaire (Aris Y., 1994). Les configurations de la chaîne alpine dans le nord-est de l'Algérie, ainsi que leur distribution, résultent de plusieurs phases tectoniques.

#### 2.2.3.2.1 Les phases tectoniques mésozoïques Tertiaires

La formation principale de la chaîne alpine dans le nord-est de l'Algérie a principalement eu lieu pendant les phases tectoniques du Tertiaire.

**Au Crétacé :** À cette époque, la différenciation paléogéographique, amorcée au Crétacé inférieur, persiste et est accentuée par l'activité des zones positives et négatives. Dans la zone néritique, la finalisation de la construction de la plate-forme carbonatée se produit avec l'émergence définitive à la fin du Crétacé supérieur (Guellal S et al., 1973).

**À l'Éocène (Phase priabonnienne) :** Cette phase de compression survient vers la fin du Lutétien, identifiée comme la période fini-lutétienne ou phase atlasique d'après Durand Delga M. (1969) et Raoult J.F. (1974), ou encore considérée comme la phase priabonnienne selon Vila J.M. (1980). La genèse de cette compression réside dans la fermeture de la Téthys occidentale due à la rotation de l'Afrique autour d'un pôle localisé à l'ouest de Tanger. Cette rotation entraîne la collision entre la partie orientale de l'Alboran et la marge africaine tellienne. Dans les zones internes, la position relative de la Kabylie par rapport au Tell est solidifiée dès l'Éocène supérieur, liée à un métamorphisme régional distinct (Wildi W., 1983).

Cette phase est liée à des failles verticales orientées NE SW comme l'accident N45° 50° E d'El Kentour qui s'étend jusqu'à l'avant pays au Sud-Ouest entre les montagnes du Bélezma et celles du Hodna formant la "transversale de Constantine"

**Au Miocène :** Cette étape miocène se manifeste également en tant que phase de compression, caractérisée par un raccourcissement global dans toute la région nord-orientale de l'Algérie, s'orientant du nord au sud, vraisemblablement débutée au Burdigalien moyen dans les zones septentrionales (J. P. Bouillin, 1977).

D'après les observations de J. M. Vila, la phase Tortonienne majeure à vergence sud est tenue responsable des importants chevauchements anormaux impliquant les formations postérieures au

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Burdigalien, élevées au sein de la nappe numidienne. Ces chevauchements anormaux sont conjugués à des décrochements NW-SE et NE-SW.

Les conséquences de cette activité tectonique ont abouti à la création d'un dispositif structural compliqué, se distinguant par la superposition du socle kabyle sur la couverture sédimentaire, avec les nappes de flysch transportées par-dessus les formations telliennes.

Selon J.M. Vila (1980), cette phase aurait conduit à l'émergence de la "nappe néritique constantinoise", des unités allochtones de Selloua, de l'ensemble Sud-Sétifien, ainsi que des unités méridionales à nummulites.

### **2.2.3.2.2 La tectonique récente**

Cette phase post-nappes de tectonique a un impact majeur sur le relief actuel. Elle a entraîné le remplissage des bassins mio-pliocènes grâce à la dégradation des reliefs environnants.

À l'échelle du Constantinois, les structures attribuées à cette tectonique suggèrent une variété de phases. Deux étapes successives de distension et de compression ont influencé les formations tortoniennes, provoquant un resserrement des structures préexistantes et la formation de plis alignés principalement dans la direction atlasique. Parmi ces plis, on peut mentionner ceux de Djebel Ouahch, du massif du Chettaba, et du Djebel Djaffa.

En outre, des failles inverses, parfois avec des caractéristiques décrochantes ou chevauchantes, ainsi que des déformations cassantes orientées est-ouest et nord-ouest/sud-est, comme l'accident de M'cid Aïcha-Debbar sur une distance d'environ une centaine de kilomètres, sont observées. Le long de cet accident, des chevauchements Nord-Sud post-miocène sont localement rapportés (Guellal S., et al., 1973).

### **2.2.3.3. Contexte géologique local (Lithologie et perméabilité)**

Localement, la géologie locale spécifique aux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel reflète en partie la complexité du cadre géologique régional. Elle est caractérisée par des dépôts sédimentaires du secondaire et du tertiaire. Les différentes formations géologiques et litho stratigraphiques se trouvant dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel sont présentés ci-dessous.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.2.3.3.1 Grands ensembles géologiques

Le bassin versant d'oued Mgharouel présente une diversité remarquable de formations géologiques, chacune jouant un rôle crucial dans la dynamique hydrologique régionale. Ces formations sont principalement caractérisées par leur composition, leur localisation et leur origine.

#### 2.2.3.3.1.1. Trias Exotique ou Extrusif

- **Complexe broyé triasique et principaux glaçons calcaires dolomitiques** : Occupant une petite surface au nord du bassin versant d'Oued Mgharouel, cette formation est caractérisée par des structures géologiques complexes résultant de processus tectoniques et d'activités volcaniques pendant l'ère triasique.

#### 2.2.3.3.1.2. Nappe ultra-tellienne

L'unité ultra-tellienne est largement développée dans le Constantinois. Elle est représentée par des formations marneuses et marno-calcaires de faciès généralement clairs. Cette unité à niveaux généralement inverses est caractérisée par des séries d'âge Barrémien à Eocène.

D'après la carte géologique au 1/50 000 d'El Aria, les formations situées sur la bordure méridionale et occidentale du Djebel Ouahch (Constantine Est), sont étroites. Elles se présentent sous forme d'écaillés coincées entre les marnes priaboniennes (tellien sensu stricto) et l'unité des flysch (Vila, 1980).

- **Barrémien et Aptien** : La nappe du Barrémien et de l'Aptien est une importante unité aquifère. En général, elle est constituée de sédiments datant des périodes géologiques du Barrémien et de l'Aptien, il y a environ 130 à 100 millions d'années. Il y a souvent des calcaires, des grès et des argiles dans ces formations, ce qui peut donner lieu à des aquifères importants qui peuvent stocker et fournir de l'eau potable. Le Barrémien présente une lithologie très diversifiée, comprenant des dolomies, des grès roux, des intercalations argileuses et marneuses, ainsi que des calcaires variés. L'Aptien se compose d'une couche marneuse et d'une couche carbonatée. L'Aptien marneux est une formation de 60 à 80 mètres d'épaisseur qui présente une majorité de marne, avec des intercalations d'argiles verdâtres dures et de petits bancs de grès et de roches. Les calcaires marneux. *Exogyra latissima* et *Toucasia carinata* ont été produits par les marnes. Le barrémien et l'aptien se trouve dans la partie Nord Est du bassin versant d'Oued Ziad.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### 2.2.3.3.1.3. Nappe néritique Constantine

Elle comporte les plus hauts reliefs calcaires de la région. Cette unité possède un style particulier. Elle s'est déplacée en bloc, comme une immense banquise carbonatée, transportant ses structures propres, acquises à partir du Sénonien supérieur (failles de direction atlasiques), mais surtout au cours du plissement Priabonien (Vila, 1980). Le contact de base de la nappe néritique cisaille clairement des structures plicatiles anciennes et lui confère une allure de "rouleau frontal" signalé le long de la limite méridionale de cette nappe, telle la terminaison Sud du Djebel Guerioum (Bouterraa, 2007).

- **Cénomaniens calcaires** : sont des formations carbonatées se trouvant dans le Sud du bassin versant d'Oued Ziad et peuvent atteindre 250 à 300 m d'épaisseur.

### 2.2.3.3.1.4. Nappes Peni-Tellienne :

- **Campanien conglomératique** : Concentré à l'extrême nord-ouest du bassin versant d'Oued Mgharouel, ce dépôt est principalement constitué de conglomérats formés à l'époque du Campanien.

- **Sénonien supérieur calcaire** : Présent également à l'extrême nord-ouest du bassin versant d'Oued Mgharouel, cette couche est composée de calcaires datant du Sénonien supérieur.

- **Sénonien inférieur marneux** : Localisé dans la même région, cette formation est principalement constituée de marnes du Sénonien inférieur.

- **Sénonien supérieur marneux** : Également concentré à l'extrême nord-ouest du bassin versant, ce dépôt est composé de marnes appartenant au Sénonien supérieur.

### 2.2.3.3.1.5. Nappes Telliennes SS:

- **marneux – Maestrichtien au Paléocène** : Ces nappes dominent la partie amont jusqu'à la partie médiane du bassin versant d'Oued Mgharouel, s'étendant du sud vers le nord. Elles occupent également une surface importante dans la partie extrême est du bassin.

### 2.2.3.3.1.6. Nappe tellienne (Oued Ziad)

- **2.2.3.3.1.7. Nappe du flysch massylien (Oued Ziad)** Il est présenté par des bancs durs (gré et calcaire) très minces qui n'empêchent pas l'érosion de ces matériaux dans lesquels se développent toutes les formes de glissement et de ravinement. Le Flysch Massylien présente une zone de transition entre le domaine des Flyschs et le domaine externe des séries Telliennes.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

- **Sénonien a micro brèches et a blocs** : Aux environs de la route de Mechta Tafrent, au sud-ouest du parc du Djebel Ouahch, émerge une série distincte de flysch contenant des microbrèches qui remontent au Crétacé supérieur et présentent des caractéristiques massyliennes. Ce faciès particulier se distingue du faciès tellien, formant une couche clairement délimitée qui a été déposée dans un domaine paléogéographique distinct, potentiellement situé au nord de la zone de dépôt ultratellienne (Bouillin, 1977; P.E. Coiffait, 1992). Composée d'une alternance de calcaires microbréchiqes et de pélites marneuses micacées, cette série présente les séquences turbiditiques typiques des flyschs. Situé en position distale dans le bassin, suivant la séquence de Bouma, il recouvre les marno-calcaires telliens de la région de Constantine (Bougdal et al., 2007).

### 2.2.3.3.1.8. Mio-Pliocène

- **Continental Mio-Pliocène** : Cette formation domine et affleure sur toute la surface du bassin versant d'Oued Mgharouel, et seulement la partie aval du bassin versant d'Oued Ziad, représentant une période géologique caractérisée par des dépôts continentaux provenant de diverses sources sédimentaires.

La zone d'étude regroupe principalement des terrains du Néogène continental. Des conglomérats rougeâtres marquent la base du Miocène inférieur et constituent une zone limitée le plus souvent par des failles. Le Miocène moyen, laguno-lacustre, comprend deux couches : une couche inférieure formée de marnes grises à gypse et Gastéropodes, et une supérieure comprenant des marnes légèrement beiges où apparaissent des chenaux.

Le Miocène supérieur continental est une forme de dépôts détritiques rougeâtres comparable à celui du Pliocène. La sédimentation est composée d'argiles rougeâtres quelquefois sableuses et de calcaires lacustres (Coiffait, 1992).

### 2.2.3.3.1.9 Quaternaire

- **Alluvions récentes** : se trouvant dans les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel, d'une formation limoneuse, des galets roulés et des graviers occupant la vallée du Rhumel et de ses principaux affluents, situées au centre du bassin versant d'Oued Mgharouel, au sud, et en aval du bassin versant d'Oued Ziad, ces alluvions représentent des dépôts sédimentaires relativement récents résultant de l'action des cours d'eau actuels et des inondations périodiques.

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITs PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

**-Terrasses, formations de pente et quaternaire indéterminé :** Localisées au centre et en aval des deux bassins versants, ces terrasses et formations de pente témoignent de processus géologiques anciens et divers, mais dont l'âge exact reste à déterminer correspondent à des glacis polygéniques qui forment des surfaces très faiblement inclinées.

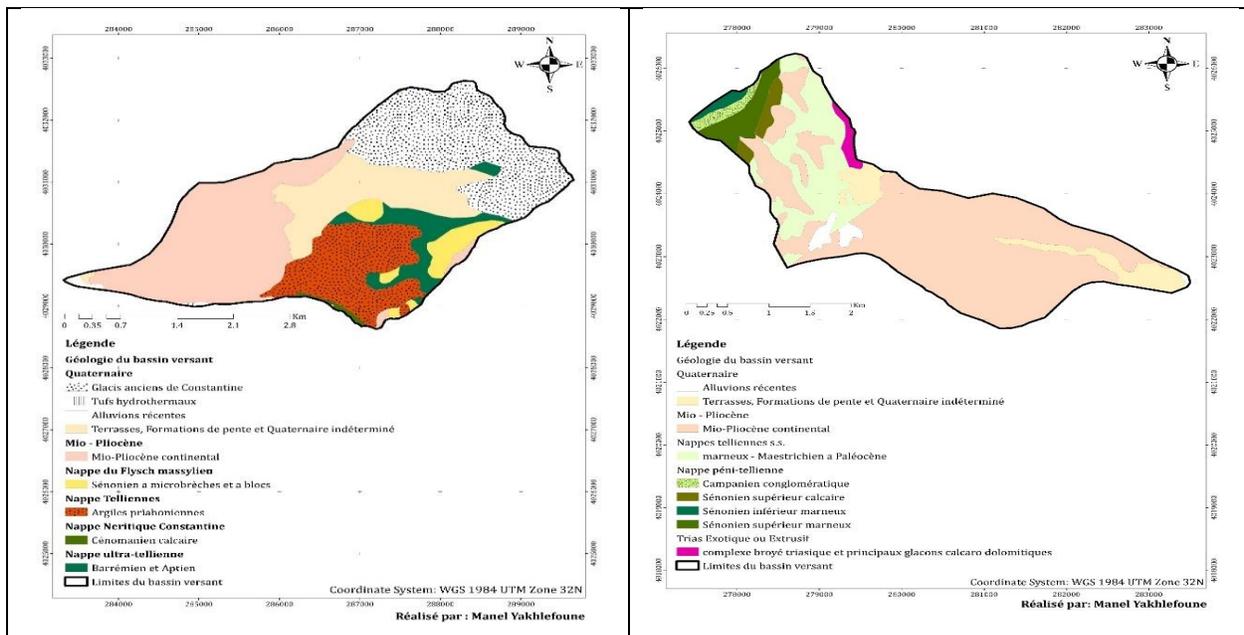


Figure 2.10 Cartes géologiques; A/ Bassin versant Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.

(Source : digitalisé depuis les cartes géologiques de 1/200000 de Constantine et d'El Aria)

### 2.2.4. Le Couvert végétal

La végétation a un impact déterminant sur les processus hydrologiques. Elle influence significativement la vitesse à laquelle l'eau s'écoule en surface, en ralentissant le ruissellement superficiel. De plus, la végétation affecte le taux d'évaporation, en augmentant souvent la transpiration végétale et en réduisant ainsi la quantité d'eau disponible pour l'évaporation directe depuis le sol ou la surface de l'eau.

Par ailleurs, le couvert végétal est également essentiel pour la capacité de rétention du bassin hydrographique. Les racines des plantes stabilisent le sol, réduisant l'érosion et favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol. Cette infiltration contribue à recharger les nappes phréatiques et à maintenir un débit stable des cours d'eau, même pendant les périodes de faibles précipitations. Pour déterminer la répartition du couvert végétal dans les bassins versants étudiés, nous avons

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

utilisé la carte de l'occupation du sol et de la couverture terrestre publié par Environmental Systems Research Institute (Esri) en 2020 en partenariat avec Impact Observatory et Microsoft, d'une résolution de 10m, la classification du sol a été fait par un modèle d'apprentissage profond (Deep Learning) et d'intelligence artificielle, réalisé à partir des données des satellites d'imagerie Sentinel-2 de l'Agence Spatiale Européenne (European Space Agency) (ESA), entraîné à l'aide de plus de 5 milliards de pixels Sentinel-2 étiquetés manuellement, échantillonnés à partir de plus de 20 000 sites répartis dans tous les principaux biomes du monde. Le modèle d'apprentissage profond sous-jacent utilise 6 bandes de données de réflectance de surface Sentinel-2 : bleu visible, vert, rouge, proche infrarouge et deux bandes infrarouges à ondes courtes. Pour créer la carte finale, le modèle est exécuté sur plusieurs dates d'imagerie tout au long de l'année, et les sorties sont composées en une carte finale représentative de 2020 avec une précision moyenne de 85 %.

### 2.2.4.1. Occupation du sol et couverture du sol du bassin versant d'Oued Rhumel

Le bassin versant d'Oued Rhumel se constitue de plusieurs composantes formant la couverture végétale (Tableau 2.15) qui sont les cultures, les herbes, les broussailles, les arbres, les zones urbaines, les terrain nus et les plans d'eau), chaque composante a une valeur spécifique basée sur le degré de son influence sur le phénomène d'inondation et d'érosion.

Les valeurs des surfaces de chaque classe de couverture de terrain ont été calculées à l'aide du logiciel ArcGIS et sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.15 : Répartition en surfaces des types d'occupation du sol/ couverture du sol dans le bassin versant d'Oued Rhumel

Type d'occupation du sol	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)
Crops/ Cultures	3041.066	57.0447
Grass / Herbes	18.2712	0.3427
Scrub/ Broussailles	1564.513	29.3474
Trees / Arbres	154.7938	2.9036
Urban area/ Zones Urbaines	463.9596	8.703
Bare soil/ Terrain Nu	63.30119	1.1874
Water /Eau	25.11651	0.4711

(Source : Auteure)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Cette répartition diversifiée des classes de couverture du terrain souligne l'influence des facteurs géographiques et humains sur l'occupation du territoire dans la région étudiée.

Afin de faciliter l'interprétation des composantes du sol dans le bassin versant d'Oued Rhumel nous les avons groupés en quatre classes principales qui sont : les zones agricoles, les zones forestières, les zones urbaines et les terrains nus.

### **2.2.4.1.1 Zone agricole**

Essentiellement caractérisée par les cultures céréalières et maraîchères, elle occupe une vaste superficie de 3041.066 km<sup>2</sup>, représentant ainsi 57.04 % de la surface totale. Cette zone est principalement située sur des terrains plats tels que les terrasses alluviales et en zone collinaire, avec des pentes relativement modérées, variant de 0 % à 14.89 %, parfois même plus élevées. La majeure partie de la surface étendue est recouverte par une végétation saisonnière, de plus en plus dominante en allant du Nord vers le Sud.

L'absence momentanée de la couverture végétale au sol, conjuguée à une exploitation excessive et à des pratiques culturales inadaptées à la morphologie des terrains, aggrave considérablement les effets de l'érosion hydrique. Dans le bassin supérieur (en amont de la confluence Rhumel-Boumerzoug), de vastes champs coexistent avec des étendues déboisées, favorisant ainsi le ruissellement et l'emportement de matériaux solides lors de précipitations intenses. Cette problématique est particulièrement préoccupante entre Constantine et El Kheneg (bassin moyen en raison des pentes prononcées), représentant un danger imminent pour l'agglomération de Constantine. Ces régions sont le théâtre de processus morphogénétiques ascendants, où le ravinement, les glissements, les éboulements et les coulées boueuses se conjuguent pour former des paysages de bad-lands. En outre, ces terrains érodés jouent un rôle crucial en tant que réservoir fournissant les éléments solides entraînés vers l'aval (la ville de Constantine) par les eaux de pluie lors de chaque précipitation importante. Ils contribuent également à l'élévation des lits des oueds Rhumel et Boumerzoug, diminuant ainsi la pente d'écoulement de ces cours d'eau et facilitant leur débordement.

Les types de végétation fournissant une protection partielle à faible intensité prédominent dans le bassin. Leur distribution spatiale et temporelle augmente progressivement du Sud vers le Nord, en parallèle avec la diminution des précipitations. Cette configuration impacte la variabilité de

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

l'écoulement de surface, en termes de débits liquides, et joue un rôle dans l'érosion des sols, contribuant à la charge solide transportée.

### 2.2.4.1.2. Zone forestière

La zone forestière regroupe des terrains comprenant des arbres, des maquis et des broussailles, offrant une protection constante contre le ruissellement et l'érosion hydrique. Elle couvre une superficie totale d'environ 1737.578 km<sup>2</sup>, représentant ainsi 32.59 % de la surface totale des bassins versants. Cette zone est principalement située dans des terrains escarpés, classés morphologiquement comme une zone montagneuse, caractérisée par des pentes d'environ 8.84 % et des altitudes d'environ 895 mètres. Des exemples de cette localisation comprennent le versant du Mansourah en rive droite du Rhumel, la forêt de pins sur les versants de Sigus, ainsi que des arbustes de pins d'Alep sur les versants Sud de Guerioun et de Fortass.

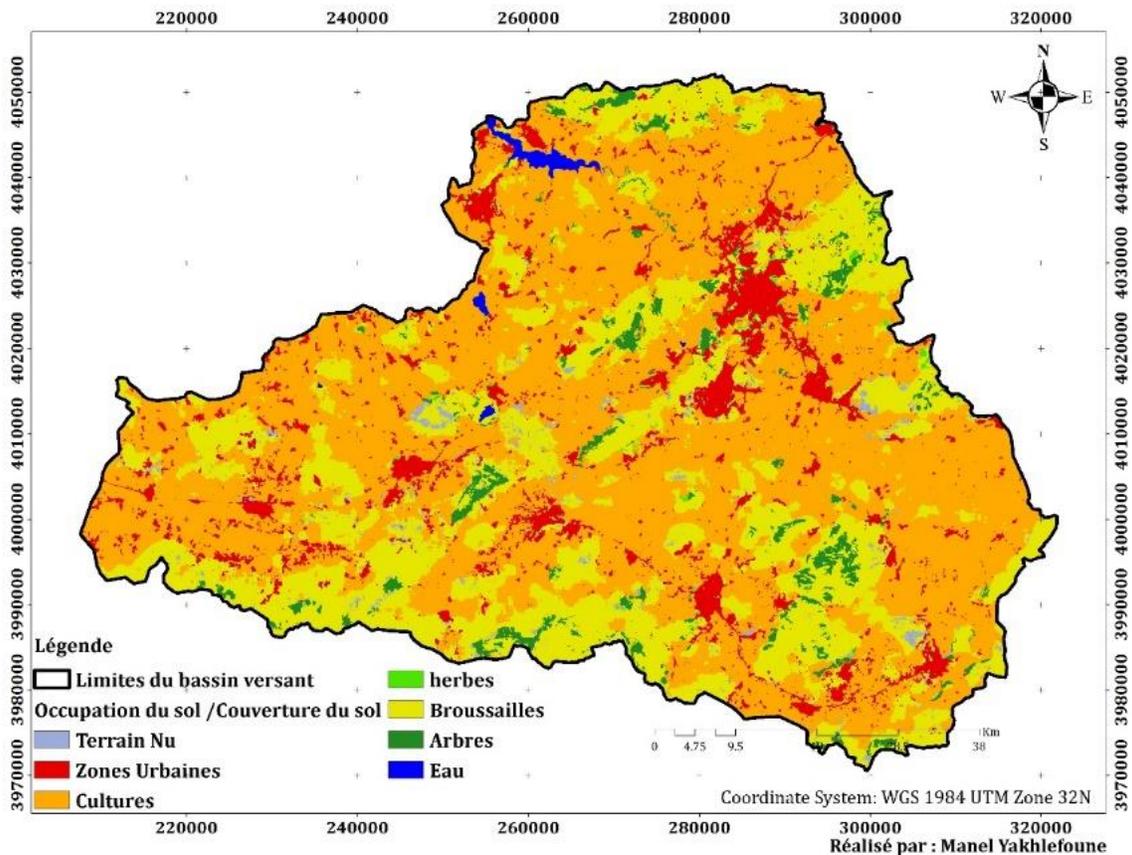


Figure 2.11 Carte d'occupation du sol/ couverture du sol du bassin versant d'Oued Rhumel  
(Source : ESRI 2020 + traitement auteure)

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

### **2.2.4.1.3. Zone urbaine**

En ce qui concerne les centres urbains et périurbains des chefs-lieux de districts et de communes tels que Constantine, Ain M'lila, Ain Smara, El Khroub, Hamma Bouziane, Didouche, Mourad, Ibn Ziad etc... Ces zones couvrent une superficie de 463.96 kilomètres carrés, soit 5,32 % de la superficie totale du bassin versant.

Les principaux centres urbains du bassin versant d'Oued Rhumel s'étendent le long des cours d'eau d'Oued Rhumel et Oued Boumerzoug. Ces cours d'eau reçoivent et transportent les déchets des eaux usées ainsi que les divers éléments abandonnés par les différentes installations industrielles, principalement situées en amont de la confluence entre le Rhumel et le Boumerzoug (Palma, Boumerzoug, Chaabat Erssas, Ain Smara, Oued Hamimine, El Khroub). Cela pose un problème d'obstruction au niveau du pont du diable (secteur Bardo), entraînant ainsi un risque potentiel d'élévation du niveau de l'eau lors des crues. Ces installations industrielles déversent directement leurs eaux usées et leurs déchets solides dans le lit principal du cours d'eau (blocs, panneaux).

### **2.2.4.1.4. Terrain Nu**

Ce sont des terrains nus ou presque dépourvus de végétation en permanence, qui correspondent à des affleurements rocheux se manifestant sous forme de pointements et de falaises imposantes, comme les massifs calcaires de Constantine, les plateaux calcaires d'Aïn El Bey et de Mansourah. Leur superficie totale est de 63.30 km<sup>2</sup>, représentant ainsi 0.0118 % de la superficie totale.

L'absence de végétation favorise l'écoulement superficiel, particulièrement lors de fortes précipitations. En revanche, le phénomène d'interception réduit le ruissellement car une partie de l'eau de pluie est retenue par le feuillage des arbres et évaporée. Ainsi, le manque ou la discontinuité de couverture végétale contribue à l'irrégularité des débits et à l'occurrence de crues importantes, surtout sur les terrains en pente et les sols sensibles à l'érosion.

### **2.2.4.2. Occupation du sol, couverture du sol des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel**

La répartition des classes de l'occupation du sol et de la couverture du sol dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel est caractérisée par une diversité géographique et une occupation variable des surfaces (Fig 2.12).

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GENERALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITES PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

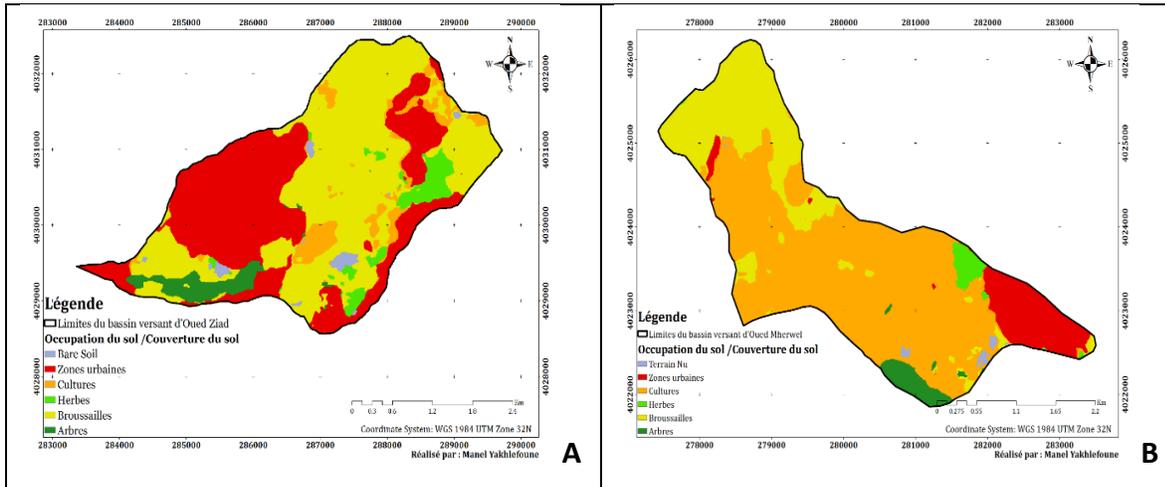


Figure 2.12 : Carte d'occupation du sol/ couverture du sol ; A/ bassin versant Oued Ziad, B/  
bassin versant d'Oued Mgharouel

(Source : ESRI 2020 + traitement auteure).

À partir des données fournies dans la figure ci-dessus, il est observé que les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel sont dotés d'une couverture végétale diversifiée. Des observations notables incluent :

### 2.2.4.2.1. Les terrains nus

Bien qu'ils couvrent une superficie modeste dans les deux bassins versants soit  $0.15 \text{ km}^2$ , représentent  $1.27\%$  de la surface du bassin versant d'Oued Ziad sont principalement localisés dans le sud et le centre du bassin versant, et  $0.052 \text{ km}^2$ , représentant  $0.56 \%$  du bassin versant d'Oued Mgharouel caractérisée par de petites taches localisées au sud-est du bassin versant.

### 2.2.4.2.2. Les zones urbaines

Les zones urbaines occupent une vaste superficie du bassin versant d'Oued Ziad à savoir  $4.43 \text{ km}^2$ , soit  $37.00\%$ , se concentrent principalement à l'ouest et au sud du bassin versant. Tandis que pour le bassin versant d'Oued Mgharouel elles occupent une petite surface de  $0.896 \text{ km}^2$  qui représente  $9.69 \%$  de la surface totale du bassin, située dans la partie aval du bassin versant et englobe une partie de la cité Boussouf à savoir le groupement du 7ème km et la cité des médecins.

### 2.2.4.2.3. Les cultures

Elles couvrent une petite surface du bassin versant d'Oued Ziad située au centre et au Nord-Est et représentent  $0.75 \text{ km}^2$  soit ( $6.26\%$  de la surface). En revanche, pour le bassin versant d'Oued

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Mgharouel, les zones cultivées constituent la classe dominante du bassin versant, elles couvrent une vaste étendue de 5.689 km<sup>2</sup>, représentant 61.48 % du bassin versant. Elles sont réparties au milieu du bassin versant entre sa partie amont et aval.

### 2.2.4.2.4. Les herbes

Cette classe représente une petite surface dans les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel, soit 0.51 km<sup>2</sup> (4.24%) et 0.177 km<sup>2</sup>, représentant (1.91 %) respectivement. Elle est localisée principalement dans les parties du Nord-Est des deux bassins versants.

### 2.2.4.2.5. Les broussailles

Couvrant la plus grande partie du bassin versant d'Oued Ziad avec une superficie de 5.67 km<sup>2</sup> (47.39%), sont principalement situées un peu partout en amont au milieu et en aval du bassin versant. Tandis que pour le bassin versant d'Oued Mgharouel les Broussailles couvrent une superficie de 2.181 km<sup>2</sup>, soit 23.58 % du bassin versant, cette classe est concentrée principalement à l'extrême Est et au Nord-Ouest du bassin versant (Tableau 2.16).

### 2.2.4.2.6. Les arbres

Les herbes couvrent une petite superficie dans les bassins versants d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel, représentant respectivement 3,83 % (0,46 km<sup>2</sup>) et 2,79 % (0,258 km<sup>2</sup>), principalement situées au sud-ouest et au sud de ces bassins.

Tableau 2.16 : Répartition en surfaces des types d'occupation du sol/ couverture du sol dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel.

Occupation du sol/ Couverture du sol	Bassin versant d'Oued Ziad		Bassin versant d'Oued Mgharouel	
	Surface (km <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)	Surface (km <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)
Terrain Nu	0.152296	1.273303	0.052	0.56
Zone urbaine	4.425783	37.00277	0.896	9.69
Cultures	0.749095	6.262977	5.689	61.48
Herbes	0.50716	4.240231	0.177	1.91
Broussailles	5.668143	47.3898	2.181	23.58
Arbres	0.458207	3.830941	0.258	2.79

(Source : Auteure).

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMETRIQUE)

Cette répartition détaillée des classes de la couverture de terrain met en lumière la variété des caractéristiques de surface dans les deux bassins versants, reflétant l'impact des activités humaines et des caractéristiques naturelles de la région.

### **Conclusion du chapitre**

Au début de cette partie du travail, nous nous sommes fixés comme principal objectif l'analyse fine du cadre naturel et l'étude des principaux traits physiques de chaque bassin versant englobant des aspects tels que la physiographie, la morphométrie, la topographie, le réseau hydrographique, la géomorphologie, la géologie, la lithologie, ainsi que le couvert végétal et sa perméabilité, tous ayant un impact sur le comportement hydrologique. En adoptant une démarche multiscalaire, nous avons initié notre analyse à une échelle régionale en étudiant le bassin versant d'Oued Rhumel dans son ensemble. Par la suite, nous avons affiné notre focus à une échelle locale pour examiner plus spécifiquement les sous-bassins d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel. Cette approche nous a permis de mieux appréhender les particularités hydrologiques de chaque bassin en fonction des données disponibles, enrichissant ainsi notre compréhension de la zone d'étude.

Le bassin versant de l'Oued Rhumel présente une diversité physique notable dans son ensemble : il passe d'une région relativement plane à un relief montagneux. La partie nord du bassin est caractérisée par la prédominance d'unités telliennes et des nappes de flysch, tandis que la partie méridionale est principalement composée de dépôts associés à l'unité carbonatée constantinoise et à des formations peu ou non déformées par la tectonique (formations mio-plio-quadernaires). Il est caractérisé par une couverture végétale importante qui occupe plus de la moitié de sa surface, ce qui lui qualifie comme un bassin avec une forte perméabilité dans son ensemble.

Les bassins versants d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel sont situés dans des régions montagneuses, leurs parties amont issues des montagnes de Chettaba et de Djebel el Wahch respectivement, tandis que leurs parties aval sont souvent marquées par une urbanisation anarchique, accentuée par un relief escarpé, avec des pentes moyennes à fortes (selon la classification d'ORSTOM) variant de 12% à 35% qui occupent plus de la moitié de la surface des deux bassins versants. Ces bassins présentent une forme allongée, avec un indice de compacité supérieur à 1 (1.32 pour Oued Ziad et 1.56 pour Oued Mgharouel), en ce qui concerne le réseau hydrographique, les deux bassins versants

## CHAPITRE II : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES BASSINS VERSANTS : PRINCIPAUX TRAITS PHYSIQUES (CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE ET MORPHOMÉTRIQUE)

présentent un réseau hydrographique assez développé en amont, constitué principalement de micro-bassins versants à caractère torrentiel.

En ce qui concerne la géologie, on y trouve une diversité de formations géologiques, et un couvert végétal faible en aval, où l'urbanisation se présente fortement, avec un temps de concentration relativement court soit 1.85 heures pour le bassin versant d'Oued Ziad et 1.67 heures pour celui d'Oued Mgharouel, ce qui indique un déplacement rapide de l'eau à travers le bassin. Cela peut exacerber les conséquences d'un ruissellement intense, surtout en présence des pentes prononcées qui peuvent accentuer ce phénomène, provoquant ainsi des dommages considérables aux enjeux environnantes. Donc, les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel présentent des caractéristiques physiques assez spécifiques, ce qui semble favoriser le ruissellement de surface favorisant ainsi le déclenchement rapide de l'aléa inondation.

Cette analyse préliminaire nous a permis d'évaluer les réponses hydrologiques face aux conditions environnementales, ce qui jettera les bases nécessaires pour élaborer des stratégies de gestion du risque adaptées et efficaces, qui seront développées et approfondies dans les chapitres suivants.

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

### **Introduction**

L'étude d'un bassin versant requiert une approche intégrée qui prend en compte divers facteurs influençant le régime hydrologique d'un Oued. Outre les éléments géographiques, géologiques et morphologiques, l'analyse hydro-climatologique joue un rôle crucial dans l'étude de la dynamique hydrologique d'un bassin versant (Bendjema, 2020).

Dans ce chapitre, nous nous procédons en première partie à présenter le climat général qui caractérise le bassin versant d'Oued Rhumel à échelle régionale.

Dans une deuxième partie, nous effectuons une analyse approfondie des deux bassins versants d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel à échelle locale. Il s'agit de faire une étude détaillée des facteurs climatiques et hydrologiques influençant le régime des deux bassins versants, cela nous permettra non seulement de caractériser le micro climat dominant dans les deux bassins versants, mais aussi de saisir les possibilités et la capacité des bassins versants à générer des écoulements, ainsi que d'évaluer les critères requis pour la dimension des infrastructures hydrauliques et les spécificités des structures d'évacuation des crues. Dans cette perspective, nous allons déterminer les débits de pointe dans chaque bassin versant, qui sont responsables des inondations pour les différentes périodes de retour allant de 10 ans jusqu'à 1000 ans, en analysant les pluies journalières maximales qui sont responsables de déclenchement des crues cela nous permet de déterminer la crue historique de référence qui s'est passé le 19 septembre 2018 dans le bassin versant d'Oued Ziad, ensuite nous allons estimer l'apport moyen interannuel et le transport solide dans les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel. Les résultats obtenus de l'analyse climatique et hydrologique constituent une base solide et essentielle pour le chapitre suivant de notre travail de recherche qui nous permet d'élaborer une cartographie précise de l'aléa inondation dans les deux bassins versants à travers la réalisation de scénarios de pluie pour les différentes périodes de retour.

### **3.1. Contexte climatique du bassin versant d'Oued Rhumel**

Vu la grande surface du bassin versant d'Oued Rhumel et la difficulté d'accès aux données climatiques enregistrés dans les stations répartis dans la totalité du bassin versant, et selon la disponibilité des données recueillis nous nous concentrons notre étude du contexte climatique du bassin sur les étages bioclimatiques et les précipitations moyennes mensuelles.

#### **3.1.1. Les domaines bioclimatiques**

L'ensemble du bassin d'Oued Rhumel est majoritairement influencé par un climat semi-aride (Fig 3.1). Du fait de sa position géographique, Constantine se trouve à la jonction entre l'Atlas tellien

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

"modéré" au nord et l'Atlas saharien "exotique" au sud. De surcroît, la topographie variée de la région entraîne une diversité climatique significative.

Les bassins de Constantine sont influencés par les masses d'air polaire et tropical, avec des perturbations météorologiques accentuées par le front polaire et l'air méditerranéen. Cette région connaît un climat méditerranéen tempéré au nord et semi-aride au sud, avec des précipitations cycloniques et des variations thermiques engendrant des averses orageuses. Les variations topographiques influencent la distribution des éléments hydro climatiques, donnant un climat semi-humide avec des étés chauds et secs et des hivers frais et pluvieux.

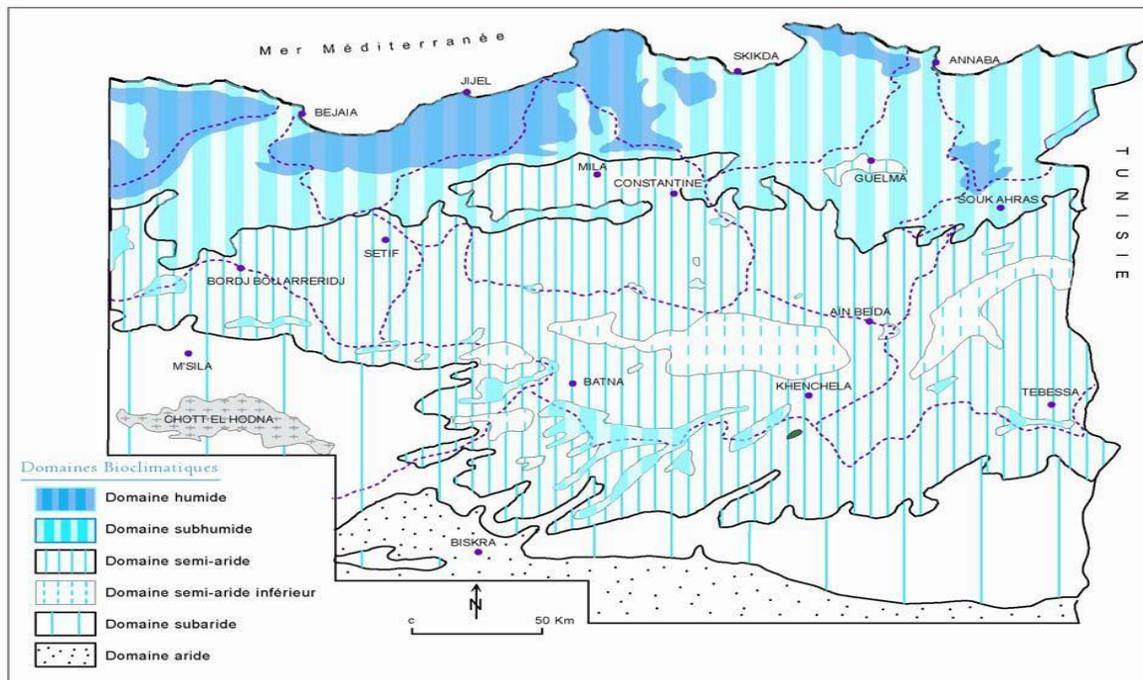


Figure 3.1 : Les étages bioclimatiques au Nord-Est de l'Algérie

(Source : Mebarki, 2005 in Kateb, 2020)

### 3.1.2. Les Précipitations

La carte de répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin versant d'Oued Rhumel (Fig 3.2) a été élaborée en se basant sur la carte pluviométrique de l'Algérie du nord réalisée par l'institut national de cartographie (INC- 1993), cette carte a été réalisée en utilisant les données fournis par l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH) dans le cadre d'un projet initié et financé par le PNUD (Programmes de développements des Nations Unies), Etude des ressources en eau d'Algérie (ALG 88/021) pour une période de 60 ans s'étendant de (1922-1960) et (1969-1989).

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Nous avons exploité les données de 16 stations (Tableau.1) qui se trouvent à l'intérieur et aux alentours du bassin, ensuite nous avons fait l'interpolation des stations par ArcMap pour extraire la carte finale des isohyètes (Fig 3.2).

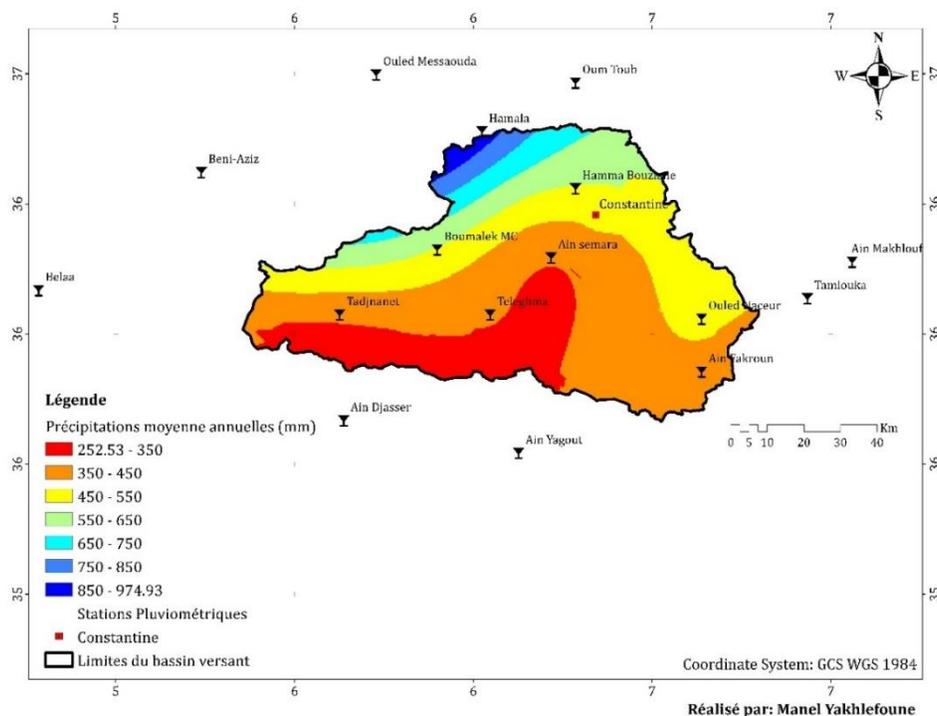


Figure 3.2 : Répartition des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant d'Oued Rhumel

(Source : ANRH + Auteure)

La carte montre une tendance générale : les précipitations diminuent du Nord vers le Sud à mesure que l'on s'éloigne du littoral. Cette diminution est principalement due à la perte progressive d'humidité atmosphérique lors du passage des courants aériens à travers les chaînes montagneuses, de Bejaia à Collo, incluant la chaîne numidique et les massifs anciens de la petite Kabylie. Ainsi, le bassin versant d'Oued Rhumel se divise en trois zones pluviométriques distinctes

- La région septentrionale, précisément dans le Bas Rhumel, les précipitations sont abondantes, dépassant les 900 mm, principalement dans les massifs montagneux humides de la petite Kabylie, allant de Bejaia à Collo. Pres de la station de Hamala, les précipitations atteignent plus de 950 mm.

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

- Quant à la zone centrale, ou Moyen Rhumel, elle montre les premières traces de l'influence du relief, avec des précipitations situées entre 650 et 850 mm. Cette zone comprend principalement les reliefs de basses montagnes subhumides du Tell.
- Enfin, dans la zone méridionale, qui englobe les bassins semi-arides à arides des hautes plaines, les précipitations diminuent progressivement vers le sud. Cette région est clairement délimitée dans sa partie nord par l'isohyète 550 mm. La pluviométrie diminue vers la bordure sud, descendant jusqu'à 350 mm, avec des creux assez marqués, parfois inférieurs à 350 voire 252.53 mm, dans la zone des lacs salés entre les stations de Telghma et Ain Yagout.

Tableau 3.1 : Précipitations moyennes annuelles des stations pluviométriques dans le bassin versant d'Oued Rhumel.

Numéro	Nom de la station	X	Y	Precipitation Moyenne
1	Ouled Messaouda	6.08	36.71	1485
2	Hamala	6.34	36.57	920
3	Beni-Aziz	5.65	36.47	854
4	Hamma Bouziane	6.57	36.43	541
5	Boumalek MC	6.23	36.28	542
6	Belaa	5.25	36.18	399
7	Tadjnanet	5.99	36.12	374
8	Ouled Naceur	6.88	36.11	475
9	Ain semara	6.51	36.26	360
10	Ain Djasser	6	35.86	200
11	Ain Yagout	6.43	35.78	322
12	Tamlouka	7.14	36.16	415
13	Ain Makhoulouf	7.25	36.25	549
14	Teleghma	6.36	36.12	360
15	Ain Fakroun	6.88	35.98	409
16	Oum Toub	6.57	36.69	748

(Source : ANRH + traitement Auteure).

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

### 3.2. Contexte climatique des bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

L'analyse des conditions climatiques locales des sous-bassins versants d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel, en particulier les précipitations, revêt une importance vitale. Elle nous renseigne de manière essentielle sur les conditions d'écoulement aussi bien surfacique que souterrain, ce qui est nécessaire pour évaluer le fonctionnement hydrologique des cours d'eau (Gherissi, 2018).

Pour procéder à cette étude climatique, nous avons exploité les données météorologiques enregistrées à la station de Constantine (Ain El Bey) contrôlé par l'office nationale de météorologie (ONM) sur une période s'étalant de (1968 à 1993) pour étudier les températures, la tension en vapeur et l'évaporation, et une série de 11ans s'étalant de (2007 à 2017) pour étudier l'humidité de l'air.

En ce qui concerne les précipitations moyennes annuelles, outre les données collectées à partir de la station d'Ain El Bey, nous avons également rassemblé des données climatiques sur les précipitations moyennes mensuelles provenant de deux stations situées au plus près de nos sous-bassins versants. Il s'agit de la station de Hamma Bouziane, la plus proche du bassin versant d'Oued Ziad, et de la station de Constantine ANRH, plus proche du bassin versant d'Oued Mgharouel. Ces deux stations sont sous le contrôle de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de Constantine. Il convient de noter que les trois séries de données recueillies des trois stations de référence (voir Tableau 3.2) couvrent une même période de 30 ans, de 1988 à 2017.

Tableau 3.2 : Caractéristiques des stations pluviométriques de la zone d'étude

Station	Longitude (X)	Latitude (Y)	Altitude (Z)
Ain El Bey	851.66	338.49	694.00
Hamma Bouziane	848.5	352.8	460
Constantine ANRH	850.35	344.75	595

(Source : ANRH).

Les stations choisies sont déterminées selon des critères de régularité, de longévité des données disponibles et de fiabilité des données.

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

### 3.2.1. Température

L'analyse des températures revêt une importance capitale, car l'augmentation des températures moyennes peut exacerber le risque d'inondation en influençant divers processus hydrologiques et météorologiques. Ces facteurs incluent la fonte des glaciers et des calottes glaciaires aux niveaux des deux pôles, l'élévation du niveau de l'océan mondial, ainsi que l'intensification des précipitations résultant des températures plus élevées, ce qui modifie les schémas de précipitations et favorise la survenue d'événements météorologiques extrêmes tels que les tempêtes tropicales, les cyclones et les pluies torrentielles, augmentant ainsi le risque d'inondation. Le tableau ci-dessous montre les températures moyennes mensuelles enregistrées à la station de Ain El Bey Constantine pour une période de 26 ans (1968-1993).

Tableau 3.3 : Températures moyennes mensuelles à la station Ain El Bey (1968-1993)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avrl	Mai	Juin	Juil	Aout
Moyenne	21.28	16.22	11.13	7.74	6.80	7.72	9.53	11.90	16.46	21.46	24.94	25.25

(Source : Office nationale de météorologie).

Les données présentées dans le tableau des températures moyennes mensuelles (Tableau 3.3) indiquent que le mois de janvier enregistre les températures les plus basses de l'année, avec une moyenne de 6.8°C. En revanche, le mois d'août affiche les températures les plus élevées, avec une moyenne de 25.25°C. La moyenne annuelle est égale à 15°C.

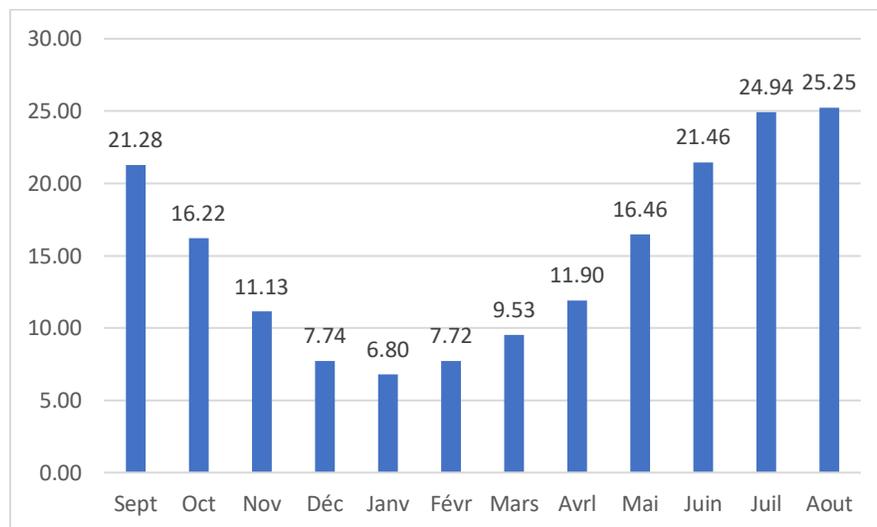


Figure 3.3 Histogramme de variation des températures moyennes mensuelle en °C

(Source : Auteure)

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Les données présentées dans l'histogramme (Fig 3.3) montrent qu'il y a une progression constante dans les températures jusqu'au mois d'août, qui se distingue comme le mois le plus chaud. On observe deux périodes distinctes : une période chaude s'étendant de juin à septembre, et une période froide plus prolongée allant de novembre à mars.

### 3.2.2. Tension de vapeur

L'analyse de la tension en vapeur fournit une base précieuse pour les prévisions météorologiques et hydrologiques, car elle offre des indices cruciaux sur les conditions météorologiques susceptibles de conduire à des précipitations abondantes et à des événements météorologiques extrêmes puisqu'elle permet d'estimer le potentiel de formation de nuages et de précipitations.

Tableau 3.4 : Tension de la vapeur moyennes mensuelles à la station Ain El Bey (1968-1993)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avrl	Mai	Juin	Juil	Aout
Moyenne	14.14	11.88	9.78	8.20	7.69	8.05	8.90	9.98	12.14	14.16	15.55	15.60

(Source : Office nationale de météorologie)

La tension de vapeur est liée à l'humidité atmosphérique, et des valeurs élevées peuvent indiquer une plus grande disponibilité d'eau dans l'atmosphère, les valeurs représentées dans le (tableau 3.4), indique que le mois d'août enregistre la valeur la plus élevée de la pression de la vapeur soit 15.60 millibars tandis que le mois de janvier enregistre la valeur la plus faible 7.69 millibars. La moyenne annuelle de la tension de de la vapeur est égale à 11.3 millibars.

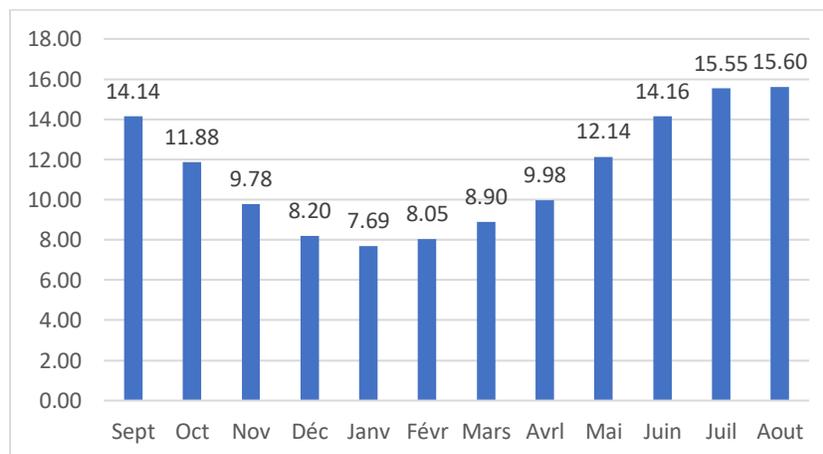


Figure 3.4 Histogramme de variation des valeurs de la tension de la vapeur moyenne mensuelle en millibars.

(Source : Auteure)

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Depuis l’histogramme (Fig 3.4) on observe une diminution progressive des valeurs de la tension en vapeur du mois de septembre jusqu’au mois de janvier, et une augmentation considérable des valeurs de la tension de vapeur du mois de février jusqu’au mois d’aout. Il est à noter qu’une augmentation de la tension de vapeur peut être associée à des températures plus élevées, ce qui peut favoriser la formation de phénomènes météorologiques extrêmes tels que les tempêtes tropicales, les cyclones et les fronts météorologiques intenses.

### 3.2.3. Evaporation

L’analyse de l’évaporation offre des renseignements fondamentaux sur le cycle de l’eau atmosphérique. En comprenant les mécanismes de l’évaporation, les spécialistes du climat peuvent mieux saisir la répartition de l’humidité dans l’air, les schémas de précipitations, ainsi que les fluctuations de température. Cette compréhension permet de prédire les évolutions climatiques, d’évaluer les risques de sécheresse et d’inondation, et d’appréhender les répercussions du changement climatique sur les réserves d’eau et les écosystèmes.

Tableau 3.5 : Evaporation moyennes mensuelles à la station Ain El Bey (1968-1993)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avrl	Mai	Juin	Juil	Aout
Moyenne	134.18	92	58	44	43	47	57	67	94	139	182	186

(Source : Office nationale de météorologie)

D’après les données du (tableau 3.5), il est observé que les mois avec des taux d’évaporation élevés, dépassant les 90 mm, s’étendent de mai à octobre. En revanche, les mois affichant des taux d’évaporation inférieurs à 70 mm vont de novembre à avril. Il est à noter que la moyenne annuelle est de 1145 mm

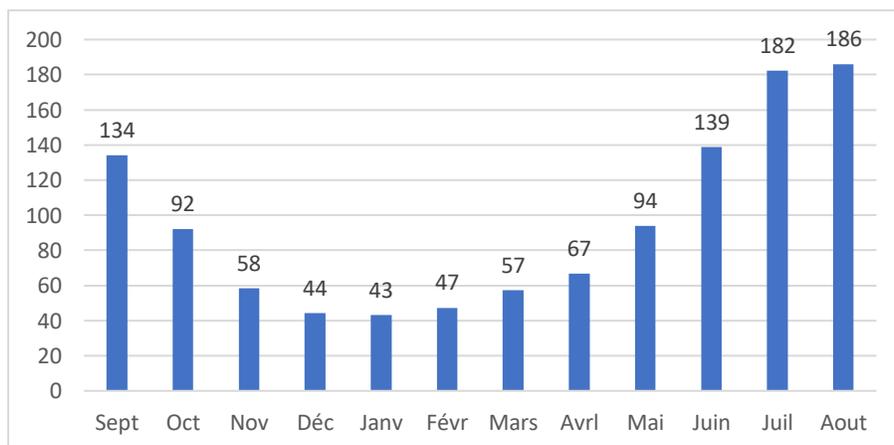


Figure 3.5 Histogramme de variation des valeurs de l’évaporation moyenne mensuelle en mm

(Source : Auteure)

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Selon l'histogramme (Fig 3.5), les taux d'évaporation faibles signalent généralement une évaporation réduite, pouvant entraîner des conditions de sécheresse, une baisse de l'humidité atmosphérique et éventuellement des difficultés pour les ressources en eau et les écosystèmes associés, cela correspond aux mois de décembre, janvier et février. À l'inverse, des taux d'évaporation élevés indiquent une évaporation plus importante, ce qui peut favoriser une hausse de l'humidité de l'air, des précipitations potentielles et influencer les schémas climatiques locaux et régionaux, cela correspond aux mois allant du mai jusqu'à Octobre.

### 3.2.4. Humidité de l'air

L'importance de l'humidité dans le cycle hydrologique réside dans son double rôle : d'une part, elle témoigne de l'approche plus ou moins imminente de la condensation atmosphérique, et d'autre part, elle régule souvent le taux d'évapotranspiration du sol. Pour analyser l'humidité de l'air nous avons utilisé les données de la station d'Ain El Bey Constantine qui couvre une période de 11 ans (2007-2017), les valeurs sont exprimées en pourcentage.

Tableau 3.6 : Pourcentage de l'humidité relative moyenne à la station d'Ain El Bey (2007-2017)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avrl	Mai	Juin	Juil	Aout
Humidité relative Moyenne (%)	76.55	75.72	74.24	71.36	65.88	55.19	46.64	50.75	63.81	68.42	73.70	66.64

(Source : Office nationale de météorologie)

Les forts pourcentages de d'humidité peuvent signaler des conditions favorables à la création de précipitations et de nuages, ainsi qu'à des températures plus modérées. D'après le (tableau 3.6) on constate que le mois qui a enregistré un fort pourcentage de l'humidité est celui du mois de septembre soit 76.55%. À l'inverse, le mois qui a enregistré un faible pourcentage de l'humidité est celui du mois de Mars soit 46.64%. Il est à noter que des niveaux d'humidité faibles peuvent indiquer des conditions sèches, augmentant le risque d'incendies de forêt et entraînant des températures plus élevées.

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

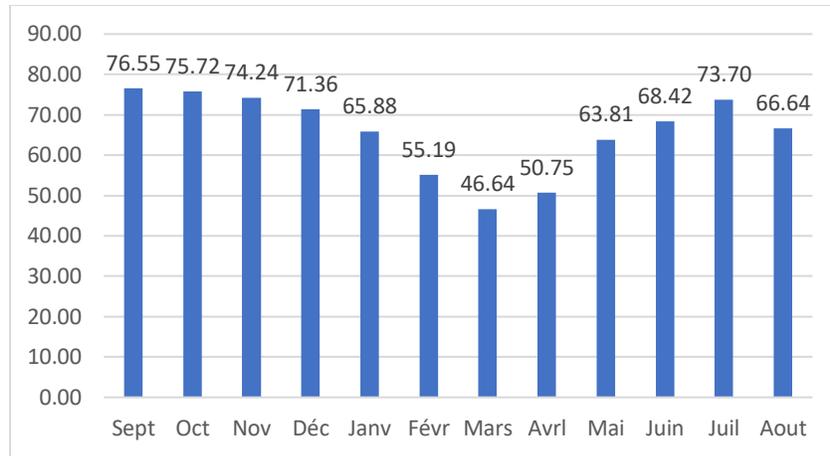


Figure 3.6 Histogramme de variation du pourcentage de l'humidité relative moyenne à la station d'Ain El Bey

(Source : Auteure)

Depuis l'histogramme (Fig 3.6) on constate que les pourcentages moyens correspondent aux mois de Février, Mars, et Avril avec des valeurs respectivement (55.19%, 46.64, 50.75) tandis que les fortes valeurs sont enregistrées dans les mois de septembre jusqu'au mois de janvier et du mois de mai jusqu'au mois d'Aout, ces valeurs dépassent la moyenne (50%), ils varient de 63.81% au 76.55%.

### 3.2.5. Analyse des précipitations

L'analyse des précipitations joue un rôle important dans la variabilité saisonnière et annuelle du débit des cours d'eau, constituant la principale source d'alimentation des rivières. Dans cette partie nous allons analyser les précipitations moyennes interannuelles et les précipitations moyennes mensuelles et saisonnière des stations étudiées.

#### 3.2.5.1. Précipitations moyenne interannuelles

L'étude des précipitations joue un rôle crucial dans la détermination du climat (Haoues, 2017). La région d'étude est située dans une zone climatique caractérisée par des isohyètes variant entre 400 mm et 600 mm. La répartition des précipitations moyennes interannuelles dans les trois stations pluviométriques de Constantine, Ain El Bey et Hamma Bouziane pour la période (1988-2017) sont données dans le (tableau 3.7) si dessous.

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Tableau 3.7 : Répartition des pluies moyennes interannuelles dans les trois stations (Hamma Bouziane, Constantine et Ain El Bey)

Année	Station Hamma Bouziane (ANRH)	Station Ain El Bey (ONM)	Station Constantine (ANRH)
1988	449.9	514	527.5
1989	359.4	371,3	389.6
1990	516.7	426	561.3
1991	604.7	510,8	568
1992	478.8	756,8	565
1993	379.8	401,8	448.5
1994	570.1	471,2	348.4
1995	575.1	534,8	631.6
1996	299.9	620,5	307.2
1997	593.6	506,9	608.3
1998	538.9	570,3	588.1
1999	481.8	514,2	538.3
2000	434.4	373,5	419.2
2001	297.4	463,5	327.8
2002	669.4	485,2	757.9
2003	593.6	767,6	628.9
2004	679.7	701	717.6
2005	426.5	325,5	472.5
2006	565.8	458.3	576
2007	477.8	480,7	513.1
2008	594.3	347,9	639.1
2009	358.6	627,6	676.7
2010	600.9	490,6	648
2011	565.2	571,8	568
2012	517.7	415,6	548.2
2013	599	385,5	570.3

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

2014	607.8	454	640.6
2015	266.2	592,4	485.7
2016	353	301,5	299.8
2017	513.5	296	542.7
Moyenne interannuelle	498.98	491.23	537.13

(Source : Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH) + Office nationale de météorologie (ONM))

D'après le tableau 11 constate que les précipitations moyennes interannuelles varient de 266.2 mm jusqu'au 767.6 mm, les fortes valeurs sont enregistrées dans les années 1992, 2002, 2003, 2004 pour une moyenne interannuelle qui dépasse 700mm.

La représentation graphique des pluies moyennes annuelles des stations pluviométriques étudiés sont illustrée dans la figure N°9, ci-après.

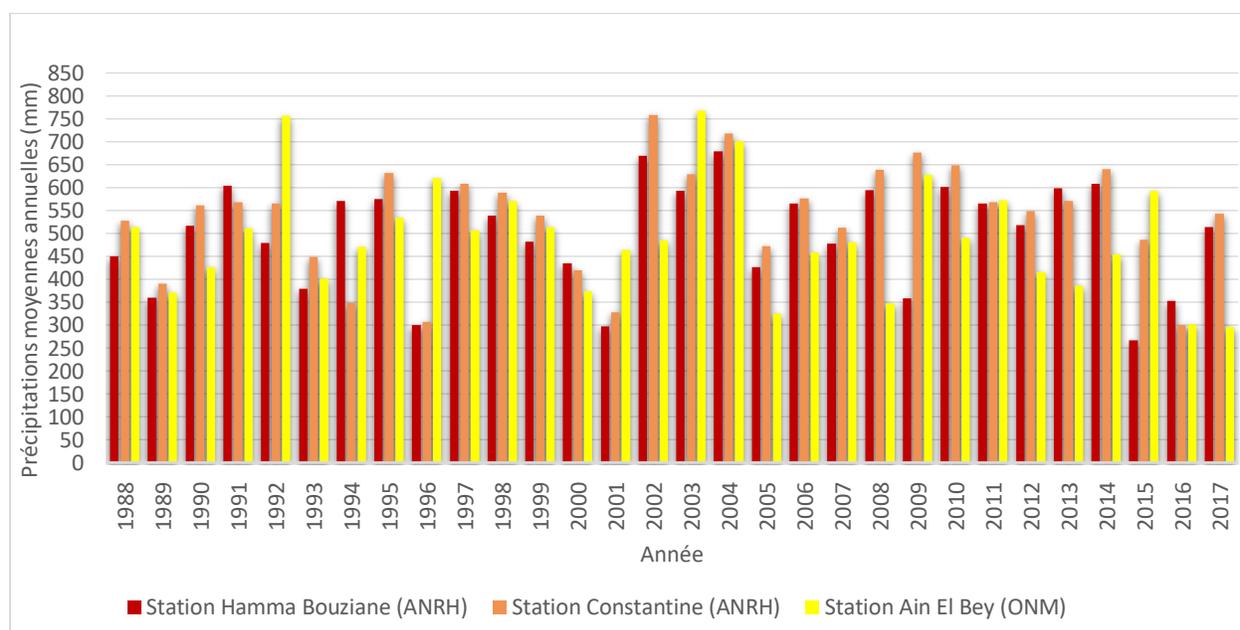


Figure 3.7 : Variation des précipitations moyennes annuelles dans les trois stations : Constantine, Ain El Bey et Hamma Bouziane (1988 – 2017).

(Source : Auteure)

La variabilité annuelle des précipitations est significative d'une année à l'autre pour les trois stations. Sur une période de 30 ans (voir Fig 3.7), 13 années ont connu des précipitations excédant la moyenne annuelle de 491.23 mm pour la station d'Ain el Bey, tandis que 17 années ont connu

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

des précipitations excédant la moyenne annuelle de 537.13 mm et 498.98 mm pour les deux stations de Constantine (ANRH) et El Hamma Bouziane.

Entre (les années 2002, 2003, 2004) les précipitations sont supérieures à la moyenne dans les trois stations étudiées avec un maximum de 767 mm, ceci caractérise une période relativement humide. D'après la (figure 3.7), on constate que les valeurs enregistrées dans les deux stations de Constantine et de Hamma Bouziane sont proches par rapport à ceux enregistré par la station de Ain El bey, cela dû à la distance entre les deux stations et aussi le lieu de chaque station.

En règle générale, les précipitations dans la région d'étude sont soumises chaque année aux variations pluviométrique

Les bassins versants étudiés présentent un régime climatique mixte. En amont, ils sont caractérisés par un climat subhumide, avec des précipitations interannuelles moyennes dépassant les 550 mm, provenant respectivement du Djebel Kellal pour le bassin versant d'Oued Ziad et Djebel Sidi Slimane pour le bassin versant d'Oued Mgherouel. En revanche, la partie aval est davantage sujette à un climat semi-aride, avec une pluviométrie annuelle moyenne inférieure à 550 mm.

### 3.2.5.2. Précipitations moyennes mensuelles

Les variations mensuelles des précipitations au fil de l'année ont un impact direct sur le débit des cours d'eau et la recharge des nappes phréatiques. Le tableau si dessous représente la variation des précipitations moyennes mensuelles de la station de Constantine pendant une période de 38ans et la station de Hamma Bouziane pour une série de 39ans.

Tableau 3.8 : Répartition des pluies moyennes mensuelles de la station de Hamma Bouziane (1988 - 2008) et la station de Constantine (1983 – 2021)

Mois \ Station	Hamma Bouziane (1988 - 2008)		Constantine (1983 - 2021)	
	P Moyenne	P (%)	P Moyenne	P (%)
Septembre	37.80	7.5	40.58	7.32
Octobre	34.10	6.76	45.50	8.20
Novembre	52.57	10.43	57.17	10.31
Décembre	83.80	16.62	84.76	15.28
Janvier	72.50	14.38	71.27	12.85
Février	50.83	10.08	60.35	10.88
Mars	48.23	9.57	65.47	11.80

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Avril	53.44	10.6	51.27	9.24
Mai	43.57	8.64	41.95	7.56
Juin	14.77	2.93	16.40	2.96
Juillet	4.81	0.95	4.21	0.76
Aout	7.74	1.54	15.72	2.83
Annuel	504.17	100	544.65	100

(Source : ANRH + Traitement personnel)

Selon le tableau 3.8, on constate que les précipitations qui tombent dans les mois du septembre au mois de mai (34mm jusqu'à 84 mm) sont plus importantes que celles qui tombent du mois de juin jusqu'au mois d'Aout variant de 4.21 mm jusqu'à 16.40 mm.

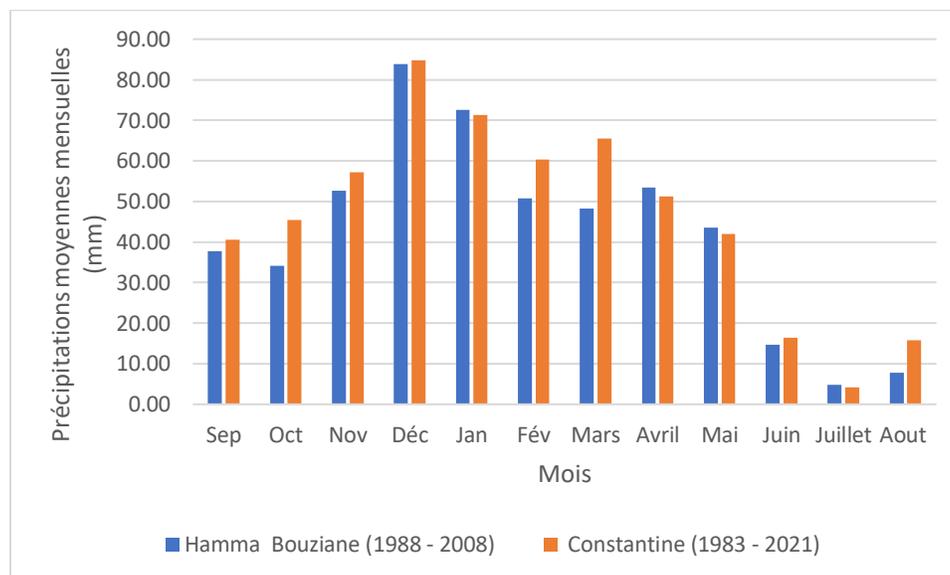


Figure 3.8 : Variation des précipitations moyennes mensuelles en mm (Station de Constantine 1983 - 2021 et la station de Hamma Bouziane 1988 - 2008)

(Source : A.N.R.H).

Selon la figure 3.8, on constate que le mois de juillet est le mois le plus sec avec des précipitations moyennes de 4.81 mm pour la station d'El Hamma Bouziane et 4.21 mm pour la station de Constantine (Tableau 3.8), tandis que le mois de décembre est le mois le plus pluvieux de l'année avec 83.80 mm et 84.76 mm pour les stations d'El Hamma Bouziane et Constantine respectivement.

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

### 3.2.5.3. Précipitations moyennes saisonnières

Il est essentiel d'analyser la variabilité saisonnière afin de déterminer si la diminution ou l'augmentation de la pluviométrie est propre à une saison spécifique ou à plusieurs saisons.

Tableau 3.9 : Répartition saisonnière des pluies moyennes de la station de Hamma Bouziane (1988 - 2008) et la station de Constantine (1983 – 2021)

Stations		Automne	Hiver	Printemps	Été	Total
Hamma Bouziane (1988 - 2008)	Pluies moyennes saisonnières (mm)	124.5	207.13	145.25	27.32	504.17
	Pourcentage des Pmoy saisonnières	25%	41%	29%	5%	100%
Constantine (1983 - 2021)	Pluies moyennes saisonnières (mm)	143.25	216.38	158.69	36.33	554.65
	Pourcentage des Pmoy saisonnières	26%	39%	29%	6%	100%

(Source : ANRH + Traitement personnel)

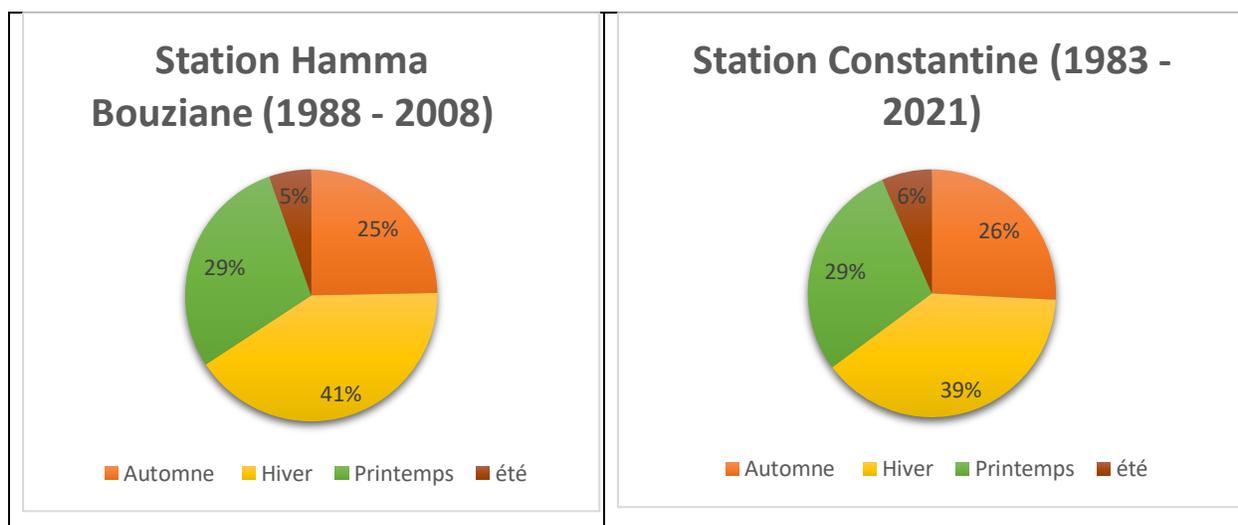
Les pluies de l'année sont divisées en quatre saisons agricoles (Tableau 3.9).

L'automne comprend les mois de septembre, d'octobre et de novembre.

L'hiver comprend les mois de décembre, janvier et février.

Les mois de printemps : Mars, Avril, Mai.

Les mois d'été : Juin, Juillet, et Août



## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Figure 3.9 Répartition saisonnière en pourcentage des précipitations moyennes annuelles ; a) station d'El Hamma Bouziane (1988-2017) ; b) station de Constantine (1983 – 2021).

(Source : ANRH + Traitement personnel)

L'analyse de variation saisonnière des précipitations montre que :

- L'été est la saison la plus sèche (de Juin à Aout), cette saison se caractérise par sa température moins élevée, avec une moyenne annuelle de 36.33 mm pour la station de Constantine, soit 6 % du total annuel, et 27.32 mm pour la station de Hamma Bouziane soit 5% du total annuel, et 36.33 mm pour la station de Constantine soit 6% du total annuel (Fig 3.9)
- On constate que le maximum des pluies tombe en saison de l'hiver (Tableau 3.9) dans les deux stations de Hamma Bouziane et de Constantine ANRH avec une moyenne annuelle de 207.13 mm soit 41% pour la station d'El Hamma Bouziane et 216.38 mm, soit 39 % Pour la station de Constantine.
- Les deux saisons d'automne et de printemps ont presque les mêmes quantités de Précipitations avec 124.5 mm pour la station de Hamma Bouziane et 143.25 mm pour la station de Constantine en automnes et 145.25 mm et 158.69 mm pour les deux stations respectivement pendant le printemps.

### 3.2.5.4. Analyse des pluies journalières maximales

L'étude des précipitations journalière maximales, joue un rôle essentiel dans la conception des ouvrages d'évacuation des crues et de protection contre les inondations surtout dans le domaine des études hydrotechniques, comme les études des cours d'eau. La connaissance des pluies journalières maximales est fondamentale pour la prédétermination des débits de crue qui constitue la partie la plus importante de l'étude.

L'étude se concentrera sur les données recueillies des stations pluviométriques d'El Hamma Bouziane, qui offre une série d'observations de 34 ans s'étalant de (1988 – 2021), et celle de Constantine ANRH qui couvre une période de 38ans s'étalant de (1984 – 2021), une durée amplement adéquate. Le choix de chacune de ces stations est motivé par deux facteurs principaux : sa proximité géographique de la zone d'étude et la disponibilité d'une série d'observations de plus de 30 ans, ce qui est largement suffisant pour l'étude du risque d'inondation.

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

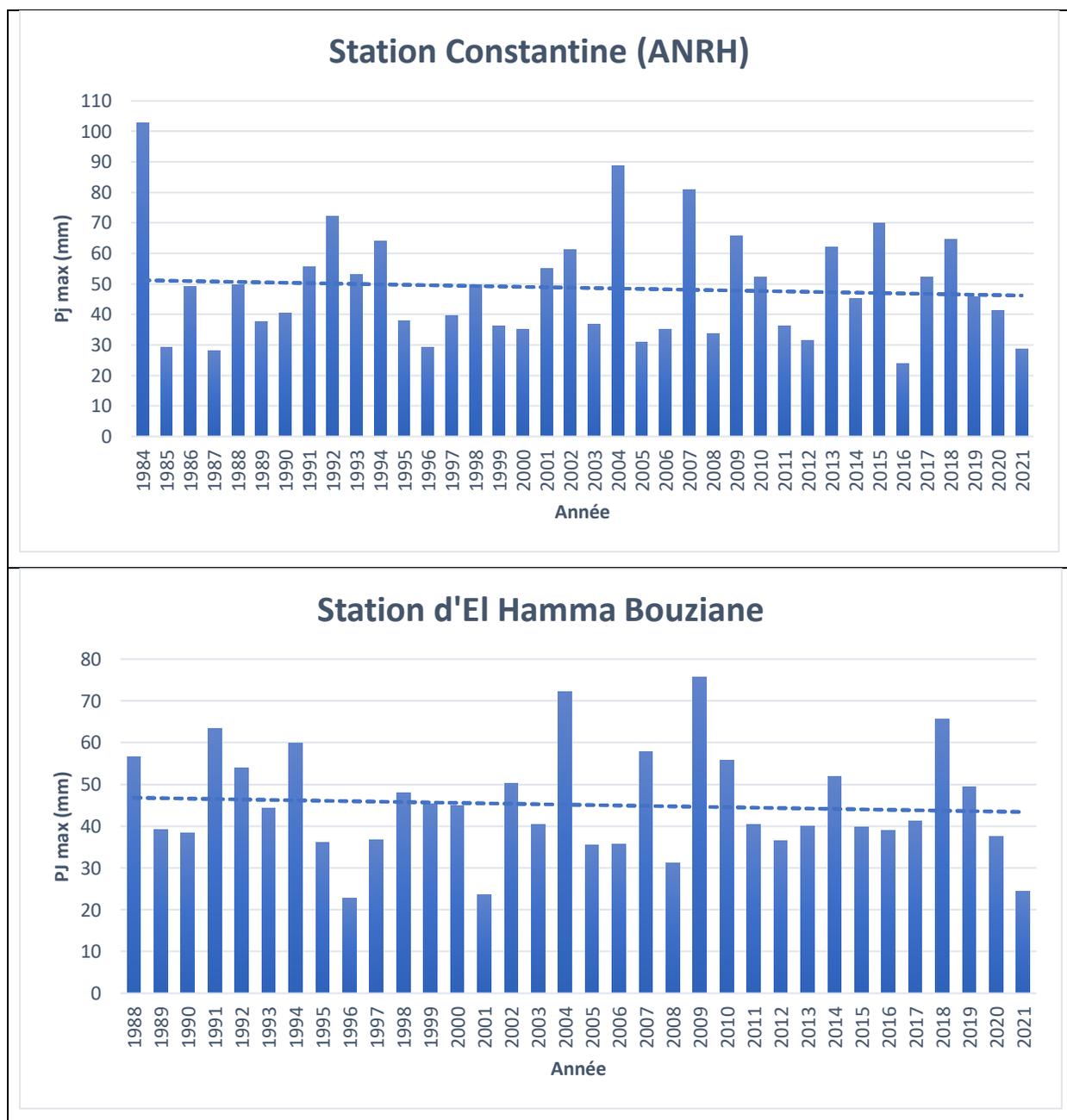


Figure 3.10 : Répartition des précipitations journalières maximales ; A) Station de Constantine ANRH (1984 - 2021) ; B) Station d'El Hamma Bouziane (1988 – 2021).

(Source : ANRH + Traitement personnel)

Selon la figure 3.10, la distribution des pluies maximum journalières, révèle une grande variabilité dans le régime temporel des pluies, en effet, les pluies journalières maximales ont dépassé la moyenne interannuelle soit supérieur à 50 mm/jour sur une période de 15 ans pour la station de Constantine ANRH et 13ans pour la station d'El Hamma Bouziane, dont 8 années sont communes pour les deux stations analysées, il s'agit des années (1991, 1992, 1994, 2004, 2007, 2009, 2010,

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

2018), où des pics de valeurs maximales relativement élevées ont été enregistrés, comparativement au régime hydrologique habituel des deux stations.

La valeur la plus élevée des  $P_{jmax}$  enregistrée dans les stations d'El Hamma Bouziane et Constantine ANRH est égale à 75.6 mm/jour et 102.4 mm/jour pour les années 2009 et 1984 respectivement. En revanche, la valeur la plus faible des  $P_{jmax}$  enregistrée est égale à 22.8 mm/jour, pour l'année hydrologique de 1996 à la station d'El Hamma Bouziane et 28mm/jour pour l'année hydrologique de 1987 à la station de Constantine ANRH.

### **3.3. Analyse fréquentielle des données pluviométriques**

L'analyse fréquentielle des précipitations journalières maximales se révèle crucial lorsqu'on étudie la survenance des événements extrêmes, puisqu'elle contribue à l'évaluation des débits de crue. Cette méthode statistique vise principalement à évaluer les probabilités futures d'événements en se basant sur des mesures des événements passés. Dans ce contexte, une analyse approfondie des données observées est cruciale.

L'analyse fréquentielle des pluies implique d'adapter la série de données des précipitations maximales à un modèle théorique pour évaluer l'intensité de pluie correspondant à une durée et à une période de retour spécifiques dont le but est d'évaluer l'amplitude des événements exceptionnels en relation avec leur fréquence et leur occurrence, en se basant sur des lois de probabilité. Cette démarche est essentielle pour estimer les débits de crue maximale.

L'analyse fréquentielle nécessite la vérification des hypothèses fondamentales, cela se déroule par étapes qui incluent :

- l'homogénéité (assurant que les données sont issues d'un échantillon homogène, ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence significative dans la moyenne des sous-échantillons)
- La stationnarité (fait référence à l'absence de tendance à la hausse ou à la baisse dans la série chronologique des données).
- Indépendance signifie qu'il n'y a pas d'autocorrélation dans les séries.

Pour faire cette analyse, nous avons utilisé le logiciel Hyfran Plus qui a été conçu pour l'analyse fréquentielle en hydrologie et spécialement pour des événements extrêmes, ou bien pour les débits pour chaque période de retour relevée.

#### **3.3.1. Présentation du logiciel Hyfran Plus**

C'est un logiciel d'analyse statistique des données développé par L'équipe du Pr. Bernard Bobée (Professeur Émérite à l'Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau-Terre et

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Environnement INRS-ETE, Québec). Il permet d'ajuster un nombre important de distribution statistique à une série d'observation de données, ainsi de vérifier les hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité, il a été conçu pour l'analyse fréquentielle en hydrologie et spécialement pour des événements extrêmes, ou bien pour les débits pour chaque période de retour relevée.

Les propriétés empiriques des deux stations pluviométriques de données d'observations ont été calculées à l'aide du logiciel Hyfran en utilisant la formule de Hazen et sont présentées dans le tableau 3.10 ci-dessous.

Tableau. 3.10 : Caractéristique empiriques des deux séries de données issues des deux stations pluviométriques d'El Hamma Bouziane et de Constantine

Données Statistiques	Bassin versant Oued Ziad	Bassin versant Oued Mgharouel
Nombre de données (n)	34	38
Minimum	22.8	23.8
Maximum	75.6	103
Moyenne	45.1	48.7
Ecart-type	12.9	18.1
Médiane	40.9	45.5
Coefficient de variation (Cv)	0.287	0.372
Coefficient d'asymétrie (Cs)	0.512	1.05
Coefficient d'aplatissement (Ck)	2.68	3.5
L'Exposant climatique (b) donné par l'ANRH	0.34	0.37

(Source : Traitement personnel)

La représentation graphique de l'observation de la probabilité au non dépassement, ainsi que l'histogrammes des observations classées par valeur pour les deux stations étudiées est donné dans la figure suivante (Fig 3.11).

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

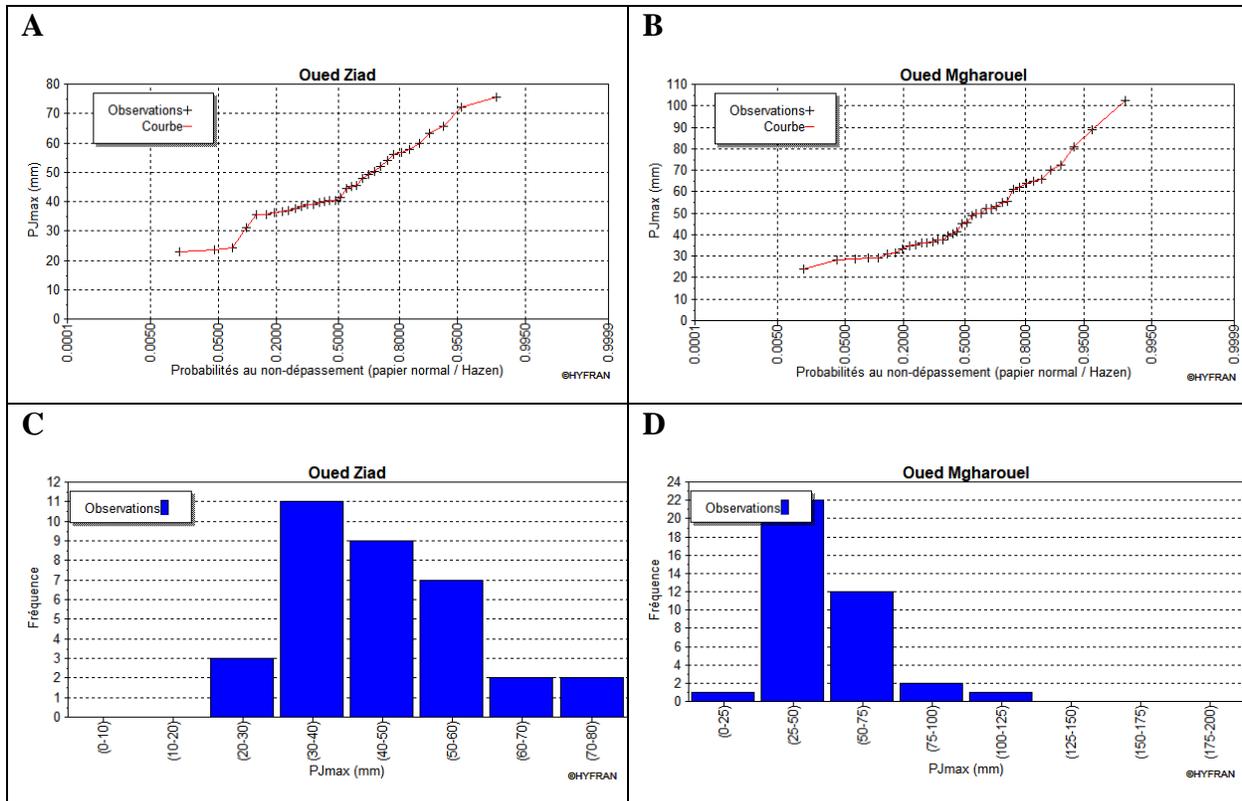


Figure 3.11 A et B/ Observation de la probabilité au non dépassement de la station Hamma Bouziane et Constantine ; C et D/ Observations classées par valeur de la station Hamma Bouziane et Constantine.

(Source : Traitement Auteure)

### 3.3.2. Ajustement des pluies journalières maximales aux lois de probabilité

Dans le domaine de l'hydrologie fréquentielle, diverses techniques sont disponibles pour ajuster les séries de données pluviométriques. L'efficacité d'une méthode d'estimation dépend de la distribution de probabilité utilisée, de la taille de l'échantillon et de ses caractéristiques spécifiques. Cependant, de nombreuses études comparatives, à la fois empiriques et théoriques, ont été réalisées afin d'identifier les conditions sous lesquelles une méthode d'estimation se révèle la plus performante pour une distribution statistique spécifique. La sélection d'une loi repose d'abord sur un ajustement graphique, puis sur un test de dispersion. La loi peut être acceptée ou rejetée en fonction de l'apparition des points sur le papier de probabilité.

L'Algérie connaît un climat extrêmement variable et imprévisible, ce qui rend crucial le recours à une distribution statistique asymétrique pour l'analyse des précipitations maximales quotidiennes. Dans le but de déterminer une intensité de pluie associée à une période de retour spécifique et pour obtenir des résultats plus précis. Nous avons procédé à un ajustement des séries de données

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

d'observations des précipitations journalières maximales quotidiennes en utilisant les lois théoriques qui conviennent bien au régime hydrologique méditerranéen et algérien. Il s'agit de la loi de Gumbel et la loi de Galton (log-normale) (Kim et al., 2020). Ce choix est justifié par l'ensemble des recherches menées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques et l'entreprise Hydro Projet Est Engineering sur la région de Constantine.

### 3.3.2.1. Ajustement à la loi de Gumbel

Il s'agit de la distribution double exponentielle, utilisée pour évaluer les valeurs de fréquence des précipitations maximales quotidiennes.

L'expression de la fonction de répartition de la loi de Gumbel est la suivante :  $f(x) = e^{-e^{-\gamma}}$

$$Y = \frac{x-x_0}{a} \quad \text{Avec :}$$

- $F(x)$  : fréquence au dépassement de la valeur de  $x$ .
- $a$  et  $X_0$  : paramètre d'ajustement de la loi de Gumbel dont : ( $X_0$ : Paramètre de position ;  $a$ : Paramètre de l'échelle différent de zéro et positif appelé aussi « gradex »).
- $Y$  : variable réduite de Gumbel
- $x$  : Variable étudié (précipitation maximale journalière ( $P_{jmax}$  en mm))

Puisque c'est une loi à deux paramètres, cette loi s'ajuste facilement à des ajustements graphiques. Avant d'entamer le processus d'ajustement, il est nécessaire de suivre les étapes ci-après :

- Organiser les valeurs des précipitations par ordre croissant en leur attribuant des rangs de 1 à  $n$ .
- Pour chaque valeur de précipitation, déterminer la fréquence expérimentale à l'aide de la formule de Hazen puisque des simulations ont montré que pour la loi de Gumbel, il est judicieux utiliser la distribution empirique de Hazen:  $F(x) = \frac{m-0.5}{n}$  dont :
- $m$  : numéro d'ordre (rang de la précipitation) ;
- $n$  : la taille de l'échantillon (nombre total d'observations).
- Effectuer le calcul de la variable réduite de Gumbel selon l'expression suivante :  $y = (-\ln(F(x)))$
- Déterminer les paramètres d'ajustement " $\alpha$ " et " $x_0$ " par les deux formules suivantes :

$$a = 0.78 \times \sigma \quad \text{Et} \quad X_0 = \bar{X} - 0.577 \times a \quad \text{Avec :}$$

-  $\sigma$  : écart type de la série ;  $\bar{X}$ : La moyenne arithmétique de la série.

L'équation de la droite de Gumbel est exprimée comme suit :  $x = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \times y + X_0$  dont :  $\frac{1}{\alpha}$  : la pente de la droite de Gumbel

- Représenter graphiquement les couples ( $x_i, y_i$ ) sur papier Gumbel

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

- Calculer des caractéristiques empiriques de la série de donnée.
- Ajuster graphiquement la loi choisie.
- Calculer le quantile et son intervalle de confiance. L'expression d'un quantile est la suivante :

$$X = a \times Y + X_0 \quad \text{Soit} \quad Pjmax = \frac{1}{a} + Y + X_0$$

-L'ajustement a été réalisé à l'aide du logiciel Hyfran Plus en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance.

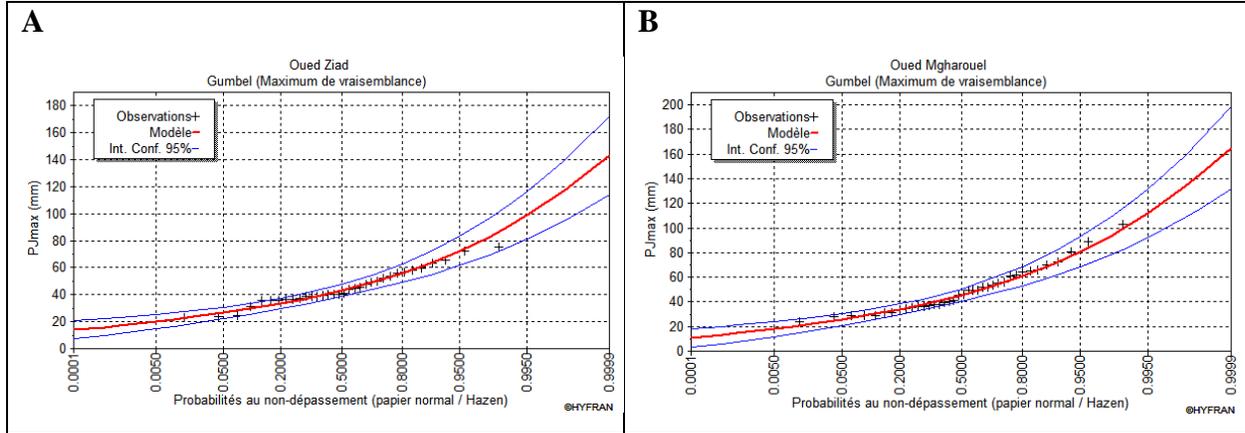


Fig 3.12. Ajustement des pluies journalières maximales de la station Hamma Bouziane et la station de Constantine ANRH à la loi de Gumbel.

(Source : traitement personnel)

### 3.3.2.2. Ajustement à la loi Log Normal

La fonction de répartition de la loi de Galton (log normal) est donnée par l'expression suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\log(x) - \bar{x}}{\sigma} \right)^2} \quad \text{Avec :}$$

$\bar{x}$  : La moyenne des logarithmes de la variable x.

$\sigma$  : L'écart type des logarithmes de la variable x.

Quand on utilise la variable centrée réduite Z, la formulation devient ainsi :  $Z = \frac{\log X - \bar{X}}{\sigma}$

L'expression d'un quantile est la suivante :  $Pj \max(P\%) = e^{(\bar{X} + Z(P\%) \times \sigma)}$

La valeur de paramètre Z est associée à la probabilité de non dépassement.

Pour déterminer les deux paramètres (la moyenne, écart type) de la loi log-normale, on fait appel au logiciel Hyfran.

Dans notre calcul, on a opté pour la méthode du maximum de vraisemblance, et la fréquence choisit est celle de Hazen.

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

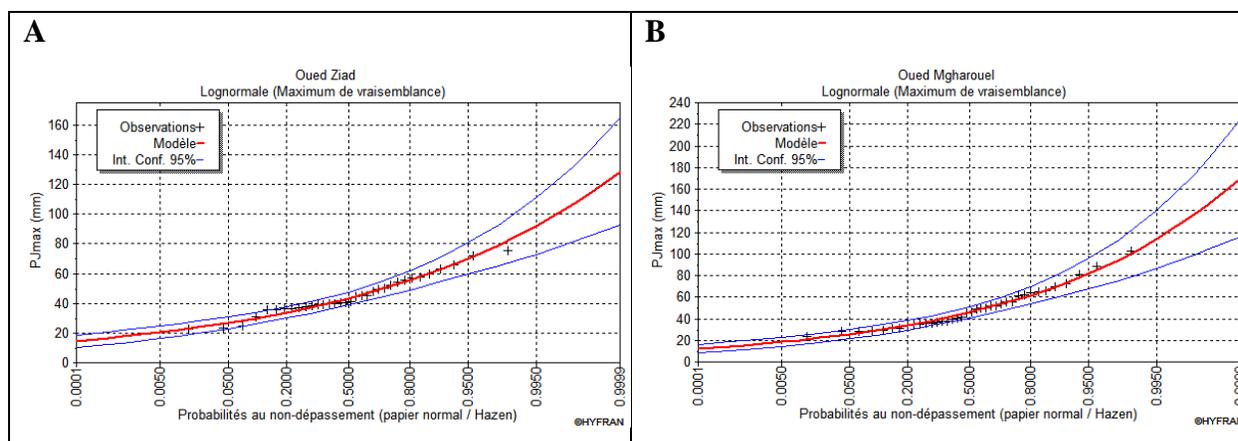


Figure 3.13. Ajustement des pluies journalières maximales de la station Hamma Bouziane et la station de Constantine ANRH à la loi de Gumbel.

(Source : Traitement personnel)

En se référant aux graphiques de l'ajustement des deux séries d'observations aux lois de probabilité de Gumbel et Log Normale (Fig 3.12 et 3.13), on constate que la série des précipitations annuelles s'ajuste de manière appropriée avec les deux lois. Toutefois, il est nécessaire de comparer l'adéquation de ces distributions avec précision afin de sélectionner le meilleur ajustement.

### ➤ Test d'adéquation de l'ajustement :

Le test d'adéquation de l'ajustement consiste à vérifier la compatibilité des données avec une distribution choisie a priori. Il convient par conséquent de comparer l'adéquation de ces lois afin d'adopter le meilleur ajustement. L'un des tests le plus employé, est le test du Khi carré ( $\chi^2$ ). Les résultats du test ont été fait par le logiciel Hyfran plus, et sont présenté dans le tableau (3.11) ci-dessous :

Tableau 3.11 : Résultat du test Khi carré de l'adéquation de l'ajustement dans les deux bassins versants

Loi de distribution	Bassin versant d'Oued Ziad		Bassin versant d'Oued Mgharouel	
	p-value	Khi-carré ( $\chi^2$ )	p-value	Khi-carré ( $\chi^2$ )
Gumbel	0.71	3.10	0.64	1.85
Log normal	0.78	3.18	0.72	2.84

(Source : Traitement personnel)

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

### 3.3.2.3. Comparaison des lois

Selon le logiciel Hyfran plus, la sélection de la distribution statistique la plus adaptée aux échantillons est donnée par deux méthodes : soit par comparaison visuelle des graphiques d'ajustement avec les deux lois, soit par la comparaison par critères en se basant sur les deux critères : 1/ le critère d'Akaike (AIC), 2/le critère d'information bayésien (BIC).

Ces critères permettent de choisir la distribution la mieux ajustée en tenant compte à la fois de l'erreur d'estimation et de la parcimonie (le nombre de paramètres à ajuster). Le logiciel Hyfran plus suggère que la loi qui s'adapte mieux est celle qui a des faibles valeurs de critères d'information Bayésien (BIC) et critères d'information Akaike (AIC).

Dans cette étude nous avons effectué une comparaison par graphique (fig 3.14), ainsi que par critère (fig 3.15) sous le logiciel Hyfran plus afin de choisir quelle loi de probabilité s'adapte mieux avec nos séries d'observation.

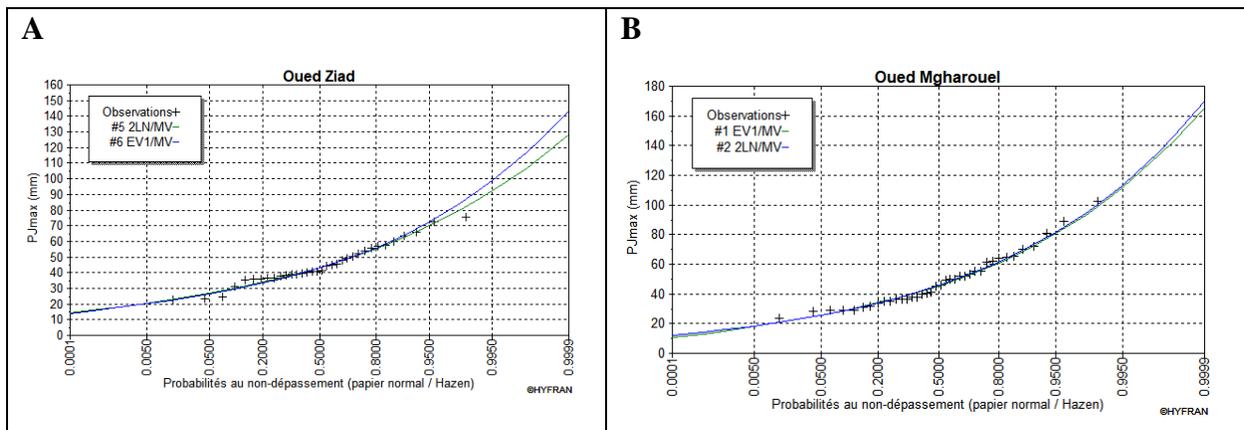


Figure 3.14 résultats de la comparaison par graphique pour les deux stations d'El Hamma Bouziane et Constantine.

(Source : Traitement personnel)

Les résultats obtenus de la comparaison effectuée par graphique montrent un ajustement adéquat des deux séries d'observation des deux stations étudiées avec les deux lois (Fig. 3.14 A et B), cependant la comparaison par critère montre un ajustement meilleur avec la loi Log normal, puisqu'elle affiche des valeurs plus faibles pour les deux critères d'information Bayésien (BIC) et Akaike (AIC), (voir figure 3.15 A et B).

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

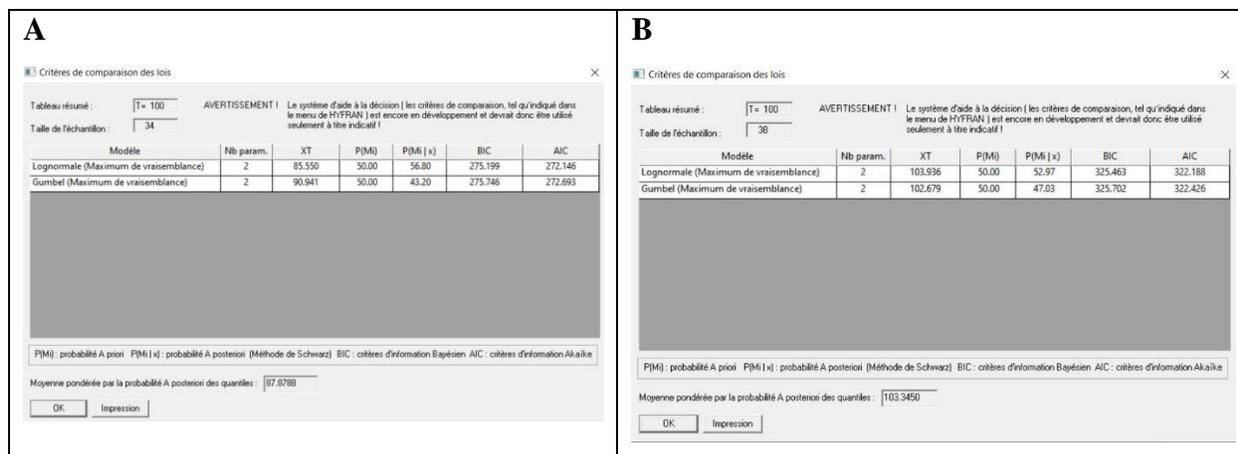


Figure 3.15 : Résultats de la comparaison par critères fait pour les deux stations d'El Hamma Bouziane et celle de Constantine.

(Source : Traitement personnel)

Sur la base de la comparaison graphique et par critères (Fig 3.14 ; et 3.15), nous adoptons de travailler avec les pluies maximales journalières estimées par la loi de Galton.

Le tableau ci-dessous montrent les valeurs adoptées par l'ajustement à la loi Log Normale qui seront utilisées pour extrapoler les précipitations maximales journalières pour des événements rares et pour estimer le débit de projet (Tableau 3.12).

Tableau 3.12 : Résultats statistiques des ajustements des pluies obtenus par la loi de Log-normale en utilisant la méthode de maximum vraisemblance pour les deux stations étudiées.

Bassin versant d'Oued Ziad				
Période de retour T	q (Probabilité/fréquence au non dépassement )	XT (pluies journalières maximales fréquentielle en mm/ Valeurs théoriques)	Ecart-Type $\delta$	Intervalle de confiance (95%)
1000	0.999	107	11.9	88.4 - 135
100	0.99	85.6	7.48	73.2 - 103
50	0.98	76.0	6.29	68.4 - 93.0
20	0.95	71.1	4.81	61.6 - 80.4
10	0.9	63.0	3.77	56.0 - 70.7
5	0.8	55.4	2.82	49.6 - 60.7
2	0.5	43.3	1.86	38.7 - 46.0

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Bassin versant d'Oued Mgharouel				
T	q (Probabilité au non dépassement )	XT (pluies journalières maximales fréquentielle en mm/ Valeurs théoriques)	Ecart-Type	Intervalle de confiance (95%)
1000	0.999	136	18.9	99 - 173
100	0.99	104	11.6	81.3 - 127
50	0.98	94.4	9.61	75.6 - 113
20	0.95	81.7	7.23	67.6 - 95.9
10	0.9	71.9	5.58	61.0 - 82.9
5	0.8	61.6	4.11	53.5 - 69.6
2	0.5	45.8	2.62	40.6 - 50.9

Les valeurs théoriques des pluies journalières maximales fréquentielles estimés par la loi Log Normale (quantiles estimés) pour diverses périodes de retour et qui sont affiché dans le tableau ci-dessus 3.12, nous permet d'analyser les pluies de courte durée, ainsi d'établir la courbe d'intensité durée Fréquence dite courbe (IDF)

### 3.4. Courbe d'intensité – durée – fréquence (courbe IDF)

Les courbes d'intensité-durée-fréquence sont une approche supplémentaire adoptée en climatologie comme en hydrologie aussi pour évaluer un aléa à partir d'un seuil spécifique (Dauphiné et Provitolo, 2013 p24).

Dans cette étape on va adopter une relation entre pluie, temps de retour et durée : celle-ci consiste à représenter, pour chaque temps de retour choisis, la pluie en fonction de la durée. C'est cette présentation que l'on nomme courbe IDF. Elle a l'avantage pratique de bien se prêter à l'interpolation pour différentes durées.

Pour la mise en œuvre des courbes IDF on transforme les pluies maximales journalières aux pluies de courtes durées exprimées en (mm).

#### 3.4.1. Détermination des pluies de courte durée

Pour des périodes plus courtes que le temps de concentration, il est possible d'estimer les précipitations de courte durée pour différentes fréquences, nous passons des pluies journalières maximales aux pluies de courte durée de même fréquence en utilisant la formule de K. Body recommandée par l'ANRH en 19884 :

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

$$P_{ct} = P_{jmax} \left( \frac{tc}{24} \right)^b \text{ Avec :}$$

-Pct : La pluie de courte durée de fréquence égale à celle des Pjmax en (mm) ;

-Pjmax : La pluie maximale journalière pour la même fréquence (mm) ;

-tc: durée de l'averse ( temps en heures) ;

-b: L'exposant climatique (donné par l'ANRH).

L'analyse des pluies de courte durée qui correspond au temps de concentration des bassins versants étudiés, nous permet de connaître la période de retour des crues historiques qui ont déjà frappés les agglomérations situées en aval des bassins versants s'il y'en a un retour d'expérience.

Tableau 3.13 : Pluies de courtes durées correspondantes au temps de concentration "Tc" et à une fréquence "F" des bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

Fréquence	0.999	0.99	0.98	0.95	0.90
Période de retour (an)	1000	100	50	20	10
Ptc (mm) BV Oued Ziad	44.77	33.72	31.38	29.33	26.36
Ptc (mm) BV Oued Mgharouel	50.73	38.79	35.21	30.48	26.82

(Source : Traitement personnel)

L'événement du 19-09-2018 a été enregistrée au niveau de la station de Hamma selon les sources de L'ANRH. Une valeur importante de 33.5 mm durant 40 minutes soit une intensité de 139.6 l/s/h, faisant une crue exceptionnelle, qui a causé des dégâts humains (la mort de deux personnes) et de matériels importants.

Les résultats obtenus dans le tableau (3.13) montrent que l'inondation survenu le 19-09-2018 a une période de retour de 100 ans.

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

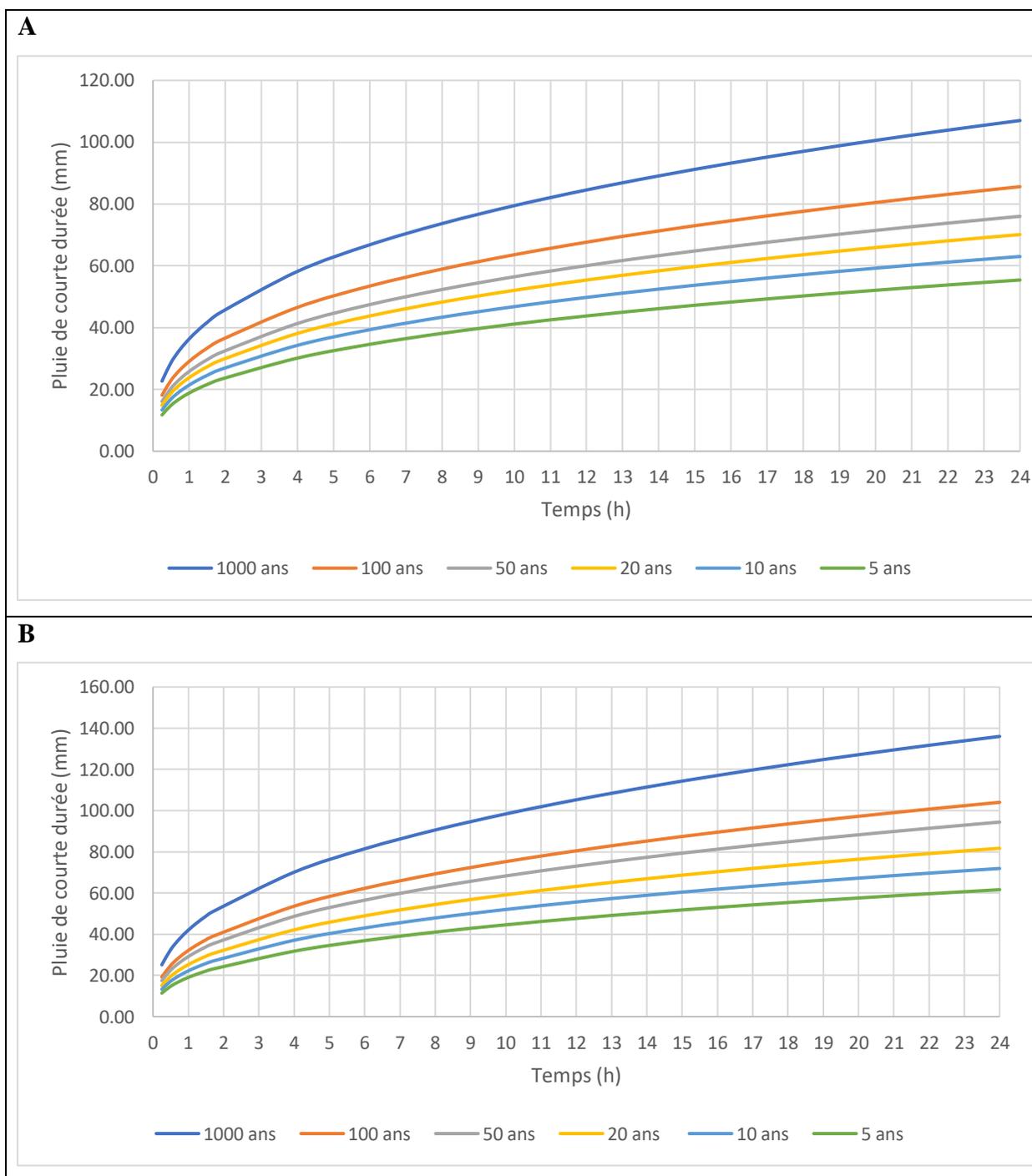


Figure 3.16 : Courbe de la pluie de courte durée pour les différentes fréquences étudiées ; A) Bassin versant d'Oued Ziad ; B) Bassin versant d'Oued Mgharouel (Source : Traitement personnel)

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

### 3.4.2. Détermination des intensités maximales à différentes Fréquences

Pour déterminer les intensités maximales pour différentes périodes de retour, on utilise la

formule suivante :  $I_{max} = \frac{P_{jmax} (Pct \text{ en } mm)}{t(h)}$  Avec :

- $I_{max}$  : Intensité maximale (mm/h).
- $P_{jmax}$  : pluie de courte durée qui correspond à la même durée  $t$  (h).

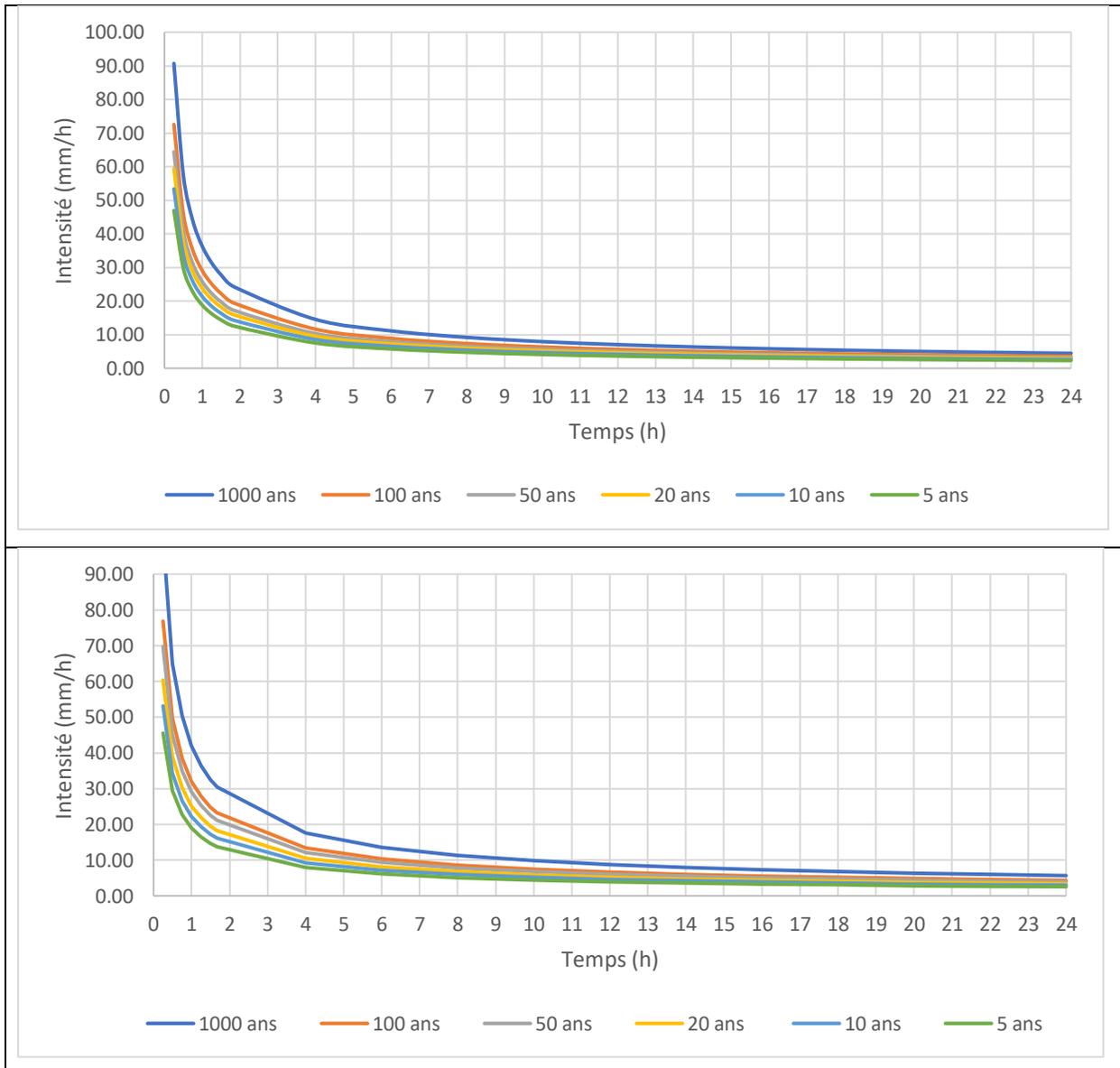


Figure 3.17 Courbe Intensité-Durée-Fréquence (IDF) ; A) Station d'El Hamma Bouziane ; B)

Station de Constantine ANRH

(Source : Traitement personnel)

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Les courbes intensités-durée- fréquence (Fig 3.17) permettent d'estimer les fréquences de dépassements  $F$  et période de retour  $T$  des événements pluviométriques observés générateurs de débits à partir de leurs durées et leurs intensités par interpolation graphique. Ces courbes sont essentielles pour la gestion de l'évacuation des eaux pluviales en zones urbaines et sont également employées pour évaluer les débits dans les projets de protection contre les inondations.

Le tableau (3.14) ci dessous, montre les valeurs calculées de la pluie de courte durée ainsi que les intensités pour les différentes durée et fréquences, ces valeurs nous ont permis de tracer les courbes des pluies de courte durée pour les différentes périodes de retour (5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans, 1000 ans) ci dessus (Fig 3.16), ainsi que les courbes d'intensité durée fréquence présentées dans la figure (3.17).

Tableau 3.14 : Valeurs des précipitations de courte durée et leurs intensités fréquentielle pour les deux stations d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Bassin versant Oued Ziad																			
Temps		Période de retour (ans)																	
		1000			100			50			20			10			5		
Min	Heur	Pjmax	Pct	It	Pjmax	Pct	It	Pjmax	Pct	It	Pjmax	Pct	It	Pjmax	Pct	It	Pjmax	Pct	It
		(mm)	(mm)	(mm/h)	(mm)	(mm)	(mm/h)	(mm)	(mm)	(mm/h)	(mm)	(mm)	(mm/h)	(mm)	(mm)	(mm/h)	(mm)	(mm)	(mm/h)
15	0.25	107	22.67	90.67	80.6	17.08	68.30	75.00	15.89	63.55	70.1	14.85	59.40	63.00	13.35	53.39	55.40	11.74	46.95
30	0.5	107	28.69	57.38	80.6	21.61	43.23	75.00	20.11	40.22	70.1	18.80	37.59	63.00	16.89	33.79	55.40	14.86	29.71
45	0.75	107	32.93	43.91	80.6	24.81	33.08	75.00	23.08	30.78	70.1	21.58	28.77	63.00	19.39	25.85	55.40	17.05	22.74
60	1	107	36.32	36.32	80.6	27.36	27.36	75.00	25.46	25.46	70.1	23.79	23.79	63.00	21.38	21.38	55.40	18.80	18.80
75	1.25	107	39.18	31.34	80.6	29.51	23.61	75.00	27.46	21.97	70.1	25.67	20.53	63.00	23.07	18.45	55.40	20.29	16.23
90	1.5	107	41.69	27.79	80.6	31.40	20.93	75.00	29.22	19.48	70.1	27.31	18.21	63.00	24.54	16.36	55.40	21.58	14.39
<b>111</b>	<b>1.85</b>	<b>107</b>	<b>44.77</b>	<b>24.20</b>	<b>80.6</b>	<b>33.72</b>	<b>18.23</b>	<b>75.00</b>	<b>31.38</b>	<b>16.96</b>	<b>70.1</b>	<b>29.33</b>	<b>15.85</b>	<b>63.00</b>	<b>26.36</b>	<b>14.25</b>	<b>55.40</b>	<b>23.18</b>	<b>12.53</b>
240	4	107	58.19	14.55	80.6	43.83	10.96	75.00	40.78	10.20	70.1	38.12	9.53	63.00	34.26	8.56	55.40	30.13	7.53
360	6	107	66.79	11.13	80.6	50.31	8.38	75.00	46.81	7.80	70.1	43.75	7.29	63.00	39.32	6.55	55.40	34.58	5.76
480	8	107	73.65	9.21	80.6	55.48	6.93	75.00	51.62	6.45	70.1	48.25	6.03	63.00	43.36	5.42	55.40	38.13	4.77
600	10	107	79.45	7.95	80.6	59.85	5.98	75.00	55.69	5.57	70.1	52.05	5.21	63.00	46.78	4.68	55.40	41.14	4.11
720	12	107	84.53	7.04	80.6	63.68	5.31	75.00	59.25	4.94	70.1	55.38	4.62	63.00	49.77	4.15	55.40	43.77	3.65
840	14	107	89.08	6.36	80.6	67.10	4.79	75.00	62.44	4.46	70.1	58.36	4.17	63.00	52.45	3.75	55.40	46.12	3.29
960	16	107	93.22	5.83	80.6	70.22	4.39	75.00	65.34	4.08	70.1	61.07	3.82	63.00	54.89	3.43	55.40	48.27	3.02
1080	18	107	97.03	5.39	80.6	73.09	4.06	75.00	68.01	3.78	70.1	63.57	3.53	63.00	57.13	3.17	55.40	50.24	2.79
1200	20	107	100.57	5.03	80.6	75.76	3.79	75.00	70.49	3.52	70.1	65.89	3.29	63.00	59.21	2.96	55.40	52.07	2.60
1320	22	107	103.88	4.72	80.6	78.25	3.56	75.00	72.81	3.31	70.1	68.06	3.09	63.00	61.16	2.78	55.40	53.79	2.44

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

1440	24	107	107.00	4.46	80.6	80.60	3.36	75.00	75.00	3.13	70.1	70.10	2.92	63.00	63.00	2.63	55.40	55.40	2.31
Bassin versant Oued Mgharouel																			
15	0.25	136	25.12	100.50	104	19.21	76.85	94.4	17.44	69.76	81.7	15.09	60.37	71.9	13.28	53.13	61.6	11.38	45.52
30	0.5	136	32.47	64.94	104	24.83	49.66	94.4	22.54	45.08	81.7	19.51	39.01	71.9	17.17	34.33	61.6	14.71	29.41
45	0.75	136	37.73	50.30	104	28.85	38.47	94.4	26.19	34.91	81.7	22.66	30.22	71.9	19.94	26.59	61.6	17.09	22.78
60	1	136	41.96	41.96	104	32.09	32.09	94.4	29.13	29.13	81.7	25.21	25.21	71.9	22.18	22.18	61.6	19.01	19.01
75	1.25	136	45.57	36.46	104	34.85	27.88	94.4	31.63	25.31	81.7	27.38	21.90	71.9	24.09	19.28	61.6	20.64	16.51
90	1.5	136	48.75	32.50	104	37.28	24.86	94.4	33.84	22.56	81.7	29.29	19.53	71.9	25.78	17.18	61.6	22.08	14.72
<b>100.2</b>	<b>1.67</b>	<b>136</b>	<b>50.73</b>	<b>30.38</b>	<b>104</b>	<b>38.79</b>	<b>23.23</b>	<b>94.4</b>	<b>35.21</b>	<b>21.09</b>	<b>81.7</b>	<b>30.48</b>	<b>18.25</b>	<b>71.9</b>	<b>26.82</b>	<b>16.06</b>	<b>61.6</b>	<b>22.98</b>	<b>13.76</b>
240	4	136	70.08	17.52	104	53.59	13.40	94.4	48.65	12.16	81.7	42.10	10.53	71.9	37.05	9.26	61.6	31.74	7.94
360	6	136	81.43	13.57	104	62.27	10.38	94.4	56.52	9.42	81.7	48.92	8.15	71.9	43.05	7.17	61.6	36.88	6.15
480	8	136	90.57	11.32	104	69.26	8.66	94.4	62.87	7.86	81.7	54.41	6.80	71.9	47.88	5.99	61.6	41.02	5.13
600	10	136	98.37	9.84	104	75.22	7.52	94.4	68.28	6.83	81.7	59.09	5.91	71.9	52.01	5.20	61.6	44.56	4.46
720	12	136	105.23	8.77	104	80.47	6.71	94.4	73.05	6.09	81.7	63.22	5.27	71.9	55.63	4.64	61.6	47.67	3.97
840	14	136	111.41	7.96	104	85.20	6.09	94.4	77.33	5.52	81.7	66.93	4.78	71.9	58.90	4.21	61.6	50.46	3.60
960	16	136	117.05	7.32	104	89.51	5.59	94.4	81.25	5.08	81.7	70.32	4.39	71.9	61.88	3.87	61.6	53.02	3.31
1080	18	136	122.27	6.79	104	93.50	5.19	94.4	84.87	4.71	81.7	73.45	4.08	71.9	64.64	3.59	61.6	55.38	3.08
1200	20	136	127.13	6.36	104	97.22	4.86	94.4	88.24	4.41	81.7	76.37	3.82	71.9	67.21	3.36	61.6	57.58	2.88
1320	22	136	131.69	5.99	104	100.71	4.58	94.4	91.41	4.15	81.7	79.11	3.60	71.9	69.62	3.16	61.6	59.65	2.71
1440	24	136	136.00	5.67	104	104.00	4.33	94.4	94.40	3.93	81.7	81.70	3.40	71.9	71.90	3.00	61.6	61.60	2.57

(Source : Traitement personnel)

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

D'après le tableau ci-dessus on remarque que : plus l'intervalle de temps augmente, plus les valeurs des pluies de courte durée augmente durant les différentes périodes de retour.

### 3.5. Détermination des débits maximum

Étant donné le manque de stations hydrométriques pour évaluer les débits maximums, les débits peuvent être calculés par plusieurs formules empiriques, les formules empiriques utilisées pour cette étude sont souvent appliquées sur les bassins du nord Algérien, et qui s'adaptent bien au régime de nos bassins versants étudiés. Il s'agit de (la formule de Giandotti, la formule de Turraza, la formule de Mallet Gautier et enfin la formule d'Alexeev).

#### 3.5.1. Formule de Giandotti

$$Q_{max; p\%} = \frac{Cr \times S \times (H_{moy} - H_{min})}{4 \times S^{0.5} + 1.5 \times L} \times Ptc\%$$

Dont :  $Q_{max, p\%}$  : Débit maximum pour une fréquence donnée de pluie ( $m^3/s$ )

C : Coefficient topographique variant entre 0.066 et 0.166

Pour des bassins versant de topographie accidentée tel nos bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel ( $c = 0.166$ ).

S : Surface en ( $Km^2$ ) ;  $H_{moy}$  : Altitude moyenne en (m) ;  $H_{min}$  : Altitude minimale en (m)

Ptc% : Pluie fréquentielle de courte durée correspondant au temps de concentration

L : Longueur du cours d'eau principale en (km).

#### 3.5.2. Formule de Turazza

$$Q_{max; p\%} = \frac{C \times Itc\% \times S}{3.6}$$

Dont :  $Q_{max, p\%}$  : Débit maximum pour une fréquence donnée de pluie ( $m^3/s$ )

C : coefficient de ruissellement de la crue considérée pour une probabilité P%.

I<sub>tc</sub>% : Intensité de la pluie de fréquence (P%) pour une durée égale au temps de concentration T<sub>c</sub>.

S : Surface du bassin versant ( $km^2$ ).

#### 3.5.3. Formule de Mallet Gauthier

$$Q_{max, p\%} = 2 \times K \times \log(1 + 20Ptc\%) \times \frac{S}{\sqrt{Lp}} \times \sqrt{1 + 4LogT - LogS}$$

$Q_{max, p\%}$  : Débit maximum pour une fréquence donnée de pluie ( $m^3/s$ )

Ptc% : Pluie fréquentielle de courte durée correspondant au temps de concentration

S : Superficie du bassin versant en ( $km^2$ ).

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Lp : Longueur du talweg principal en (km).

K : Constant dépendant des caractéristiques géographique et climatiques du bassin  $1 \leq K \leq 3$

On prend  $K=1.5$

T : Période de retour (ans)

### 3.5.4. Formule d'Alexeev

$$Q_{max, p\%} = 0.34 \times P_{tc}^{4/3}$$

$Q_{max p\%}$  : Débit maximum pour une fréquence donnée de pluie (m<sup>3</sup>/s)

$P_{tc}$  : Pluie fréquentielle de courte durée correspondant au temps de concentration.

Les résultats obtenus du calcul des débits maximaux des deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel pour les différentes périodes de retour sont mentionnées dans le tableau suivant

Tableau 3.15 : Débit de différentes fréquences des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

Bassin versant d'Oued Ziad					
Fréquence	0.9	0.95	0.98	0.99	0.999
Période de retour (an)	10	20	50	100	1000
Giandotti	35.82	39.86	42.65	45.83	60.84
Turazza	26.32	31.94	37.02	42.86	65.02
Mallet Gauthier	67.52	78.52	90.85	99.76	127.71
Alexeev	26.67	30.75	33.65	37.04	54.05
<b>La moyenne</b>	<b>39.09</b>	<b>45.27</b>	<b>51.04</b>	<b>56.37</b>	<b>76.90</b>
Bassin versant d'Oued Mgharouel					
Giandotti	23.26	27.24	31.46	34.66	45.33
Turazza	22.70	28.14	35.22	41.78	62.45
Mallet Gauthier	57.07	66.35	77.47	85.26	108.55
Alexeev	27.30	32.37	39.24	44.64	63.85
<b>La Moyenne</b>	<b>32.76</b>	<b>38.52</b>	<b>45.85</b>	<b>51.59</b>	<b>70.04</b>

(Source : Traitement auteure)

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Le tableau 3.15 ci-dessus présente les débits de pointe des deux bassins versants étudiés pour les différentes périodes de retour (10ans, 20ans, 50ans, 100ans et 1000ans), on constate que les résultats obtenus de l'application des 4 formules empiriques sont proches, en règle générale le débit maximal obtenu est celui qui est le plus proche de la moyenne des quatre formules utilisées. Mais dans notre cas ce débit n'est pas proche à la moyenne des quatre formules utilisées, c'est pourquoi nous allons adopter le débit issu de la moyenne des quatre formules.

### 3.6. Hydrogramme de crue

L'hydrogramme de crue illustre la variation des débits de pointe d'un cours d'eau en fonction du temps et permet d'identifier les caractéristiques de la crue, telles que le volume, la forme, le temps de montée de la crue et le temps de descente (décru). La forme de l'hydrogramme est déterminée en utilisant la méthode de Sokolovsky, qui le modélise à l'aide de deux équations paraboliques distinctes : l'une représentant la montée de la crue et l'autre la décrue, toutes ont leur propre équation.

#### -Equation de la montée de crue

$$Q_{tm} = Q_{max} \times \left( \frac{T_i}{T_m} \right)^m$$

#### -Equation de la décrue

$$Q_{td} = Q_{max} \times \left( \frac{T_b - T_i}{T_d} \right)^n$$

Où :

$Q_{tm}$  : débit de la montée de la crue.

$Q_{td}$  : débit de décrue.

$T_d$  : Durée de la décrue en heures.

$m$  et  $n$  : Exposants de la parabole pour les crues pluviales, ( $m = 2$  ;  $n = 3$ )

$T_m$  : Temps de montée de la crue en heures.

$T_b$  : temps de base en heures.

-Le temps de montée est habituellement équivalent au temps de concentration ( $T_m = T_c$ )

-Le temps de la décrue est égale à deux fois le temps de montée c'est à dire le temps de concentration ( $T_d = 2T_m = 2T_c$ ) dont : 2 est un coefficient de forme pour les petits cours d'eau et vallons dans des bassins versants dénudés et faiblement perméables.

-Le temps de base est la somme du temps de la montée et le temps de descente ( $T_b = T_m + T_d$ )

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Les trois temps de la montée, la descente ainsi que le temps de base des deux bassins versants étudiés sont donnée dans le tableau (3.16) ci-dessous.

Tableau 3.16: Le temps de montée et de descente de la crue ainsi que le temps de base pour les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

Bassin versant	Temps de la montée	Temps de la descente	Temps de base
Oued Ziad	1.85	3.7	5.55
Oued Mgharouel	1.67	3.34	5.01

(Source : Traitement personnel)

### 3.6.1. Calcul du volume de la crue

Le volume de la crue est une mesure essentielle qui permet de quantifier la quantité totale d'eau transportée lors d'une crue par un cours d'eau. Il donne des informations non seulement sur l'intensité et l'ampleur de la crue, mais aussi sur son impact potentiel sur les zones affectées.

$$VT = \frac{(1.8 \times Qt \times Tb)}{1000}$$

**VT** : volume de crue hm<sup>3</sup>.

**Qt** : débit maximal m<sup>3</sup>/s

**Tb** : temps de base en heure.

Les résultats obtenus des calculs du volume de la crue pour les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel sont mentionnées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.17 : volume de crue fréquentiel pour les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

Temps (an)	10	20	50	100	1000
Volume du B.V Oued Ziad (Hm <sup>3</sup> )	0.36	0.40	0.43	0.46	0.65
Volume du B.V Oued Mgharouel (Hm <sup>3</sup> )	0.25	0.30	0.36	0.41	0.59

(Source : ANRH + Traitement personnel)

Les données relatives au volume de la crue répertoriées dans le tableau (3.17) revêtent une importance capitale pour les deux bassins versants. En effet, les valeurs faibles du volume de la crue indiquent généralement des crues de petite à moyenne envergure, avec un impact restreint sur les zones environnantes. Toutefois, même les crues de moindre importance peuvent entraîner des dommages locaux et des perturbations temporaires. Les valeurs moyennes correspondent à des événements de crue plus substantiels, susceptibles d'engendrer des inondations dans les zones

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

basses et d'endommager les infrastructures et les biens. Quant aux valeurs élevées du volume de la crue, elles signalent des crues majeures et potentiellement dévastatrices, avec un risque accru d'inondations généralisées, de dommages matériels étendus, de pertes humaines et de graves perturbations socio-économiques.

Les résultats obtenus du calcul de la montée de crue et la décrue pour les différentes fréquences dans les deux bassins versants sont résumés dans les tableaux ci-dessous (Tableau 3.18 et 3.19).

Tableau 3.18 : Calcul des débits fréquentielles de la montée de la crue et de la décrue en fonction du temps pour l'hydrogramme de crue d'Oued Ziad

Période de retour (ans)	10	20	50	100	1000
Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	35.82	39.86	42.65	45.83	65.02
Temps (h)	Q <sub>tm</sub> (m <sup>3</sup> /s)				
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.65	0.73	0.78	0.84	1.19
0.5	2.62	2.91	3.12	3.35	4.75
0.75	5.89	6.55	7.01	7.53	10.69
1	10.47	11.65	12.46	13.39	19.00
1.15	13.84	15.40	16.48	17.71	25.12
1.5	23.55	26.20	28.04	30.13	42.74
T <sub>m</sub> = 1.85	35.82	39.86	42.65	45.83	65.02
	Q <sub>td</sub> (m <sup>3</sup> /s)				
2	31.64	35.21	37.67	40.48	57.43
2.5	20.07	22.33	23.89	25.67	36.42
3	11.73	13.05	13.96	15.00	21.28
3.5	6.09	6.78	7.25	7.79	11.06
T <sub>d</sub> = 3.7	4.48	4.98	5.33	5.73	8.13
4	2.63	2.93	3.14	3.37	4.78
4.5	0.82	0.91	0.97	1.05	1.49
5	0.12	0.13	0.14	0.15	0.21
T <sub>b</sub> = 5.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Source : Traitement personnel)

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Tableau 3.19 : Calcul des débits fréquentielles de la montée de la crue et de la décrue en fonction du temps pour l'hydrogramme de crue d'Oued Mgharouel.

Période de retour (ans)	10	20	50	100	1000
Qmax (m <sup>3</sup> /s)	27.30	32.37	39.24	44.64	63.85
Temps (h)	Q <sub>tm</sub> (m <sup>3</sup> /s)				
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.61	0.73	0.88	1.00	1.43
0.5	2.45	2.90	3.52	4.00	5.72
0.75	5.51	6.53	7.91	9.00	12.88
1	9.79	11.61	14.07	16.01	22.89
1.15	12.94	15.35	18.61	21.17	30.28
1.3	16.54	19.62	23.78	27.05	38.69
T <sub>m</sub> = 1.67	27.30	32.37	39.24	44.64	63.85
	Q <sub>td</sub> (m <sup>3</sup> /s)				
2	19.98	23.69	28.72	32.68	46.73
2.15	17.14	20.32	24.64	28.03	40.09
2.5	11.58	13.74	16.65	18.95	27.10
3	5.95	7.06	8.55	9.73	13.92
T <sub>d</sub> = 3.34	3.41	4.05	4.90	5.58	7.98
3.5	2.52	2.99	3.63	4.13	5.90
4	0.75	0.90	1.08	1.23	1.77
4.5	0.10	0.12	0.14	0.16	0.23
5.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(Source : Traitement personnel)

Nous avons utilisé les valeurs calculées dans les deux tableaux (3.18 et 3.19) afin de tracer l'hydrogramme de crue des deux bassins versants étudiés (Fig 3.18A et B)

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

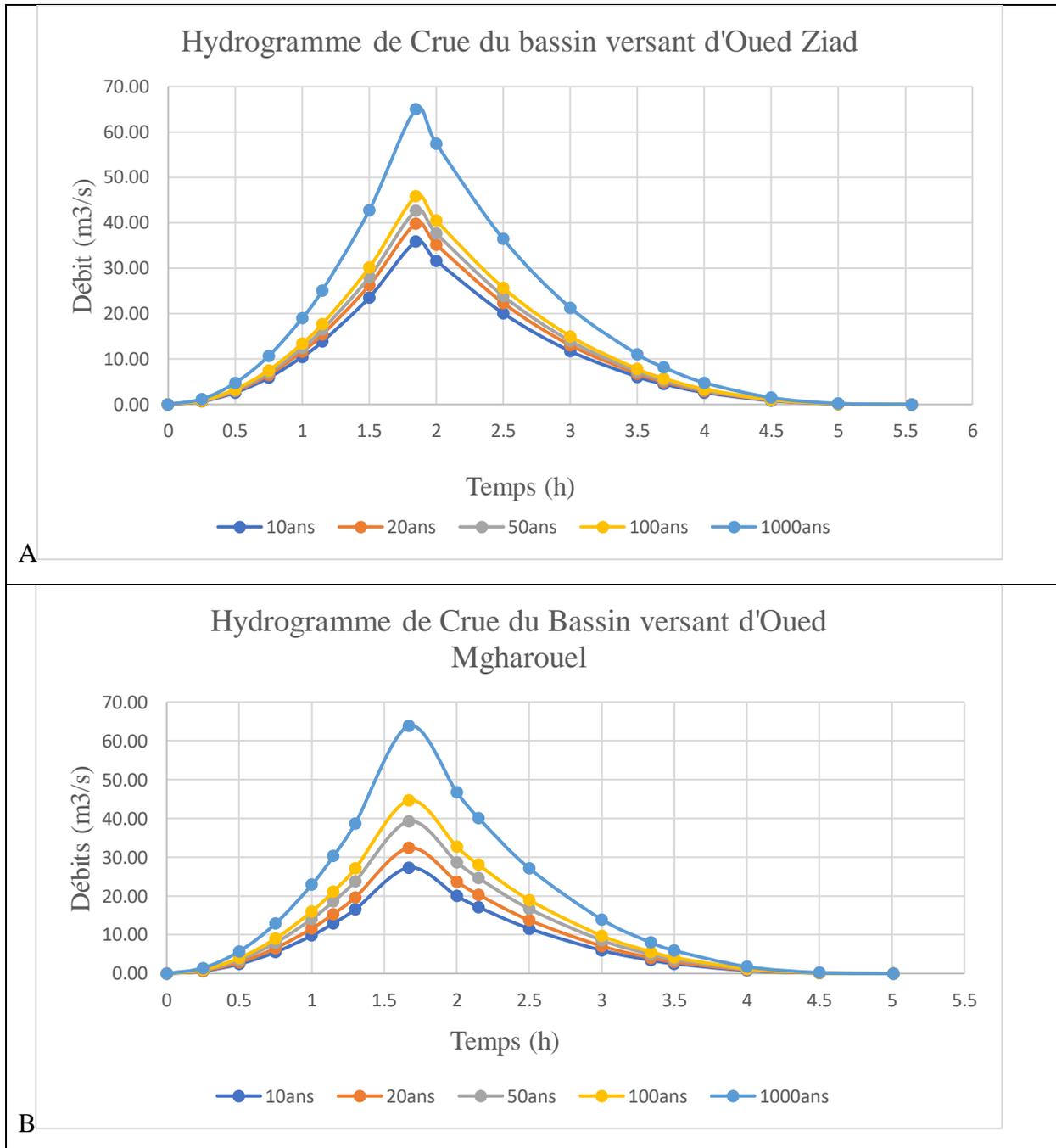


Figure 3.18 : Hydrogramme de Crue ; A/ bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel

(Source : Auteure)

L'hydrogramme de crue de chaque bassin versant est présenté par les deux courbes (Fig 3.18 A et B) qui correspondent aux débits calculés des deux cours d'eaux en fonction du temps, ce graphique montre le temps de montée jusqu'au débit maximale, la décrue ou le temps de descente,

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

et la durée totale (Tableau 3.15), ainsi que les volumes (tableau 3.16) et les durées des débordements sont déterminants dans le cas des crues.

L'hydrogramme de crue est fortement influencé par les caractéristiques du bassin versant, à savoir :

- Les caractéristiques géométriques (sa surface, sa forme, son élévation, sa pente) chacune de ces caractéristiques à une influence plus au moins importante sur l'hydrogramme de crue.
- Les caractéristiques géologiques (type des formations géologiques), certaines formations sont poreuses dans lesquelles l'eau s'infiltré et une grande partie alimente les nappes phréatiques au profondes et ne participe pas à la crue, par rapport aux formations géologiques qui sont imperméables et dans lesquelles toutes les précipitations qui tombe vont converger vers le cours d'eau et participer à la crue.
- Les caractéristiques physiographiques (morphologie, couvert végétal, activité humaine...etc).
- le temps de montée de la crue des deux bassins versants étudiés représente 33.33% du temps de base tandis que le temps de la descente (décrue) représente 66.66% du temps de base.

### 3.7. Estimation de l'apport moyen interannuel et la lame d'eau écoulée

Dans cette étude, nous allons estimer l'apport moyen annuel à l'aide de diverses formules empiriques, fournissant la lame d'eau ruisselée en millimètres et l'apport moyen interannuel en hm<sup>3</sup>. Ces méthodes dépendent de la moyenne annuelle des précipitations et de la superficie du bassin versant. Parmi ces méthodes, nous pouvons mentionner :

#### 3.7.1. La formule de Samie :

$$Le = P_{moy}^2 \times (293 - 2.2\sqrt{S}) \quad \text{Et} \quad A = Le \times S \quad \text{où :}$$

- Le : la lame d'eau écoulée en (mm).
- P<sub>moy</sub> : précipitation moyenne annuelle en (m).
- S : surface du BV en (Km<sup>2</sup>).

#### 3.7.2. La formule de Maillet Gauthier

$$Le = 0.6 \times \bar{P} \times \left(1 - 10^{-0.36 \times \bar{P}^2}\right) \times 10^3 \quad \text{Et} \quad A = Le \times S \quad \text{où :}$$

- Le : lame d'eau écoulée en (mm).
- P<sup>-</sup> : précipitation moyenne annuelle (m).

#### 3.7.3. La formule de l'ANRH

$$\bar{A} = 0.915 \times \bar{P}^{2.684} \times S^{0.842} \quad \text{Et} \quad Le = \frac{\bar{A}}{S} \times 10^3 \quad \text{où :}$$

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

- $\bar{A}$ : Apport en ( $\text{Hm}^3$ ).

-P : précipitation moyenne annuelle en (m).

-S : Surface du bassin versant en ( $\text{km}^2$ ).

-Le : lame d'eau écoulée en (mm)

### 3.7.4. La formule de Medinger

$$Le = 1.024 \times (P_{moy} - 0.26)^2 \quad \text{Et} \quad \bar{A} = Le \times S$$

- $P_{moy}$  : pluie moyenne annuelle en (mm).

-S : Surface du bassin versant en ( $\text{km}^2$ ).

-A : apport moyen en ( $\text{hm}^3$ ).

-Le : lame d'eau écoulée en (mm).

### 3.7.5. La formule de Goutagne

$$Le = (0.164 - 0.00145\sqrt{S}) \times P \quad \text{Et} \quad A = Le \times S \quad \text{où :}$$

-Le : lame d'eau écoulée en (mm).

-S : Surface du bassin versant en ( $\text{km}^2$ ).

-A : apport moyen en ( $\text{hm}^3$ ).

Les résultats obtenus du calcul de l'apport moyen interannuel et la lame d'eau écoulée dans les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel sont mentionnées dans le tableau ci-dessous

Tableau 3.20 : la lame d'eau écoulée et les apports liquides dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

Formules Empiriques	Bassin versant d'Oued Ziad		Bassin versant d'Oued Mgharouel	
	Lame d'eau écoulée (Le) en (mm)	Apport moyen liquide ( $\bar{A}$ ) en ( $\text{hm}^3$ )	Lame d'eau écoulée (Le) en (mm)	Apport moyen liquide ( $\bar{A}$ ) en ( $\text{hm}^3$ )
Formule de Samie	72.53	0.88	88.08	0.81
Formule de M-G	57.47	0.69	74.91	0.69
Formule de l'ANRH	98.20	1.19	132.35	1.22
Formule de Medinger	61.05	0.74	88.90	0.82
Formule de Goutagne	80.14	0.97	88.52	0.82

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

La moyenne	73.88	0.89	94.55	0.87
Valeurs adoptées	72.53	0.88	88.90	0.82

(Source : Traitement personnel)

L'analyse des résultats obtenus pour l'apport moyen annuel, exprimé en lame d'eau ruisselée, révèle que les valeurs dérivées des cinq formules utilisées sont très similaires, démontrant ainsi la fiabilité de ces formules pour le régime hydrologique algérien.

Pour notre cas d'étude, nous adoptons les valeurs fournies par la formule de Samie, car elles se rapprochent le plus de la valeur moyenne obtenue parmi les cinq formules empiriques utilisées.

### ❖ Caractéristiques de l'écoulement

Les différentes caractéristiques de l'écoulement sont les suivantes :

#### a. Module de l'écoulement (Me)

Il est défini comme suit :  $Me = \frac{\bar{A}}{T}$  où :

- $\bar{A}$ : Apport moyen annuel en (L). ( $\bar{A} = 0.88 \text{ hm}^3 = 880000000 \text{ L} = 880 \text{ m}$  pour le bassin versant d'Oued Ziad, et  $\bar{A} = 0.82 \text{ hm}^3 = 820000000 \text{ L} = 820 \text{ m}$  pour le bassin versant d'Oued Mgharouel)

- T : Temps d'une année en secondes :  $T = 31536000 \text{ s}$

#### b. Module de l'écoulement spécifique (M<sub>0</sub>)

Il est donné par :  $M_0 = \frac{Me}{S}$  où :

- $M_0$  : module de l'écoulement spécifique (l/s).

- $Me$  : module de l'écoulement.

- $S$ : surface du bassin versant ( $\text{km}^2$ ).

#### c. Coefficient de variation :

Le coefficient de variation pourrait être estimé par plusieurs formules, dans cette étude nous avons estimé le coefficient de variation par les formules ci-dessous :

➤ La formule de Kristky Menkel, elle est donnée par l'équation :  $Cv = \frac{0.83}{(S^{0.06} \times M_0^{0.27})}$

➤ La formule d'Antonov, elle est donnée par l'équation :  $Cv = \frac{0.7}{(S+1000)^{0.09}}$

➤ La formule d'Ourkuiprovodkhoz, elle est donnée par l'équation :  $Cv = \frac{0.7}{M_0^{0.09}}$

➤ La formule de Sokolovsky, elle est donnée par l'équation :

$$Cv = 0.78 - 0.29 \times \log_{10}(M_0) - 0.63 \times \log_{10}(S + 1)$$

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Le tableau (3.20) suivant regroupe les résultats de calcul des caractéristiques de l'écoulement pour les deux bassins versants étudiés

Tableau 3.21 : caractéristiques de l'écoulement pour les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

Caractéristiques de l'écoulement		Oued Ziad	Oued Mgharouel
Module de l'écoulement (l/s)		27.90	26.00
Module de l'écoulement Spécifique (l/s)		2.31	2.81
Coefficient de variation	Formule de Kristky Menkel	0.56	0.55
	Formule d'Antonov	0.37	0.38
	Formule d'Ourkguiprovodkhoz	0.64	0.63
	Formule de Sokolovsky	0.60	0.01
La moyenne		0.54	0.39
Coefficient de variation adopté		0.56	0.38

(Source : Traitement personnel)

### 3.8. Estimation de l'apport solide

Pour comprendre les processus érosifs et sédimentaires dans les deux bassins versants étudiés il est primordial d'estimer la quantité totale de sédiments et de particules solides transportée par Oued Ziad et Oued Mgharouel au cours d'une année. La nature des sols, leur résistance à l'érosion, ainsi que le couvert végétal et le régime pluviométrique, influencent fortement les apports solides. Étant donné l'absence de stations de mesure pour évaluer la dégradation annuelle du sol, le transport solide est estimé à l'aide de la formule empirique de Sogreah qui donne le taux d'abrasion en fonction de la lame d'eau écoulée (voir Tableau 3.21:  $ES = a \times Le^{0.15}$  où :

- ES : taux d'abrasion (t/km<sup>2</sup>/an).

- Le : lame d'eau ruisselée en (mm)

-a : coefficient empirique qui varie en fonction de la perméabilité du terrain (a = 350 pour les bassins versants d'une perméabilité faible a moyenne).

Il est important de mentionner que la formule de Sogreah a été développée en se basant sur des études menées sur 32 bassins versants algériens et 9 bassins tunisiens. Cette formule prend en considération la répartition du bassin versant en fonction de sa perméabilité.

Les résultats obtenus du calcul des apports solides sont résumés dans le tableau (3.22) ci-dessous :

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

Tableau 3.22: Estimation de l'apport solide des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

Transport solide	Estimation de l'apport solide ( $E_s$ ) (t/km <sup>2</sup> /an)	Volume de sédiments	L'apport solide en sédiment (T/an)	L'apport solide en charriage (T/an)	L'apport total (T/an)
Formules	$E_s = a \times L_e^{0.15}$ ES : taux d'abrasion (t/km <sup>2</sup> /an). Le : lame d'eau ruisselée en (mm) a = 350	$V_s = \frac{E_s \times S}{\gamma}$ En tenant compte du poids spécifique moyen des sédiments $\gamma = 1.4 \text{ T/m}^3$ .	$A_s = E_s \times S$ As : apport solide en sédiment (T/an) Es : taux d'abrasion (t/km <sup>2</sup> /an). S : Surface du bassin versant (km <sup>2</sup> )	$A_{char} = 20\% A_s$ Achar : L'apport solide de charriage (t/an) As : As : apport solide en sédiment (T/an)	$A_t = A_s + A_{char}$ At: L'apport total (T/an) As : apport solide en sédiment Achar : L'apport solide de charriage
B.V Oued Ziad	665.5	5747.07	8045.90	1609.18	9655.08
B.V Oued Mgharouel	686.13	4533.36	6346.70	1269.34	7616.04

(Source : Traitement personnel)

Les résultats obtenus dans le tableau (3.22) indiquent un apport solide annuel de 9655.08 tonnes pour le bassin versant d'Oued Ziad et 7616.04 tonnes pour le bassin versant d'Oued Mgharouel. Ces quantités incluent des particules de sol, des débris végétaux et d'autres matières solides érodées des berges et du lit des cours d'eaux, ainsi que celles apportées par les affluents lors des précipitations chaque année. Ces valeurs suggèrent qu'il y a une érosion en amont ou des régions avec des sols facilement érodés dans les deux bassins versants, ce qui peut entraîner une sédimentation accrue en aval, potentiellement affectant la morphologie du lit des Oueds. Ces informations sont essentielles pour élaborer des plans d'aménagement du territoire, des mesures de

## CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

conservation des sols, et des stratégies de gestion des bassins versants afin de réduire l'érosion et la dégradation des terres.

### **Conclusion**

L'analyse climatique nous a permis d'identifier les principales caractéristiques climatiques spécifique des bassins versants étudiés.

Le bassin versant d'Oued Rhumel est soumis à un climat semi-aride à méditerranéen humide. Au plan climatique, ce bassin présente des contrastes marqués : au nord, un climat humide et pluvieux prédomine, avec des précipitations annuelles moyennes atteignant 970 mm, tandis qu'au sud, le climat est semi-aride avec des précipitations annuelles moyennes d'environ 250 mm.

Il est important de noter que le climat des hautes plaines environnantes exerce une influence sur notre bassin versant, qui se caractérise par deux saisons bien définies : une saison chaude et sèche s'étendant de fin mai à fin octobre, suivie d'une saison froide et humide de novembre à avril-mai.

Les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel sont caractérisé par un régime climatique mixte. En amont, ils bénéficient d'un climat subhumide avec des précipitations intenses dépassant les 550 mm, principalement issues des montagnes de Djebel El Wahch, Djebel Kellal, Djebel Ben Khelifa et Djebel Ben Ouataf. En aval, ils sont soumis à un climat semi-aride avec des précipitations inférieures à 550 mm.

L'établissement de l'analyse hydrologique des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel vise à estimer le débit de crue optimal afin de réaliser une modélisation hydraulique de l'aléa inondation dans le chapitre suivant et de proposer des aménagements adaptés aux conditions des Oueds. La détermination des débits de pointe fréquentiels et les hydrogrammes de crues des cours d'eau repose sur l'utilisation de plusieurs formules empiriques. Les résultats obtenus des calculs sont les suivants :

- Les séries pluviométriques sont mieux ajustées à la loi Log Normal pour les deux bassins versants.
- L'analyse des pluies de courte durée, correspondant au temps de concentration du bassin versant d'Oued Ziad, a permis de déterminer que la crue historique du 19 septembre 2018 a une période de retour centennale.
- Le débit de crue centennale pour le bassin versant d'Oued Ziad est estimé à 56.37 m<sup>3</sup>/s et à 51.59 m<sup>3</sup>/s pour le bassin versant d'Oued Mgharouel. Ces débits de pointe, en particulier les débits centennaux, peuvent provoquer l'inondation de vastes terrains. Les hydrogrammes de crues établis montrent l'évolution des crues pour les différentes fréquences au fil du temps.

### CHAPITRE III : ANALYSE HYDRO-CLIMATIQUE

- L'étude des écoulements a permis de déterminer non seulement les débits de crue, mais aussi les apports liquides et solides. En effet, la lame d'eau écoulee dans les bassins versants d'Oued Ziad et d'Oued Mgharouel est assez élevée, atteignant respectivement 72,53 mm et 88,90 mm.
- Les apports liquides sont estimés à 0,88 hm<sup>3</sup> pour le bassin versant d'Oued Ziad et à 0,82 hm<sup>3</sup> pour le bassin versant d'Oued Mgharouel, avec des quantités importantes de transport solide dans les deux bassins (665,5 tonnes/km<sup>2</sup>/an pour Oued Ziad et 686,13 tonnes/km<sup>2</sup>/an pour Oued Mgharouel). Ces quantités sont transportées vers l'aval, menaçant les zones urbaines et provoquant des dommages aux infrastructures existant

# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

## **Introduction**

L'étude des risques naturels, notamment des inondations, se déroule en deux étapes.

La première, consiste à analyser l'aléa d'inondation, tandis que la seconde se concentre sur l'étude de la vulnérabilité. Ces deux aspects posent une problématique en termes de délimitation de la zone d'étude, car leurs échelles diffèrent. L'étude de l'aléa inondation s'effectue à l'échelle du bassin versant, tandis que l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux se fait à celle de la commune ou de l'agglomération qui se situe dans le bassin versant et correspondant aux limites administratives. Il est à noter que la méthodologie d'évaluation des risques dépendra de la disponibilité, de la nature et de la qualité des données.

Dans ce chapitre nous procédons dans un premier lieu à faire la cartographie du risque inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel en utilisant le Processus d'Analyse Multicritère Hiérarchique (Analytical Hierarchy Process « AHP »). Cette approche intégrative permettra d'apprécier et d'évaluer les différents facteurs géoenvironnementaux intimement liés à l'aléa inondation ainsi que les facteurs urbains et structuraux qui jouent un rôle prépondérant dans la vulnérabilité. Cette technique est idéale lorsque l'accès aux données statistiques de mesure est impossible, c'est bien le cas du bassin versant d'Oued Rhumel.

Ensuite nous procéderont à cartographier le risque d'inondation dans ceux d'Oued Ziad et Oued Mgharouel par croisement de l'aléa et de la vulnérabilité. Il est important de noter que ces derniers ont été cartographiés en utilisant les systèmes d'informations géographiques (SIG), en associant le logiciel HecRas de simulation hydraulique de l'aléa inondation.

Le résultat final de la cartographie du risque vise à développer une stratégie de prévention et d'adaptation au risque dans une perspective de durabilité et de résilience.

### **4.1. Évaluation des zones vulnérables au risque d'inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel (Analyse multicritère hiérarchique)**

La méthode du processus d'analyse multicritère hiérarchique (Analytical Hierarchy Process, AHP) est employée pour identifier les zones potentiellement vulnérables au risque d'inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel. En couplant cette méthode avec les systèmes d'informations géographiques (SIG), nous pouvons cartographier la variabilité spatiale du risque en tenant compte des différents facteurs influençant ce phénomène. Cette technique est efficace pour hiérarchiser de multiples facteurs et produire une information spatiale

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

L'évaluation de cette susceptibilité dans le cas d'Oued Rhumel permet de repérer les zones sensibles et susceptibles d'être inondées. De nombreux experts en hydrologie utilisent l'approche d'analyse hiérarchique pour sélectionner les paramètres pertinents qui influent sur le risque. Grâce à l'expertise de ces spécialistes et à une étude approfondie de la zone concernée, nous avons pu identifier les facteurs ayant le plus d'impact sur le phénomène d'inondation dans le bassin versant étudié. Les facteurs pris en compte incluent les précipitations annuelles moyennes, la densité de population, l'occupation du sol (Couverture du sol), la pente, la densité de drainage, l'élévation, la distance à la rivière, la distance aux routes, ainsi que l'indice d'humidité topographique. Ces éléments sont analysés à l'aide de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) en utilisant les systèmes d'information géographique (SIG) comme outil pour générer les cartes et estimer l'étendue des zones exposées et vulnérables.

En effet, l'augmentation du taux des précipitations accroît considérablement la probabilité du risque d'inondation en favorisant un ruissellement plus important sur la surface du sol. Pour réaliser la carte des précipitations moyennes mensuelles, nous avons utilisé les données des pluies moyennes extraits de la carte pluviométrique de l'Algérie septentrionale, réalisée par l'ANRH. Aussi, la densité de drainage affecte directement la stabilité du sol, en particulier dans les zones montagneuses, elle contribue de manière significative à la recharge des eaux souterraines, ce qui peut provoquer des glissements de terrain et des d'inondation, puisqu'elle affecte la perméabilité et la capacité de stockage du sol, influençant ainsi l'infiltration et le ruissellement. De même pour la pente qui joue un rôle important dans le changement de la vitesse de l'eau et de la force de l'inondation et le degré de l'infiltration (Das, 2020).

Par ailleurs, nous relevons que, l'élévation modifie la direction et la profondeur de l'écoulement et peut influencer significativement la classification des zones à risque.

C'est aussi, un paramètre déterminant dans la catégorisation des risques d'inondation, ayant une influence plus marquée que la pente. Les cartes de la densité de drainage, la pente et l'élévation ont été réalisées en utilisant le modèle numérique de terrain de 30 m de résolution, ensuite nous avons effectué le traitement final de chaque carte sur Arcmap en utilisant la commande spécifique sur Arctoolbox pour chaque carte

L'indice d'humidité topographique (TWI) sert à prédire la saturation du sol en surface. En effet, le sol a la capacité de créer un écoulement de surface lorsqu'il est saturé en eau, plus la valeur TWI est élevée, plus elle devient vulnérable aux inondations (Das, 2018). L'extraction de la carte de

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

l'indice d'humidité topographique a aussi été effectué en utilisant le modèle numérique du terrain d'une résolution de 30m, ensuite nous avons fait le traitement par ArcGis en utilisant l'outil Arctoolbox.

La distance par rapport aux Oueds ainsi que, la distance par rapport aux routes, sont des facteurs clés qui influent significativement sur le risque d'inondation, plus on est proche des routes ou des Oueds plus le risque d'inondation augmente, cette distance peut varier aussi, selon la taille et le type du cours d'eau.

Pour la réalisation de ces cartes nous avons utilisé le modèle numérique du terrain de 30m de résolution format raster en complémentarité avec le fichier vecteur des rivières et des routes existantes dans le bassin versant, ensuite nous les avons traités par Arcmap en utilisant la commande de la distance euclidienne sous Arctoolbox.

Les variations dans la couverture et l'occupation des sols, impactent également les processus hydrologiques tels que l'infiltration, le ruissellement de surface, l'évaporation et l'évapotranspiration.

Dans la présente partie de notre travail, nous avons extrait les données relatives à l'occupation du Sol du bassin versant d'Oued Rhumel ; à partir de l'exploitation de la carte produite par ESRI-2020.

La carte de la densité de population du bassin versant a été extraite à partir de la plateforme cartographique (LuminoCity 3D), interactive destinée à explorer les performances et la dynamique des villes. Elle compile divers indicateurs clés sur les villes, comme la population, la croissance, le logement, les habitudes de déplacement, l'emploi, l'implantation des entreprises et l'utilisation de l'énergie. Ces données sont visualisées en 3D et traitées pour montrer la densité des centres urbains, facilitant ainsi l'analyse des relations entre la forme des villes et leurs performances.

### **4.1.1. Méthodologie d'application du processus d'analyse multicritère hiérarchique (AHP)**

La première étape implique la subdivision d'un problème complexe en sous-critères adaptés à ce dernier, organisés selon une hiérarchie de classifications. La deuxième phase met en lumière le rôle du décideur qui établit la comparaison binaire entre deux critères, en se basant sur son expérience sur le terrain étudié, et les informations recueillies auprès d'experts. L'évaluation de la décision se déroule de manière orale avant d'être convertie en une valeur numérique. Le principe est clairement défini sur une échelle absolue allant de 1 à 9 présenté dans le tableau (4.1) ci-dessous et son inverse.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Tableau 4.1 : Echelle de Saaty

Échelle recommandée de comparaison	
Intensité d'Importance	La description
1	Importance égaux
2	Égale à modérée
3	Importance modérée
4	Importance modérée à forte
5	Importance Forte
6	Importance Fort à très forte
7	Très forte importance
8	Très à extrêmement forte importance
9	Extrême importance

(Source : Saaty , 1980)

La troisième phase implique l'élaboration d'une matrice comparative. Les évaluations concernant les actions non essentielles sont échangées entre experts en se basant sur l'historique ou l'expérience de l'action en question. Les valeurs comparatives sont structurées au sein d'une matrice.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & a_{12}\dots & a_{1j} \\ a_{21} & 1 & a_{2j} \\ \vdots & & \\ a_{i1} & a_{i2}\dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Nombre des comparaisons} = \frac{n(n-1)}{2} \quad (\text{Equation 4.1})$$

Si la valeur attribuée à un élément reflète son importance ou son influence sur un autre élément, le calcul du poids est réalisé selon l'équation suivante.

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \frac{\text{poid d'attribut } i}{\text{poid d'attribut } j} \quad (\text{Equation 4.2})$$

Après avoir déterminé les poids des critères de l'étude, il est nécessaire d'évaluer la cohérence. Le taux de cohérence (CR) est un indicateur évaluant l'uniformité et la consistance des poids des attributs au sein de chaque catégorie d'acteurs. Pour qu'une matrice soit considérée comme valide,

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

le taux de cohérence (CR) doit être inférieur à 0,01. Sa vérification peut être effectuée en utilisant l'équation suivante :  $CR = \frac{CI}{RI}$  (Equation 4.3) Où :

- CI est l'indice de consistance de la matrice normalisée calculé pour déterminer le degré d'incohérence de la matrice.
- On peut calculer l'indice de consistance de la manière suivante st est calculé à l'aide de la formule  $CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1}$  (Equation 4.3) où :
- $\lambda_{\max}$  est la plus grande valeur propre. Une matrice obtenue à partir de la matrice de préférence, n est la matrice de taille de comparaison. RI est l'indice de cohérence moyen de comparaisons aléatoires répétées (Saaty, 1980) ou de simulations.

Tableau 4.2 : Valeurs moyennes de l'indice de cohérence pour les comparaisons selon la taille de la matrice n

<b>n</b>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>RI</b>	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

(Source : Saaty, 1980)

### 4.1.2. Analyse et discussion des résultats

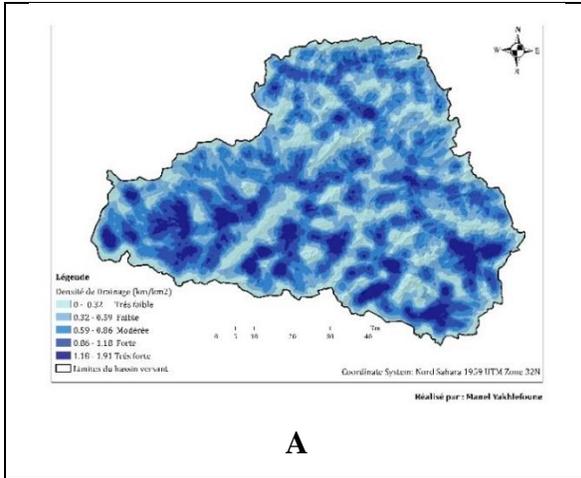
Les valeurs d'indice de cohérence résultantes (Tableau 4.3) montrent un taux de cohérence élevé parmi les jugements sélectionnés, et sont inférieures au seuil de 0,1, de sorte que les valeurs pondérées peuvent être acceptées.

Tableau 4.3 : Valeurs de CI et CR

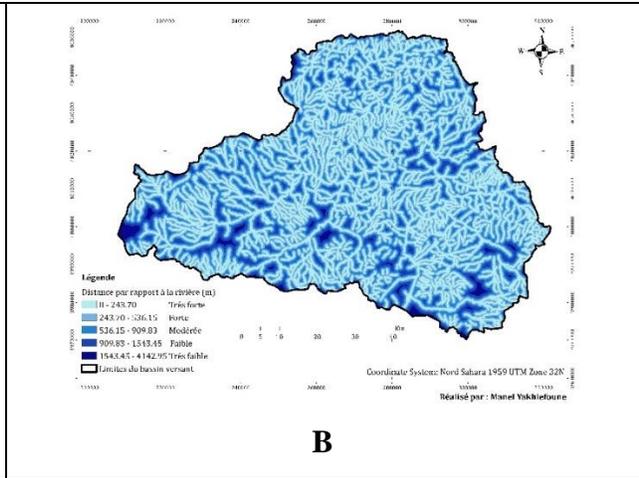
CI= indice de cohérence, n=9	RI= Indice de cohérence aléatoire
$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.02$	$CR = \frac{CI}{RI} = 0.0144$

(Source : Traitement personnel)

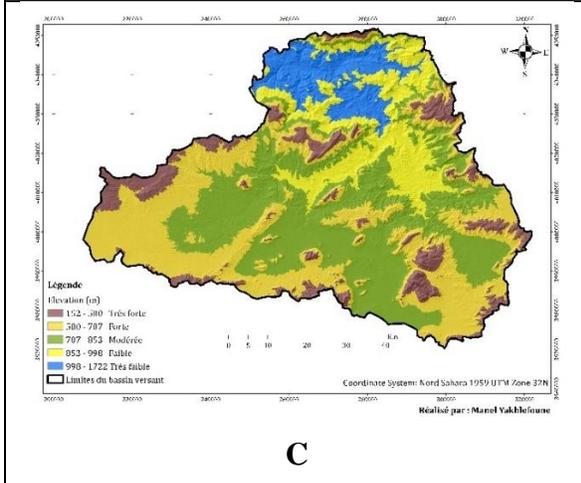
# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE



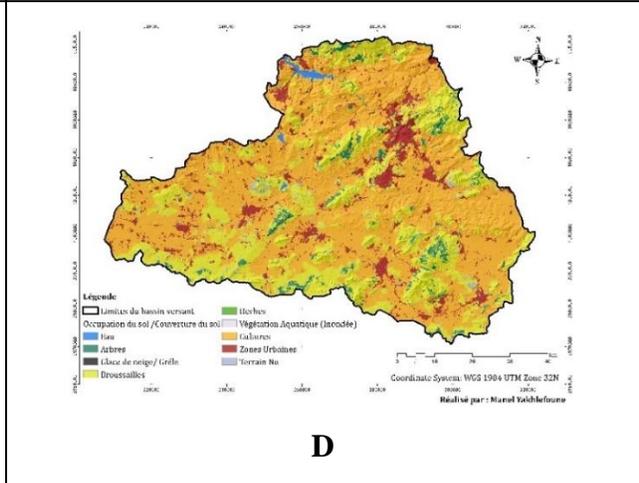
**A**



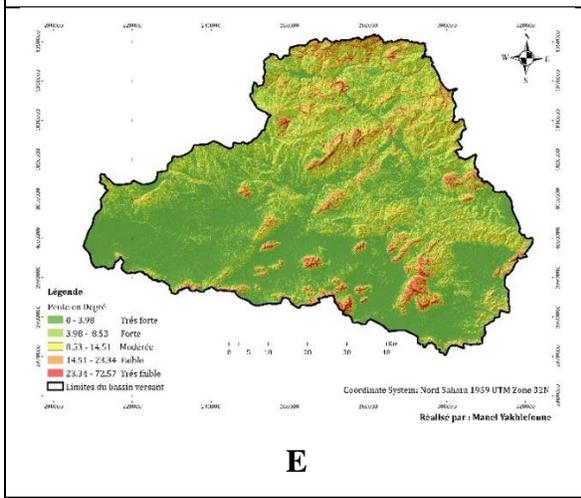
**B**



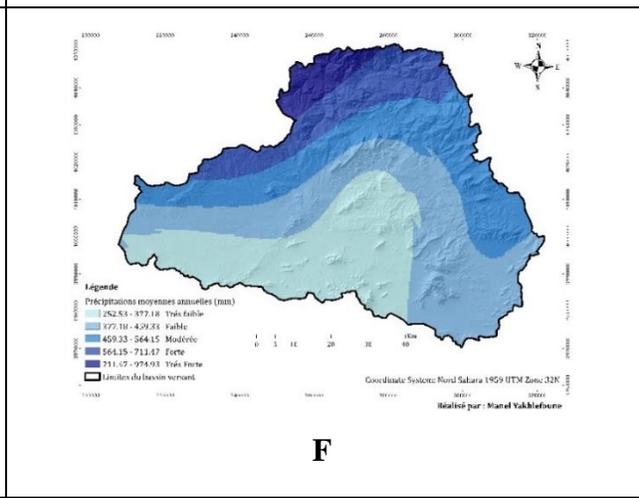
**C**



**D**



**E**



**F**

# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

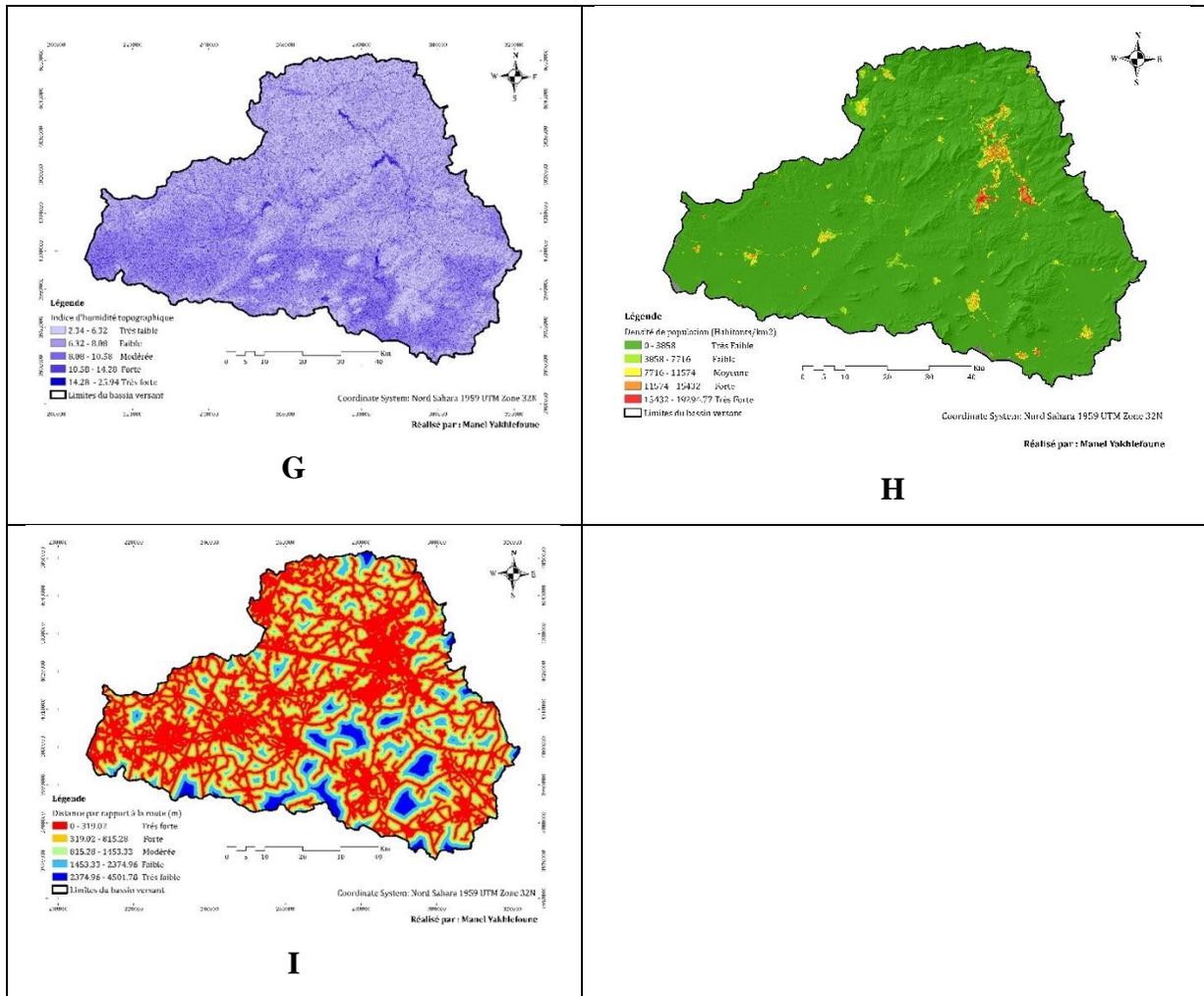


Figure 4.1 : Paramètres qui influent sur l’inondation : (A) densité de drainage, (B) distance à la rivière, (C) élévation, (D) occupation du sol, (E) pente, (F) précipitations moyennes annuelles, (G) indice d’humidité topographique, (H) Densité de la population, (I) distance aux routes.

(Source : Traitement personnel)

Les résultats obtenus à partir de la réalisation des cartes pour chaque facteur montrent une forte densité de drainage dans la partie méridionale du bassin versant (Figure 4.1.A), cela implique un écoulement de surface accéléré, augmentant ainsi la probabilité d’inondation, les valeurs de la carte de la densité de drainage varient entre 0.0076 et 3.6 km/km<sup>2</sup>.

Les précipitations moyennes annuelles les plus élevés (711.47 mm – 974.93 mm) sont constatées dans le Nord du bassin versant et qui correspond à la partie aval d’Oued Rhumel près du barrage de Beni Haroun (Fig 4.1B) ce qui augmente considérablement la probabilité d’inondation.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Selon la carte de la densité de population (Fig 4.1H), on constate que plus de la moitié de la surface du bassin a une très faible densité de population cela s'explique par le tissu urbain qui occupe une surface minimale dans ce bassin, les zones de forte à très forte densité de population sont localisées dans la région de Constantine répartie entre la commune de Constantine et la commune d'El Khroub respectivement.

Les valeurs élevées de l'indice d'humidité topographique (Fig 4.1G) correspondent à des zones favorisant l'accumulation d'eau et un ruissellement important, les valeurs élevées sont enregistrées dans les zones imperméables et dans les cours d'eaux permanents.

En ce qui concerne les distances par rapport à l'Oued et par rapport aux routes, il n'y a pas d'accord sur le nombre de distances critiques présentant des risques élevés d'inondation. La distance est différente d'un Oued à l'autre et d'une route à l'autre. Selon Das (2020), les petits Oueds peuvent influencer jusqu'à plusieurs mètres de la rive, mais jusqu'à plusieurs kilomètres dans les grands Oueds. Dans ses travaux de (2018, 2019), Das a déclaré que la distance de 500 mètres était la plus vulnérable aux inondations, tandis que (Samanta et al.2016 ; Rahmati et al., 2016 ; Ajjur and Mogheir,2020) mentionnent 100 mètres comme la distance la plus vulnérable. Selon la figure (4.1B, et 4.1I) plus on est proches des Oueds et des routes plus la probabilité au risque d'inondation augmente.

L'élévation et la pente du bassin versant sont considérées comme les facteurs les plus importants qui influent sur le régime des précipitations, en effet, les valeurs faibles indiquent une très forte probabilité aux inondations (Fig 4.1C, 4.1E)

La réalisation de la carte d'occupation du sol nous a permis d'identifier les zones avec un potentiel élevé à l'aléa inondation et les zones à potentiel faible. En effet, l'occupation du sol peut agir comme un facteur qui favorise le risque lorsqu'il s'agit des zones urbaines avec des surfaces imperméables qui augmentent le ruissellement, comme elle peut agir comme un facteur qui diminue le risque lorsqu'il s'agit des zones humides avec une végétation dense. Les résultats obtenus montrent que plus de la moitié de la surface du bassin est occupée par l'agriculture ce qui favorise une infiltration meilleure des précipitations (Fig 4.1D).

Afin de combiner l'ensemble des cartes, ils doivent être à une échelle commune, c'est pourquoi nous avons reclassé toutes les cartes thématiques en cinq classes pour chaque facteur afin de former la matrice de comparaison. Les résultats obtenus du processus final de pondération pour chaque critère est donnée dans le (Tableau 4.4) ci-dessous.

CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION  
: VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Tableau 4.4 : Matrice de comparaison

	élévation	Pente (°)	Densité de Drainage	Précipitation	Densité de population	Distance à la rivière	Occupation du sol	Indice d'humidité topographique	Distance à la route
Élévation	1	2	2	2	3	4	5	6	7
Pente (degré)	1/2	1	1	1	2	3	4	5	6
Densité de Drainage	1/2	1	1	1	2	3	4	5	6
Précipitation	1/2	1	1	1	1	2	3	4	5
densité de population	1/3	1/2	1/2	1	1	1	2	3	4
Distance à la rivière	1/4	1/3	1/3	1/2	1	1	2	3	4
Occupation du sol	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1	2	3
Indice d'humidité topographique	1/6	1/5	1/5	1/4	1/3	1/3	1/2	1	2
Distance à la route	1/7	1/6	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/2	1
Somme	3.593	6.450	6.450	7.283	11.083	15.083	21.833	29.500	38.000
Poids des facteurs	0.26	0.17	0.17	0.14	0.09	0.08	0.05	0.03	0.02
Poids (%)	26	17	17	14	9	8	5	3	2
(Somme x poids des facteurs)	0.93	1.07	1.07	0.99	1.03	1.15	1.07	0.98	0.89

(Source : Traitement personnel)

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Les résultats obtenus de l'application du processus d'analyse multicritère hiérarchique dans le bassin versant d'Oued Rhumel indiquent que le poids maximal dans le tableau (4.4) du processus d'analyse hiérarchique correspond au facteur de l'élévation (0,26 soit 26 %), ce dernier est considéré comme le facteur le plus important dans le cas de ce bassin. Les facteurs de la pente et la densité de drainage viennent en deuxième position et prennent un poids identique de (0.17 soit 17%) dans la matrice d'AHP, suivie par le facteur de précipitations moyennes annuelles qui est classé en quatrième position et prend un poids de 0.14 soit (14%). Le facteur de la densité de population vient en 5ème position dans la matrice AHP (Tableau 4.4), par rapport au degré d'influence avec un poids de 0.09 soit 9%.

La distance aux Oueds prend la sixième position dans la matrice AHP tandis que la distance aux routes prend la neuvième position avec des poids de 8% et 2% respectivement.

Enfin, la 7ème et 8ème position sont respectivement occupées par l'occupation du sol et l'indice d'humidité topographique avec des poids de 0.05 et 0.03 soit 5% et 3%.

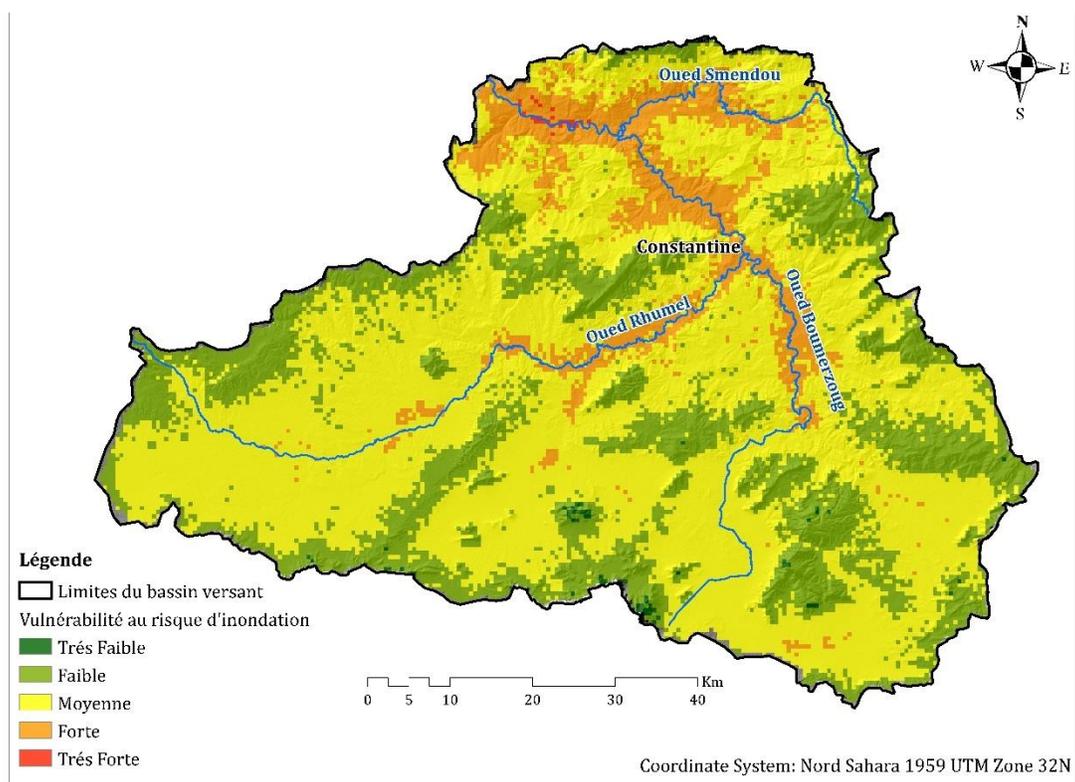
Les paramètres classés ont été intégrés dans le logiciel Arcmap 10.8 grâce à l'option de superposition pondérée sous l'outil arctoolbox en assignant les valeurs de poids résultantes dans la matrice de comparaison AHP pour chaque paramètre.

Ces pondérations sont utilisées pour corriger le degré d'importance de chaque critère en le multipliant par les couches de la carte pour chaque critère, par l'utilisation de l'option de superposition pondérée sur ArcMap (Kahsay et al. 2018), afin d'extraire la carte finale de vulnérabilité au risque d'inondation en suivant (l'équation 4.4)

La vulnérabilité = (Elévation  $\times$  0.26) + (pente  $\times$  0.17) + (densité de drainage  $\times$  0.17) + (Distance à la rivière  $\times$  0.08) + (indice d'humidité topographique  $\times$  0.03) + (précipitation moyenne annuelle  $\times$  0.14) + (occupation du sol  $\times$  0.05) + (Densité démographique  $\times$  0.09) + (distance aux routes  $\times$  0.02) ... (Equation 4.4)

Le croisement des différents paramètres géoenvironnementaux et urbains influençant le risque d'inondation permet d'identifier le niveau de vulnérabilité.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE



Réalisé par : Manel Yakhlefoune

Figure 4.2 Carte finale de vulnérabilité au risque d'inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel.

(Source : Traitement personnel)

La carte finale de vulnérabilité au risque d'inondation (Fig 4.2) réalisée par la méthode AHP montre que plus de la moitié de la surface du bassin versant est exposé à un risque moyen, cette portion de la surface représente 63.03%.

Les zones à risque fort et très fort représente 0.10% et 10.5% de la superficie totale du bassin et se sont des zones d'expansion des plaines alluviales qui correspond au lit majeur des cours d'eau d'Oued Rhumel, Oued Boumerzoug et Oued Smendou (Fig 4.2).

Les zones qui présentent une vulnérabilité faible et très faible représentent respectivement 26.15 % et 0.21 %, elle correspond aux zones qui présente un relief fort, avec des pentes un peu élevées.

### 4.1.3. Synthèse

La quantification des facteurs influençant le risque d'inondation grâce à l'utilisation de la méthode d'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) intégrée dans ArcMap a permis une analyse détaillée et objective de l'impact de chaque facteur. Cette approche repose sur la pondération des critères

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

géoenvironnementaux et urbains pertinents, afin d'évaluer leur contribution respective au risque d'inondation.

La carte finale de vulnérabilité au risque d'inondation obtenue par cette méthode met en évidence une répartition claire des zones classées selon leur niveau de risque, allant de faible à très fort. Les zones à faible risque se situent principalement dans les reliefs élevés et bien drainés, tandis que les zones à très fort risque coïncident avec les plaines alluviales, les lits majeurs des cours d'eau et les zones fortement urbanisées près des cours d'eau.

Ces résultats sont essentiels pour orienter les mesures de prévention et de gestion du risque. Cette méthodologie offre un outil puissant pour une gestion intégrée et efficace des risques d'inondation, en permettant aux décideurs d'identifier les priorités et de planifier des actions adaptées aux spécificités de chaque zone.

Nous pensons que l'intégration du processus de l'analyse hiérarchique (AHP) dans le logiciel SIG fournit un puissant système d'aide à la décision spatiale qui permet de cartographier efficacement la vulnérabilité au risque d'inondation afin de comprendre la relation entre l'inondation et les facteurs aggravant sa dynamique pour une meilleure gestion et un bon maintien des ressources en eau. Les résultats obtenus de cette méthodologie de travail peuvent servir comme une approche et un document d'aide à la décision pour les gestionnaires des villes et les décideurs.

### **4.2. Modélisation hydraulique de l'aléa inondation dans les bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel**

La modélisation hydraulique permet de cartographier l'étendue des inondations, en fournissant des informations sur les élévations et hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement. Elle repose sur des modèles de propagation des débits qui simulent la dynamique des écoulements dans les cours d'eau et calculent le niveau d'eau correspondant à un débit donné. Les modèles hydrauliques pour la simulation des crues se divisent en deux catégories : les modèles hydrodynamiques unidimensionnels (1D) et bidimensionnels (2D).

Il existe plusieurs logiciels de simulation de l'aléa inondation, l'un des plus couramment utilisés est le modèle HEC-RAS, mis en place et développé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine (US Army Corps of Engineers).

#### **4.2.1. Présentation du logiciel de simulation HECRAS**

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est un logiciel informatique de modélisation hydraulique développé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine (US Army Corps of Engineers). Il est utilisé pour :

- Simuler l'écoulement des cours d'eau tout en tenant compte des structures de franchissement.
- déterminer les hauteurs d'eau en fonction des débits et délimiter les zones inondables.
- Gérer les ressources en eau et réaliser des évaluations environnementales.

Le HEC-RAS permet de réaliser des simulations en une dimension (1D) ou en deux dimensions (2D).

Le HEC-RAS est reconnu pour sa précision, sa flexibilité et sa facilité d'utilisation, ce qui en fait un outil de référence dans les études hydrauliques et hydrologiques.

### **4.2.2. Méthodologie de simulation de l'aléa inondation des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel**

La modélisation de l'aléa inondation dans les bassins versants étudiés nécessite l'élaboration d'une base de données :

- La topographie représentée par un levé topographique du cours d'eau ou un modèle numérique du terrain de très bonne résolution pour éviter le décalage du cours d'eau par erreur d'altitude lors de la simulation. D'une manière générale, plus on dispose des données topographiques précises, plus nos profils seront représentatifs de la géométrie réelle de la section de l'oued, dans ce contexte nous avons utilisé le levé topographique d'Oued Ziad élaboré par l'entreprise Hydro-Projet Est Engineering sis à Constantine, ainsi pour avoir des résultats plus fiables et précis nous avons utilisé les modèles numérique de terrain des deux bassins versants d'une résolution du 10m obtenus à partir de la digitalisation des courbes de niveau de la carte topographique à l'échelle de 1/25000 pour simuler l'aléa inondation
- En outre, nous avons utilisé les données géométriques d'Oued Ziad obtenus par l'entreprise (HPE) pour générer les cross sections, tandis que pour le bassin versant d'Oued Mgharouel, nous avons utilisé le modèle numérique de terrain pour tracer le cours d'eau et les cross sections ainsi que les données d'élévation pour chaque section transversale.
- La rugosité du cours d'eau à simuler ainsi que ses berges.
- La pente en amont et en aval. Dans cette étude les pentes en amont et en aval ont été calculé par le logiciel HecRas.

### **4.2.3. Cartographie de l'aléa inondation**

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

La cartographie de l'aléa inondation est un outil essentiel dans la gestion des risques naturels et la planification territoriale. Elle permet de visualiser et d'évaluer les zones susceptibles d'être affectées par des inondations, offrant ainsi une base précieuse pour la prévention, la préparation et la réponse aux catastrophes. En identifiant les régions à risque, la cartographie aide à orienter les politiques d'aménagement, à informer les populations et à élaborer des stratégies d'adaptation efficaces

### 4.2.3.1. Cartographie de l'aléa inondation dans le bassin versant d'Oued Ziad

Les données topographiques (profil en long et cross sections) forment la base fondamentale de toutes les modélisations hydrauliques des cours d'eau. Dans notre étude nous avons créé le profil longitudinal ainsi que les cross sections transversales relatives à Oued Ziad pour lancer la modélisation hydraulique et la cartographie de l'aléa inondation

#### 4.2.3.1.1. Profil en long

Le profil en long représente graphiquement les variations d'altitudes du lit de l'Oued en fonction de la distance

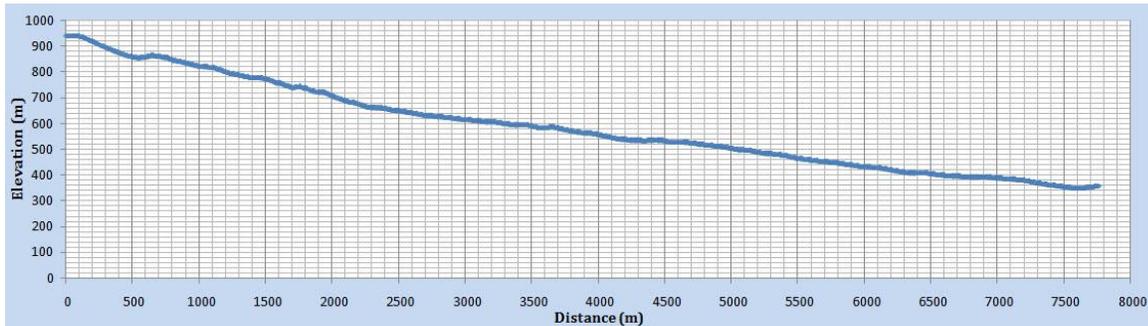


Figure 4.3 Profil en long du bassin versant d'Oued Ziad

(Source : Auteure)

On constate d'après la (Figure 4.3) ci-dessus, qu'il y'a une variation des pentes du cours d'eau d'Oued Ziad de l'amont à l'aval, en effet, plus on se dirige vers le Nord -Est, plus les pentes augmentent (correspondant aux zones de reliefs) soit 6.4 %. Plus on se dirige vers le sud, plus les pentes diminuent (correspondant au cours d'eau) soit 4.9 %.

#### 4.2.3.1.2. Cross sections transversales

Les profils transversaux sont obtenus grâce à des coupes perpendiculaires des cours d'eau, ils permettent d'avoir une idée assez précise de la géométrie en un point donné de ces derniers.

# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Par ailleurs, nous avons pu tracer 39 profils transversaux qui ne se croisent pas entre sur une longueur de 8.38 km du cours d'eau, qui couvrent pratiquement la totalité de la plaine alluviale et qui prennent en compte le modelé du relief au niveau du lit majeur (Fig 4.4).

A noter que les simulations ont été réalisées pour des périodes de retour de 10 ans, 20ans, 50ans, 100ans et 1000 ans

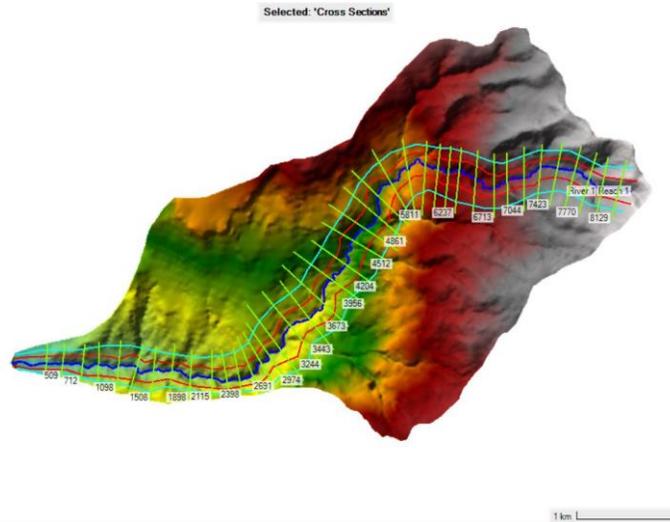
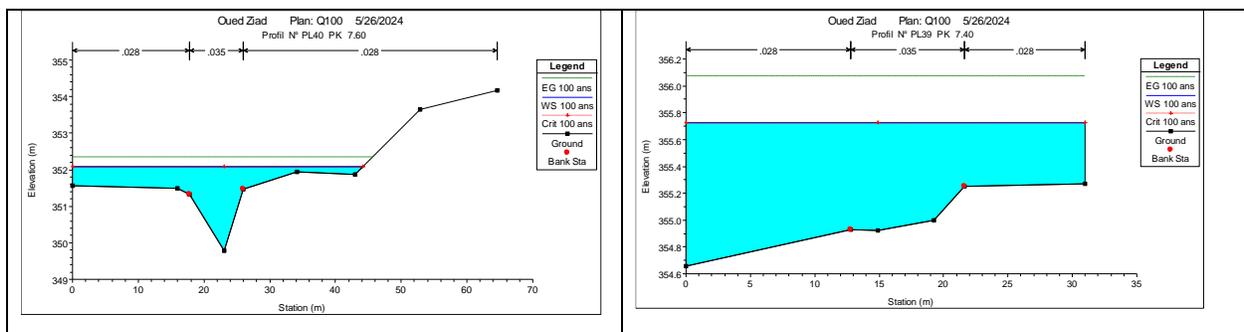


Figure 4.4 Cross sections transversales d'Oued Ziad

(Source : Auteure)

Dans cette étude on opte pour une analyse des résultats de simulation des débits centennales qui est la fréquence utilisée en hydraulique pour le dimensionnement des ouvrages de protection des cours d'eaux contre les crues.



# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

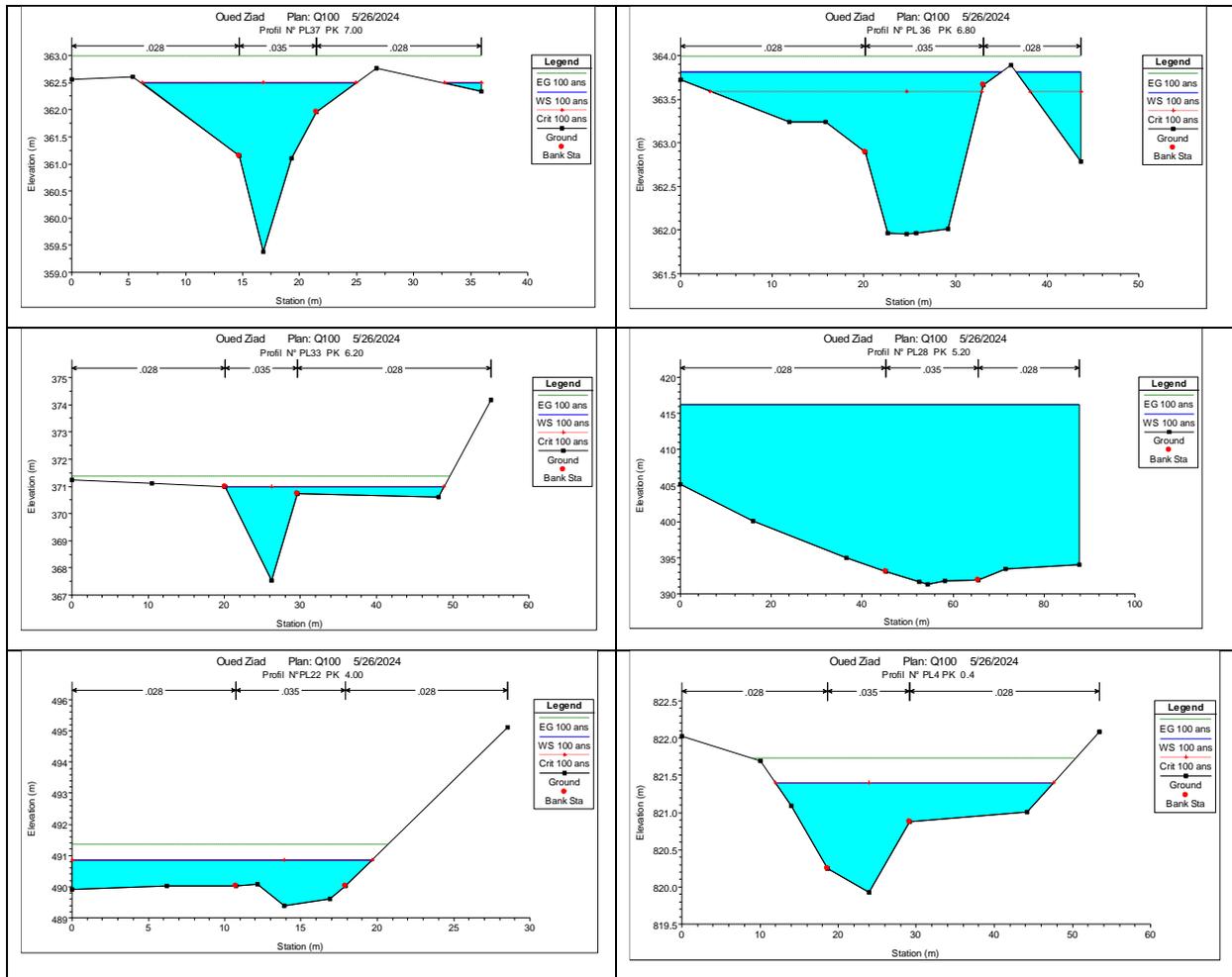


Figure 4.5 : Résultat de simulation du débit centennal dans certaines sections transversales d'Oued Ziad qui présentent des débordements.

(Source : Traitement personnel)

## ✓ Lecture de la figure

Les deux points rouges indiqués sur les sections dans la figure (4.5) représentent les limites du lit mineur de l'oued, tandis que le niveau d'eau dans les lits mineur et majeur est représenté en bleu.

-La ligne EG 100 ans montre la ligne d'énergie pour un débit centennal.

-La ligne WS 100 ans montre le niveau de la surface de l'eau pour un débit centennal.

- ligne Crit 100 ans montre la ligne critique pour un débit centennal, correspondant au profil de la surface de l'eau lorsque le flux est critique.

Les différentes coupes transversales nous renseignent sur une série d'éléments : L'asymétrie des rives, Le rétrécissement et le surcreusement du lit de l'Oued dans certains secteurs, Ces dernières particularités seraient intimement liées au contexte néo actif de cette région.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

La direction principale du cours d'eau d'une linéarité presque parfaite est NE-SO (NORD-EST SUD-OUEST), en amont et devient E-O (Est-Ouest) vers l'aval. Le cours d'eau est peu sinueux et semble suivre des segments d'accidents linéaires.

Tableau 4.5 : Résultat des calculs de la simulation hydraulique du débit centennale par HacRas

River Station	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Velocity Chnl (m/s)	Flow Area (m <sup>2</sup> )	Top Width (m)	Water level (m)
39	50.98	886.92	888.14	888.14	888.65	0.011952	3.2	16.18	16	1.22
38	50.98	832.24	834.53	834.53	835.11	0.012476	3.36	15.18	13.26	2.29
37	50.98	819.93	821.36	821.36	821.66	0.008033	2.74	22.09	34.99	1.43
36	50.98	775.23	777.63	777.63	778.24	0.012609	3.46	14.75	12.28	2.4
35	50.98	762.55	765.08	765.08	765.72	0.012809	3.55	14.38	11.38	2.53
34	50.98	711.71	712.76	712.76	713.17	0.013238	2.84	17.95	22.07	1.05
33	50.98	675.95	676.71	676.71	677.02	0.014647	2.45	20.83	34.84	0.76
32	50.98	652.75	654.07	654.07	654.53	0.012896	3	16.99	18.78	1.32
31	50.98	610.38	612.22	612.22	612.68	0.012719	3	16.97	18.48	1.84
30	50.98	606.23	607.43	607.43	607.88	0.012902	2.97	17.15	19.07	1.2
29	50.98	593.62	594.3	594.3	594.55	0.015579	2.2	23.19	47.87	0.68
28	50.98	576.78	579.64	579.64	580.36	0.013474	3.76	13.55	9.49	2.86
27	50.98	561.25	562.75	562.75	563.29	0.012478	3.26	15.64	14.47	1.5
26	50.98	555.02	557.13	557.13	557.68	0.012576	3.26	15.62	14.56	2.11
25	50.98	548.29	550.03	550.03	550.4	0.013854	2.7	18.9	25.44	1.74
24	50.98	541.81	543.97	543.97	544.65	0.012505	3.68	14.11	10.68	2.16
23	50.98	537.38	538.88	538.88	539.22	0.009446	1.61	20.02	29.8	1.5

CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE  
AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

22	50.98	516.97	519.1	519.1	519.64	0.012405	3.23	15.77	14.78	2.13
21	50.98	507.21	509.52	509.52	510.17	0.012444	3.6	14.18	10.79	2.31
20	50.98	489.03	492.16		492.26	0.00122	1.4	36.4	20.76	3.13
19	50.98	489.38	490.8	490.8	491.25	0.010267	3.01	17.24	19.55	1.42
18	50.98	474.88	476.93	476.93	477.53	0.012236	3.41	14.93	12.53	2.05
17	50.98	463.84	465.87	465.87	466.5	0.012535	3.52	14.49	11.67	2.03
16	50.98	447.09	449.35	449.35	449.82	0.01352	3.03	16.83	18.41	2.26
15	50.98	441.73	444.11	444.11	444.84	0.012474	3.8	13.46	9.39	2.38
14	50.98	425.34	427.3	427.3	427.89	0.012518	3.4	15	12.97	1.96
13	50.98	401	416.06		416.06	0	0.03	1781.57	87.79	15
12	50.98	413.66	415.45	415.45	416	0.01284	3.29	15.51	14.39	1.79
11	50.98	407.77	409.67	409.67	410.23	0.009389	3.39	15.9	14.75	1.9
10	50.98	384.65	387.46	387.46	387.88	0.007782	3.08	19.17	23.17	2.81
9	50.98	374.75	376.31	376.31	376.77	0.0129	2.99	17.05	18.75	1.56
8	50.98	367.55	370.93	370.93	371.3	0.006173	2.82	20.98	28.46	3.38
7	50.98	363.92	365.97	365.97	366.56	0.011085	3.44	15.11	12.84	2.05
6	50.98	360.89	363.75		363.99	0.003029	2.2	23.18	12.15	2.86
5	50.98	359.85	362.57		363.14	0.00761	3.4	15.56	8.93	2.72
4	50.98	359.28	361.2	361.2	361.9	0.012728	3.68	13.84	10.05	1.92
3	50.98	356.75	358.53	358.53	359.02	0.011309	3.11	16.62	18.38	1.78
2	50.98	354.92	355.68	355.68	356.01	0.008066	1.99	21.36	30.97	0.76
1	50.98	349.79	352.03	352.03	352.3	0.005691	2.62	25.09	43.94	2.24

(Source : Auteure)

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Selon le Tableau (4.5) les hauteurs d'eau lors de la crue centennale varient de 0.68m à 3.13m, tandis que les vitesses d'écoulement peuvent atteindre 3.8m/s. Ces débordements, sont associés à des vitesses élevées allant de 0,03 m/s à 3,76 m/s ce qui menace les habitations.

La simulation hydraulique a montré le débordement de certaines sections transversales, situées en amont, au milieu et en aval du bassin versant

La section PL36 (Fig. 4.5.d) située à l'entrée du dalot existant sur la route nationale N° 27, montre un débordement remarquable pour une crue de référence centennale et un débit de 50.98 m<sup>3</sup>/s, affectant ainsi une partie de l'agglomération urbaine située en aval (Fig. 4.6).

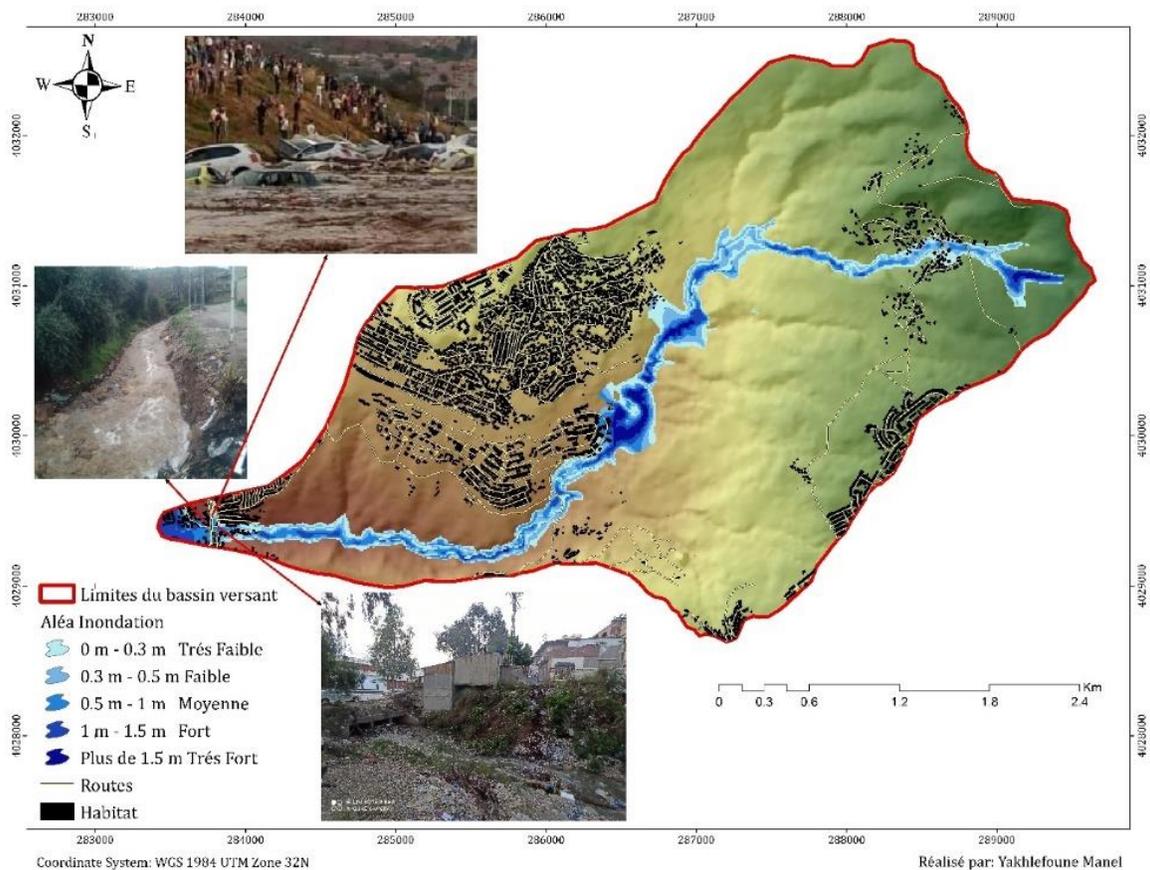


Figure 4.6. Carte de modélisation de l'aléa inondation du bassin versant d'Oued Ziad avec un débit centennial soit  $Q=50.98 \text{ m}^3/\text{s}$ .

(Source : Auteure)

Suite à la simulation de l'écoulement dans le cours d'eau de l'Oued Ziad, il est observé un débordement pour la période centennale avec un débit de pointe de 50.98 m<sup>3</sup>/s. Ce phénomène se

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

produit dans certains profils en travers situés principalement en amont du bassin versant, près des zones éparses de la région de Tafrent, au niveau de la route nationale n°3 près de l'agglomération de Bekira, et dans la zone urbaine en aval (Agglomération El Cantoli), à l'entrée du dalot existant au niveau de la section PL36 (Fig. 4).

### **4.2.3.1.3. Synthèse**

La cartographie de l'aléa inondation grâce au logiciel Hec Ras nous a permis de tirer les constats suivants :

- Une élévation du niveau de l'eau jusqu'à un niveau critique dépassant celui des seuils, et un important débordement le long de l'Oued.
- Les valeurs de vitesse d'écoulement varient de l'amont vers l'aval, jusqu'à la section numéro 28, où elles augmentent pour atteindre une valeur maximale de 3,76 m/s. (Tableau 4.5)
- les résultats obtenus par cette simulation sont proches de l'étendue de la surface débordée par les eaux lors de l'inondation survenue en septembre 2018 dans la même zone d'étude, ce qui confirme que cet événement hydro climatique extrême a une période de retour de 100 ans. Cette simulation montre que la capacité des ouvrages hydrauliques existants est insuffisante pour gérer la crue centennale.

### **4.2.3.2. Cartographie de l'aléa inondation dans le bassin versant d'Oued Mgharouel**

#### **4.2.3.2.1. Profil en long**

D'après la (figure 4.7) ci-dessous, le profil longitudinal d'Oued Mgharouel révèle des pentes fortes en amont soit (12.94%) comme sur le versant de Djebel Ben Ouataf. Ces pentes diminuent progressivement pour atteindre (2.24%) à proximité de l'agglomération urbaine qui se situe en aval du bassin versant.

# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

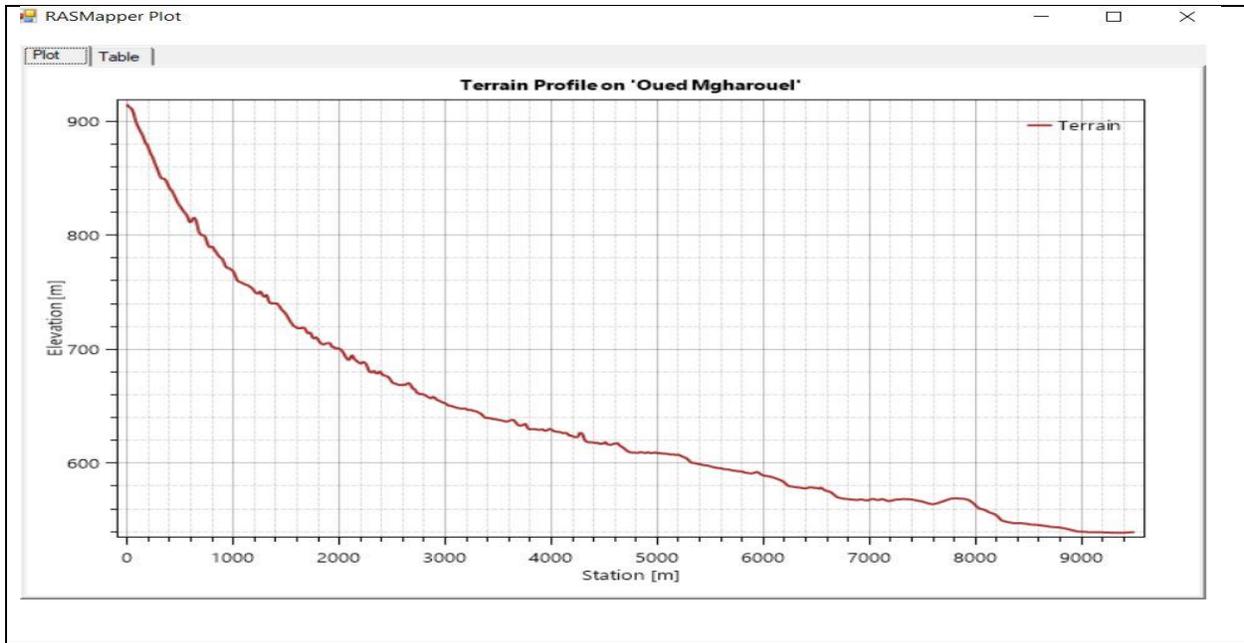


Figure 4.7. Profil en long du bassin versant d'Oued Mgharouel.

(Source : Traitement personnel)

## 4.2.3.2.2. Cross sections transversales

Dans le bassin versant d'Oued Mgharouel, nous procédons à faire une simulation hydraulique sur 24 sections transversales (fig 4.8), effectué pour un débit centennal de  $51.59 \text{ m}^3/\text{s}$

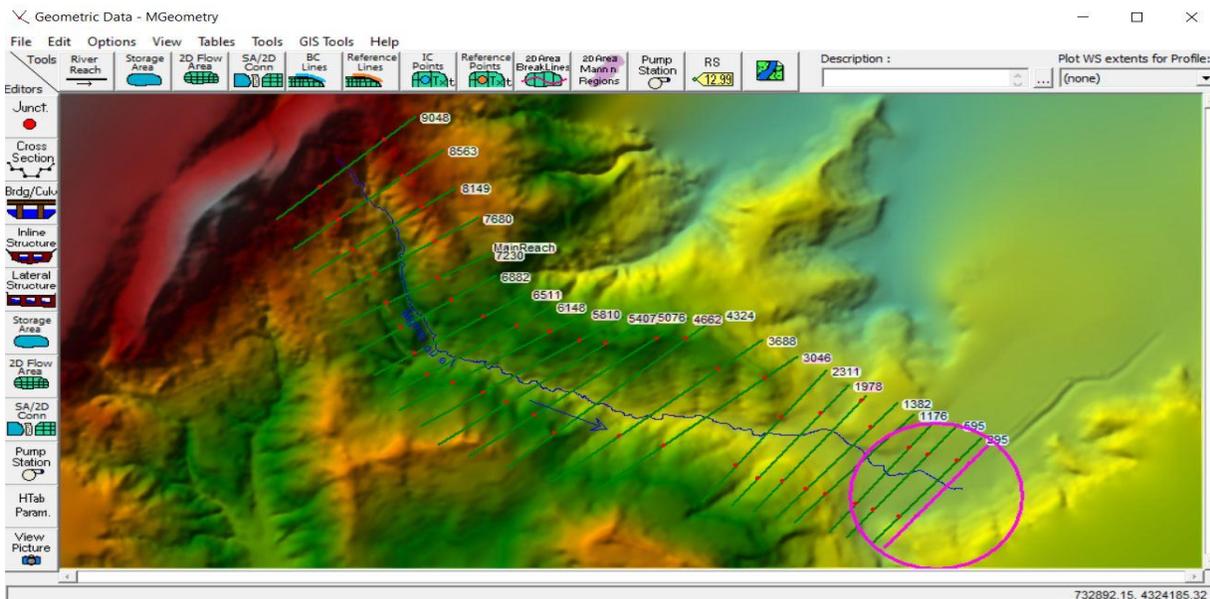
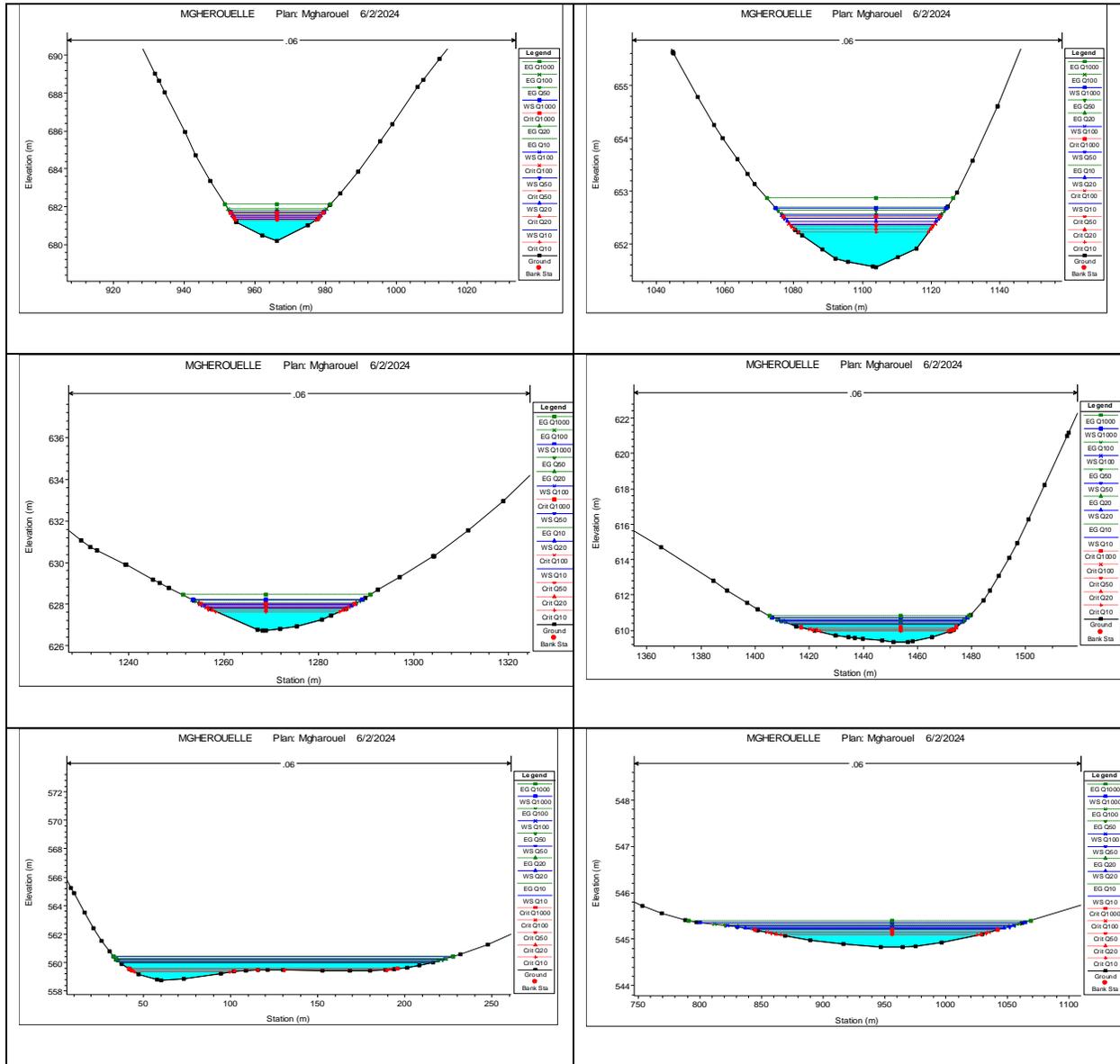


Figure 4.8 : Cross section transversales d'Oued Ziad.

(Source : Traitement personnel)

# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Les résultats présentés dans la figure (4.9) ci dessous montrent le débordement d'Oued Mgharouel pour un débit centennal dans certaines zones du cours d'eau surtout dans sa partie avale, malgré son calibrage. Pour connaitre les causes réelles de ce débordement il faut analyser la capacité des sections transversales à transporter le débit centennal, aussi il faut analyser l'état actuel du cours d'eau et les facteurs anthropiques pouvant aggraver le risque d'inondation.



## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

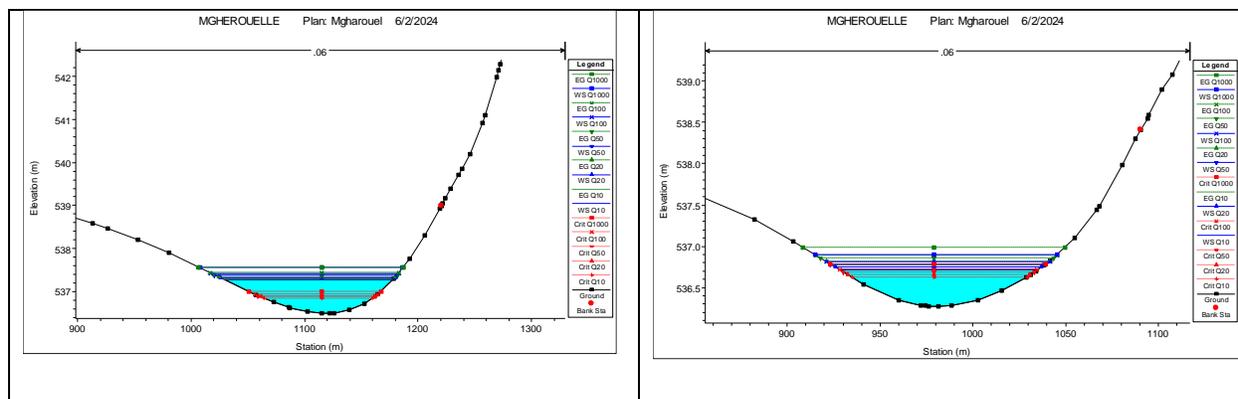


Figure 4.9 Résultat de simulation du débit centennal dans certaines sections transversales d'Oued Mgharouel qui présentent des débordements.

(Source : Traitement personnel par HECRAS)

Les résultats obtenus de la simulation hydraulique de l'aléa inondation dans le bassin versant d'Oued Mgharouel pour un débit centennal sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 4.6 : Résultat des calculs de la simulation hydraulique du débit centennale par HacRas

River Station	Q Total (m <sup>3</sup> /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Velocity Chnl (m/s)	Flow Area (m <sup>2</sup> )	Top Width (m)	Water level (m)	River Station
	m <sup>3</sup> /s	m	m	m	m	m/m	m/s	m <sup>2</sup>	m	m	m
24	51.59	849.41	850.12	850.33	850.81	0.13	3.68	14.03	29.27	1.7	0.92
23	51.59	772.49	773.43	773.78	774.59	0.19	4.77	10.82	20.14	2.08	1.29
22	51.59	739.99	741.29	741.32	741.72	0.04	2.89	17.87	23.26	1.05	1.33
21	51.59	705.59	706.35	706.63	707.24	0.15	4.17	12.39	24.09	1.85	1.04
20	51.59	680.2	681.55	681.51	681.9	0.03	2.59	19.94	25.16	0.93	1.31
19	51.59	667.75	668.82	668.82	669.18	0.04	2.65	19.46	27.5	1.01	1.07
18	51.59	651.56	652.54	652.39	652.7	0.02	1.77	29.14	46.11	0.71	0.83
17	51.59	640.97	641.83	641.83	642.12	0.04	2.39	21.61	37.82	1.01	0.86
16	51.59	633.18	634.24	633.97	634.34	0.01	1.43	36.15	52.14	0.55	0.79

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

15	51.59	626.72	628.03	627.85	628.24	0.02	1.99	25.86	32.81	0.72	1.13
14	51.59	617.74	618.83	618.83	619.18	0.04	2.61	19.77	28.5	1	1.09
13	51.59	609.34	610.58	610.06	610.62	0.00	0.92	56.14	68.59	0.32	0.72
12	51.59	606.45	607.26	607.24	607.49	0.04	2.09	24.67	50.09	0.95	0.79
11	51.59	591.92	592.31	592.31	592.43	0.02	0.7	44.03	158.42	0.51	0.39
10	51.59	578.07	578.76	578.9	579.25	0.03	3.12	16.56	36.02	1.47	0.83
9	51.59	566.53	567.24	567.24	567.46	0.05	2.1	24.53	55.7	1.01	0.71
8	51.59	567.3	568.31	568.09	568.42	0.01	1.5	34.43	55.08	0.61	0.79
7	51.59	558.83	559.81	559.81	560.09	0.01	2.36	21.83	39.16	1.01	0.98
6	51.59	557.39	558.11	558.11	558.34	0.05	2.12	24.36	54.16	1.01	0.72
5	51.59	548.09	548.75	548.53	548.81	0.01	1.07	48.38	98.03	0.48	0.44
4	51.59	544.83	545.29	545.15	545.33	0.01	0.78	66.1	232.75	0.47	0.32
3	51.59	539.55	539.84	539.84	539.93	0.06	1.25	38.01	205.96	0.99	0.29
2	51.59	536.49	537.43	536.93	537.44	0.00	0.52	99.28	165.64	0.21	0.44
1	51.59	536.27	536.82	536.71	536.89	0.02	1.23	42.1	120.67	0.66	0.44

(Source : Traitement personnel par HECRAS)

D'après le tableau (4.6), la simulation a montré que certaines sections transversales débordent. Cela signifie que l'eau a dépassé les rives de la rivière en ces points, inondant ainsi, les régions environnantes. La hauteur d'eau varie de 0.29m jusqu'à 1.53m provoquant l'inondation d'importantes aires, notamment en aval.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Cette situation, accompagnés de vitesses élevées variant de 0.52 m/s à 4.77 m/s, constitue une menace pour les habitations situées dans la partie avale du bassin versant.

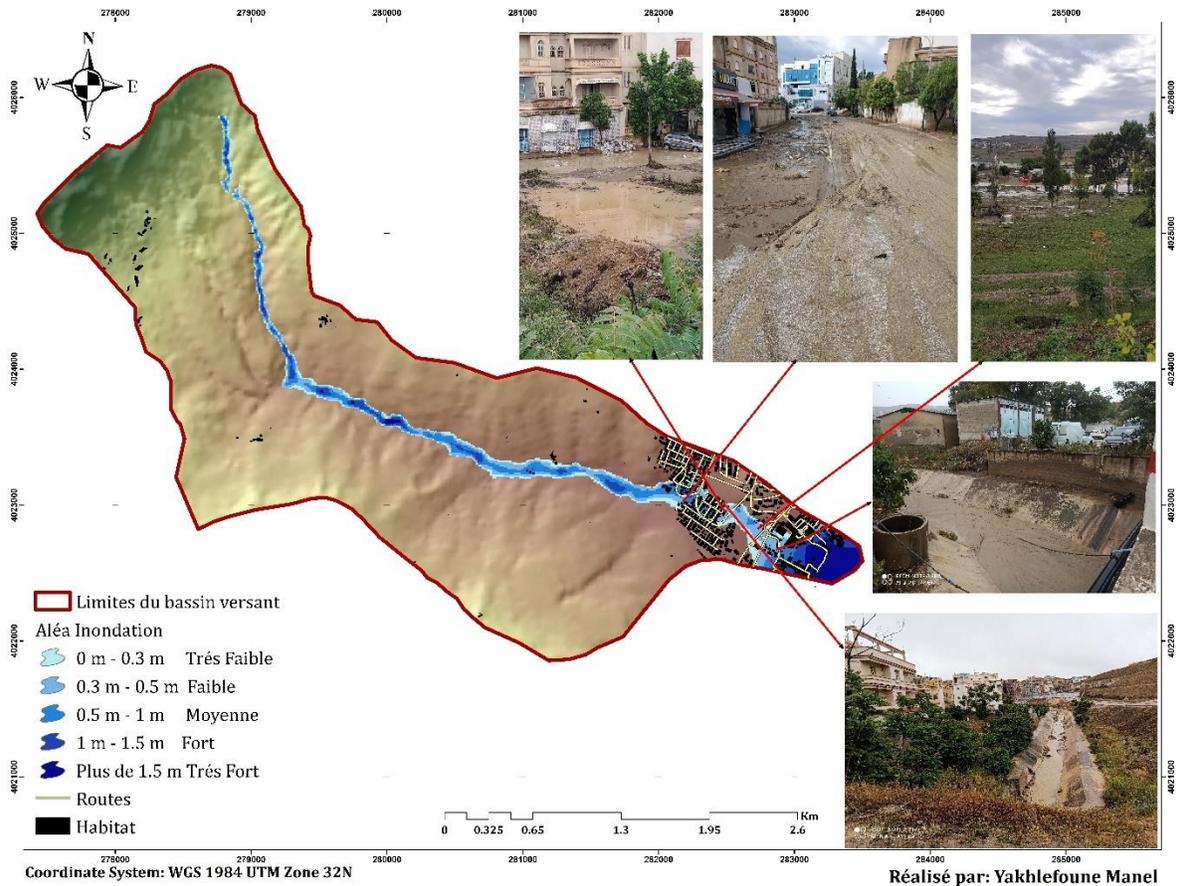


Figure 4.10. Carte de modélisation de l'aléa inondation du bassin versant d'Oued Ziad avec un débit centennal soit  $Q = 51.59 \text{ m}^3/\text{s}$ .

(Source : Auteure)

La figure (4.10) représente l'aléa centennal d'inondation dans le bassin versant d'Oued Mgharouel cette carte a été classée en cinq classes en fonction de la profondeur, à savoir de très faible à très fort

Les photographies accompagnant la carte d'aléa (Fig.4.10) montrent le débordement du cours d'eau lors des fortes précipitations. Ces photographies prises sur terrain le 22 mai 2023 fournissent des preuves visuelles de l'impact des inondations, en montrant des rues boueuses, des zones gorgées d'eau et des canaux de drainage détruits.

### 4.2.3.2.3. Synthèse

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

La simulation d'une crue centennale (Tableau 4.6), montre que les valeurs maximales des hauteurs d'eau peuvent atteindre plus de 1.5m.

La zone inondable est estimée à une surface de 99.27 m<sup>2</sup> soit 9927 ha. La vitesse d'eau varie entre 0.52 m/s et 4.77 m/s.

L'analyse de la modélisation hydraulique de l'aléa inondation dans le bassin versant d'Oued Mgharouel pour la période de retour centennale permet de faire les observations suivantes :

- le débordement du cours d'eau lors de fortes pluies (Fig 4.10)
- La route nationale 05 qui enjambe cet Oued, et elle aussi sous la menace des inondations et dégradation de la chaussée.

Aussi, quand la vitesse d'écoulement est forte et le débit dépasse les 51.59 m<sup>3</sup>/s, on assiste à :

- Une augmentation du niveau d'eau d'environ 1 mètre au-dessus du seuil critique, suivi d'un débordement clair.

### **4.2.3.2.4. Validation des résultats : Analyse et Enquête sur terrain (Caractéristiques et genèse des inondations dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel).**

Au cours des différentes phases d'élaboration de cette thèse, nous avons eu l'opportunité de réaliser plusieurs sorties sur le terrain dans les deux bassins versants étudiés. Ces sorties ont permis de documenter la région à travers la prise des photos et faire des interviews avec la population locale, afin d'appuyer nos observations et analyses. Parmi ces sorties, l'une d'elles a été effectuée lors de fortes précipitations, offrant une occasion précieuse d'observer directement les impacts des pluies intenses sur le terrain, notamment en termes de ruissellement, d'inondation par débordement de l'oued et des interactions avec les infrastructures locales. Ces observations sur terrain ont été essentielles pour mieux comprendre la dynamique des phénomènes hydrologiques dans les bassins versants d'Oued Mgharouel et d'Oued Ziad et ont confirmé leur forte vulnérabilité au risque d'inondation.

En effet, à la suite des fortes pluies survenues le 24 mai 2023, nous sommes sortis pour effectuer des observations de terrain et prendre des photographies dans les deux bassins versants étudiés. Nos constatations ont révélé plusieurs dégâts importants. Tout d'abord, au niveau du bassin versant d'Oued Mgharouel, son cours d'eau a débordé, inondant la route menant à la clinique Ibn Rochd près du quartier El Hana et quartier des avocats (Figures 4.11 I, M et N). Ce débordement a également affecté la route nationale n°5, causant la destruction partielle de la chaussée au niveau du dalot près du rondpoint menant à la SNTV et Ain Smara (Figures 4.11 E et F).

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Par ailleurs, plus de 100 moutons ont été emportés par les eaux, témoignant de l'ampleur des dégâts (Figure 4.11L). Nous avons également observé le dérapage de deux voitures près du rond-point de la SNTV à Boussouf, soulignant les dangers immédiats pour les usagers de la route. Enfin, l'explosion d'un regard (Figure 4.11 K) due au reflux de l'eau, ce qui illustre les défaillances des infrastructures en période de crues, aggravant les impacts des inondations dans cette région.

En ce qui concerne Oued Ziad, 30 minutes après le début de fortes précipitations le même jour, nous avons observé un important ruissellement urbain au niveau de la route nationale n°27. Face aux défaillances du système d'assainissement, les habitants et les propriétaires des locaux commerciaux sont rapidement intervenus en sortant avec des pelles pour nettoyer les avaloirs, dans le but de prévenir une nouvelle inondation dans la région. (Figure 4.11 A,C et D)

Par ailleurs, le cours d'eau de l'Oued Ziad, en aval de la section située avant la route nationale n°27, était rempli de débris et de déchets (Figure 4.11 B,D). Cette accumulation représente un facteur aggravant qui pourrait obstruer l'écoulement des eaux et provoquer une nouvelle crue en cas de précipitations supplémentaires. Ces observations mettent en évidence les vulnérabilités des infrastructures locales face aux événements climatiques extrêmes et soulignent l'urgence d'interventions pour améliorer le système d'assainissement et la gestion des déchets.

Ces observations nous ont permis d'identifier deux types d'inondations distincts dans les deux bassins versants.

### ✓ **L'inondation par ruissellement urbain due à :**

-On relève que l'ancien réseau d'évacuation n'arrive plus à évacuer les débits de ruissellement surtout près des nouvelles zones urbanisées donc imperméabilisées.

- La défaillance des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales

- On a aussi observé un phénomène de reflux des eaux d'assainissement dans les regards raccordés à Oued Mgharouel lors des fortes pluies (partie aval à côté de la route nationale 05 et 7eme km) voir (fig 4.11. G)

-On constate par ailleurs, l'obstruction des avaloirs par les déchets solides transportés par les Flots

### ✓ **L'inondation par les débordements des apports maximums des Oueds Ziad et Mgharouel**

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

-Les débordements apparaissent généralement après un temps de concentration inférieur à 2h lors des fortes précipitations dues principalement aux sous-dimensionnement des canalisations en aval et l'envasement de ces derniers par les déchets solides ce qui provoque leur débordement.

- Les inondations produites dans des zones présentant un environnement topographique défavorable comme le cas des zones traversées par des Oueds ou situées au pied d'une montagne, c'est bien le cas de nos bassins versants étudiés.



# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE



E



F



G



H



I



J

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE



Figure 4.11 : Conséquences des pluies intenses de courte durée sur la région d'étude prise le 24/05/2023 à 17h30

(Source : Auteure)

### 4.3. Analyse de la vulnérabilité au risque d'inondation

L'étude de la vulnérabilité se concentre sur les agglomérations urbaines situées en aval de chaque bassin versant, c'est-à-dire les zones qui sont directement affectées par les débordements des Oueds Ziad et Mgharouel lors des crues. Cette analyse permet d'identifier et de délimiter les zones de faible à forte vulnérabilité afin de développer des stratégies adéquates pour chaque bassin versant pour minimiser le risque.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Les agglomérations concernées par cette étude sont : une partie de la ZHUN de Boussouf, la cité Djebli Ahmed Ex Cantoli, Bekira, et Tafrent (Djebel El Wahch), ses derniers font partie de la commune de Constantine et celle d'El Hamma Bouziane.

### 4.3.1. Présentation des limites administratives du cadre d'étude

Oued Ziad prend naissances des monts de Djebel Kellal et Djebel el Ouahch (Commune de Constantine), il dessine un tracé linéaire parfait de direction Est-Ouest en amont, puis il change de direction pour entrer dans les limites administratives de la commune d'El Hamma Bouziane suivant une direction générale (Nord-Est/Sud-Ouest), puis il change une autre fois son tracé pour rejoindre Oued Rhumel dans sa partie aval en suivant une direction Est-Ouest en dessinant une linéarité parfaite.

Quant au bassin versant d'Oued Mgharouel, le cours d'eau prend naissance des monts des Djebels Ben Ouataf et Sidi Slimane, il suit une direction Nord-Sud en amont, puis il change de direction vers le Nord-Ouest/Sud-Est pour rejoindre Oued Rhumel en aval près du 7ème km à Boussouf, (Constantine).

Dans cette étude, nous nous intéressons à étudier les agglomérations urbaines qui se situe dans la partie aval de chaque bassin versant étudié et qui sont concerné par l'analyse de la vulnérabilité. Mais avant de commencer l'analyse de la vulnérabilité, nous commençons d'abord a présenté les deux communes qui les appartient. Il s'agit des communes de Constantine et El Hamma Bouziane.

#### 4.3.1.1. Localisation de la commune de Constantine

Constantine est située en position géographique centrale dans la région, servant de point de jonction entre le Tell et les Hautes Plaines. Elle se trouve au croisement des grands axes Nord-Sud (Skikda-Biskra) et Ouest-Est (Sétif-Annaba), et constitue un nœud ferroviaire très important reliant les principales villes de l'Est algérien. Constantine est située à une latitude de 36,23 et une longitude de 7,35, au centre de l'est algérien, précisément à 245 km des frontières algéro-tunisiennes, à 431 km de la capitale Alger à l'ouest, à 89 km de Skikda au nord, et à 235 km de Biskra au sud.

La ville est bâtie sur un majestueux rocher de part et d'autre de l'Oued Rhumel, entourée par de véritables obstacles naturels. Les repères géographiques indiquent que la région est variée en termes de position et d'altitude par rapport au niveau de la mer, se situant entre les lignes Kentour à 400-800 m au nord et 800-1200 m au sud.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Cette situation géographique privilégiée a conféré à Constantine un rôle prépondérant dans les mouvements de population, favorisant son développement au fil de son histoire et lui permettant de demeurer une métropole régionale.

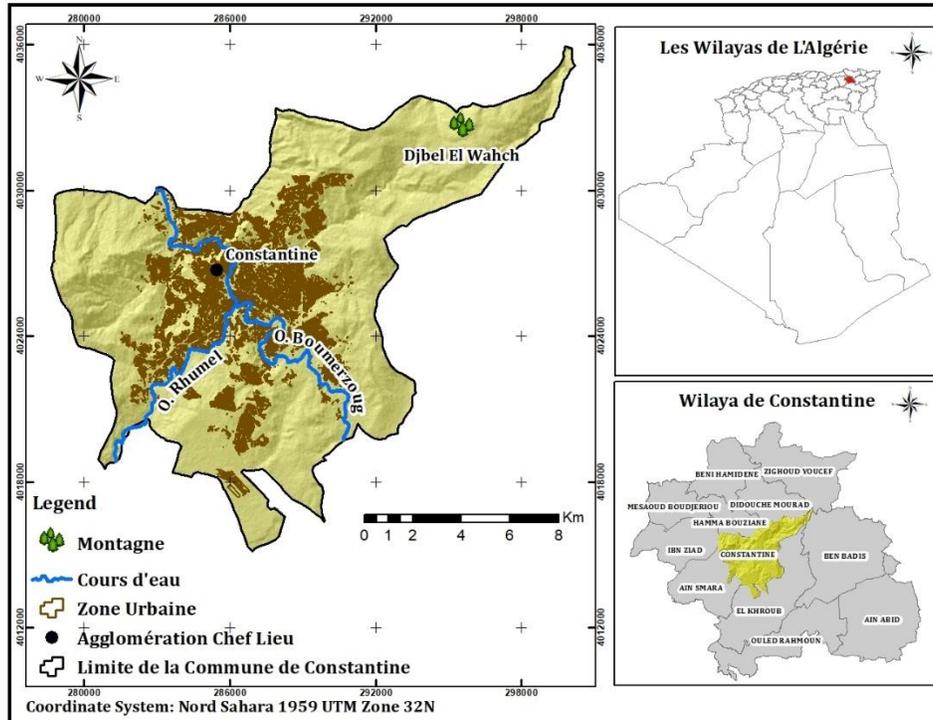


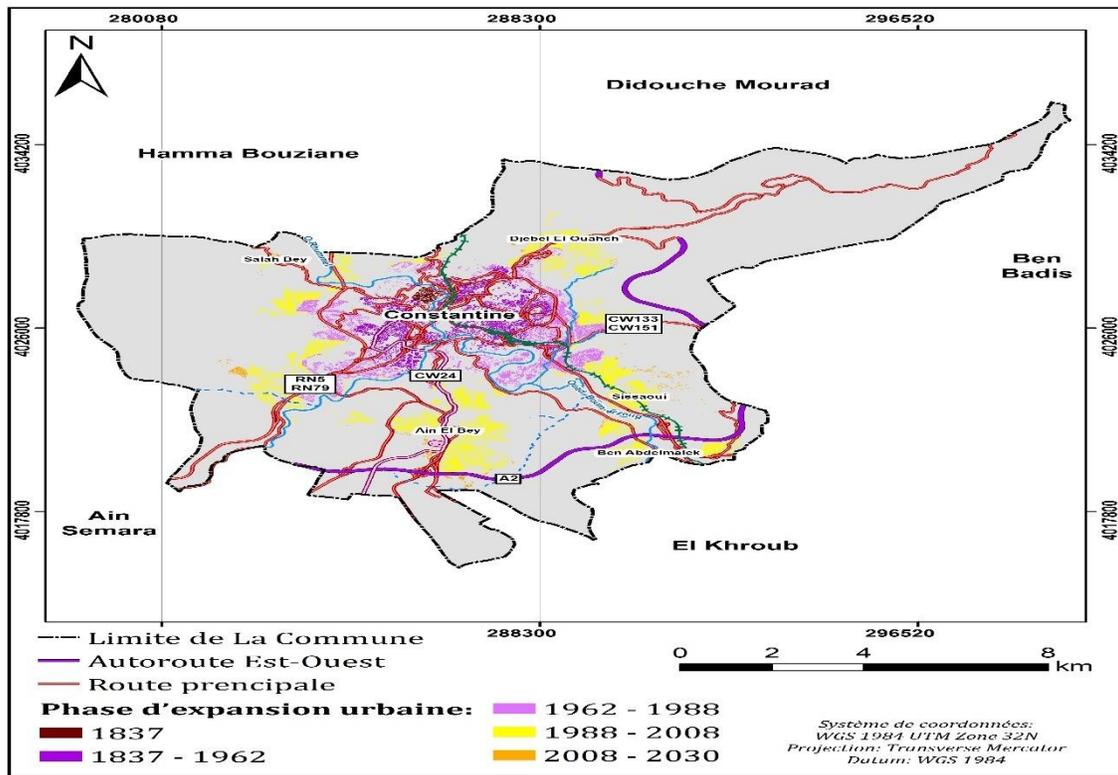
Figure 4.12. Localisation de la commune de Constantine

(Source : travail personnel)

### 4.3.1.1.1. Evolution urbaine de la commune de Constantine

La commune de Constantine a vécu une histoire riche de changements successifs, chaque fois ajoutant des couches de complexité à sa structure urbaine.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE



La figure ci-dessous représente l'expansion urbaine de Constantine, sur différentes périodes.

Figure 4.13 Evolution urbaine de la commune de Constantine

(Source : Auteure)

Les phases d'expansion urbaine montrent une expansion progressive et croissance significative de la ville au fil du temps, cette évolution née à partir du noyau centre de Constantine et en s'étendant vers l'extérieur (Fig.4.13).

### ✓ En 1937

Au début de la colonisation française en 1837, la ville couvrait environ 30 hectares.

### ✓ La période de 1837 - 1962

Un siècle plus tard, en 1937, Constantine s'étendait sur 234 hectares. Dans les années cinquante, cette superficie a atteint 1 800 hectares. Après l'indépendance en 1962, Constantine a continué de s'étendre, avec une consommation accrue des terres.

### ✓ La période de 1962 - 1988

Après l'indépendance La ville a fait face à des contraintes d'expansion spatiale en raison de la complexité du site et de la présence de zones militaires. Malgré ces obstacles, une urbanisation

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

rapide et non maîtrisée a saturé les sites disponibles, augmentant la demande en terrains constructibles tout en évitant l'empiètement sur les terres agricoles.

Les autorités locales ont donc cherché des solutions alternatives, incluant l'urbanisation le long des axes routiers et le transfert de la croissance démographique vers les communes voisines.

- ❖ **Relance économique et industrialisation** : Entre 1970 et 1975, Constantine connaît une forte relance économique marquée par la création et la mise en chantier d'unités industrielles. Cet essor attire une population en quête d'emploi provenant des villes internes, des campagnes, ainsi que des wilayas défavorisées (Skikda, Mila, Jijel, Oum El Bouaghi, Guelma) Le taux d'accroissement global moyen annuel atteint 3.42%, s'alignant presque avec le taux national de 3.14%,

- ❖ **Apparition des Zones d'habitations urbaine nouvelle (ZHUN)**

L'apparition des grands ensembles à Constantine est une réponse directe à la crise du logement causée par une croissance démographique rapide et un afflux important de populations rurales vers la ville. Pour faire face à cette demande croissante de logements, les autorités ont conçu ces grands ensembles en s'inspirant des principes de modernité et d'efficacité. Ces constructions étaient considérées comme la solution idéale pour résoudre le problème de logement. Ainsi, plusieurs Zones d'Habitat Urbain Nouveau (ZHUN) ont été développées, incluant des quartiers tels que Ziadia, Sakiet Sidi Youcef, BUM, Daksi, 5 Juillet, Dj Ouhch Boudjenana, et Boussouf.

Dans cette étude nous faisons un bref historique sur la création de la ZHUN de Boussouf, où se situe l'agglomération urbaine concerné par l'étude de vulnérabilité dans le bassin versant d'Oued Mgharouel.

- **Présentation de la ZHUN de Boussouf que fait partie notre bassin versant d'Oued Mgharouel**

La Zone d'Habitation Urbaine Nouvelle (Z.H.U.N) de Boussouf a été établie par un décret ministériel (n° 335) le 19 février 1975, dans la partie ouest de Constantine. Sa création s'inscrit dans le cadre de l'expansion de la ville vers l'ouest, visant à trouver des terrains disponibles pour l'urbanisation. Ce programme de logements collectifs a été lancé pour répondre à une forte demande de logements à cette époque.

La cité Boussouf est la dernière d'une série de nouvelles zones urbaines qui comprennent la cité du 20 Août, la cité Filai, la cité du 5 Juillet, et la cité de Boudjenana, toutes situées le long de

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

l'important axe de la RN05. Actuellement, la cité Boussouf bénéficie d'un nouveau programme d'équipements et de plusieurs interventions pour améliorer et stabiliser les terrains.

La cité Boussouf est délimitée par :

Au nord, la cité des Frères Arafa.

Au nord-est, la cité de Hacène Boudjenana.

À l'est, la RN05.

Au sud, la promotion immobilière de Blikaz.

À l'ouest, le périmètre urbain de la ville de Constantine.

La superficie totale de la zone urbaine de la ville de Constantine a atteint 3285 hectares en 1987.

### ✓ **La période de 1988 à 2008**

Crise économique et sécuritaire : Cette période est marquée par une instabilité sécuritaire et la destruction d'infrastructures économiques pendant les années 90.

Ouverture économique : La libéralisation du marché commence, mais les efforts politiques et économiques sont freinés par la situation sécuritaire.

Croissance démographique en baisse : Les migrations internes diminuent, avec un taux d'accroissement de 0.49%. La population connaît une décélération continue, comme indiqué par le recensement de 1998.

Relance économique : La stabilité politique et sécuritaire stimule une relance économique.

Effets positifs : Les actions politiques et économiques ont des effets positifs sur tous les domaines, bien que les taux d'accroissement globaux moyens restent faibles.

Diminution de la croissance démographique : Le recensement de 2008 montre une courbe démographique descendante avec un TAGMA de -0.95%, contrairement au taux national de 1.72%.

### ✓ **La période de 2008 - 2030**

Depuis 2008 jusqu'à 2024 la croissance de la ville s'est orientée vers les communes avoisinantes due à la rareté des terrains disponibles pour l'urbanisation.

Les zones de croissance projetées jusqu'à 2030 suggèrent une expansion continue, principalement vers le Sud, le Sud-Est et le Sud-Ouest de la ville. Les modèles d'expansion indiquent le développement le long des routes et autoroutes principales, facilitant la connectivité et la croissance.

#### **4.3.1.1.2. Croissance Démographique de la commune de Constantine**

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

La population de la commune de Constantine a été en évolution constante depuis le RGPH<sup>18</sup> 1977 jusqu'à 2008 (Tableau 4.7). Après 2008 la population a connu une baisse remarquable, en effet, la rareté des réserves foncières pousse la commune de Constantine à se tourner vers les communes voisines (El Khroub « Nouvelle Ville », Didouche Mourad, Hamma Bouziane) afin de trouver un espace urbanisable pour ces affectations futures en logements et équipements pour sa population actuelle et future, aussi, la migration d'une partie de la population de la commune vers les autres communes voisines dans le cadre du relogement des bidons villes

Tableau 4.7 : Evolution démographique de la population de Constantine de 1977 à 2023

Population RGPH (1977)	Population RGPH (1987)	Population RGPH (1998)	Population RGPH (2008)	Estimation PDAU (2020)	Résultat primaire RGPH (2023)
350384	447807	481947	509811	447779	256017

(Source : RGPH, ONS 2008+ bilan des résultats primaires des statistiques DPAT)

Pour connaître les raisons précises de ces changements démographiques il faut faire une analyse détaillée des différentes variables qui contribuent à l'évolution ou la démissions démographique (soldes naturels et migratoires).

### 4.3.1.1.3. Analyse du réseau routier de la commune de Constantine

La ville de Constantine est traversée par les routes nationales, (R.N.5, RN.3, RN.10, RN.79) qui se transforment à l'intérieur du périmètre urbain en voies primaires principales (Fig 4.13), confortée par le boulevard de l'est et le contournement Massinissa, les voies secondaires viennent se greffer sur ces principaux axes pour relier entre eux les différents quartiers de la ville de Constantine. L'état des routes dans la ville de Constantine est assez bon dans l'ensemble. Pour la modernisation et la réhabilitation de la ville, un vaste programme de rénovation et d'embellissement a été lancé à travers les quartiers et de la ville.

---

<sup>18</sup> Recensement général de la population et de l'habitat

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

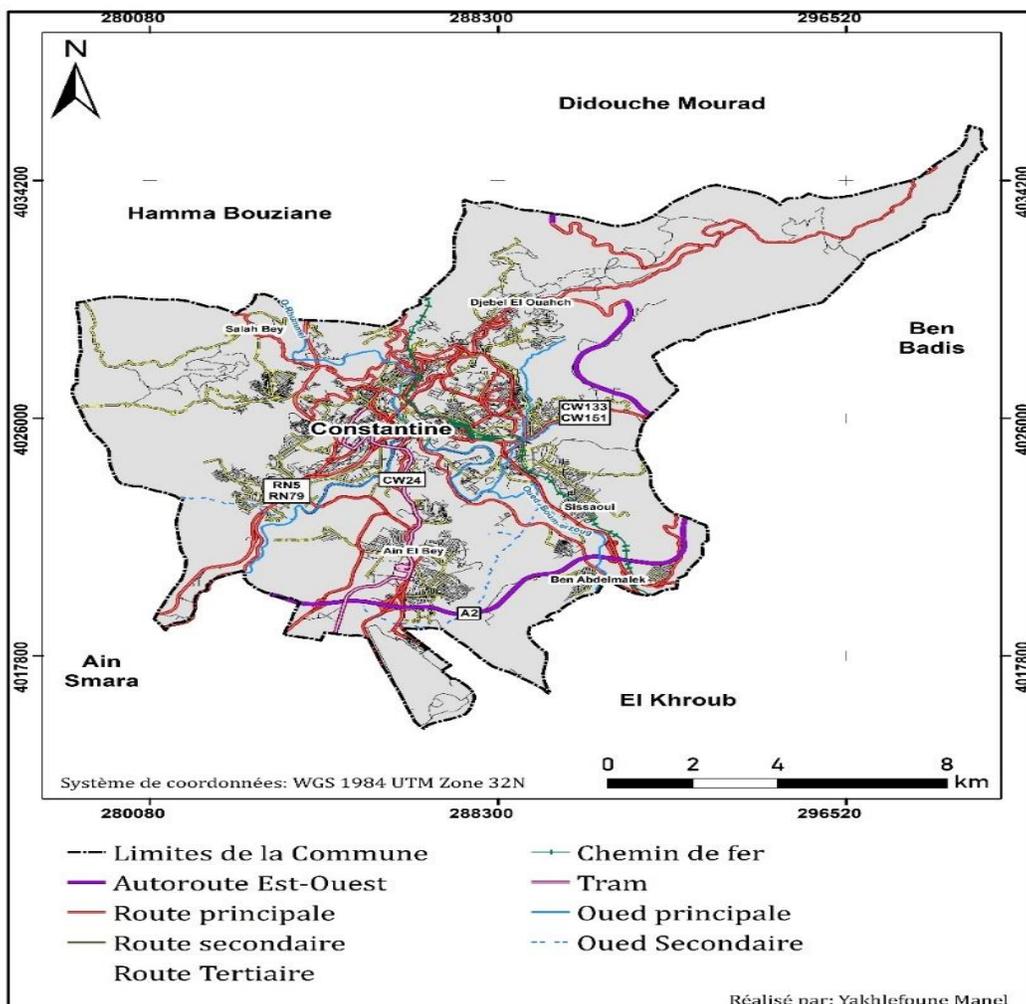


Figure 4.14. Réseau routier de la commune de Constantine

(Source : Auteure)

La carte du réseau routier de la commune de Constantine montre les principales routes reliant les différentes parties de la commune et les régions voisines, ce qui indique leur importance stratégique pour la planification urbaine. L'autoroute Est-Ouest et les routes principales jouent un rôle crucial dans le développement et l'accessibilité de la ville.

### 4.3.1.2. Localisation de la commune d'El Hamma Bouziane

La commune de Hamma Bouziane est située dans la partie centrale Nord-Ouest de la wilaya de Constantine dont elle fait partie, elle occupe une superficie de 71.18 km<sup>2</sup>.

Cette commune est considérée comme la plus petite dans la wilaya de point de vue de superficie et la 3ème de point de vue du volume de sa population après Constantine et El Khroub ; elle est limitée par :

- Au Nord, la commune de Beni Hamidene.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

- Au Nord- Est, la commune de Didouche Mourad.
- Au Nord \_Ouest, la commune de Messaoud Boudjeriou.
- Au Sud \_Ouest, commune d'Ibn Ziad.
- Au Sud\_ Est, la commune de Constantine.

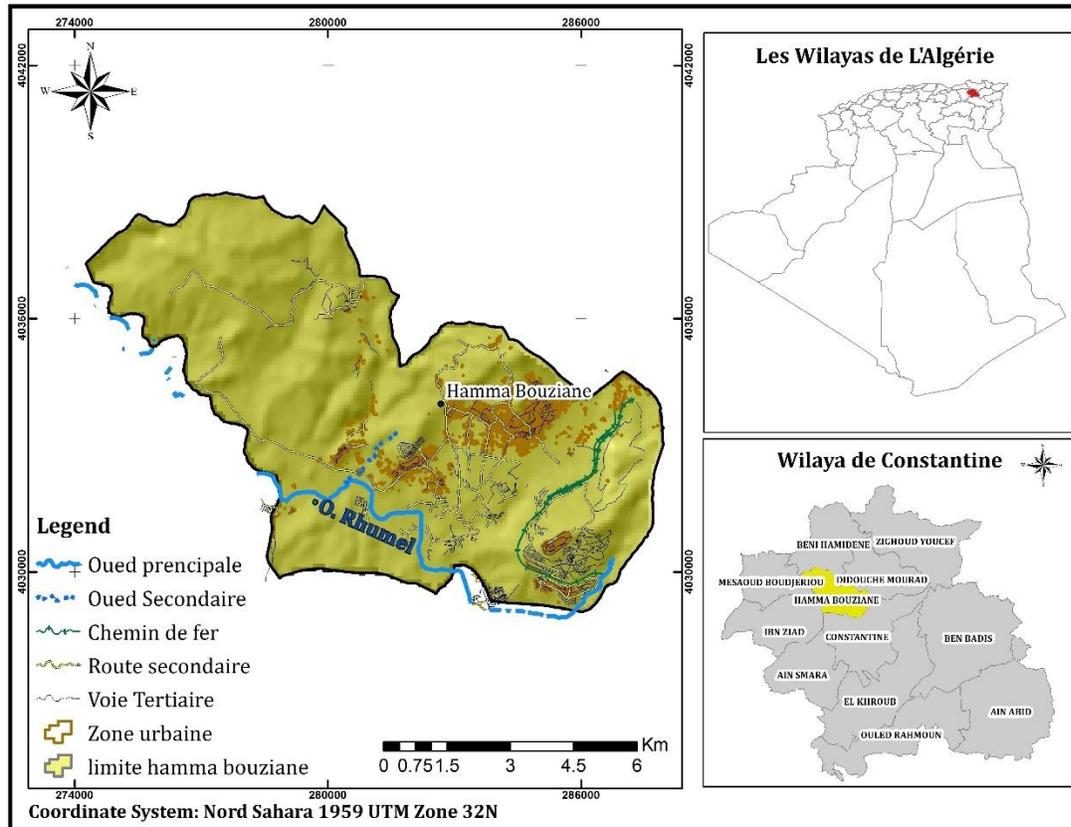


Fig 4.15. Situation de la commune d'El Hamma Bouziane.

(Source : PDAU 2010, Constantine)

Le chef-lieu de commune Hamma Bouziane est situé au Nord de la ville de Constantine. Il se distingue par sa position par rapport aux axes routiers importants :

- RN 79 : Constantine - Mila
- RN 27 : Constantine - Jijel
- RN 03 : Constantine – Skikda

Le chef-lieu de commune de Hamma Bouziane est traversé par deux grandes lignes de force de l'espace à savoir :

- La situation à proximité du chef-lieu de la wilaya de Constantine.
- L'axe important reliant Constantine et Skikda par la route nationale n°27, puis la RN n°3.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

La commune de Hamma Bouziane se compose d'une agglomération chef-lieu, de six agglomérations secondaires, BEKIRA au sud-est, Djebli Ahmed au sud ces derniers font partie du bassin versant d'Oued Ziad, Kaidi Abdellah, au sud-ouest Ghoumrian à l'est Zegrou Larbi au nord-est La gare, à l'est une zone rurale où on y trouve plusieurs regroupements ruraux dont les plus importants sont : Chaouche Mustapha, Madadi, Hadj Brahim, Remada, Gueref, Ain Kerker, Boukhlef Et Rekani.

Un mouvement d'urbanisation involontaire s'est développé dans les quatre localités de la commune. Cet accroissement tant démographique que spatial, a donné des écarts apparents dans les formes d'extensions.

### 4.3.1.2.1. Evolution urbaine de la commune d'El Hamma Bouziane

Les différentes phases d'évolution urbaine de la commune d'El Hamma Bouziane sont mentionnées sur la figure (4.16) si dessous.

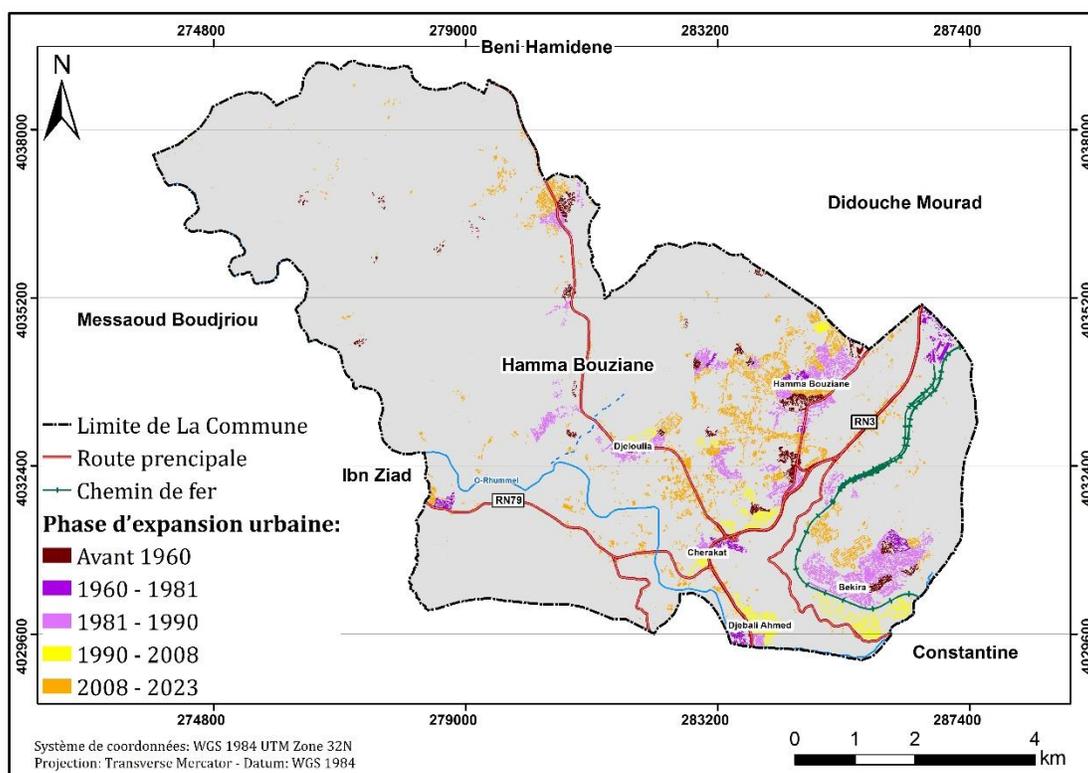


Figure 4.16. Evolution urbaine de la Commune d'El Hamma Bouziane

(Source : Auteure)

✓ **Avant 1960**

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Le premier noyau de la ville d'El Hamma Bouziane est apparu en 1860 sous la forme du village des autochtones appelé Baragli. À cette époque, la ville était connue sous le nom de "Village Nigro". Le centre de la ville était alors une zone inondée où poussaient des saules et des plantes épineuses. Le gouvernement colonial a ensuite asséché les terres et tracé la route numéro 03 reliant les wilayas de Constantine et de Skikda en passant par le centre-ville.

Avec la création du village colonial en 1866, le village comprenait la mairie, l'église, l'école et le bureau de poste. Le village est resté sous l'administration de la commune de Constantine jusqu'à ce qu'il soit érigé en commune indépendante le 16 décembre 1887.

Cette période montre l'emplacement des premières habitations dans la commune et le développement urbains de la région. La surface urbaine était 62 Ha.

### ✓ **La période de 1960 - 1981**

De 1960 à 1972, la commune d'El Hamma Bouziane a été caractérisée par une croissance relativement lente, marquée par l'augmentation de la superficie urbaine avec l'apparition de plusieurs agglomérations telles que le quartier Sataïh, Ghairan, Bekira et quelques zones éparses. Comme dans toutes les villes du pays, cette période a été principalement marquée par un exode rural massif et l'absence de projets de logement. Les initiatives étaient alors individuelles.

A partir de 1972 jusqu'à 1981, la commune a connu une stagnation générale avec une expansion limitée dans certains anciens quartiers de manière anarchique et l'émergence de quelques nouveaux noyaux comme les entreprises et le quartier Djebli Ahmed. Cette période a également vu l'apparition de l'usine de ciment en 1980 ainsi que l'auto construction dans la région de Kaidi Abdallah pour regrouper la population rurale.

### ✓ **La période de 1981 - 1990**

Cette phase a marqué une explosion de l'urbanisation dans la ville, qui a connu une croissance urbaine significative, en particulier dans la partie est. La principale caractéristique de cette période a été la poursuite de la construction anarchique due à l'apparition de nouveaux regroupements comme Djelloulia et la gare. On a également commencé à voir émerger des constructions planifiées (lotissements résidentiels) dans le but de préserver les terres agricoles.

Le développement urbain a concerné plusieurs zones, principalement :

-Bakira (65,6 hectares), incluant les lotissements Bekira 01, Bekira 2 et 3 (12 hectares pour 200 lots, 10 hectares pour 310 lots), Sataïh (11,60 hectares, avec des constructions planifiées), ainsi qu'Oued Ziad, Boussa, et Labyadhi.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Ce développement est attribué à l'importance du programme de logements protégés à El Hamma, particulièrement après les plans quinquennaux (1980-1984 et 1985-1989) qui ont prévu 359 logements sociaux (dont 159 à Bakira).

De nouvelles constructions ont émergé, notamment : Quartier du 1er Novembre (Logements sociaux), lotissements Aïn Sedari 1 (131 lots sur 13 hectares), lotissements Aïn Sedari 2 (38 lots sur 2 hectares), Djelloulia (4,2 hectares), Gare (9,20 hectares).

Des zones rurales à l'ouest ont également été développées : Zerzour El Ouali (6,8 hectares), les Dekkakine (4 hectares), Ghamriane (1,2 hectare).

### ✓ **La période de 1990 - 2008**

Cette phase s'est caractérisée par la poursuite du rythme de l'urbanisation, suivie d'un début de ralentissement, touchant uniquement la partie Est de la ville. L'accent a été mis sur les banlieues, avec la création de nouvelles zones résidentielles dans la région de Bekira, comprenant des logements collectifs et des lotissements.

### ✓ **La période de 2008 - 2023**

Cette phase a connu une croissance urbaine significative en raison de l'apparition d'un programme de construction rurale, avec l'émergence de nouveaux regroupements planifiés tels que le regroupement d'Aïn Ben Sebaa et Zekrar El Arbi, entre autres. Cette période s'est également distinguée par un retour marqué de la construction anarchique, avec l'apparition de quartiers entiers sur des terres appartenant à l'État et sur des exploitations agricoles.

#### **4.3.1.2.2. Croissance démographique de la commune d'El Hamma Bouziane**

Il est bien connu que les zones principalement agricoles connaissent une croissance démographique faible. Cependant, dans le cas de la commune d'El Hamma Bouziane, la croissance démographique est très rapide au cours des dernières quatre décennies, passant de 23384 habitants en 1977 à 117096 habitants en 2020 (Estimation du PDAU), après elle a connu une baisse progressivement en 2020 et 2022 pour atteindre 81137 habitants selon les résultats primaire de RGPH 2022 (voir le tableau 4.8). Cette baisse en population peut être expliquée par la délocalisation d'une partie de sa population vers les autres communes disposant des programmes de logements aidés par l'état.

Tableau 4.8. Evolution démographique de la commune d'El Hamma Bouziane

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Population RGPH (1977)	Population RGPH (1987)	Population RGPH (1998)	Population RGPH (2008)	Estimation PDAU (2020)	Résultats primaires RGPH (2022)
23384	36656	58307	72950	117096	81137

(Source : RGPH, ONS 2008+ bilan des résultats primaires des statistiques DPAT)

La population communale est répartie inégalement entre :

- 36480 habitants à l'ACL, soit 62,47 % de la population de la commune.
- 19085 habitants en A.S soit 32.68 % de la population de la commune.
- 2832 habitants en Z.E soit 4.85 % de la population de la commune.
- Le peuplement de la commune est caractérisé par :
- le caractère fortement aggloméré de la population 95.15 % en ACL et AS
- une densité de l'ordre de 820 habitants/km<sup>2</sup> contre 362 qui représentent la densité moyenne au niveau de la wilaya

### 4.3.1.2.3. Analyse du réseau routier de la commune d'El Hamma Bouziane

L'analyse du réseau routier est essentielle pour comprendre le développement, l'accessibilité, et les défis en matière d'infrastructures d'une commune. La commune d'El Hamma Bouziane dispose 3 routes nationales qui la relie avec les communes et les wilayas avoisinantes et un chemin de fer (fig 4.17).

#### ✓ La Voie primaire

La voie primaire est représentée par l'avenue de l'ALN (Le chef-lieu de commune) est repiqué entre deux routes nationales La RN27A et la RN27.

L'axe principal (Avenue de l'ALN) qui entreprend à partir de La RN27A est indispensable pour tout le trafic de l'agglomération chef-lieu. Ce qui provoque un flux très important.

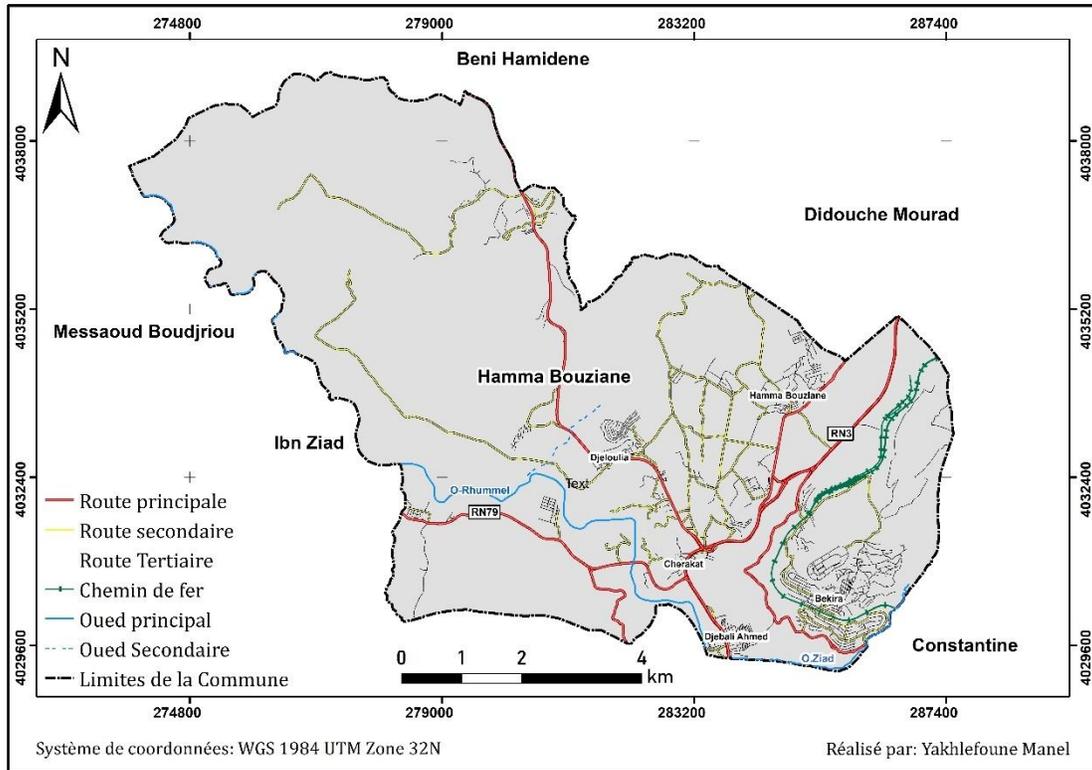
#### ✓ Voie secondaire

La voirie secondaire assure la liaison entre les différents quartiers de l'agglomération et se formule autour des voies primaires. A l'exception des voies à l'intérieur des lotissements qui sont en général en bonne état, le reste sont rétrécies et se distinguent par un état moyen et quelquefois médiocre du fait des travaux de réalisation de certains programmes d'habitat qui ne sont pas encore achevés.

#### ✓ Voie tertiaire

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

La voirie tertiaire se localise dans les lotissements, les programmes d'habitat collectif et certaines parties de l'ancien centre, elle se distingue par son état bon et quelquefois médiocre dû au fait des travaux non encore achevés.



On constate que malgré la situation très proche de la commune d'El Hamma Bouziane aux grands axes de circulation (RN79, RN3, RN27). Elle souffre des problèmes de circulation énormes notamment pendant les heures de pointe ce qui provoque des goulots d'étranglement au niveau de l'axe principal, qui constitue le passage obligatoire pour la desserte de toutes les entités urbaines.

### 4.3.2. Cartographie de la vulnérabilité au risque d'inondation dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel

La vulnérabilité est un concept complexe qui englobe divers aspects. Elle concerne la résistance des structures et des infrastructures aux dommages lors de crues, la sécurité des individus face aux dangers, ainsi que les dysfonctionnements des réseaux et services publics à l'échelle systémique ou sociétale. Cette vulnérabilité peut être analysée à différentes échelles, allant de l'échelle locale (bâtiments, individus) à celle plus vaste d'un quartier ou d'une commune, intégrant les dynamiques

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

urbaines. À une échelle plus large, métropolitaine ou communautaire, elle entraîne des enjeux systémiques et des impacts financiers et sociaux indirects importants.

L'urbanisation croissante à Constantine a conduit à une augmentation alarmante de la vulnérabilité aux inondations, principalement en raison de l'implantation humaine dans les zones à risque. Cette expansion urbaine s'est souvent réalisée sans pleine conscience de ces dangers naturels. Les études de risque visent à mieux comprendre les phénomènes et les enjeux associés aux inondations, afin de gérer d'une manière efficace l'utilisation des sols et de contrôler l'extension urbaine dans ces zones exposées. Cela nécessite de concilier les impératifs de prévention avec les besoins socio-économiques de développement.

La diversité des approches pour évaluer la vulnérabilité urbaine, sont souvent limitées à la densité résidentielle. Les études plus approfondies sont rares et ne prennent pas suffisamment en compte les enjeux matériels et environnementaux. Une démarche plus complète est nécessaire pour intégrer tous les aspects critiques de ces évaluations urbaines. Il s'agit de la vulnérabilité social et structurelle (Soto et Renard., 2014).

Il y a peu d'études intégrées sur la vulnérabilité humaine aux inondations, qui prennent en compte à la fois les caractéristiques socio-économiques de la population et les effets de la vulnérabilité des bâtiments et des infrastructures. Seules quelques études, comme celles de Kaźmierczak et Cavan (2011) et Messner et Meyer (2006), ont réalisé cette évaluation intégrée jusqu'à présent. Par exemple, la méthode OSIRIS-risque (et OSIRIS-inondation) est un outil qui intègre la vulnérabilité des individus, des infrastructures essentielles (notamment des réseaux), et la vulnérabilité géographique, pour aider à la prise de décision en cas de risque (Morel et al., 2009)

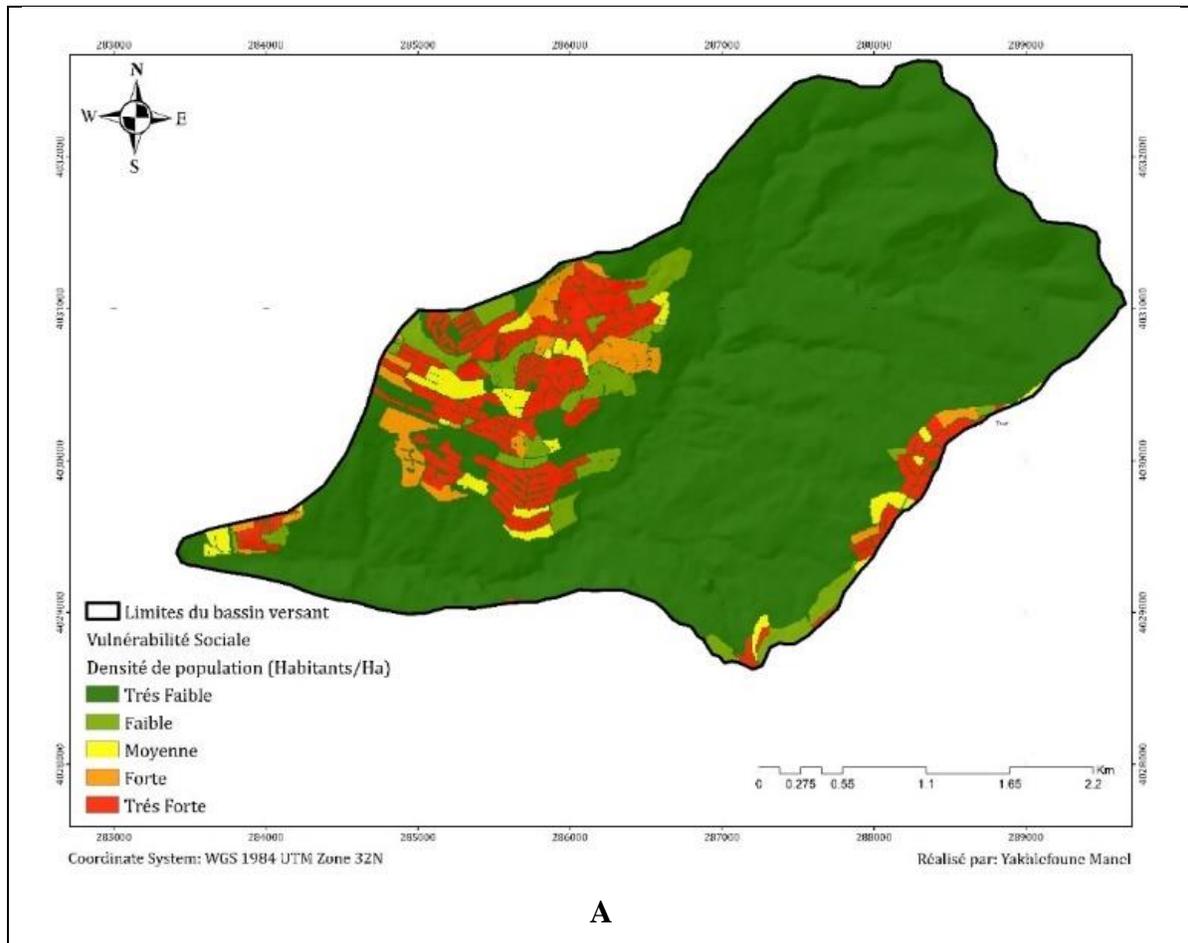
Dans cette étude nous avons utilisé une démarche d'évaluation de la vulnérabilité au risque d'inondation qui prend en compte la vulnérabilité avec ses trois dimensions (Sociale, environnemental et fonctionnelle).

### **4.3.2.1. La vulnérabilité sociale**

La Vulnérabilité sociale est représentée par la densité de population. Dans cette analyse, nous examinons la densité de population afin d'évaluer l'impact des inondations sur les agglomérations urbaines situés en aval des bassins versants étudiés. En effet, une densité de population élevée peut témoigner d'une exposition élevée au risque, ce qui requiert des mesures particulières pour protéger et soutenir les personnes vulnérables qui pourraient être affectées, que ce soit actuellement ou dans le futur suite à des projets d'aménagement.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L’ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D’INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Nous avons utilisé les données recueillies de la direction de programmation et de suivi du budget de Constantine pour réaliser cette étape. Ces données concernent la population par district, et par ilots, basées sur les résultats primaires du recensement général de la population et de l’habitat réalisé en 2022.



## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

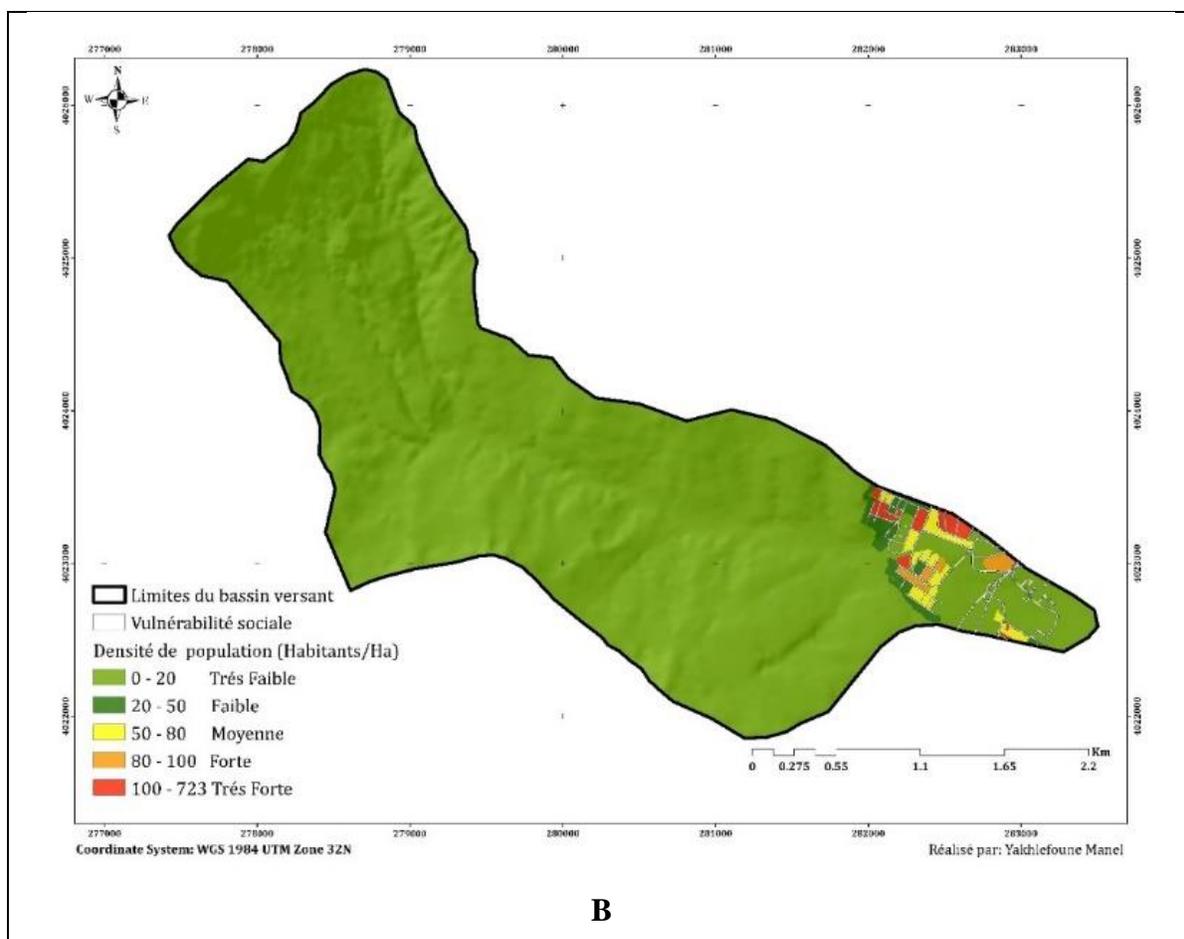


Figure 4.18 Carte de vulnérabilité sociale ; A/Bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.

(Source : Auteure)

La figure (4.18) ci-dessus, met en évidence les régions ayant les densités de population les plus élevées. Elle illustre la densité de population dans les deux bassins versants, ces cartes ont été classés en 5 classes de très faible vulnérabilité à très fortes selon la densité de population (Habitants/Ha)

La densité de population dans le bassin versant d'Oued Ziad est plus grande que celle du bassin versant d'Oued Mgharouel du fait que la surface bâtie occupe 29.36% de la surface total du bassin versant d'Oued Ziad tandis que ce pourcentage est 8.65% pour le bassin versant d'Oued Mgharouel.

Une grande partie de la surface des deux bassins versants indique une très faible densité de population. Les zones ayant une densité de population moyenne jusqu'à très forte sont susceptibles de subir des conséquences les plus graves des inondations. L'augmentation de la densité de

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

population peut exacerber les dommages causés par les inondations en raison de la concentration des personnes et des infrastructures et l'imperméabilisation du sol

### 4.3.2.2. La vulnérabilité physique et structurelle (Environnementale)

la vulnérabilité structurelle a été étudié par plusieurs chercheurs, la plupart des travaux qui concernent la vulnérabilité structurelle sont effectués sur la vulnérabilité des constructions face aux risques sismiques , d'autres recherches aussi sont effectués par les architectes qui concernent la résistance des constructions et des infrastructures face aux risques d'inondations tel que (Kelman et Spence 2002) à l'université de Cambridge en Grande Bretagne et (Salagnac et Bessis) du CSTB en France et l'institut for research in construction au Canada .

Dans ce travail, la vulnérabilité environnementale englobe la vulnérabilité physique et structurelle, elle consiste à analyser la vulnérabilité du cadre physique représenté par la résistance des bâtiments aux inondations et identification des points faibles par une analyse de l'état du bâti et d'infrastructures existantes (Routes, ponts etc...), l'analyse concerne aussi les modes d'occupations du sol tel que l'occupation illicite des territoires a risque ou le changement des cours d'eaux par l'urbanisation, la qualité des constructions et des infrastructures existantes, ainsi que la vulnérabilité du sol par rapports aux facteurs pouvant aggraver le risque d'inondation (glissements de terrains, éboulements, instabilité des versants, caractéristiques géotechniques du sol etc..). Pour arriver à faire une carte de vulnérabilité structurelle dans les deux bassins versants étudiés nous avons utilisé :

- la carte de vulnérabilité du sol de la commune de Constantine aux glissements de terrains élaboré par le bureau d'étude Français ARCADIS EEG SIMEC SOL a échelle de 1/10000 laquelle il fait ressortir l'aptitude des différentes zones aux instabilités et met en lumière l'aptitude des différentes formations lithologiques aux phénomènes gravitaires et au risque significatif d'inondation.
- consulter la carte de géologie et géotechnique du groupement de Constantine du plan directeur de l'aménagement et d'urbanisme a une échelle de 1/50000
- Consulter les services techniques de l'assemblée populaire communale de Constantine et d'El Hamma Bouziane pour avoir l'implantation des constructions illicite et anarchiques construit avec des matériaux vulnérables et moins résistantes aux risques
- nous avons effectué une enquête sur terrain, et nous avons fait des interviews avec la population située dans la partie aval des deux bassins versants pour collecter l'ensemble des informations

# CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

nécessaires sur le débordement des cours d'eau et les constructions menacées et qui ont été affecté déjà par ces débordements.

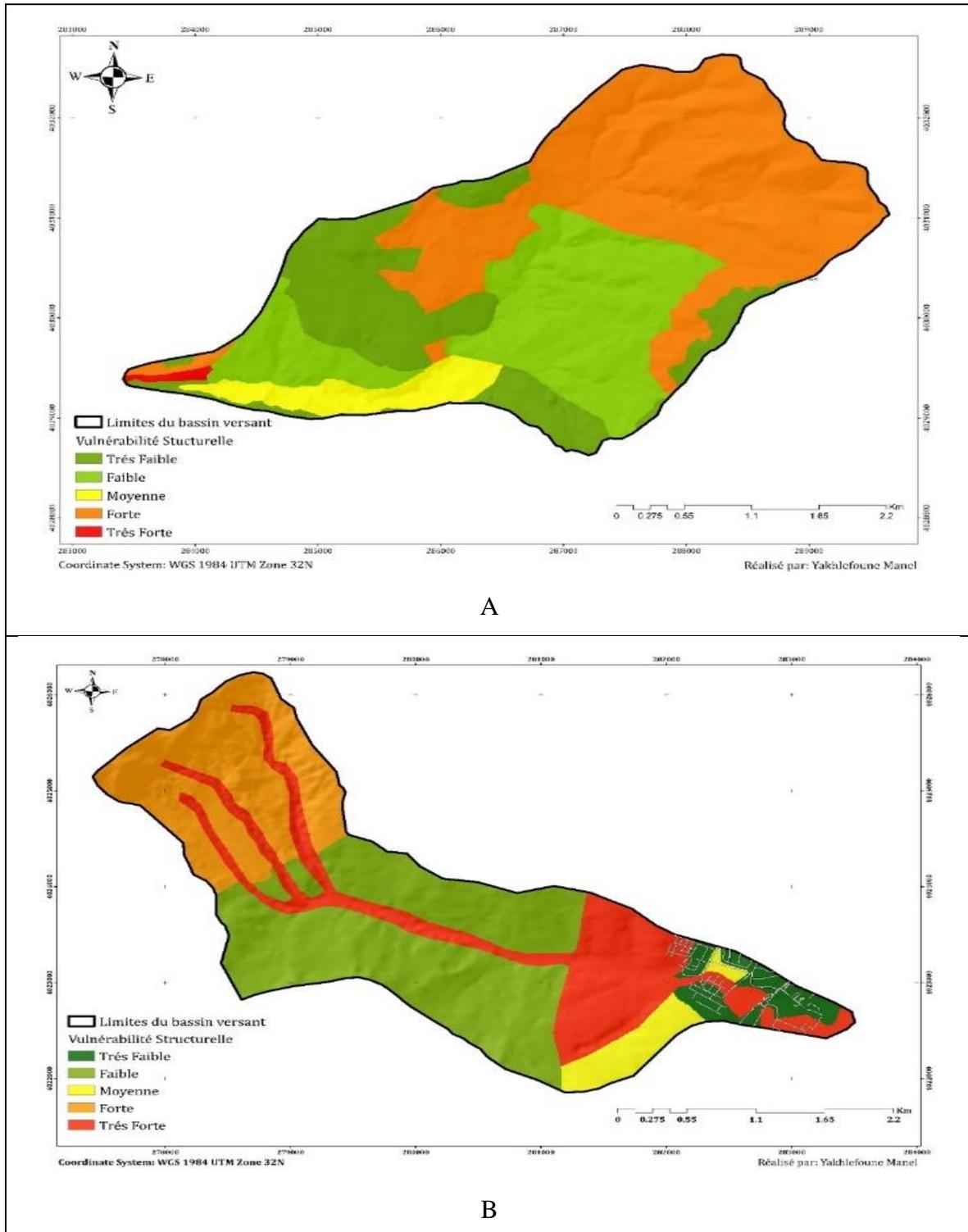


Figure 4.19. Carte de vulnérabilité physique et structurelle A/Bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

(Source : Auteure)

Les cartes de vulnérabilité physique et structurelle pour les bassins versant d'Oued Ziad et Oued Mgharouel (Fig 4.19), ont été classés en cinq classes :

**-la classe 1** représente une vulnérabilité très faible : cette classe englobe les zones favorables à la construction ou les pentes sont faibles et stable. Les terrains concernés incluent les calcaires néritiques crétacés, les formations telliennes marno-calcaires, les calcaires lacustres plio-quaternaires, et les terrasses alluviales les plus élevées. Aucun signe significatif d'instabilité n'y a été observé, et les constructions existantes ne présentent pas de dégradations dues à des mouvements de sols. Le bâti est en bonne état généralement et les infrastructures routières sont en bonne état

**-la classe 2** représente une vulnérabilité faible : correspond aux zones peu favorables aux constructions (Versant et collines de moyenne à faible déclivité situés dans des sites constructibles.

**-la classe 3** représente une vulnérabilité moyenne : correspond aux zones de stabilité incertaine (terrains dominants de caractéristiques géotechniques médiocres) cette classe correspond au foret de Sidi M'Sid situé au sud du bassin versant d'Oued Ziad. Et aux monts de El Hadj Baba pour le bassin versant d'Oued Mgharouel. Cette zone se caractérise par une déclivité moyenne (15-20 %) à élever (supérieure à 30 %), avec des terrains de qualité géotechnique médiocre, notamment des marnes miocènes et des remblais anciens. Les indices d'instabilité, tels que les escarpements de glissements, la fissuration ou les morphologies moutonnées, ne sont pas clairement visibles. Selon l'expertise du CTC de Constantine (Contrôle Technique de la Construction), les dégradations des constructions situées dans cette zone sont fréquentes mais restent superficielles, se manifestant par des joints dilatés, ainsi que des fissures dans les clôtures et les escaliers.

**- la classe 4** représente une vulnérabilité forte : correspond aux zones classées comme défavorables aux constructions (terrains montagneux, collines isolées et versants raides), présentent de nombreux signes d'instabilité tels que des escarpements de tête de glissement, des moutons dans les marnes, des fissures du terrain, des inclinaisons d'arbres et des désordres dans les constructions existantes. Pour les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel, il existe des constructions illicites et fragile construits avec des matériaux non résistant à la qualité du sol dans ces zones.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

- la classe 5 représente une vulnérabilité très forte : correspond aux zones défavorables aux constructions (non constructible) exposée au risque d'inondation (terrasses alluviales basses des Oueds)

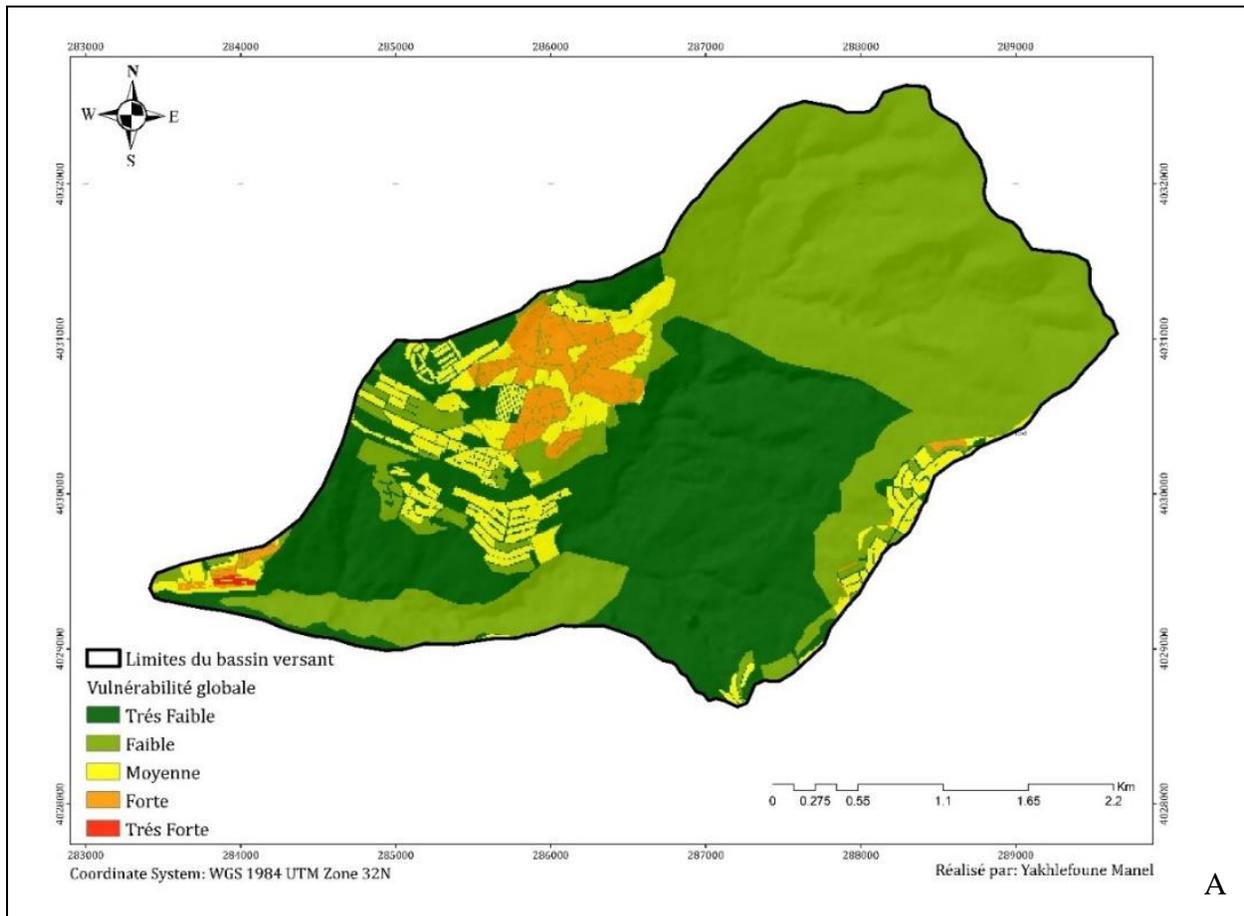
-Zone instable non constructible (glissements de terrains actifs actuels)

-Zone instable non constructible a fréquent indices d'instabilité.

-Exploitation anarchique et non conforme des berges dans certaines zones situé en aval des cours d'eau d'Oued Ziad et Oued Mgharouel. Les terrasses alluviales situées à proximité immédiate des cours d'eau et légèrement surélevées (de 3 à 4 mètres) par rapport aux lits mineurs adjacents sont souvent sujettes à des inondations. Les signes observés incluent la présence de nouveaux limons et des laisses de crues recouvrant fréquemment la terre feuilletée.

### 4.3.2.3. Vulnérabilité globale

La vulnérabilité globale dans les deux bassins versants est égale à la sommation des deux cartes de la vulnérabilité sociale (Densité de population) ainsi que la vulnérabilité environnementale (physique et structurelle). La sommation des deux cartes a été réalisé sur Arcmap.



## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

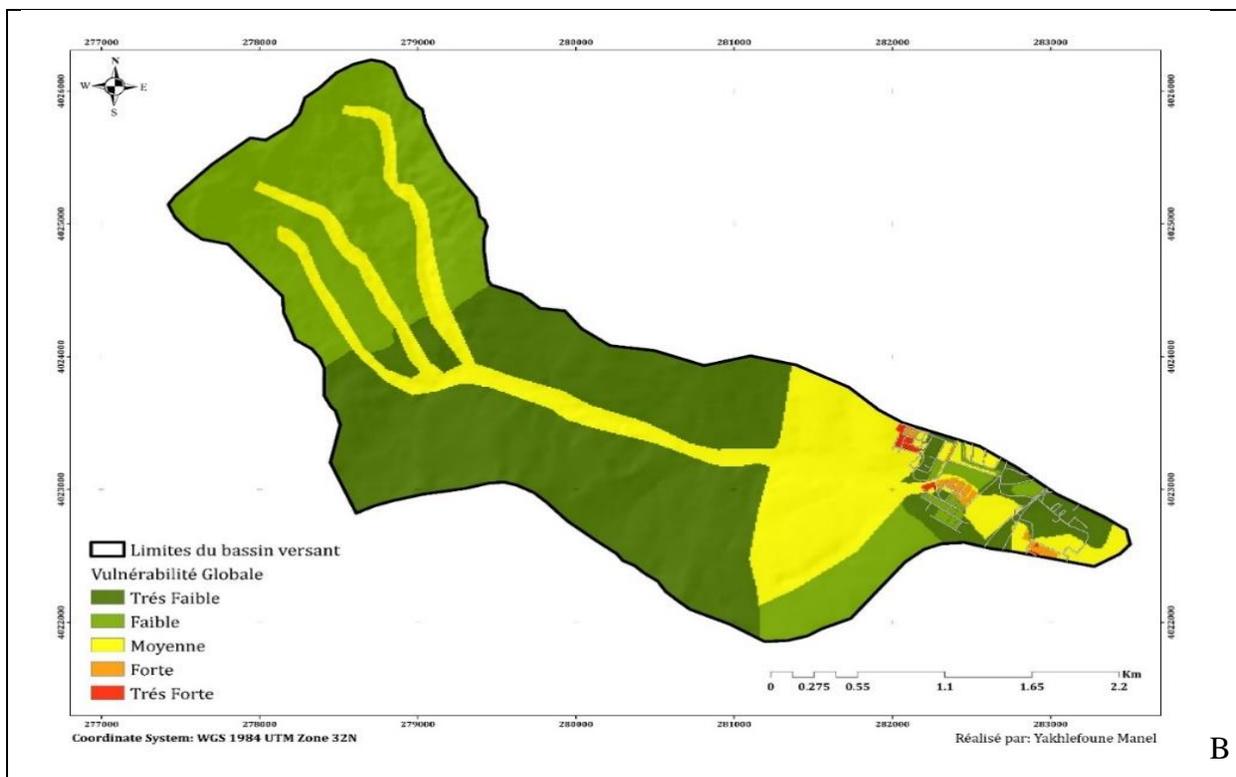


Figure 4.20. Carte de la vulnérabilité globale A/Bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.

(Source : Auteure)

D'après la figure (4.18), la carte de vulnérabilité globale est classée en cinq classes qui illustre les niveaux de vulnérabilité de très faible à très fort.

Les zones qui se trouvent dans la partie amont et au milieu des deux bassins versants sont caractérisées par une vulnérabilité faible et très faible respectivement. Ces deux zones sont les moins vulnérables, mais cela ne signifie pas qu'elles sont totalement exemptes de risque. Les zones qui présentent une vulnérabilité moyenne à très forte sont situées dans la partie aval du bassin versant près des cours d'eau et des infrastructures et des zones bâties.

Ces zones nécessitent une attention particulière pour la gestion des risques d'inondation et devraient être surveillées.

### ✓ Synthèse

D'après notre analyse sur la vulnérabilité, nous pensons que la principale cause de l'augmentation de la vulnérabilité réside dans l'intervention humaine qui ne se soucie pas des risques encourus.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

À Constantine, l'implantation d'habitats humains près des rives des oueds est identifiée comme le principal facteur contribuant à cette vulnérabilité, comme le confirment les études réalisées par ARCADIS EEG SIMECSOL, 2004

### 4.4. Cartographie du risque inondation

La cartographie du risque d'inondation est réalisée en croisant deux facteurs principaux : l'aléa et la vulnérabilité. En croisant ces deux éléments sur une carte, on peut repérer les zones où les risques d'inondation sont les plus élevés. Les zones à risque très élevé (très forte probabilité d'inondation) et à risque élevé (dommages potentiels importants en cas d'inondation), seront identifiées comme les plus exposées. En revanche, les régions à faible probabilité et faible vulnérabilité seront perçues comme étant moins risquées.

Nous avons utilisé la matrice (tableau 4.9) pour évaluer les niveaux de risque en fonction de leur probabilité d'occurrence (Aléa) et leur vulnérabilité.

Tableau 4.9 : Matrice des niveaux de risque d'inondation en fonction des niveaux d'aléa et de la vulnérabilité

<b>Vulnérabilité</b> <b>Aléa</b>	<b>1/ Très Faible</b>	<b>2/ Faible</b>	<b>3/ Moyenne</b>	<b>4/ Forte</b>	<b>5/ Très Forte</b>
<b>1/ Très Faible</b>	Risque Très faible 1	Risque Très faible 2	Risque Faible 3	Risque Moyen 4	Risque Moyen 5
<b>2/ Faible</b>	Risque Très faible 2	Risque faible 4	Risque Moyen 6	Risque Moyen 8	Risque fort 10
<b>3/ Moyen</b>	Risque Faible 3	Risque Moyen 6	Risque Moyen 9	Risque Fort 12	Risque Très Fort 15
<b>4/ Fort</b>	Risque moyen 4	Risque moyen 8	Risque fort 12	Risque Très fort 16	Risque Très fort 20
<b>5/ Très Fort</b>	Risque moyen 5	Risque fort 10	Risque Très fort 15	Risque Très fort 20	Risque Très fort 25

(Source : auteure)

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Le croisement de la carte d'aléa et la carte de vulnérabilité dans les deux bassins versants sous Arcmap nous a permis d'établir une carte finale du risque d'inondation dans les deux bassins versants (Fig 4.21)

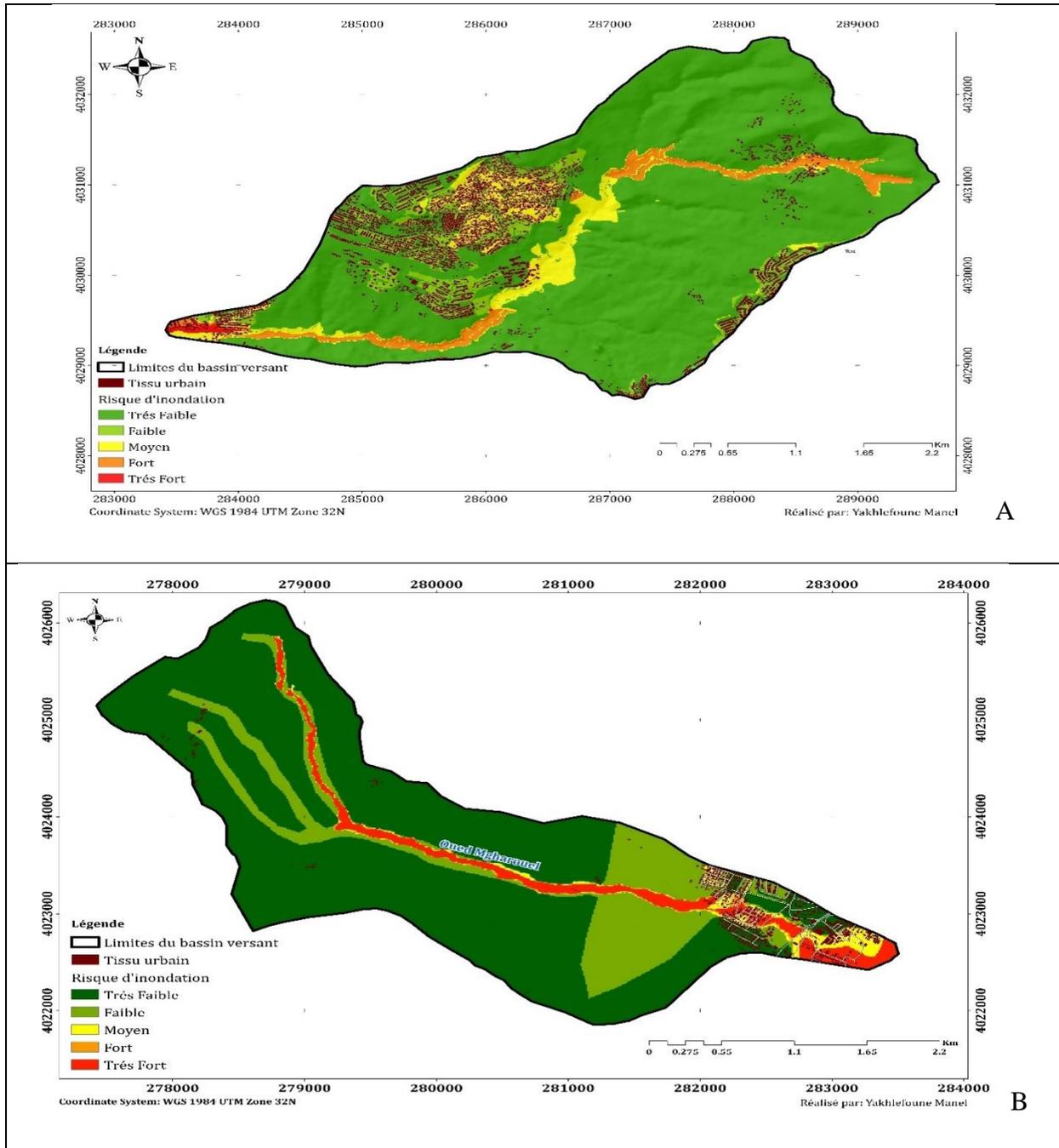


Figure 4.21 : Cartographie du risque d'Inondation ; A/Bassin versant d'Oued Ziad ; B/ Bassin versant d'Oued Mgharouel.

(Source : Auteure)

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

L'analyse de la carte des risques d'inondation consiste à examiner la distribution spatiale des différents niveaux de risque.

### ✓ **Zones à risque faible et très faible**

Ces zones sont les plus étendues sur la carte et couvrent de vastes régions, en particulier dans les parties nord et sud-est. Ces zones suggèrent que ces régions sont moins susceptibles d'être touchées par les inondations, peut-être en raison d'une altitude plus élevée ou de systèmes de drainage efficaces. Le positionnement de ces infrastructures par rapport aux zones inondables est crucial pour la planification et les interventions d'urgence.

### ✓ **Zones à risque moyen**

Les zones à risque moyen sont dispersées et entourent souvent les zones à risque élevé et très élevé. Ces zones peuvent être influencées par leur élévation relative, leur pente ou leur proximité avec des plans d'eau.

### ✓ **Zones à risque fort et très fort**

Les zones qui présentent un risque fort et très fort sont principalement situées dans les parties centrale et méridionale de la carte. Il y a une concentration notable le long de certains cours d'eau, ce qui indique probablement des zones sujettes aux inondations en raison de leur proximité avec des cours d'eau.

## **4.5. Analyse de la vulnérabilité fonctionnelle et évaluation des enjeux vulnérables au risque d'inondation**

La vulnérabilité fonctionnelle dans le contexte du risque d'inondation fait référence à l'impact potentiel des inondations sur le fonctionnement des infrastructures, des services essentiels et des activités humaines. Elle évalue dans quelle mesure les systèmes critiques et les activités socio-économiques peuvent être perturbés ou paralysés par un événement d'inondation.

L'analyse des enjeux exposés au risque d'inondation permet de :

- Evaluer les conséquences possibles des inondations sur les personnes, les infrastructures, les biens matériels, l'environnement et l'économie locale.
- Fournir une base pour élaborer des stratégies de gestion des risques et des plans d'urgence efficaces, en incluant des mesures préventives, des systèmes d'alerte précoce et des plans de réponse.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

- Aider les décideurs à prendre des décisions éclairées sur l'aménagement du territoire, la conception des infrastructures, et la réglementation de l'utilisation des sols pour réduire les risques d'inondation.

Tableau 4.10. Statistiques des enjeux vulnérables au risque d'inondation dans les deux bassins versants

Bassin versant	B.V Oued Ziad		B.V Oued Mgharouel	
Total des constructions	4971		707	
Nombre de logements habités	8994		1307	
Nombre de logement inhabité	1682		90	
Nombre de logements à usage professionnel	42		93	
Total logements	5327		1490	
Population (2022)	38956		3267	
Surface du bassin versant en (Ha)	1209		925.15	
Densité de population (Habitants /Hectare)	78638		4236	
Equipements	Sanitaire	2	Sanitaire	2
	Educatifs	20	Educatifs	6
	Activité et commerce	Plusieurs	Activité et commerce	Plusieurs
	Administratifs et services	10	Administratifs et services	14
	Socio-culturels et cultuels	4	Socio-culturels et cultuels	4
	Sportifs, loisirs et détente	4	Sportifs, loisirs et détente	4

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

Infrastructures	RN 03, RN 27, chemin de fer et quelques routes secondaires et tertiaires	RN 05, quelques route secondaire et tertiaires
-----------------	--	--

(Source : auteure)

Le tableau (4.10) ci-dessus résume la vulnérabilité des enjeux existants dans les deux bassins versants étudiés, il s'agit de la vulnérabilité de la population (humaine) représenté par le nombre total de la population et sa densité pour l'ensemble des ilots, et la vulnérabilité fonctionnelle qui se réfère à la fonction de chaque bâtiment situé dans une zone à risque et à sa capacité d'accueil de la population, et enfin l'ensemble des équipements et infrastructures vulnérables.

Les résultats obtenus de la cartographie de l'aléa inondation dans les deux bassins versants montrent le débordement des deux cours d'eau d'Oued Mgharouel est Oued Ziad sur la Route nationale N°05 et 27 respectivement interrompant les déplacements. Ce constat a été confirmé sur terrain lors des deux inondations qui ont frappé les deux bassins versants.

-l'enquête effectuée sur terrain a montré la destruction d'une partie du dalot situé au-dessous de la RN 05 causant le dérapage de deux voitures et la destruction du réseau d'assainissement (explosion des regards au niveau du 7<sup>ème</sup> km Boussouf) du au débordement d'Oued Mgharouel (Figure 4.11 E et F).

### 4.5.1. Synthèse et recommandations

- Pour une meilleure planification et développement urbain dans ces zones il faut :
- Éviter de construire de nouvelles infrastructures dans les zones à risque élevé ou très élevé. Envisager des mesures d'atténuation des inondations pour les structures existantes dans ces zones.
- Se préparer aux situations d'urgence.
- Élaborer des plans d'évacuation et des systèmes d'alerte précoce axés sur les zones à haut risque, en particulier celles situées à proximité d'infrastructures essentielles.
- Mettre en œuvre des pratiques de gestion des bassins versants afin de réduire le ruissellement et d'améliorer l'absorption naturelle de l'eau dans les zones à risque moyen ou élevé.

### 4.6. Evaluation des facteurs contribuant au déclenchement et à l'aggravation du risque inondation dans les deux bassins versants

Depuis longtemps, la gestion du risque inondation s'est appuyée sur des ouvrages tels que les digues ou le calibrage des oueds. Cependant, ces aménagements ne suffisent pas à protéger contre les crues exceptionnelles. En outre, ils créent un faux sentiment de sécurité, comme en témoigne

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

le bassin versant de l'Oued Mgharouel, où les inondations continuent de causer des dégâts malgré son calibrage.

Les inondations trouvent leurs causes principales dans les précipitations abondantes, inondant les terres basses et provoquant des crues destructrices. Cependant, ces phénomènes ne sont pas uniquement liés aux conditions météorologiques. D'autres facteurs anthropiques existent. En effet, l'expansion rapide des villes, notamment des métropoles tel Constantine, les zones à risque se densifient, aggravant la vulnérabilité des populations et des infrastructures.

L'imperméabilisation des sols due à l'urbanisation intensifie le ruissellement et augmente les volumes d'eau collectés, tandis que les forts débits et vitesses d'écoulement favorisent le transport de déchets et de sédiments qui obstruent les canaux d'évacuation. Ces problèmes sont exacerbés par le manque d'entretien des infrastructures et la gestion inefficace des déchets.

Plusieurs facteurs anthropiques aggravant le risque d'inondation sont constaté au niveau des bassins versants étudiés (Figure 4.22), et sont résumés ci-dessous.

- Urbanisation anarchique, occupation des terres inondées et même le lit mineur de l'oued dans les deux bassins versants étudiés et des activités économiques informelles sur la RN 27 qui traverse Oued Ziad à Djebli Ahmed

- Extension non contrôlée à proximité des lits d'Oued Mgharouel, en particulier dans des zones jugées inconstructibles selon les études effectuées par SIMEC SOL, précisément dans le lotissement des avocats et le 7<sup>e</sup> km à Boussouf, ce développement urbain accéléré, rend la zone particulièrement sensible aux pluies même modérées ce qui augmente la vulnérabilité.

- Le non-respect par rapport aux servitudes liées aux Oueds.

- L'absence du couvert végétal et de reboisement essentiel pour réduire la vitesse d'écoulement et favoriser l'infiltration aggravent la situation.

- La délivrance de permis de construire au sein des emprises d'oueds, sans consultation des autorités compétentes, comme la Direction des Ressources en Eau, aggrave encore cette situation. Par ailleurs, la proximité d'installations industrielles, notamment dans la zone de Palma, et l'urbanisation précaire amplifient la pression sur ces zones.

- Le cours d'eau d'Oued Ziad est non aménagé, souffre de l'accumulation de décombres, de débris et d'objets hétéroclites, formant des obstacles à l'écoulement des eaux et favorisant les débordements.

- Les deux Oueds sont abandonnés, on constate des lits encombrer et des berges attaquées

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

-L'absence d'entretien régulier, notamment sous les ponts, amplifie ces problèmes. De plus, la présence de ponts rapprochés près des embouchures agit comme des goulots d'étranglement, intensifiant le gonflement des cours d'eau.

-L'absence d'une culture du risque au sein de la population locale

-La défaillance des réseaux d'assainissement pour collecter les eaux pluviales tel le cas du bassin versant d'Oued Mgharouel ou on a signalé un problème de reflux des regards situés au 7eme km lors des précipitations qui augmente le risque

-Une topographie défavorable, marquée par des zones urbaines en basse altitude au pied des montagnes, rendent les inondations encore plus destructrices. À chaque épisode pluvieux, même léger, ces agglomérations enregistrent des pertes significatives

Ces facteurs combinés mettent en évidence une gestion insuffisante des risques d'inondation et l'urgence de mettre en œuvre des mesures adaptées pour protéger les populations et les infrastructures.



## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE



Figure 4.22. Facteurs aggravant le risque d'inondation dans les bassins versants ; A,B,C,D/ Oued Ziad, E,F Oued Mgharouel

(Source : Auteure)

### Conclusion

L'analyse multicritère hiérarchique (AHP) a gagné en importance dans les études récentes, se révélant être un instrument efficace pour la cartographie des risques et la prise de décisions dans des problématiques environnementales complexes (Dahri et Abida, 2017 ; Mihi et al., 2019). De nombreux experts ont utilisé AHP en association avec ARCGIS pour localiser les zones exposées aux risques d'inondation afin de réduire l'impact de ce dernier sur l'homme et ses biens, ainsi que sur l'environnement et les activités socio-économiques. Cette technique permet de traiter simultanément de nombreuses données entrées pour des résultats plus précis et bien définis.

La modélisation hydraulique réalisée à l'aide du logiciel HEC-RAS permet de simuler les crues pour différentes périodes de retour et d'analyser les caractéristiques hydrauliques des écoulements dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel, notamment les hauteurs d'eau, les énergies et les vitesses d'écoulements et de délimiter les zones inondables. L'événement historique du 19 septembre 2018, qui a touché l'agglomération Djebli Ahmed en aval du bassin versant, illustre clairement le danger potentiel que représente Oued Ziad pour la population. De même pour Oued Mgharouel qui constitue la principale source des inondations affectant les deux lotissements des avocats et El Hanna ainsi qu'une partie des constructions illégales du 7<sup>ème</sup> km et la station-service située à proximité de la RN n°5. Les zones les plus vulnérables et à surveiller en priorité sont les secteurs correspondant au lit majeur des deux Oueds et leurs croisements en aval avec les routes.

## CHAPITRES VI : MODELISATION DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE AU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE CARTOGRAPHIE DU RISQUE

La cartographie de la vulnérabilité permet de délimiter les zones qui présente une forte vulnérabilité. En intégrant les données cartographiques des enjeux vulnérables, les autorités peuvent élaborer des stratégies de gestion des risques adaptées protéger la population et ses biens ainsi que les infrastructures

L'évaluation du risque et la cartographie prévisionnelle constituent des outils essentiels pour la gestion des risques et l'aménagement urbain. Elles permettent d'identifier les zones les plus vulnérables, d'orienter les efforts de prévention et de préparation aux inondations, et de définir les mesures d'atténuation nécessaires pour améliorer leur protection.

Les résultats de cette analyse nous ont permet de mieux comprendre les phénomènes naturels, les dangers potentiels et les enjeux associés, afin de réguler de manière efficace l'utilisation des terres et de limiter l'expansion urbaine dans les zones à risque, tout en conciliant les impératifs de prévention avec les besoins socio-économiques de développement. L'évaluation des risques permet de cibler les actions de prévention vers les zones les plus exposées, en renforçant leur protection.

# CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

## **Introduction**

En raison de sa localisation géographique, de son climat et de son orographie démembrée, l'Algérie est confrontée aux défis récurrents des inondations ; ce qui a incité les décideurs et la communauté des chercheurs à travailler sur un « système de gestion du risque inondation » afin d'atténuer ses effets dévastateurs.

La mise en place de la stratégie nationale de lutte contre les inondations a été élaborée par le ministère des ressources en eau (MRE) et a pu bénéficier d'une aide financière de la part de la commission européenne (CE).

Cette aide entre dans le cadre du programme d'appui au secteur de l'eau et de l'assainissement (EAU II) » (2014-2017) qui découle de l'instrument européen de voisinage et de partenariat (IEVP – Europe Aid).

Nous allons essayer dans cette partie du travail d'examiner notre système national de gestion du risque d'inondation en soulignant les cadres législatif et réglementaire qui le régissent.

En outre, nous allons examiner et analyser les mesures prises par l'État pour faire face à ces risques ; à la lumière des expériences et des leçons tirées d'événements climatiques extrêmes qui ont impactées notre pays dans un passé proche.

Aussi, nous allons insister sur les différents projets d'infrastructure mise en place ainsi que l'instauration de programmes de sensibilisation.

Toutes ces mesures vont dans le sens d'une politique d'adaptation et d'atténuation de ce risque et de parer aux dysfonctionnements et lacunes du système actuel de gestion et d'anticiper les futurs défis climatiques et hydrologiques.

### **5.1. Système de gestion du risque inondation en Algérie**

Le système de gouvernance et de gestion des risques naturels en Algérie a évolué, passant d'une approche réactive à la gestion des risques à une perspective globale intégrant la prévision et la réduction du risque, Cette évolution découle des expériences et enseignements tirés des grandes catastrophes ayant touché le pays, ainsi que de son engagement dans des accords internationaux tels que le cadre d'action de Sendai et Hyōgo. Ce système Algérien de gouvernance et de gestion des risques naturels s'appuie sur :

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

### 5.1.1. Un volet juridique

Ce volet présente le cadre législatif et réglementaire algérien en matière de risques naturels majeurs. La mise en place d'un cadre législatif performant pour la gestion des risques en Algérie implique l'adoption de lois et de décrets sectoriels couvrant plusieurs domaines à savoir l'eau, le développement durable, ainsi que le changement climatique.

Entre les années 1980 et 2000, plusieurs décrets et lois avaient permis de réglementer en partie la prévention vis-à-vis des risques naturels et technologiques, en effet, le renforcement du cadre juridique concernant la gestion des risques en Algérie trouve ses origines dans les années quatre-vingt suite au tremblement de terre d'El Asnam du 10 octobre 1980 (Boughouass, 2018 ; Belarbi, 2019), le gouvernement algérien a répondu en adoptant le 29 mai 1985 un premier plan national de prévention des catastrophes et d'organisation des interventions et secours. Cette initiative se matérialise à travers deux principaux décrets, à savoir :

- Le Décret n°85-231 du 25 août 1985 établit les modalités et les conditions pour la réalisation et l'organisation des opérations de secours lors d'une catastrophe. Ce décret a été le catalyseur de la création des plans d'organisation des interventions et secours (Plans ORSEC), déployés à divers niveaux (wilayas, communes et les unités notamment industrielles).
- Le Décret n°85-232 du 25 août 1985 traite de la prévention des risques de catastrophe, il est constitué de 11 articles. Bien que le terme du plan de prévention des risques, qu'ils soient d'origine naturelle ou technologique, soit mentionné dans (l'article 2), aucune description détaillée de ses objectifs, de son contenu et de sa mise en œuvre n'est fournie.
- Arrêté ministériel n ° 01 du 29/09/1985 sur l'organisation des interventions et de l'assistance en cas de catastrophe, et la prévention des risques.
- Guide du 20/11/1985 sur la manière de mettre en œuvre des plans de prévention et des plans d'organisation d'interventions de secours en cas de catastrophe.

Ces décrets ont constitué le fondement du système algérien de gestion des catastrophes pendant presque deux décennies. D'un autre côté, la Loi 90-29 du 1er décembre 1990 concernant l'aménagement du territoire et l'urbanisme a pour but de réglementer l'aménagement, l'urbanisation des sols et la construction dans le contexte d'assurer un équilibre environnemental et intersectoriel. Elle définit les instruments d'urbanisme tels que les plans directeurs

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

d'aménagement et d'urbanisme (PDAU) et les plans d'occupation des sols (POS), ainsi que leur fonction intersectorielle et spatiale.

Le PDAU subdivise une commune concernée ou une association de communes en quatre secteurs distincts : secteur urbanisé, secteur à urbaniser, secteur d'urbanisation future et secteur non urbanisable. En outre, la loi 90-29 énonce les règles et procédures pour l'établissement et la délivrance des permis de lotir et de construire. Bien que la loi prenne en considération la protection des espaces naturels, culturels et historiques, elle n'aborde le sujet des risques de manière générale qu'à l'article 69, en subordonnant l'autorisation de certaines constructions et démolitions à l'avis des services compétents. Par ailleurs, le Décret exécutif 90-402 du 15 décembre 1990, porte sur l'organisation et le fonctionnement du fonds dédié aux calamités naturelles ainsi qu'aux risques technologiques majeurs.

Mais c'est suite aux inondations de Bab El Oued (novembre, 2001) et le tremblement de terre de Boumerdes survenu en mai 2003 que le cadre juridique relatif à la gestion des risques en Algérie a véritablement pris de l'ampleur (Boughouass, 2018, Belarbi, 2019). Cela se traduit par l'apparition d'autres textes réglementaires qui sont venus compléter les premières dispositions réglementaires, couvrant divers domaines tels que l'aménagement du territoire, l'environnement et le développement durable, l'assurance, la construction parasismique et l'organisation générale. En ce qui concerne l'aménagement du territoire, la Loi 04-05 du 14 août 2004 modifie et complète la loi n° 90-29 du 1er décembre 1990, mettant particulièrement l'accent sur la restriction des terrains constructibles à ceux qui ne sont pas directement soumis aux risques naturels et technologiques. Ainsi, il est attribué aux plans directeurs d'aménagement et d'urbanisme (PDAU) ainsi qu'aux plans d'occupation des sols (POS) la responsabilité de définir les conditions d'aménagement et de construction en vue de prévenir les risques naturels et technologiques.

En ce qui concerne l'environnement et le développement durable, la législation algérienne a été améliorée avec la promulgation de la loi 01-20 du 12 décembre 2001, consacrée à l'aménagement et au développement durable, et la loi 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

En ce qui concerne l'assurance, trois textes législatifs récents ont été adoptés pour encadrer le système d'assurance :

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

- L'ordonnance 03-12 du 26 août 2003 concerne l'obligation d'assurance des catastrophes naturelles et l'indemnisation des victimes. Elle impose une assurance à toute personne possédant un bien immobilier ou exerçant une activité industrielle ou commerciale, et exige un contrat d'assurance lors de toute transaction immobilière ou déclaration fiscale. Cette ordonnance stipule que les compagnies d'assurances doivent fournir une couverture contre les effets des catastrophes naturelles avec la garantie de l'État, en fixant les conditions d'indemnisation.

- Le Décret exécutif n° 04-268 du 29 août 2004 détermine les phénomènes naturels inclus dans l'obligation d'assurance des conséquences des catastrophes naturelles et précise les procédures pour déclarer l'état de catastrophe naturelle. Il englobe les séismes, les inondations et les coulées de boues, les tempêtes et les vents violents, ainsi que les mouvements de terrains. Aussi ; ce décret préconise la proclamation de l'état de catastrophe naturelle par un arrêté interministériel des ministres responsables des collectivités locales et des finances, dans un délai de deux mois après l'événement, en se fondant sur un rapport émis par les walis impliqués.

- Le Décret exécutif 04-270 du 29 août 2004 définit les clauses types à inclure dans les contrats d'assurance des conséquences des catastrophes naturelles.

En ce qui concerne la construction parasismique, l'Arrêté du 04 janvier 2004 du Ministre de l'Habitat et de l'Urbanisme procède à la révision des normes parasismiques algériennes en remplaçant celles-ci par les (RPA 99 / Version 2003). Cet arrêté approuve les ajustements des RPA 99 suite au séisme du 21 mai 2003 de Boumerdes, il impose aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'études techniques, entreprises de réalisation, ainsi qu'aux organismes de contrôle technique et d'expertise, l'application des nouvelles règles. De plus, il confie au centre national de recherche appliquée en génie parasismique (CGS) la responsabilité de les élaborer et de les diffuser.

En ce qui concerne l'organisation et la communication, divers textes ont abordé les aspects de l'organisation générale et de la communication, notamment :

- Le Décret exécutif 03-332 du 08 octobre 2003, qui établit la création, l'organisation et le fonctionnement du Centre Opérationnel National d'Aide à la Décision.

- Le Décret exécutif 04-181 du 24 juin 2004, qui instaure la commission de communication liée aux risques naturels et technologiques majeurs.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

- La Loi cadre n°04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

La loi 04-20, promulguée le 25 décembre 2004, vise à prévenir et gérer de manière durable les catastrophes naturelles et technologiques. Elle intègre divers éléments visant à systématiquement réduire les risques et les pertes, mettant en avant des principes de précaution et de prudence, de concomitance, d'action préventive, de participation et d'intégration des techniques nouvelles. L'objectif principal était l'amélioration de la connaissance des risques, de leur surveillance et de leur prévision, ainsi que le développement de l'information préventive sur ces risques. De plus, il englobe la prise en compte des risques dans l'utilisation des sols et dans la construction, la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens aux aléas, et la mise en place de dispositifs visant à assurer une prise en charge cohérente, intégrée et adaptée de toute catastrophe d'origine naturelle ou technologique (Boughouass, 2018). Cette loi englobe deux aspects principaux : la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes. En matière de prévention, elle établit des règles générales, notamment la création d'un "plan général de prévention des risques majeurs" pour chaque risque. Des exigences spécifiques sont définies aussi pour chaque risque majeur.

En ce qui concerne la gestion des catastrophes, la loi aborde la planification des urgences et des réponses, s'appuyant sur les plans ORSEC et les plans d'intervention spéciaux, classifiés à différents niveaux (national, inter-wilayas, wilayas, communaux et sites sensibles). Elle prévoit également des mesures structurelles, telles que la constitution de réserves stratégiques, un système de réparation des dommages et la création d'une "Délégation nationale aux risques majeurs" chargée de coordonner les actions et d'évaluer le système national de prévention des risques majeurs et de gestion des catastrophes.

La loi se conclut par différentes dispositions pénales, spécifiques et finales. Néanmoins, afin d'assurer une mise en application efficace de cette loi, il est impératif de publier de nouveaux décrets. Ces décrets, actuellement en phase de rédaction, jouent un rôle crucial dans l'élaboration des "plans de prévention des risques" (PPR) réglementaires, à la fois à l'échelle nationale et locale, revêtant une importance fondamentale dans chaque municipalité de la région examinée.

Dans son ensemble, la loi 04-20 constitue un cadre juridique exhaustif régissant les aspects techniques et organisationnels de la gestion des risques majeurs, englobant à la fois la prévention et la réaction face aux crises. Elle établit des directives pour la prévention des risques et la gestion

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

des catastrophes, mettant en accent l'importance de la planification, de la coordination et des mesures stratégiques pour garantir une prévention et une gestion optimales des risques.

- Le Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT) a été actualisé en 2010 pour intégrer un ensemble de directives concernant l'aménagement du territoire, la planification urbaine et l'urbanisme (Mezhoud, 2021).

- Décret exécutif n°11-194 du 22 mai 2011 concernant les missions, la structure et le fonctionnement de la délégation nationale aux risques majeurs.

- Décret exécutif n° 19-59 du 2 février 2019 fixant les modalités d'élaboration et de gestion des plans.

- La loi n° 24-04 du 16 Chaâbane 1445 correspondant au 26 février 2024 portant les règles de prévention, d'intervention et de réduction des risques de catastrophes dans le cadre du développement durable, cette loi vient pour compléter et corriger les insuffisances de la loi 04-20.

### **5.1.2. Un volet institutionnel<sup>19</sup>**

En Algérie, la gestion des inondations nécessite une collaboration renforcée entre les différents ministères, avec une attention particulière accordée au rôle clé de la protection civile, du ministère des ressources en eau et de la délégation nationale aux risques majeurs relevant du ministère de l'intérieur qui est responsable de l'instauration de la stratégie nationale de gestion des risques, ainsi que les directions chargés de la gestion des ressources en eau tel que la direction des ressources en eau, l'agence nationale des ressources hydrauliques ( ANRH), Office national de l'assainissement (ONA), l'agence des bassins hydrographiques (ABH), les collectivités locales...etc.

La coordination interministérielle implique la collaboration et le lien entre différentes institutions relevant de différents ministères. Cela signifie que ces institutions travaillent ensemble, partagent des informations et coordonnent leurs actions pour atteindre des objectifs communs. Cette approche favorise une gestion plus efficace et intégrée des problématiques qui nécessitent la contribution de plusieurs secteurs gouvernementaux.

#### **5.1.2.1. Au niveau National**

Plusieurs organismes collaborent de manière étroite pour gérer ce risque, tels que la Direction Générale de la Protection Civile (DGPC), les ministères des Ressources en Eau, de l'Intérieur, des

---

<sup>19</sup> Direction générale de la protection civile

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire, des Travaux Publics et des Transports, l'office national de météorologie (ONM), l'Habitat et l'Urbanisme, l'Environnement et autres.

### **5.1.2.2. Au niveau local**

La coordination pour la gestion du risque d'inondation au niveau de la wilaya (département) et de la commune (municipalité) implique une collaboration étroite entre divers services techniques locaux, y compris le wali, la Direction de la Protection Civile de la Wilaya (DPCW), la Direction de l'Administration Locale (DAL), la Direction des Ressources en Eau (DRE), la Direction de l'Urbanisme et de la Construction (DUC), la Direction des Travaux Publics (DTP), les services de Sécurité et de l'Ordre Public, la Direction de l'Énergie, le chef de Daïra qui coordonne les activités des différentes P. APW sous l'autorité du Wali, et le Président de l'Assemblée Populaire Communale (PAPC).

### **5.1.3. Un Volet opérationnel**

Le volet opérationnel vise à garantir une gestion efficace du risque d'inondation, intégrant des approches prévisionnelles, et préventives, des mécanismes d'intervention d'urgence et des actions à long terme pour renforcer la résilience des communautés face au risque d'inondation. Ce volet est marqué par une amélioration constante des méthodes, des équipements, et des ressources humaines et matérielles de la Protection Civile, du Ministère des Ressources en Eau, l'office national de l'assainissement (ONA), et de l'Office National de la Météorologie (ONM)...etc.

### **5.1.4. La prévision**

En Algérie, la prévision du risque d'inondation s'opère au niveau de deux directions responsables : l'Office National de la Météorologie (O.N.M) et l'Agence Nationale des Ressources en Eau (A.N.R.H).

L'Office National de la météorologie (O.N.M) joue un rôle crucial dans la prévision du risque d'inondation en Algérie, en mettant en œuvre des mécanismes d'alerte et de communication efficaces. En effet, un Bulletin Météorologique Spécial (BMS) est émis, mettant l'accent sur des paramètres tels que la quantité des précipitations et leur durée, en cas de conditions météorologiques exceptionnelles. Lorsqu'un BMS est déclenché, il est immédiatement transmis à la direction générale de la protection civile. Cette dernière avise et alerte les directions de la protection civile au niveau local, leur enjoignant de prendre les mesures nécessaires pour la préparation et la réponse opérationnelle face au risque d'inondation.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

De même, l'Agence nationale des ressources en eau (A.N.R.H) joue un rôle important dans la gestion du risque d'inondation puisqu'elle possède un ensemble de stations pluviométriques et hydrométriques pour mesurer les précipitations et les débits, répartis un peu partout dans le pays. Les conditions de remplissage des barrages sont signalées sans délai aux services techniques concernés. Ces informations incluent des détails essentiels tels que le volume d'eau dans le barrage, la quantité d'eau à déverser, et toute information pertinente liée à la sécurité du barrage et la protection des habitants en amont. De plus, toutes les zones potentiellement inondables sur le territoire de la wilaya concernée sont également identifiées et communiquées.

### 5.1.5. La prévention

L'Algérie a mis en œuvre des politiques de prévention du risque d'inondation en planifiant des actions visant à accroître la résilience aux catastrophes, soutenues par un plan d'action renforcé dans divers secteurs.

Sur le plan sectoriel, diverses mesures préventives ont été instaurées, notamment :

1. la mise en place d'une étude par les services du Ministère des Ressources en Eau (MRE) qui vise à l'élaboration d'une Stratégie Nationale de lutte contre le risque d'inondation à l'horizon 2030.

Cette stratégie s'articule autour de cinq grands axes stratégiques et dix-neuf objectifs, notamment :

- l'amélioration de la connaissance des risques.
- la réorientation vers des mesures non structurelles.
- la réduction de la vulnérabilité.
- l'aménagement durable des territoires.
- le développement de la coopération institutionnelle.

2. Le Ministère des Ressources en Eau (MRE) a initié des études visant à élaborer des plans de prévention du risque inondation dans les villes les plus exposées au risque.

3. La conception d'études visant à protéger les agglomérations exposées aux crues, suivie de leur mise en œuvre, et l'engagement des travaux pour la construction de structures de protection contre les inondations.

4. La conduite de plusieurs études concernant la vulnérabilité de la capitale Alger face aux catastrophes naturelles, avec une attention particulière sur le risque d'inondation parmi eux :

- Etude de la vulnérabilité du massif de Bouzareah aux catastrophes naturelles (par BRGM et ISL) financée par la Banque Mondiale.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

-Etude intégrée de réduction de la vulnérabilité des zones urbaines de la wilaya d'Alger aux catastrophes naturelles (hors massif de Bouzareah) (BURGÉAP).

-Etude sur la vulnérabilité et l'adaptation de la Wilaya d'Alger au changement climatique et aux risques naturels (par Egis Eau / IAU-IDF / BRGM) financé par la caisse des dépôts (CIM) et le PNUD.

5. Des initiatives gouvernementales visant à minimiser les impacts des inondations. En effet, des investissements importants sont engagés par l'État Algérien pour la lutte contre les inondations. En effet, au cours de la conférence nationale sur les risques majeurs tenue les 22 et 23 octobre 2018, le ministre des ressources en eau a discuté des mesures mises en place à travers des projets concrets dans le cadre de divers programmes de développement, en particulier en ce qui concerne la protection des villes contre les inondations. Il englobe diverses mesures structurelles, opérationnelles et préventives

### ➤ **Les mesures structurelles**

Il s'agit de la construction de digues longitudinales, de barrages excréteurs et de bassins de rétention, ainsi que l'aménagement et le recalibrage des oueds avec l'installation de murs de protection<sup>20</sup>.

### ➤ **Les mesures opérationnelles**

Les mesures opérationnelles sont représentées par le dispositif d'intervention qui est activé à chaque émission du BMS (Bulletin Météo Spécial). Ce dispositif implique le déploiement des équipes d'exploitation de l'ONA-SEAAL, du SEOR et du SEACO ainsi que la protection civile aux points noirs identifiés.

### ➤ **Les mesures préventives**

Les mesures préventives consistent au développement et de la mise en place d'outils de prévention et d'alerte, tels que les systèmes d'alerte pilotes dans les oueds El Harrach et Mekkara, ainsi que la modernisation des stations hydrométriques de l'ANRH.

Le ministre des ressources en eau a déclaré qu'entre 1999 et 2018, une somme substantielle dépassant les 227 milliards de dinars algériens et qui a été allouée à la prévention des inondations

---

<sup>20</sup> Behlouli Larbi. (2018). Les inondations en Algérie. Expert Hydrologue (ex. Responsable des études et de la prévision à l'ANRH. Rencontre nationale sur la gestion des risques de catastrophes le 22 et 23 Octobre 2018 au Centre International des Conférences C.I.C « Abdelatif Rahal »..

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

à travers la mise en œuvre de 575 opérations sur le territoire algérien (Hallil, 2023). Ces initiatives comprennent la protection de plus d'une centaine de villes et agglomérations réparties dans les 48 wilayas, ainsi que des aménagements significatifs réalisés dans un grand nombre d'oueds (Figure 5.2).



Figure 5.1 Travaux d'aménagement et de calibrage des cours d'eaux menaçants  
(Source : Conférence Nationale sur les risques majeurs CIC le 22-23 octobre 2018, Prise en charge de la problématique des inondations)

Constantine figure parmi les wilayas qui ont bénéficié des investissements les plus importants dans le domaine de la prévention des inondations. Un total de 18 630 000 000 DA a été alloué pour la

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

mise en œuvre de 10 opérations visant la protection de la ville d'Ali Medjeli et le calibrage des oueds Boumerzoug, Rumel (Figure 5.2).

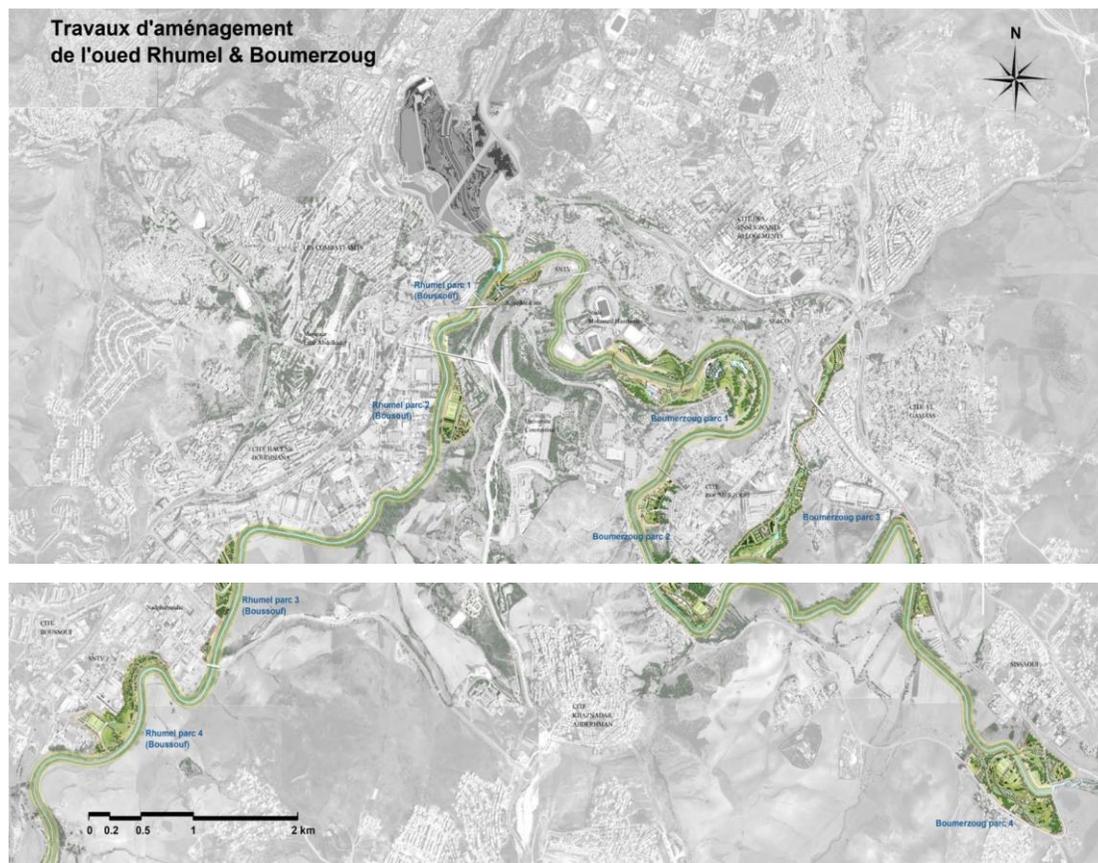


Figure 5.2 Des travaux de calibrage des Oueds Rhumel et Boumerzoug sur un linéaire de 9.95 km (source : Conférence Nationale sur les risques majeurs CIC le 22-23 octobre 2018, Prise en charge de la problématique des inondations)

### 5.1.6. L'information préventive et la sensibilisation

Chaque année, la Direction de la Prévention met en œuvre un plan de sensibilisation et d'information sur le risque d'inondation, exécuté par les directions de la protection civile des wilayas pendant la période automnale et en période hivernale. Ces campagnes visent à réduire le risque inondation, inculquer la culture du risque aux citoyens et les informer sur les comportements à adopter en cas d'inondation. Organisées sous différentes formes telles que des portes ouvertes au niveau des unités de la protection civile, des séminaires, des journées d'études, ces campagnes ont plusieurs objectifs, dont la réduction de la vulnérabilité au risque inondation, la sensibilisation de

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

la population, l'approfondissement des connaissances sur le risque et la transmission de consignes de prévention.

Les manifestations se déroulent à travers plusieurs ateliers abordant le risque inondation, tels que l'atelier sauvetage-déblaiement, l'atelier secourisme, des affiches et panneaux sur les risques majeurs, des communications suivies de débats sur le phénomène inondation, ainsi que des émissions radiophoniques locales dédiées à la sensibilisation sur les risques de crues et inondations.

L'implantation stratégique des ateliers vise une audience maximale, couvrant des lieux tels que les établissements scolaires de tous les cycles, les places publiques en centre-ville, les centres culturels, les maisons de jeunes, les CFPA (Centres de Formation Professionnelle et d'Apprentissage), et les universités. Ces campagnes se concentrent particulièrement dans le chef-lieu de la wilaya et les communes les plus exposées au risque d'inondation.

En complément de ces initiatives, des journées d'information et de formation sont organisées en collaboration avec les secteurs concernés, ciblant les responsables et élus locaux.

### **5.1.7. Phase de préparation**

La phase de préparation aux risques d'inondation est essentielle à la gestion des catastrophes. La préparation consiste à être conscient des risques potentiels, à comprendre les facteurs de risque et à savoir quelles mesures prendre en cas d'urgence.

La première étape de la préparation au risque d'inondation comprend l'identification des zones inondables par les autorités compétentes, notamment au niveau de l'Assemblée Populaire Communale (APC), de la Daïra et de la Wilaya. Les facteurs aggravants tels que l'élévation du niveau d'eau dans les barrages, des oueds, l'obstruction des canaux de drainage et les fortes pluies sont pris en compte.

Un programme d'entretien et de maintenance est mis en œuvre à partir du mois d'août, supervisé par M. le Wali. Les services concernés, tels que l'APC, la Direction des Ressources en Eau, la Direction des Travaux Publics, l'Office de la Promotion et de la Gestion Immobilière, et la Protection Civile, sont mobilisés pour diverses tâches. Ces tâches incluent l'entretien des avaloires,

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

des cours d'eau, des petits ponts, la mise en place des digues pour équilibrer les oueds, l'entretien des réserves d'eau situées en hauteur, la réduction du niveau d'eau dans les barrages, maintenance des travaux routiers, des ponts et l'écoulement d'eaux au bord des routes nationales et wilaya, le nettoyage des canaux de drainage sanitaires pour les bâtiments et les magasins, la maintenance et l'entretien des installations.

La Protection Civile joue un rôle essentiel en préparant et en mettant à jour les plans d'intervention des inondations, sous l'autorité de M. le Wali, avec la participation des services concernés. Elle s'assure de l'acquisition, du contrôle et de la maintenance des équipements d'intervention tels que les pompes d'aspiration, les groupes électrogènes, les embarcations, les tenues d'inondation, les tenues de plongée, les tuyaux d'aspiration, les cordes, etc (voir tableau 5.1).

Tableau 5.1 : Synthèse des moyens de sauvetage en Algérie en cas d'inondation

Moyens d'intervention		Nombre de moyens opérationnels
Plongeurs		507
Embarcation De sauvetage	A fond plat	66
	Pneumatique	165
Motopompes		2475
Groupes Electrogènes		965
Engins De sauvetage	CCFM <sup>21</sup>	438
	EPT <sup>22</sup>	498

(Source : direction de la protection civile de Constantine)

Des exercices, tant en salle que sur le terrain, sont réalisés pour tester le plan d'intervention, impliquant l'ensemble des acteurs concernés.

<sup>21</sup> Camion-Citerne Forêt Moyen

<sup>22</sup> Fourgons pompe-tonne

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

- Un aspect clé de cette préparation est la formation massive aux premiers secours (secourisme de masse), élaborée par la Direction Générale de la Protection Civile (DGPC) à travers l'Opération Un Secouriste Par Famille. Cette initiative a formé près de 127 000 citoyens entre 2010 et 2019, renforçant ainsi la capacité des populations à réagir efficacement en cas d'urgence.
- Dans le cadre de la préparation, élaborer des plans d'urgence tels que des plans organisationnels d'intervention d'urgence (ORSEC) à différents niveaux (c'est-à-dire national, provincial, provincial, municipal et emplacements sensibles). Ces plans définissent des protocoles et des actions pour répondre aux inondations.
- La Direction de la Protection Civile algérienne a joué un rôle actif dans cette phase, mettant en place des simulations fréquentes à des niveaux tant stratégiques qu'opérationnels en collaboration avec les parties prenantes. Ces exercices sont conçus pour tester l'efficacité des plans d'urgence existants, identifier les éventuelles lacunes et mettre à jour les procédures en conséquence. Cette approche proactive garantit que la société est mieux préparée à réagir de manière coordonnée et efficace lors d'événements liés aux inondations, renforçant ainsi la capacité du pays à répondre à ces catastrophes naturelles.

### **5.1.8. Annonce et alerte** <sup>23</sup>

La carte de vigilance météorologique, officiellement lancée le 23 mars 2017 lors de la célébration de la Journée Météorologique Mondiale par Monsieur le Ministre des Travaux Publics et des Transports, résulte d'un programme de modernisation de l'établissement et de la volonté de Météo Algérie de mettre en place un dispositif complet et actuel. L'objectif est d'informer simultanément les autorités publiques, les médias et la population sur les risques météorologiques potentiels, leur gravité, leur évolution, les conséquences attendues et de prodiguer des conseils de comportement adaptés.

Disponible à la fois sur le site web de Météo Algérie et sur les smartphones, la vigilance météorologique vise à informer le grand public, encourageant ainsi chacun à devenir un acteur de sa propre sécurité. Vigilance et Alerte à Météo Algérie.

---

<sup>23</sup> Communication du Mr. Hamadache Bachir, Directeur de la Prévision et des Télécommunications Météorologiques. Office National de la Météorologie. Rencontre nationale sur la gestion des risques de catastrophes le 22 et 23 Octobre 2018 au Centre International des Conférences C.I.C « Abdelatif Rahal». Alger.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

### 5.1.9. Phase de réponse (gestion de crise)<sup>24</sup>

L'Algérie s'appuie sur une structure décisionnelle bien défini pour la gestion des situations d'urgence, dans laquelle la protection civile joue un rôle important en matière de collaboration et de coopération avec les divers intervenants (gendarmerie nationale, police, direction des ressources en eau, travaux publics, etc.). Cette gestion s'appuie également sur le renforcement des compétences au niveau local avec l'implication des Wali (préfets) au niveau des départements, et au niveau central, avec la Direction Générale de la Protection Civile.

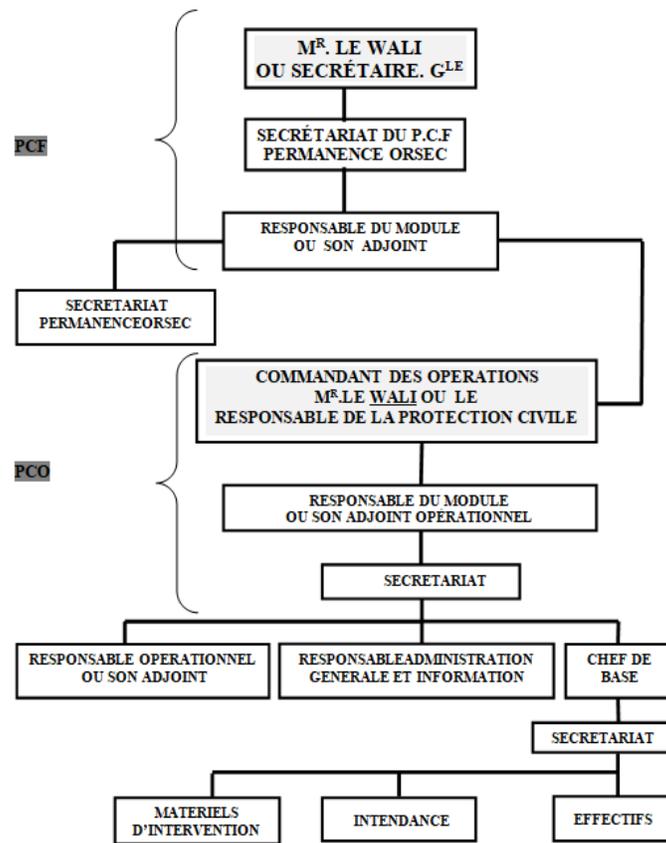


Figure 5.3 Organigramme du dispositif du plan d'intervention en cas de catastrophe  
(Source : protection civile de Constantine)

Quand un bulletin météorologique spécial (BMS) signale la probabilité d'un risque imminent, en réponse à une situation pareil, la Wilaya de l'Algérie crée une équipe de surveillance sous la direction du Wali. Pour réagir et coordonner les efforts, les autorités locales, y compris la sous-

<sup>24</sup> Direction de la protection civile de Constantine, Rapport sur les inondations en Algérie.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

préfecture et la commune, mettent également en place leurs propres unités de surveillance. La population est informée principalement par le biais de la radio, le plan ORSEC est mis en fonction en cas de survenance d'un risque. Cette approche proactive garantit une réponse coordonnée et efficace à l'urgence, mettant en œuvre des mécanismes de suivi et d'intervention rapides aux niveaux local et central, et assurant ainsi la sécurité et le bien-être des citoyens en période de risque (figure 5.3).

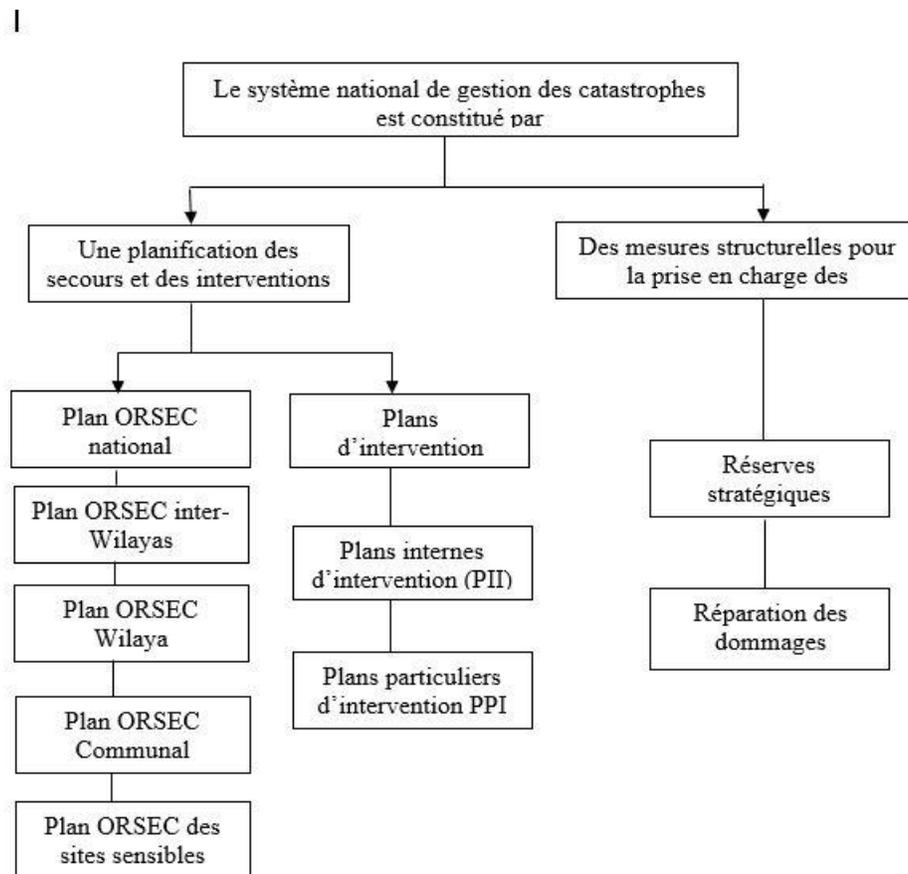


Figure 5.4 Le système national de gestion des catastrophes

(Source : Protection civile de Constantine)

-En situation d'incident au sein d'un établissement, l'exploitant assume la responsabilité de la gestion de l'intervention, dont les modalités sont détaillées dans un document officiel : le plan d'intervention interne (PII), tandis que le plan particulier d'intervention (PPI) vise à structurer les opérations de secours en cas d'accident majeur, dont les répercussions dépassent ou peuvent potentiellement dépasser les limites d'un établissement, dans le but de sauvegarder les individus, les biens et l'environnement (Figure 5.4).

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

En cas de menace de catastrophe, de sinistre évolutif, ou lorsqu'une wilaya limitrophe est en état d'alerte N°2 (éventualité de déclenchement du plan ORSEC national) (voir figure 5.4), dès réception de l'information authentifiée, le Wali prend plusieurs mesures :

- Il détermine les modules concernés par la catastrophe.
- Il met en état d'alerte N°1 les responsables ainsi déterminés.
- Il s'assure de la présence du directeur de la Protection Civile sur les lieux du sinistre, ou le désigne en tant que directeur des opérations sur le terrain.
- Il s'informe des dispositions prises par les responsables des modules.
- Il s'informe auprès du Directeur des secours et des services spécialisés sur l'évolution du sinistre.
- Il consulte le plan d'intervention propre au risque concerné.
- Il prend ses dispositions pour :
  - a. Soit mettre fin à l'état d'alerte N°1.
  - b. Soit mettre en œuvre l'alerte N°2.

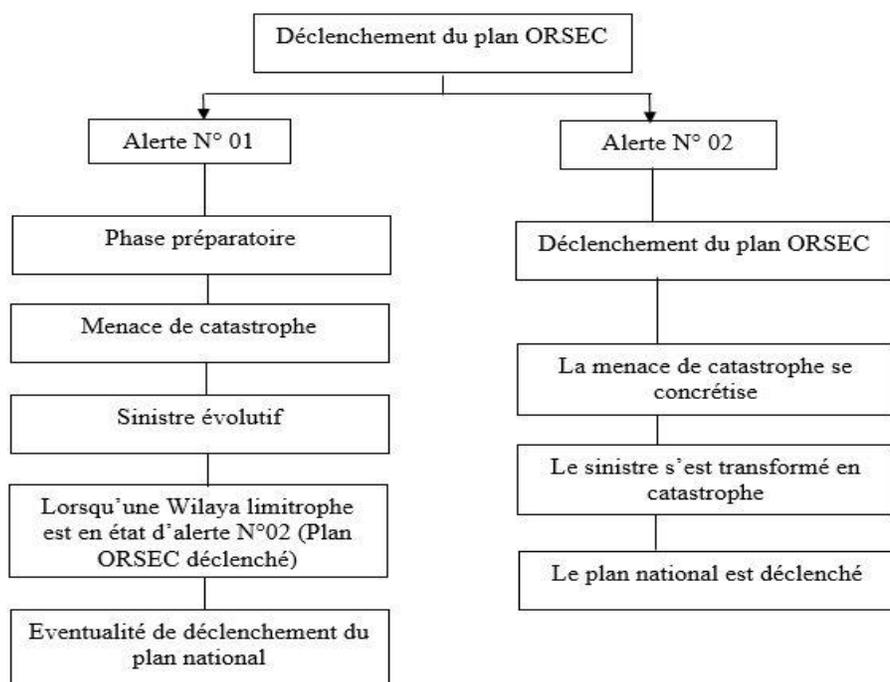


Figure 5.5 Organigramme de déclenchement du plan ORSEC

(Source : Protection civile de Constantine)

L'alerte N° 2 est déclenchée par le Wali lorsque :

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

- a- La menace de catastrophe se concrétise (authentification par le responsable de la protection civile ou les services spécialisés).
- b- Le sinistre se transforme en catastrophe (authentification par le responsable de la Protection Civile ou les services spécialisés).
- c- La catastrophe survient dans une wilaya limitrophe et s'étend à la wilaya concernée (éventualité du déclenchement du plan ORSEC national)
- d- Le plan ORSEC national est déclenché.

### **5.1.9.1. Déclenchement du plan ORSEC wilaya**

En cas de déclenchement du plan ORSEC, Le Wali prend les mesures suivantes :

- Il déclenche la mise en route des modules concernés par la catastrophe.
- Il réunit l'état-major placé sous son autorité, qui devient le poste de commandement fixe (P.C.F).
- Il s'assure de l'installation du poste de commandement opérationnel (P.C.O) par le directeur de la Protection Civile.
- Il consulte la carte de la situation de la wilaya et veille au traitement par son état-major des informations transmises par le P.C.O.
- Il avise le ministre de l'Intérieur et des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire du déclenchement du plan ORSEC.
- Il informe le (les) Wali(s) des wilayas limitrophes menacées par la catastrophe ou susceptibles de lui venir en aide.
- Il consulte le plan d'intervention propre à la nature de la catastrophe.
- Il consulte le plan des actions à mener par le poste de commandement opérationnel.
- Il tient régulièrement informée l'autorité centrale de l'évolution des événements et donne une première estimation de la situation dès que possible.

Note : Si la situation exige le déplacement du Wali sur les lieux de la catastrophe, le P.C.F est placé sous la direction du secrétaire général de la wilaya.

### **5.1.9.2. Actions menées par le P.C.F (Poste de Commandement Fixe)**

- Il s'assure de la présence des responsables opérationnels et des moyens des modules sur le site.
- Il s'assure de la disponibilité des moyens recensés des modules.
- Il vérifie la mise en place des échelons de commandement et de coordination des modules.
- Il suit la mobilisation des moyens disponibles et non engagés.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

### 5.1.9.3. Actions menées par le P.C.O (Poste de Commandement Opérationnel)

Le P.C.O est placé sous le commandement du directeur de la Protection Civile assisté du ou des spécialistes concernés par la nature de la catastrophe. Le Wali peut prendre en charge lui-même la direction des opérations sur les lieux de la catastrophe. Dans ce cas, le directeur de la Protection Civile devient son adjoint. Le commandant des opérations au P.C.O engage les actions suivantes :

- Il s'informe de la situation.
- Il procède à la reconnaissance des lieux et à l'évaluation de l'ampleur de la catastrophe.
- Il réunit les membres du P.C.O et s'informe des premières actions entreprises et des moyens mis en œuvre.
- Il détermine la marche à suivre pour la prise en charge totale de la zone sinistrée en définissant les secteurs d'interventions, les moyens à mettre en œuvre, désignant les lieux d'implantation des bases logistiques et du siège du P.C.O s'ils ne sont pas connus à l'avance, et prenant toutes les mesures opérationnelles.
- Il apprécie l'opportunité de solliciter le concours en totalité ou partiellement des plans des wilayas limitrophes ou de mettre fin à leur état d'alerte.
- Il en avise l'autorité centrale lorsque le P.C.O est directement pris en charge par le Wali ou le Wali responsable du P.C.F lorsque le P.C.O est commandé par le directeur de la Protection Civile.
- Il coordonne et suit la marche des opérations.
- Il rend compte régulièrement de l'évolution de la situation, à l'autorité centrale lorsque le Wali est au P.C.O, et au P.C.F lorsque le P.C.O est commandé par le directeur de la Protection Civile
- il Coordonne et suit la marche des opérations.
- il Rend compte régulièrement de l'évolution de la situation soit à l'autorité centrale lorsque le wali est au P.C.O, ou au P.C.F lorsque le P.C.O est commandé par le directeur de la Protection Civile

### 5.1.9.4. Base Logistique

La base logistique représente un point de rassemblement des ressources matérielles et humaines, ayant pour missions principales :

- Informers le centre de commandement opérationnel des moyens disponibles au niveau local.

# CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

-Soutenir, organiser et diriger les moyens mobilisés sur le lieu de la catastrophe à la demande du PCO.

## 5.1.9.5. Réquisition

En plus des moyens mobilisés par la wilaya conformément aux plans ORSEC, lorsqu'une catastrophe survient, le Wali procède à la réquisition des personnes et des moyens nécessaires.

## 5.1.9.6. Apport de l'ANP

L'intervention de l'Armée Nationale Populaire (ANP) dans les opérations de secours lors des catastrophes obéit aux règles établies par la loi n° 91-23 du 6 décembre 1991, qui régit la participation de l'Armée Populaire Nationale à des missions de sauvetage et de maintien de l'ordre public en situations exceptionnelles.

Ces étapes sont illustrées dans la (figure 5. 6) au-dessous.

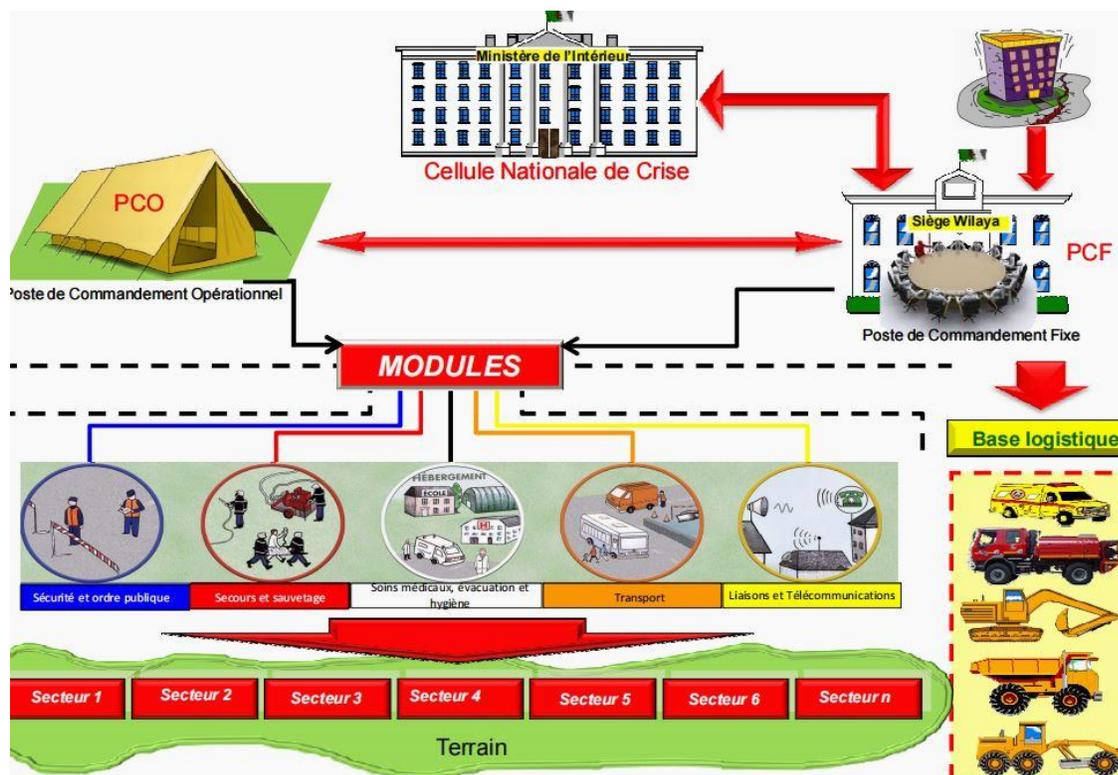


Figure 5.6 Chronologie d'activation des plans de secours en cas de catastrophe  
(Source : Protection civile de Constantine)

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

### **5.1.10. Gestion poste catastrophe**

La gestion poste-catastrophe est illustrée par les étapes suivies lors de l'inondation de Bab El Oued, implique une série d'actions coordonnées et hiérarchisées. Dès la survenue de la catastrophe, la Protection Civile a réagi en mettant en œuvre une réponse immédiate, axée sur les premiers secours, le sauvetage et l'assistance aux victimes. Par la suite, une cellule de suivi des Services du chef de gouvernement a été instaurée pour assurer une coordination efficace des opérations. Simultanément, le Ministère de l'Intérieur a établi une cellule de crise, déclenchant le plan ORSEC conformément au décret 85/231. Au niveau des 14 wilayas touchées, des cellules de crise ont été créées, orchestrant la mobilisation des moyens des 19 modules de secours. Une mesure cruciale a été le recasement de la population sinistrée, avec l'établissement de six centres d'accueil pour assurer un hébergement temporaire et des conditions de vie décentes. Ces étapes soulignent l'importance de la coordination entre les différentes entités gouvernementales et opérationnelles dans la gestion post-catastrophe, visant à répondre rapidement et efficacement aux besoins des populations affectées (Figure 5.7).

Selon la direction générale de protection civile la récurrence des catastrophes en Algérie est égale à 2ans pour une catastrophe et 25ans pour une catastrophe majeure.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

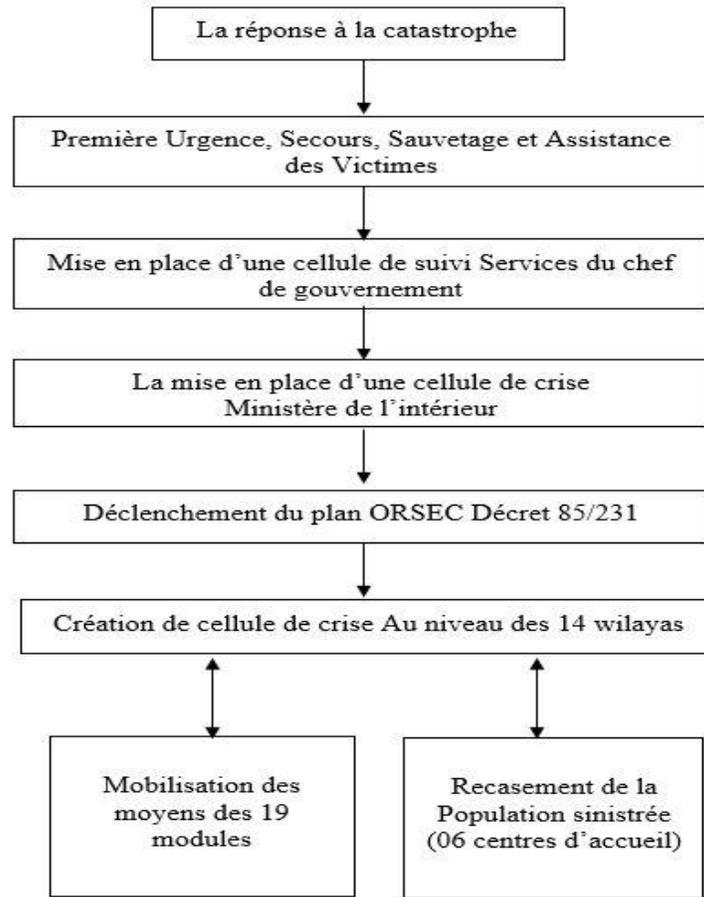


Figure 5.7 Organigramme de gestion Poste-Catastrophe de la protection civile exemple de l'inondation de Bab El Oued

(Source : Protection civile de Constantine)

### 5.2. Analyse critique du système national de gestion du risque inondation : défis et insuffisance du cadre législatif et opérationnel.

L'Algérie est confrontée à plusieurs défis majeurs dans la gestion des risques de catastrophe. Malgré l'existence d'une réglementation (la loi 04-20) qui a permis la mise en place des mesures importantes pour renforcer la gestion des risques en Algérie, en particulier liés aux catastrophes naturelles. Ces mesures comprennent le renforcement institutionnel, la création de la délégation nationale aux risques majeurs, l'amélioration des capacités de recherche et d'intervention, la mise en place de structures de veille, la capitalisation d'expériences, le renforcement des capacités locales, la formation des responsables, l'attention croissante de la population en raison de l'activité sismique et des inondations, ainsi que l'institution de l'obligation des assurances CAT-NAT. Ces

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

initiatives visent à améliorer la prévention, la préparation et la réponse face aux risques de catastrophes. Néanmoins, cette loi se heurte à plusieurs défis et lacunes, dans la gestion des risques naturels, en particulier liés aux inondations compromettant la gestion efficace des risques liés aux catastrophes en Algérie. Aussi, l'application des outils de prévention générale fait défaut en raison d'une culture moins interventionniste face aux catastrophes. Dans le cadre de notre recherche, nous avons identifié la nécessité de proposer une stratégie de prévention et d'adaptation au risque inondation pour renforcer la résilience au niveau national et au niveau local à Constantine, en mettant en lumière certaines lacunes existantes qu'on les résume si dessous dans ces points à considérer :

-La loi 04-20 se concentre principalement sur la prévention, la préparation et la réponse aux catastrophes, négligeant les phases cruciales de rétablissement et de reconstruction qui assurent la résilience du territoire.

- Le manque de textes réglementaires explicatifs et leur non-application représentent des obstacles significatifs associés à la loi 04-20. Souvent, il y a un déficit en décrets et en règlements qui sont essentiels pour mettre véritablement en œuvre les directives de la loi. Lorsque ces documents existent, leur exécution n'est pas toujours assurée, ce qui creuse des failles dans l'efficacité des normes établies. Cette carence peut entraver l'établissement de stratégies de gestion de risques cohérentes et complètes étant donné que les prescriptions légales se retrouvent dépourvues de mise en œuvre concrète, faute de suivi ou d'application régulière des textes nécessaires. Il est donc crucial d'adresser ces défis pour garantir une mise en œuvre forte et efficace de la loi, ce qui est impératif pour augmenter la capacité de résistance aux désastres et améliorer la gestion des risques.

-Les efforts de gestion des risques se focalisent davantage sur l'intervention pendant les catastrophes que sur la prévention et la prévision, créant ainsi des lacunes significatives.

-En matière de prévision, l'Algérie manque d'un système d'alerte précoce développées avec les nouvelles technologies pour surveiller les hauteurs d'eau dans les cours d'eau et émettre des messages d'alerte immédiate aux populations et aux responsables concernés mis à part l'expérience pilote effectuée à Sidi Belabbas, Annaba et qu'on recommande de la généraliser dans l'ensemble des sites jugé menacé par le risque dans le territoire algérien.

- Il semble que la stratégie de gestion des risques d'inondation au niveau national, soit adéquatement fondée sur une analyse initiale des risques à l'échelle nationale. Cependant, il serait

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

préférable de l'officialiser et de lui conférer une portée intersectorielle et interministérielle clairement définie avec un calendrier, des objectifs, des axes stratégiques, des délais fixes et des territoires prioritaires. Elle devrait être alignée sur d'autres stratégies nationales telles que l'aménagement du territoire et le plan national sur le climat, en effet, bien que des travaux de curage et de calibrage de certains cours d'eau aient été entrepris, en réalité, aucune stratégie nationale de gestion intégrée des risques d'inondation n'est appliquée sur le terrain.

-Bien que la loi 04/20 incite sur l'élaboration des plans généraux de prévention pour chaque risque naturel identifié. Mais jusqu'à présent, aucun de ces plans n'a été appliqué. C'est pourquoi la loi n° 24-04 du 16 Chaâbane 1445 correspondant au 26 février 2024 portant les règles de prévention, d'intervention et de réduction des risques de catastrophes dans le cadre du développement durable viennent pour compléter la loi 04/20.

-L'absence de planning et de délais définis pour la mise en œuvre de la loi a créé un vide dans la planification des actions liées à la gestion des risques. De plus, les moyens financiers alloués à la gestion des risques ne sont pas clairement définis, compromettant la mise en œuvre des mesures nécessaires.

-Responsabilités non définies : Les rôles et responsabilités des différentes parties impliquées dans la gestion des risques ne sont pas clairement définis, entraînant une confusion quant aux actions à entreprendre.

-Financement non défini : Les moyens financiers alloués à la gestion des risques ne sont pas clairement définis, compromettant la mise en œuvre des mesures nécessaires.

-Les cadres internationaux, tels que celui de Sendai en 2015, introduisent de nouveaux concepts qui dépassent les dispositions de la loi nationale.

-Bien que la délégation nationale de la gestion des risques majeurs (DNRM) ait été créée en 2011, elle manque de moyens adéquats pour accomplir efficacement sa mission.

-Les avancées en sciences et technologies ne sont pas pleinement exploitées dans la gestion des risques, limitant l'efficacité des mesures préventives.

-Le taux de souscription à l'assurance CAT-NAT est inférieur à 10%, et son utilisation est limitée aux transactions commerciales notariées, entravant la résilience financière face aux catastrophes.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

Enfin, la prise de conscience de la population locale face aux inondations, particulièrement celles qui habitent dans des zones présentant un risque élevé, paraît très faible en Algérie. Renforcée la sensibilisation du public en collaborant différents acteurs est indispensable.

### **5.3. Gestion intégrée du risque d'inondation vers une stratégie de prévention et d'adaptation au risque**

Partant de la synthèse de l'analyse critique de la gestion des risques inondation en Algérie et face aux défis et insuffisances du cadre législatif et opérationnel. En s'appuyant également aux propos de monsieur Lalaoui Fouad qui est colonel et directeur de l'organisation et de la coordination des secours dans la direction générale de la protection civile qui a affirmé lors de son rapport portant sur la préparation à la réponse que la prévention en Algérie ne peut jamais atteindre un niveau absolu d'efficacité en raison d'éventuels accidents et négligences, par conséquent, événements extrêmes récurrents dus aux changements climatiques tels que les inondations de Jijel en décembre 2020 et celles de Médéa et Msila en mai 2021, Constantine et Tipaza mai 2023 sont exacerbés par les changements climatiques parfois aggravé par les activités humaines telles que la construction illicite dans des zones non constructibles, les rejets anarchiques des déchets, et l'obstruction des réseaux d'évacuation, contribuent à aggraver certaines situations.

Dans ce contexte, élaborer une nouvelle stratégie de gestion du risque d'inondation basé sur les nouvelles technologies de lutte contre ce phénomène pour adapter nos territoires aux effets du changement climatique et réduire les impacts des inondations et palier aux insuffisances du système de gestion actuel est indispensable, c'est ce que nous allons suggérer dans cette partie du chapitre, qui sert comme un support d'aide pour les responsables des collectivités locales chargé de la prise de décision.

La création d'une stratégie globale de gestion intégrée des risques d'inondation en Algérie en générale et à Constantine en particulier, constitue une avancée significative dans la lutte contre les inondations accentuées par les changements climatiques et les actions humaines. Cette méthode vise à prévenir les risques et à s'adapter aux inondations plutôt que de simplement réagir aux inondations. En vue de renforcer la résilience des communautés, des mesures telles que la surveillance des zones inondables en amont et la planification des zones inondables en aval, tout en tenant compte des aspects environnementaux, sociaux, économiques et techniques, et en utilisant des nouvelles technologies sont prises en compte, de plus l'information et la sensibilisation

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

de la population aux différents risques, aux mesures préventives et aux comportements appropriés en cas d'urgence. Cette approche participative implique l'engagement de la communauté dans les efforts de préparation aux catastrophes. De même, la planification des secours, l'évaluation des besoins en nourriture et en eau, l'identification des zones de refuge et la construction d'abris d'urgence sont des éléments cruciaux de la préparation aux catastrophes, ainsi que l'adaptation des territoires au risque d'inondation est indispensable pour faciliter le retour à la normale, pour assurer la résilience, tous ces étapes qui constituent la gestion intégrée du risque inondation sont schématisé dans la figure (5.8). L'objectif principal est d'empêcher la transformation d'un risque en catastrophe (Dauphiné, 2003), de favoriser le développement durable tout en minimisant les pertes potentielles en vies humaines, en biens économiques et en environnement. Pour y parvenir, renforcer la coordination et la collaboration entre les différents acteurs impliqués dans la gestion des risques de catastrophe, notamment les autorités locales, les organisations de la société civile, les partenaires internationaux, gouvernements, les agences de gestion des catastrophes, les experts en environnement, les communautés locales et d'autres parties prenantes parait indispensable pour une gestion intégrée.

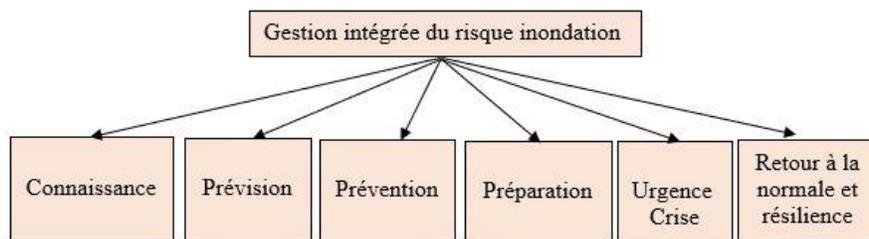


Figure 5.8 Organigramme des étapes d'une gestion intégrée du risque inondation

(Source : Protection civile de Constantine)

### 5.3.1. La connaissance du risque inondation

La connaissance du risque d'inondation implique l'évaluation à la fois de la vulnérabilité des personnes et des éléments vulnérables, ainsi que des aléas qui peuvent les affecter (Dédier et al., 2017). Elle englobe la compréhension approfondie des caractéristiques, des probabilités d'occurrence et des conséquences associées aux inondations dans une zone donnée. Elle implique la reconnaissance des facteurs contribuant aux inondations, tels que les conditions météorologiques, la topographie, l'utilisation des terres et d'autres variables environnementales.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

Cette connaissance peut découler d'études scientifiques, de modélisations hydrologiques, d'analyses historiques des événements passés, et d'autres méthodes d'évaluation des risques.

La connaissance approfondie du risque d'inondation est essentielle pour une gestion intégrée réussie, car elle fournit les bases nécessaires pour élaborer des stratégies efficaces et adaptatives tout au long du cycle de gestion des risques. Cette approche proactive et éclairée contribue à réduire les dommages potentiels, à protéger les vies et les biens, et à renforcer la résilience des communautés face aux inondations.

### **5.3.2. La prévision**

Une gestion intégrée du risque inondation nécessite une meilleure prévision, c'est pourquoi l'utilisation des approches actives qui se focalisent sur la réduction de l'aléa inondation semble indispensable, ces derniers sont souvent représentés par les techniques et les méthodes de prévision.

Pour la prévision, on peut distinguer trois catégories principales :

#### **5.3.2.1 La prévision empirique**

La prévision empirique est basée sur l'histoire et parfois les sciences naturelles. La recherche historique révèle que les sociétés ont tendance à oublier les dangers et les catastrophes passées. Cependant, l'approche historique suppose que les mécanismes restent inchangés au fil du temps, alors que l'activité humaine peut modifier les sites.

#### **5.3.2.2. La prévision déterministe**

Les prévisions déterministes sont souvent plus fiables que les prévisions empiriques. Elles utilisent des lois causales pour évaluer les mécanismes, le timing et le lieu d'une catastrophe. Lorsqu'une prévision déterministe est en mesure de prédire avec précision la date et le lieu d'une inondation catastrophique, elle est considérée comme une prédiction. Les prévisions déterministes sont devenues plus efficaces grâce à l'utilisation de modèles numériques et au suivi de certains paramètres. Les satellites météorologiques peuvent aider à déterminer les météorologues sont capables de prévoir des précipitations exceptionnelles grâce à des modèles numériques. Les prévisions deviennent de plus en plus précises à mesure que l'événement approche, et la surveillance joue un rôle essentiel à ce stade elle devient réalisable dans les heures qui précèdent une catastrophe (inondation), permettant ainsi de sauver de nombreuses vies grâce à une

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

communication fiable et rapide. Ex la tempête de Sandy, en octobre 2012, fit peu de victimes, malgré son ampleur et des pertes matérielles exceptionnelles.

### **5.3.2.3. La prévision probabiliste**

Compte tenu des difficultés rencontrées avec les prévisions déterministes, les prévisions probabilistes sont une pratique plus courante. Pour un phénomène tel que des précipitations extrêmes, l'événement décennal, centennal ou millénaire est déterminé. Cependant, cette détermination est très complexe. Des recherches continues sont menées dans toutes les disciplines pour trouver la loi de probabilité la mieux adaptée à un site ou à une région donnée.

Enfin, la méthode des scénarios peut s'appliquer à chacune de ces catégories, en effet, la prévision de scénarios est une approche prospective qualitative utilisée pour anticiper les trajectoires futures potentielles de phénomènes à risque sans s'appuyer uniquement sur des formules mathématiques. Bien qu'elle puisse intégrer des modèles probabilistes ou des équations déterministes, elle se concentre principalement sur la compréhension des trajectoires futures possibles. Par exemple, dans les grandes villes, des scénarios de catastrophe peuvent être élaborés pour évaluer les conséquences d'événements tels qu'une inondation provoquant la rupture d'une digue et affectant une usine chimique. Cette approche a été appliquée à la centrale nucléaire de Blaye, qui est confrontée à des risques d'inondation. La mise en œuvre de mesures de contrôle basées sur ces scénarios peut contribuer à prévenir ou à atténuer les catastrophes majeures. Il est important de reconnaître que les actions humaines peuvent modifier la trajectoire prévue dans les études de scénarios. Par essence, la méthode des scénarios reconnaît l'ouverture de l'avenir et l'existence de multiples résultats potentiels.

Dans ce volet, nous suggérons de faire une collaboration entre l'office nationale de météorologie (ONM), l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH) et la direction générale de la protection civile (DGPC) afin de permettre une optimisation de la prévision du risque d'inondation en Algérie, en garantissant une coordination efficace entre les services météorologiques et les acteurs impliqués dans la gestion des ressources en eau et la protection civile afin de mettre en place un système d'alerte précoce efficace, qui utilise une approche holistique qui intègre l'information de la population menacé directement en utilisant les nouvelles technologies de l'information et de communication tel le téléphone portable.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

Ce système d'alerte précoce vise à réduire les risques encourus par une population, en intégrant les connaissances scientifiques et les savoirs locaux, il est également crucial de permettre aux habitants de faire part de leur expérience et de leurs retours d'informations en direction du système d'alerte.

-Mettre en place un nouveau système de prévision des inondations, de surveillance et d'alerte, basé sur les technologies nouvelles qui utilisent des capteurs et des radars dans les zones susceptibles d'être inondées en Algérie.

- Prévoir des dispositifs spécifiques de communication en temps réel à destination des populations situées dans les zones exposées au risque d'inondation rapide et notamment dans les lits d'oueds urbanisés

- Élaborer des moyens de communication rapides avec la population résidant dans les zones urbaines occupant le lit des Oueds et qui sont exposées au risque d'inondation.

-Le développement de tels systèmes dans toutes les communes est crucial, en particulier dans les zones urbaines où les précipitations sont intenses, la topographie est défavorable et le ruissellement est important le long des lits des oueds. Cette initiative améliorerait la sécurité publique en permettant une identification et une réponse rapides aux risques d'inondation, en particulier dans les zones densément peuplées présentant un fort potentiel de ruissellement.

### **5.3.3. La prévention**

En ce qui concerne la prévention, l'utilisation des approches passives et participatives qui se focalisent sur la réduction de la vulnérabilité en utilisant des méthodes de prévention paraît idéale pour réduire la vulnérabilité des personnes.

Notre méthodologie proposée pour la prévention du risque d'inondation est basée sur la mise en place un plan d'action pour la prévention du risque d'inondation en Algérie en générale et à Constantine en particulier, ce dernier sera structuré et organisé autour de cinq piliers :

#### **5.3.3.1. La surveillance et la vigilance**

La surveillance préventive est axée sur l'anticipation des événements et l'information rapide des autorités compétentes et du public. Elle vise à évaluer la situation et à fournir des alertes précoces pour la protection civile. D'autre part, la surveillance réactive est utilisée pour contrôler et évaluer les dommages causés par l'événement. Elle permet également d'analyser l'impact sur

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

l'environnement et de guider les services d'urgence vers les zones touchées. Ces activités relèvent de la gestion des catastrophes. La vigilance est un type de surveillance qui vise à fournir aux autorités chargées de la gestion des risques ou au grand public des informations mettant en garde contre des risques potentiels. Ces informations seront diffusées par différents canaux : cartes de vigilance, bulletins, messages à la radio, à la télévision ou par téléphone portable. L'objectif est de préparer et de faciliter la réponse à de tels événements.

Il existe beaucoup de techniques nouvelles pour la surveillance du risque inondation mais deux sont fondamentales : l'utilisation de l'imagerie sous divers formats associée au traitement de l'information en temps réel ou quasi-instantané, et la mise en place généralisée d'observatoires pour monitorer une grande variété de risques, qu'ils soient naturels, technologiques, sociaux ou de santé. Ces systèmes de surveillance s'étendent à différentes portées, que ce soit à l'échelle régionale, nationale ou internationale.

### **5.3.3.1.1. Des images en temps réel :**

Initialement générée par la télédétection, l'image constitue un moyen efficace de surveillance des risques atmosphériques. Un satellite développé en collaboration avec le Japon fournit aux États-Unis des informations détaillées sur la force des précipitations au cœur d'un cyclone, les radars mesurent avec précision l'intensité des cellules orageuses. Afin d'approfondir la compréhension des fortes précipitations et des crues soudaines dans la région de la Méditerranée occidentale, aussi des études automnales en 2012 ont utilisé des radars météorologiques opérationnels ainsi que des appareils spécialisés tels que les lidars, les récepteurs GPS pour observer les cellules orageuses. Les conclusions détaillées de cette vaste campagne d'observation ne sont pas encore connues. Par ailleurs, s'appuyant sur les informations recueillies par ces radars, l'Irstea (anciennement Cemagref) en partenariat avec Météo-France a mis au point la méthode Aiga, qui permet d'évaluer en temps réel l'intensité des précipitations et des débits fluviaux sur différents bassins versants.

De son côté, la NASA a lancé le réseau Readi (Real Time Earthquake Analysis for Disaster Mitigation Network) pour détecter promptement les séismes, tsunamis et inondation à l'échelle mondiale grâce aux satellites. Ce dispositif de repérage par GPS est en phase de test aux États-

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

Unis. L'imagerie spatiale est de plus en plus sollicitée en gestion de crise, permettant d'évaluer les dégâts causés par des catastrophes telles que les séismes, tsunamis ou inondations.

À ces images s'associent des méthodes de traitement d'information visant à améliorer les alertes pour les populations en danger. Ces images sont également utilisées pour la cartographie du risque d'inondation par les systèmes d'information géographique (SIG). Dans le cadre d'un projet de cartographie des zones inondables au Sénégal, IGN France International a produit des orthophotographies de haute résolution (15 cm) et un modèle numérique de surface précis (1 mètre), créant ainsi des cartes qui peuvent être mises à jour en temps réel et servir d'outils de surveillance, en particulier en météorologie.

L'utilisation des SIG s'est élargie à la cartographie des divers types de risques, offrant la capacité de cartographier et d'analyser les caractéristiques spatiales des risques à diverses échelles.

Bien que les outils de surveillance dépendent étroitement de l'évolution technologique, il n'existe toujours pas d'outil unique de surveillance qui serait universellement applicable à tous les types de risques.

### **5.3.3.1.2. Les observatoires de veille et de surveillance**

Les observatoires représentent une deuxième modalité de surveillance, et leur utilisation s'est répandue pour monitorer le risque d'inondation. L'efficacité de ces instruments dépend du niveau de vigilance, de la perception sociale du risque, ainsi que du degré de développement économique des collectivités responsables de la gestion des observatoires de surveillance. Il est important de souligner que le passage de la surveillance à l'alerte requiert l'intervention des autorités chargées de la protection civile pour la transmission de l'alerte, marquant ainsi la transition du domaine de la prévention à celui de la gestion des désastres ou des crises. Ces deux domaines sont étroitement interconnectés. En effet, la compréhension par la population de l'alerte est d'autant meilleure que celle-ci a été préalablement informée des risques encourus et des consignes à suivre dans de telles circonstances, illustrant ainsi l'un des objectifs de l'information préventive.

Ces dispositifs de surveillance se sont aussi répandus pour le suivi des risques d'inondation. Aux États-Unis, il existe plus de mille observatoires locaux répartis à travers tout le pays.

Dans ce contexte, et suivant les exemples réalisés dans certains pays développés pour la surveillance et la vigilance en utilisant les images satellitaires en temps réelle et les observatoires

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

de veille et de surveillance qui sont classé parmi les nouvelles technologies de surveillance du risque d'inondation dans le monde, nous suggérons de développer de tel approche en Algérie à travers une collaboration entre les services concernés de la gestion des risques inondation en Algérie et l'agence spatiale algérienne (ASAL), pour en faire des expériences pilotes pareils dans certaines wilayas.

### **5.3.3.2. L'information préventive et éducation des populations pour mieux comprendre les messages d'alerte**

La gestion intégrée implique également d'informer et sensibiliser la population sur les différents types d'aléas, sur les conduites préventives à mettre en place et sur les comportements à adopter en cas d'alerte. On est là dans le cadre de la stratégie participative. Toutes les mesures de réduction des risques imposent une bonne information du public la majorité des personnes s'exposent à de grand danger, par simple curiosité. En revanche, de nombreux moyens d'information sont suggérés pour leur mise en place de façon positive, parmi eux : l'éducation dans les écoles pour les jeunes, l'utilisation des médias pour les adultes, lors des phases d'alerte par exemple, et la mise en place et diffusion de bases de données. La stratégie participative vise également à donner aux populations les moyens de planifier et d'exécuter leurs propres mesures d'intervention d'urgence. L'information préventive et l'éducation des populations jouent un rôle majeur dans la compréhension et l'acceptation des alertes

Deux types d'alerte sont à considérer : l'alerte préventive, se situant sur le moyen ou long terme et qui vise à informer les autorités et populations quelques jours ou heures avant l'arrivée d'une menace, et l'alerte d'urgence qui, quant à elle, s'inscrit sur le court voire l'immédiat terme et est rapidement signalée grâce à une alarme. D'un point de vue opérationnel, l'alerte peut être divisée en trois étapes : tout d'abord l'information qui a pour but d'annoncer le danger, puis le déclenchement de l'alerte, et enfin la phase de l'alarme. Les mesures de notification préventive et les procédures d'urgence s'articulent autour de voies de communication adaptées pour transmettre les informations vers le public. En situation préventive, l'information suit des voies traditionnelles comme les médias (télévision, radio, presse écrite, sites web spécialisés), les courriels professionnels et l'affichage public. En revanche, lorsqu'une situation d'urgence se présente, caractérisée par un aléa imminent, il est crucial de diffuser l'information de manière très rapide afin de transformer l'alerte en signal d'alarme. Pour marquer cette urgence, il est recommandé

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

d'employer des avertisseurs sonores tels que des sirènes et d'autres dispositifs de télécommunication mobiles. Par exemple, en cas de risques naturels comme les inondations, les cyclones et les tempêtes au Bangladesh, des SMS sont envoyés pour prévenir rapidement la population. Une fois l'alarme déclenchée, il est impératif de trouver un abri et de se tenir informé via la radio pour des instructions précises à suivre.

### **5.3.3.3. Sensibilisation des populations**

Le manque de sensibilisation du public aux inondations en Algérie, en particulier dans les zones où le risque est élevé mais où il n'y a pas eu d'inondations récemment, est une préoccupation majeure. Pour résoudre ce problème, il est essentiel de développer des programmes de sensibilisation du public en collaboration avec la protection civile, les universités, et autres autorités locales responsables. Mettre l'accent pendant la mise en œuvre de la stratégie nationale de gestion des risques d'inondation sur la sensibilisation de la population, en ciblant les personnes les plus vulnérables (celles qui vivent dans les lits d'oueds). Cela peut se faire par la mise en place de méthodes d'autodiagnostic. Des mesures urgentes sont également nécessaires pour les zones urbaines qui sont extrêmement exposées en raison du ruissellement des eaux de pluie et de l'entretien insuffisant des oueds.

-Réalisation des campagnes ciblées destinées aux habitants, principalement aux jeunes, devraient être mises en œuvre pour les informer des risques et les encourager à adopter des comportements appropriés, tels que la prévention des décharges illégales et la réduction de la vulnérabilité dans les zones exposées.

-Impliquer le ministère de l'éducation et de l'enseignement supérieur afin de renforcer les initiatives éducatives et la promotion de la culture de gestion du risque par la création des formations sur les risques naturels.

- Sensibiliser via les différents réseaux sociaux qui sont les plus utilisées de nos jours, aux techniques de prévention et d'adaptation aux catastrophes.

### **5.3.3.4. La cartographie de la prévention pour réduire le risque inondation**

Les stratégies de prévention sont communément matérialisées par des cartographies annexées à des textes de loi. Ces représentations cartographiques tendent à être simplifiées, distinguant trois catégories d'espaces : les zones non constructibles, interdites à l'occupation humaine durable, les

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

zones sans danger discernable, et les zones dites mixtes, où l'aménagement et l'habitat sont conditionnés à des études supplémentaires, telles que des analyses géotechniques, ou la mise en place d'infrastructures de protection, telles que des barrages contre les avalanches.

Dernièrement, des outils cartographiques avancés comme les systèmes d'information géographique (SIG) ont été adoptés dans la perspective de la prévention dans plusieurs pays développés. Contrairement à la cartographie traditionnelle, les SIG permettent d'analyser en direct l'existence de liens hypothétiques en superposant diverses données, facilitant ainsi des interventions promptes et renforçant l'efficacité préventive.

De nombreux risques font l'objet de mesures préventives mises en œuvre à partir de plans spécifiques. En ce qui concerne le risque d'inondation, il s'agit de mettre en place un zonage adapté au risque par l'élaboration du plan de prévention du risque inondation (PPRI), ce dernier se compose de trois éléments :

- une note de présentation incluant l'analyse de l'aléa naturel d'inondation et de son impact. La note de présentation explique les raisons des prescriptions, identifie les phénomènes naturels considérés comme dangereux, expose les enjeux et objectifs visés, ainsi que les choix de zonage et les mesures réglementaires

- des documents graphiques et cartographiques délimitant les zones réglementées par le PPRI. Les documents graphiques ont principalement une vocation pédagogique et comprennent généralement trois types de cartes : la carte des aléas, la carte des enjeux, et le zonage réglementaire, résultant de la combinaison des deux premières cartes et servant de support au règlement. Le plan de zonage du PPRI délimite des zones homogènes, auxquelles sont liées des interdictions ou des mesures de prévention et de protection. Le PPRI spécifie les mesures préventives à la charge des particuliers ou des collectivités. Seul ce plan de zonage est annexé ou intégré dans le PDAU et le POS.

- La carte des aléas est un document à double entrée détaillant le type d'aléa et son intensité, généralement représentée par un dégradé de couleurs.

- un règlement spécifiant les règles applicables à chaque zone est indispensable.

- La mise en place d'un programme d'actions de prévention des inondations (PAPI) vise à favoriser une gestion intégrée du risque d'inondation. Ce programme doit combiner la gestion de l'aléa, qui comprend des ouvrages de protection et la réhabilitation des zones d'expansion des crues, avec la

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

réduction de la vulnérabilité des territoires et des sociétés par le contrôle rigoureux de l'urbanisation des terrains susceptibles d'être inondés. Son objectif principal est d'assurer la sécurité des populations et des activités économiques. Le dispositif PAPI rassemble les acteurs locaux et les services étatiques pour adresser de manière holistique les bassins versants à risques. Il est destiné aux zones où les enjeux liés aux inondations sont considérables. Ce programme doit s'inscrire en cohérence avec le plan national d'adaptation de l'Algérie aux effets du changement climatique.

### **5.3.3.5. La prise en compte des risques dans l'aménagement et l'urbanisme**

Pour limiter les dégâts en cas de catastrophes naturelles, il est crucial de contrôler l'urbanisation par la réduction de la vulnérabilité des régions déjà construites, et la limitation de l'augmentation de la densité de population dans les zones à haut risque. La stratégie suggérée consiste à répartir le territoire en zones distinctes, élaborer des dispositifs réglementaires qui restreignent ou orientent le développement de certaines activités et l'occupation humaine dans des zones spécifiques, allant parfois jusqu'à interdire l'accès et l'exploitation d'espaces particulièrement exposés aux risques. Ces plans d'aménagement constituent le principal outil de l'État pour la prévention des risques naturels et technologiques.

De plus, l'intégration des risques dans l'aménagement du territoire implique également la planification et l'implantation de services d'urgence tels que les postes de police, les casernes de pompiers et les installations médicales à proximité de zones à risque. La disposition de ces services doit répondre à des critères d'égalité et d'équité, tout en assurant une efficacité optimale en cas d'urgence.

### **5.3.4. La Préparation**

Il est impératif de se préparer à une éventuelle catastrophe en organisant les moyens disponibles pour atténuer ses effets. Il est ainsi crucial de planifier autant que possible et de systématiquement préparer l'intervention des secours, constituant ainsi la préparation à la réponse. Cette préparation à la réponse implique une approche prospective. D'une part, elle nécessite de capitaliser sur l'expérience des événements antérieurs afin d'améliorer le système de gestion en place et d'éviter

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

la répétition d'erreurs, et d'autre part, elle vise à anticiper de nouvelles situations susceptibles de se produire<sup>25</sup>.

Pour améliorer la préparation au risque d'inondation, plusieurs actions sont suggérées :

-En ce qui concerne les plans ORSEC, nous suggérons d'élaborer des plans plus concis et spécifiques pour chaque type de risque et moins volumineux.

- Optimiser la cartographie et favoriser son utilisation uniforme par l'ensemble des services d'urgence.

- vérifier la capacité des données météorologiques à déclencher les plans appropriés avant que la situation d'urgence ne se produise.

- augmenter et renforcer les moyens de réponse et le retour d'expérience.

-Planification préalable des interventions d'urgence et de la gestion des crises Comprend la planification des ressources, la coordination des services, la formation, les campagnes de sensibilisation du public, les systèmes d'alerte précoce, l'évacuation préventive. La préparation aux catastrophes amène également à planifier les secours, à évaluer les besoins en termes de vivres et d'eau potable, à identifier des zones de refuges et à construire des abris d'urgence. Ainsi, au Bangladesh, des abris contre les inondations, surélevés, ont été édifiés. Ils ont donné des résultats très convenables, les pertes humaines, ont fortement diminué, même si la localisation de ces abris ne minimise pas tout à fait l'ensemble des distances à parcourir en cas d'inondation rapide (Khan, 1991)

- L'amélioration de la préparation de toute la communauté locale aux événements catastrophiques (protection civile et population).

-L'intégration des objectifs et du contenu de la prévention dans les plans conçus à ce jour exclusivement pour la gestion des urgences, afin de prévoir l'insertion de structures et de zones de sécurité déjà en temps de paix ;

-La coordination entre la planification des mesures d'urgence et l'aménagement du territoire et l'urbanisme, afin d'orienter les choix en matière de développement urbain et de reconstruction pour réduire la vulnérabilité des agglomérations urbaines et renforcer la résilience des communautés.

---

<sup>25</sup> Colonel LALAOUI Fouad, La préparation à la réponse. Directeur de l'Organisation et de la Coordination des Secours. Direction Générale de la Protection Civile

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

### 5.3.5. La gestion de crise

Bien que l'on dispose de prévisions météorologiques précises et de mesures préventives adéquates, certains risques évoluent malheureusement en catastrophes. En effet, des systèmes de prévision, de surveillance, d'alerte et de prévention, même bien conçus, peuvent se révéler insuffisants. Il revient alors aux responsables de gérer l'urgence grâce à des plans souvent établis et répétés à l'avance (plans ORSEC).

-mettre un plan d'évacuation spécifique pour le risque d'inondation afin de déplacer les personnes. Ce plan doit prévoir la délimitation des voies de circulation spécifiques pour faciliter l'évacuation rapide des habitants vers des zones plus sécurisées à l'intérieur des zones. (Smith, 1991)

-Maitriser le temps, une mauvaise gestion du temps peut aggraver ou même être à l'origine d'une catastrophe.

-Il est crucial d'avoir une communication prompte, exacte et centrée sur les faits pour gérer efficacement une situation d'urgence.

### 5.3.6. Après la Catastrophe : Évaluer, Indemniser et Reconstruire vers la Résilience

Pour une meilleure gestion post-catastrophe, les autorités locales sont tenues d'initier trois actions principales suite à une catastrophe. La première consiste à évaluer les dommages et à identifier les facteurs ayant mené à l'événement, dans un processus de retour d'expérience. La deuxième action concerne l'indemnisation adéquate des personnes affectées. En parallèle, la troisième action implique la reconstruction des logements sinistrés et la réhabilitation des liens sociaux au sein des familles et des communautés touchées pour assurer la résilience.

L'évaluation poste-catastrophe vise à comprendre les mécanismes de la catastrophe et à alimenter la prévention future. Ces analyses menées après les catastrophes jouent un rôle crucial en réévaluant ou en enrichissant notre compréhension des processus catastrophiques. Comme le relève Kervern (1995), il y a une propension naturelle des individus et des sociétés à attribuer les accidents et les désastres à des causes externes. Toutefois, les recherches effectuées après les incidents montrent de façon consistante et souvent surprenante que les facteurs intrinsèques l'emportent sur les influences extérieures.

Le retour d'expérience est également considéré comme le moyen le plus efficace pour analyser la vulnérabilité des communautés. Les rapports post-catastrophes mettent peu l'accent sur

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

l'événement déclencheur ou aléa, mais se concentrent davantage sur la gestion de la catastrophe et sur le contexte local ou général, c'est-à-dire le second aspect du risque qui est la vulnérabilité.

### **5.3.6.1. L'indemnisation**

L'assurance a pour but d'aider les individus et les gouvernements à récupérer les pertes et à reconstruire.

Inégalité géographique : l'accès à l'assurance et à l'indemnisation maintient les inégalités entre les nations

Afin de se prémunir contre les pertes humaines et matérielles, les particuliers et les autorités locales optent pour une couverture d'assurance, qui ne cesse de s'étendre pour couvrir de nouveaux risques sociétaux

### **5.3.6.2. La reconstruction et le retour à la normale**

La phase de reconstruction post-catastrophe revêt plusieurs formes, s'inscrivant dans un continuum dont les deux extrêmes sont soit l'abandon total, soit la reconstruction à l'identique des conditions antérieures à la catastrophe.

- Les approches novatrices en matière de reconstruction ne sont envisagées que lorsque toutes les autres solutions se révèlent impraticables, y compris la possibilité d'abandonner les sites affectés.

- La reconstruction à l'identique sur le site même de la catastrophe représente une autre stratégie, qui témoigne de la détermination d'une communauté ou d'une nation à défier les conséquences d'un sinistre. Cette démarche est souvent soutenue par des collectifs locaux, comme des associations de riverains dans des zones qui se trouvent à proximité des cours d'eaux et qui sont sujettes aux inondations. Cependant, ce choix comporte des risques non négligeables. Pour des désastres tels que les tremblements de terre, par exemple, il y a toujours un risque de récurrence. Le séisme d'El Asnam en Algérie en 1980 est un exemple frappant : cette ville, déjà touchée en 1954, a été de nouveau dévastée le 10 octobre 1980, avec plus de 3 500 morts. La vallée du Chéelif, son emplacement géographique, a subi une vingtaine de séismes en cent ans. Le fait de renommer la ville n'élimine en rien le danger sous-jacent.

### **5.3.6.3. Choix décisionnel**

Avant de commencer la reconstruction, plusieurs décisions clés doivent être prises. Nous proposons de créer une organisation chargée de coordonner la reconstruction, cette dernière a la

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

possibilité de choisir la stratégie de reconstruction convenable après d'avoir redéfinir l'utilisation des sols, réviser les plans d'urbanisme, prévoir un budget pour la dette municipale.

-La priorité sera portée d'abord à la réhabilitation des infrastructures de réseaux vitaux comme les routes, les communications téléphoniques et les réseaux d'énergie. Ils doivent être rendus opérationnels aussi rapidement que possible, même si cela signifie procéder à des réparations provisoires qui nécessiteront ultérieurement des travaux plus durables.

### **5.3.7. Recommandations générales et les bonnes pratiques pour la gestion intégrée du risque d'inondation au niveau national**

- Accélérer la publication des textes réglementaires d'application pour améliorer la mise en œuvre effective du cadre légal.

- Consolider une approche intégrée et interministérielle de gestion des risques en assurant son application cohérente au niveau local et son appuie par les ressources adéquates.

-Mettre à la disposition des collectivités locales de chaque wilaya un budget spécifique pour réduire les risques liés aux inondations.

- Organiser et définir le rôle de chaque acteur dans les multiples étapes qui concerne la gestion du risque partant des études préliminaires jusqu'au retour de l'expérience et la reconstruction.

-Pour chaque secteur il faut définir les responsabilités aux niveaux local et central.

- Tous les secteurs doivent se fixer des objectifs clairs. Ces derniers se déclinent en actions à court, moyen et long terme, pour ce qui est de la Prévention, Prévision et Prédiction, Intervention et lutte, relèvement et retour à la situation normale.

- Attribuer un budget conséquent dans le cadre des lois de finances ou des Comptes d'affectation spéciale.

- Prévoir et impliquer le secteur privé et de la société civile. En effet, si la responsabilité générale de réduire les risques de catastrophe incombe à l'Etat, elle n'en est pas moins partagée entre celui-ci et la société civile (bénévoles et associations) ainsi que le secteur privé.

-Le projet de la stratégie nationale de prévention et de gestion des risques majeurs doit s'aligner sur « le Cadre d'actions de Sendai 2015-2030 » auquel l'Algérie a souscrit.

-Ce projet de stratégie et son Plan d'actions, doivent constituer des outils destinés à aider le gouvernement à s'engager davantage à intégrer la réduction des risques de catastrophes (RRC) et le renforcement de la résilience dans son programme d'actions

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

Compte tenu de l'expérience acquise dans la mise en œuvre de la loi 04-20, afin d'obtenir le résultat escompté et d'atteindre l'objectif recherché, il faut mener une action intersectorielle ciblée sur les plans local et national, en ce qui concerne les quatre questions prioritaires ci-après :

- Priorité 1 : comprendre les risques de catastrophe.
  - Priorité 2 : renforcer la gouvernance des risques de catastrophe pour mieux les gérer.
  - Priorité 3 : investir dans la réduction des risques de catastrophe aux fins de la résilience.
  - Priorité 4 : renforcer l'état de préparation aux catastrophes pour intervenir de manière efficace et pour « mieux reconstruire » durant la phase de relèvement, de remise en état et de reconstruction
- Enseignements tirés de l'expérience précédente
- Rattraper les retards et remédier aux insuffisances,
  - Développer et valoriser les résultats de la recherche dans le domaine des risques et catastrophes et utilisation des simulations et modèles scientifiques en impliquant les laboratoires, unités et centres de recherche.
  - Participation des spécialistes nationaux et ceux établis à l'étranger et la société civile dans l'élaboration et l'exécution de la stratégie.

### **5.3.8. Stratégie de gestion intégrée à Constantine**

- L'établissement d'un comité de planification d'urgence, agréé par l'État à Constantine, vise à définir les zones à risque d'inondation, les sites présentant un haut niveau de risque, les itinéraires d'évacuation, les abris publics, la localisation des centres de contrôle et de secours, ainsi que les axes de transport dangereux. Cette délimitation représente un instrument robuste d'aide à la prise de décision au niveau local, spécifiquement à Constantine.

Chaque commune, notamment Constantine et Hamma Bouziane, est tenue d'établir des dossiers d'information communaux sur le risque inondation (DICRI). Ces documents ont pour objectif d'informer les acteurs institutionnels et les citoyens des risques d'inondation identifiés au niveau de leur communes, de leurs impacts potentiels, des événements historiques antérieurs, ainsi que des mesures de prévention et de protection prévues pour atténuer les effets. Ces informations, succinctes et globales, seront accessibles à la consultation en mairie et directement diffusées à la population. Les DICRI fournissent également des détails sur les mesures de prévention et d'alerte en cours, présentent les consignes de sécurité spécifiques pour le risque d'inondation avant,

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

pendant et après l'événement. De plus, ils intègrent des repères historiques, tels que des traces d'eau, dans le but de sensibiliser visuellement la population.

-Application des nouvelles technologies (images satellitaires, observatoire national des risques naturels) pour la mise en place d'une expérience pilote d'un système d'alerte précoce.

-La transformation et l'amélioration du système d'alerte à la population est indispensable et doit figurer parmi les priorités majeures de l'État, nous proposons ici de développer et instaurer un système avancé d'alerte et de communication avec les citoyens. L'objectif est d'atteindre et d'informer le plus grand nombre de personnes en activant divers moyens d'alerte de manière simultanée, spécifiquement dans les zones à risques. Pour cela, l'usage des technologies avancées est sollicité, notamment l'envoi de messages d'alerte par le biais de systèmes radio à données (qui permettent de basculer automatiquement sur un message d'alerte) et le broadcast cellulaire (qui permet de diffuser un message sur les téléphones mobiles)

-Mettre en place un système de prévision du risque inondation dans les deux cours d'eau (Oued Ziad et Oued Mgharouel) pour atténuer les effets et réduire les difficultés de gestion de la crise provoquée par ces inondations. Nous proposons un système qui s'appuie sur un réseau de capteurs de la mesure de la pluie et du débit, accompagnés d'images radar, qui permettent, grâce à un traitement numérique utilisant des modèles mathématiques, de réaliser des prévisions fiables, quelques heures à l'avance, sauvant ainsi des vies. Il est souhaitable que les autorités centrales développent un système de ce type à travers les deux bassins versants étudiés comme une expérience pilotes.

Si ce système de prévision des inondations en temps réel avec les centres régionaux n'est pas disponible, il est possible, en présence d'une bonne carte topographique de base et des données de flux, de construire des cartes appelées cartes d'inondation, pour cadrer les détails à l'échelle de la zone à gérer.

Dans ce volet, nous suggérons de financer des études supplémentaires sur les sites menacés au risque d'inondation par débordement des cours d'eau, et spécialement dans les micro bassin semi-urbain à caractère torrentiel qui sont souvent négligé par l'état mais qui causent des dégâts humains et matériels importants tel l'exemple des bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel, afin de pouvoir déterminer leur caractéristiques hydromorphologiques, climatiques, hydrologiques, socioéconomiques, et leurs facteurs déclenchants du risque, les probabilités d'occurrence de l'aléa

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

naturel et ses différentes périodes de retour, le champs d'expansion du risque et les enjeux vulnérable. Pour en pouvoir sensibiliser la population locale des risques encourus dans leur territoire à travers l'élaboration des cartes informatives au niveau des communes et qui seront publié sur les sites d'internet et partagé avec les populations locales.

### **5.3.8.1. Proposition de la constitution du comité technique du Plan de Prévention du risque inondation (PPRI) au niveau local (Constantine)**

Afin de réaliser de manière efficace le projet de plan de prévention du risque d'inondation, le wali et le comité de pilotage doivent mettre en place une équipe de projet. Cette équipe facilitera l'échange d'informations, la mise en corrélation des différentes politiques publiques en matière d'urbanisme, de déplacements et de logements. Il est essentiel que cette équipe soit cohérente et complémentaire dans son travail.

Le comité technique responsable de l'élaboration du Plan de Prévention du risque inondation est constitué des services de la wilaya, dotés d'une expertise et d'une expérience avérées dans le domaine de la prévention et de la gestion des risques. Il inclut également certaines agences et offices, tant régionaux que nationaux, ainsi que des individus compétents, tels que des universitaires, potentiellement réunis en un groupe de travail pluridisciplinaire.

Les collectivités associées seront :

- La Wilaya directement concernée par le projet plan de prévention du risque inondation (PPRI).
- La ou les communes directement concerné/es par le projet de Plan de Prévention du risque inondation.
- La ou les daïras (Intercommunale/s) dont le périmètre d'intervention est couvert en totalité ou en partie par le plan de prévention du risque inondation.

Suivant les spécificités du territoire, d'autres organismes doivent faire partie du Comité :

- La Direction de l'Urbanisme de l'Architecture et de la Construction DUAC (qui chapote le projet et assure le secrétariat en collaboration avec la Direction de la Protection Civile.
- La Direction de la Protection Civile de la Wilaya de Constantine.
- La Direction des Travaux Public (DTP).
- La Direction des Ressources en Eau (DRE).

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

Les établissements publics territoriaux de bassin et les structures porteuses des schémas d'aménagement et de gestion des eaux, à l'instar de :

- Agence Nationale des Barrages et des transferts (ANBT).
- Agence régionale des ressources Hydriques (ANRH).
- Les gestionnaires d'infrastructures et les gestionnaires des Barrages.
- Les chercheurs et les professeurs des universités.

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

### **Conclusion**

La gestion des catastrophes en général et du risque d'inondation particulièrement en Algérie ont connu des avancées significatives marquée par un-renforcement législatif et institutionnel avec la promulgation des deux lois du 04-20 de 2004, et 24-04 de 2024.

Cette loi a permis la création, de la Délégation Nationale aux Risques Majeurs (DNRM) ; cela a permis aussi le développement et l'amélioration des capacités de recherche et d'intervention afin de mieux se préparer aux catastrophes naturelles. Tout ça reflète un engagement sérieux envers la prévention, la préparation et la réponse face aux catastrophes naturelles.

Par ailleurs, la loi 04-20 a prévu la mise en place d'une politique de sensibilisation de la population et l'instauration obligatoire.

Cependant, la mise en œuvre de la loi 04-20 se heurte à des défis et lacunes, notamment dans la coordination des acteurs, le renforcement des capacités techniques et opérationnelles, et la nécessité d'aller vers un renforcement de la résilience des communautés locales.

La proposition de la mise en place d'une méthodologie de stratégie de gestion intégrée du risque d'inondation à Constantine, avec comme exemple d'étude les bassins versants Oued Ziad et Oued Mgharouel, se place comme une démarche proactive. Elle vise à proposer des objectifs clairement définis sur des actions à court, moyen et long terme, englobant la prévention, la prévision, l'intervention, en tenant compte de la résilience. Cette stratégie envisage une coordination étroite entre les secteurs, une répartition claire des responsabilités aux niveaux central et local, et intègre la gestion du risque d'inondation dans le développement durable et la planification urbaine du territoire.

Pour faire de Constantine une ville résiliente, il est essentiel de persévérer dans la mise en œuvre de ces actions et stratégies, tout en surmontant les défis liés à la coordination, au renforcement des capacités et à la participation communautaire. Une gestion intégrée du risque d'inondation à Constantine devrait non seulement se concentrer sur la réduction des risques, mais également sur la construction d'une communauté mieux informée, prête à agir et capable de se relever après une catastrophe. La coordination entre les niveaux central et local, combinée à une approche participative, constituera une pierre angulaire pour faire de Constantine une ville résiliente face aux risques d'inondation.

## CONCLUSION GENERALE

### **Conclusion générale**

La compréhension du risque d'inondation reste complexe en raison de sa nature multidimensionnelle et des nombreux facteurs qui influencent son acceptabilité. L'évaluation des principales composantes du risque, telles que l'aléa et la vulnérabilité, est essentielle pour élaborer des actions globales et résilientes face aux défis climatiques actuels et futurs.

L'analyse des bassins versants étudiés a permis de mettre en évidence leurs spécificités géographiques et hydrologiques. Le bassin de l'Oued Rhumel, traversant des zones de plaines et de reliefs montagneux avec une couverture végétale significative, favorise une certaine perméabilité. En revanche, les bassins des Oued Ziad et Oued Mgharouel, situés en régions montagneuses avec une urbanisation croissante en aval et des pentes raides, présentent un risque accru de ruissellement rapide et d'inondations. Ces caractéristiques, combinées à un réseau hydrographique dense en amont et à un temps de concentration court, amplifient les risques.

Les variations climatiques renforcent cette vulnérabilité : le bassin de l'Oued Rhumel alterne entre un climat méditerranéen humide au nord (précipitations annuelles atteignant 970 mm) et un climat semi-aride au sud (précipitations autour de 250 mm). Quant aux bassins des Oued Ziad et Oued Mgharouel, ils présentent un climat subhumide en amont, avec des précipitations dépassant 550 mm, et semi-aride en aval.

Les analyses hydrologiques et la modélisation hydraulique des crues ont permis d'évaluer les débits de pointe pour différentes périodes de retour. Les crues centennales des Oued Ziad et Mgharouel atteignent respectivement 56,37 m<sup>3</sup>/s et 51,59 m<sup>3</sup>/s, entraînant des débordements significatifs et des inondations majeures.

La cartographie des zones à risque, réalisée à l'aide de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) couplée aux systèmes d'information géographique (SIG), a permis d'identifier les zones vulnérables et de fournir des outils précis pour la gestion des risques.

Le logiciel HEC-RAS a été utilisé pour simuler les crues et déterminer leurs caractéristiques hydrauliques, mettant en évidence les impacts potentiels sur les zones urbaines. Les événements historiques, comme la crue de septembre 2018, ont illustré le danger pour les habitants et les infrastructures locales.

Sur le plan législatif, le cadre initial posé par la loi n° 04-20 a été renforcé avec l'adoption de la loi n° 24-04 du 26 février 2024, visant à améliorer la prévention et la gestion des risques dans une

## CHAPITRE V : GESTION DU RISQUE D'INONDATION : VERS UNE STRATEGIE DE PREVENTION ET D'ADAPTATION AU RISQUE

perspective de développement durable. La création de la Délégation Nationale aux Risques Majeurs (DNRM) et le renforcement des capacités techniques et institutionnelles représentent des avancées significatives pour une meilleure résilience face aux catastrophes naturelles, notamment les inondations.

Une approche proactive et intégrée est essentielle pour gérer efficacement les risques d'inondation à Constantine, notamment dans les bassins des Oued Ziad et Oued Mgharouel. Cette méthodologie propose des objectifs clairs à court, moyen et long terme, articulés autour de la prévention, de la prévision, de l'intervention et de la survie. Elle met l'accent sur une coordination étroite entre les autorités centrales et locales, avec une participation active de la communauté. La gestion des risques est également intégrée à la planification urbaine et au développement durable.

En conclusion, il est impératif de combiner analyse des risques, modélisation, et planification stratégique pour orienter les initiatives de gestion des inondations et favoriser un développement urbain durable. La prévention, ciblée sur les zones les plus exposées, renforce leur résilience tout en atténuant les impacts des catastrophes naturelles sur les populations et les infrastructures.

La forte croissance et l'urbanisation rapide souvent incontrôlée dans des zones à risque, absence de réglementation spécifique des zones à risque, une situation qui correspond bien à Constantine ou l'urbanisation des versants instables et des plaines alluviales inondables l'exposent à des risques accrus d'inondation

## RECOMMANDATIONS

### ❖ **Recommandations générales pour le bassin versant d'Oued Rhumel**

#### **Pour les zones de faible à très faible vulnérabilité au risque d'inondation :**

-Nous recommandons d'imposer des normes de construction qui intègrent des mesures de prévention contre les inondations, construire et entretenir des systèmes de drainage efficaces pour évacuer l'eau en excès.

#### **Pour les zones à risque d'inondation moyen nous recommandons de :**

- limiter les nouvelles constructions dans ces zones, ou bien exiger des normes de sécurité nécessaires pour protéger la population du risque, il s'agit en fait, d'éviter les constructions avec sous-sol et rez-de-chaussée et exiger de surélever les niveaux de constructions pour réduire les risques de dommages par les eaux
- renforcer les berges des cours d'eaux pour prévenir les débordements
- Installer en amont des digues, des bassins de rétention et d'autres infrastructures pour calibrer les débits et contrôler les inondations.
- Développer et mettre à jour régulièrement des plans d'évacuation et de gestion des crises.

#### **Pour les zones à fort et très fort risque d'inondation nous recommandons de :**

- Interdire les nouvelles constructions et limiter l'expansion des zones existantes
- Encourager la relocalisation des populations et des infrastructures vulnérables vers des zones plus sûres.
- Promouvoir des pratiques agricoles et industrielles qui réduisent l'impact des inondations.
- Mettre en place des systèmes d'alerte rapides et efficaces pour permettre des évacuations rapides.
- Renforcer et moderniser les infrastructures existantes pour qu'elles résistent mieux aux inondations.

Ces mesures doivent être accompagnées de politiques publiques efficaces, d'une coopération interinstitutionnelle et d'une sensibilisation continue des populations aux risques d'inondation. L'approche doit être intégrée et adaptable, tenant compte des évolutions climatiques et des dynamiques environnementales.

## RECOMMANDATIONS

### ❖ **Recommandations spécifiques pour la gestion intégrée du risque d'inondation à Constantine (Cas des bassins versants Oued Ziad et Oued Mgharouel)**

Afin de réduire les dommages dus aux inondations, il est nécessaire d'intervenir à différents niveaux d'échelle

#### ➤ **Gestion des eaux pluviales et aménagement urbain**

- Remplacer l'évacuation rapide des eaux pluviales par une gestion intégrée et durable, incluant des retenues d'eau orageuses pour réguler les débits.
- Préserver les zones inondables de l'urbanisation pour leur rôle naturel d'éponge.
- Favoriser des aménagements urbains adaptés tels que des zones tampons et des espaces verts pour améliorer l'infiltration.
- Redimensionner les infrastructures (buses, dalots) pour mieux gérer les débits de crues.
- Curage et entretien périodique des cours d'eau selon des normes adaptées.
- Maîtriser l'urbanisation pour éviter de nouvelles implantations dangereuses.

#### ➤ **Amélioration de la gestion du bassin versant**

- Créer des retenues collinaires en amont des bassins versants pour contrôler les débits et limiter le risque d'inondation.
- Réaliser des travaux de défense et de restauration des sols pour stabiliser et préserver les versants.
- Réduire le ruissellement en améliorant l'infiltration des sols et en limitant l'érosion hydrique.
- Mettre en œuvre des travaux de correction sur les lits des oueds et installer un réseau de banquettes pour favoriser l'infiltration des eaux pluviales.
- Opérer des actions de reboisement dans les zones sensibles pour minimiser l'effet des crues.
- Réaménagement de la protection actuelle de l'oued avec de nouvelles dimensions géométriques.

#### ➤ **Délocalisation et gestion des habitats vulnérables**

- Délocaliser les habitats précaires et mal planifiés dans les zones à haut risque d'inondation.
- Démolir les constructions non sécuritaires et indemniser les habitants pour réduire les vulnérabilités.

#### ➤ **Surveillance et gestion des risques**

- Mettre en place des stations de surveillance des crues dans les bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel.
- Améliorer l'efficacité des systèmes de surveillance et d'alerte en temps réel pour suivre les événements de crue et l'évolution des scénarios de risque.

## RECOMMANDATIONS

-Diffuser l'information concernant le risque d'inondation via des moyens de communication divers (internet, radio, télévision).

### ➤ **Sensibilisation, éducation et préparation à la gestion de crise**

-Favoriser la culture de la participation et les volontariats chez les riverains pour contribuer à la prévention.

-Mener des campagnes d'information et de sensibilisation sur le risque d'inondation dans les écoles et au sein des communautés locales.

-Organiser des journées de sensibilisation au risque et des exercices de simulation pour renforcer la culture du risque.

-Préparer des plans d'organisation de secours spécifiques pour le risque d'inondation dans chaque commune, avec la mobilisation des moyens nécessaires.

-Renforcer la formation et les compétences des opérateurs et des services de protection civile.

### ➤ **Planification et intégration dans les politiques publiques**

-Intégrer le risque d'inondation dans l'aménagement urbain et la planification territoriale à travers des plans de prévention communaux.

-Assurer la coordination entre les plans de développement urbain, les plans de prévention des risques d'inondation, et les réglementations d'urbanisme.

-Planifier et implémenter des objectifs de prévention des risques dans le Plan Communal de Développement (PCD).

### ➤ **Sur le plan économique**

Compte tenu des pertes économiques significatives engendrées par les inondations, il est impératif de:

-Appliquer rigoureusement l'Ordonnance n° 03-12 du 26 août 2003, relative à l'obligation d'assurance contre les catastrophes naturelles et à l'indemnisation des victimes.

-Mettre en place de nouveaux mécanismes pour simplifier et améliorer le processus d'assurance des biens et des installations industrielles.

-Impliquer activement les compagnies d'assurance dans la gestion des risques naturels.

### ➤ **Approche durable et développement intégré**

-Transformer les contraintes liées aux risques d'inondation en opportunités d'aménagement durable.

## RECOMMANDATIONS

-Promouvoir une approche de développement durable en favorisant des solutions intégrées qui combinent protection contre les inondations et amélioration de la qualité de vie des habitants.

### **Recommandations pour le plan ORSEC**

En ce qui concerne les plans d'organisation de secours, il est recommandé de :

- Mettre en place des plans ORSEC (Organisation de la Réponse de la Sécurité Civile) à l'échelle communale spécifique pour chaque type de risque.
- Intégrer les documents du Plan ORSEC avec des outils cartographiques afin d'obtenir une vue d'ensemble géographique.
- Coordonner et d'intégrer les plans ORSEC avec les Plans de Prévention des risques inondation, en particulier en ce qui concerne les scénarios de risque.
- Localiser les zones destinées aux bases logistiques ainsi que les zones de relogement provisoire sur une cartographie, en cas d'évacuation de la population.
- Localiser les structures critiques d'importance vitale.
- Inclure dans les plans ORSEC l'identification claire des routes stratégiques utilisées pour les secours et d'assurer leur accessibilité, en fonction des différents scénarios de risque liés aux inondations et aux dommages probables.
- Créer une plateforme web unique pour la Protection Civile, regroupant les avertissements liés à chaque type de risque et permettant d'unifier toutes les informations utiles destinées aux citoyens ainsi qu'aux autres institutions.
- Sensibiliser et d'informer de manière continue la population quant aux contenus du plan ORSEC, en prenant des mesures incisives et efficaces.
- Optimiser la transmission d'informations en situation d'urgence grâce à des approches novatrices et des outils technologiques.
- Harmoniser les Plans ORSEC et les plans d'urbanisme en fusionnant les projections du plan d'urbanisme local avec les objectifs de prévention des risques d'inondation.

### ❖ Perspectives de la recherche

La vulnérabilité urbaine face aux risques d'inondations reste un sujet d'étude en constante évolution. Compte tenu de l'accroissement rapide des villes et les surfaces imperméabilisées, aussi le dérèglement climatique et son impact sur l'environnement des milieux naturels et les enjeux socio-économiques, de même, la diversité des disciplines qui s'y intéressent rend l'évaluation de cette vulnérabilité toujours d'actualité et en perpétuelle remise en question.

Cette recherche revêt une importance particulière en raison de son impact sur plusieurs aspects:

**Scientifique** : elle offre une base solide pour les chercheurs souhaitant approfondir les futures études dans ce domaine.

**Technique** : les résultats obtenus constituent un outil précieux pour appuyer les décisions des autorités locales de Constantine.

**Spatial, économique et social** : l'application des recommandations formulées dans cette recherche contribuera à réduire la vulnérabilité urbaine face aux inondations et à renforcer la protection de la ville de Constantine contre le risque d'inondation.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdi, Ishak. (2022). Contribution à la modélisation pluie-débit dans les bassins versants de l'Est de l'Algérie. [Thèse de doctorat en science, école nationale supérieure d'hydraulique ENSH].165p
- Adger W.N., 2006, vulnerability, global environmental change, 16, p.268-281.
- Ambio. 2002 Aug;31(5):437-40. doi: 10.1579/0044-7447-31.5.437. PMID: 12374053.
- Audrey Becuwe, Philippe Pasquet (2012). Analyse des travaux récents sur le Risque Dans RIMHE : Revue Interdisciplinaire Management, Homme & Entreprise 2012/2 (n°2, vol.1), pages 109 à 118 Éditions ARIMHE. ISSN 2259-2490. DOI10.3917/rimhe.002.0109
- Anne-Marie Laroche et Wissi Mathilde Diramba Gabriel Dumont Nawres Yousfi. (2016). Cartographie Des Zones Inondables Des Terres Intérieures De Bassins Versants Non Jaugés Phase I – Modélisation Hydrologique. Laboratoire des sciences hydriques et climatiques. Université de Moncton
- Arthur Bourcet. (2022). Modélisation hydrologique et hydraulique pour la prévision des crues sur le bassin Rhin-Sarre. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. « Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES ». ffdumas-01651629. HAL Id: dumas-01651629 <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01651629>
- Azioune. R. 2022. L'inondation en milieu urbain et le changement climatique dans le Nord Est Algérien étude de cas. These de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle. Université des frères Mentouri 1. Faculté des sciences de la terre. De la géographie et de l'aménagement du territoire
- Ahmed Laabidi, Abdellah El Hmaidi; Lahcen Gourari, Mourad El ABASSI, Master. (2016). Apports Du Modele Numerique De Terrain Mnt A La Modelisation Du Relief Et Des Caracteristiques Physiques Du Bassin Versant Du Moyen Beht En Amont Du Barrage El Kansera (Sillon Sud Rifain, Maroc). European Scientific Journal. edition vol.12, No.29 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431. doi: 10.19044/esj.2016.v12n29p258 URL:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n29p258>
- Ajjur, S. B., & Mogheir, Y. K. (2020). Flood hazard mapping using a multi-criteria decision analysis and GIS (case study Gaza Governorate, Palestine). Arabian Journal of Geosciences, 13(2)
- Abdeddaim Hakima. (2018). Contribution A L'étude De L'influence De La Structure Du Réseau Hydrographique Sur Le Risque Hydrologique « Cas des bassins de l'Est de l'Algérie ». Thèse de Doctorat En Sciences Hydrauliques Université Mohamed Khider – Biskra. Faculté des Sciences et de la technologie. Département d'Hydraulique. pp 276
- Brugnot G (dir.). (2001). Gestion spatiale des risques. Lavoisier, Paris, 287 p
- Bekhira, A., Habi, M., & Morsli, B. (2019). Management of hazard of flooding in arid region urban agglomeration using HEC-RAS and GIS software: The case of the Bechar's city. Journal of Water and Land Development, 42(1), 21–32. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0041>
- Bekhira A. (2020). Contribution à l'étude du risque d'inondation dans les zones arides, Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd, Faculté de Technologie, Tlemcen, Algérie pp 188
- Bourenane H (2017). Analyse spatiale, évaluation et cartographie des risques naturels : application à l'aménagement de la ville de Constantine (Nord Est Algérien). These de doctorat en science.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Université des sciences de la technologie Houari Boumedienne (USTHB). Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire (FSTGAT). Pp 307

Bourenane. H, Bouhadad, Y. (2020). Analyse spatiale, évaluation et cartographie de l'aléa inondation dans les plaines alluviales de Boumerzoug et de Rhumel (ville de Constantine, Nord Est Algérien) : Application aux travaux d'aménagement et d'urbanisme. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01980-y>

Beatley, T. (2011). Biophilic cities: integrating nature into urban design and planning. Island Press. BOOK. EBSCO ebook academic collection

Benzougagh B., Dr. Boudad L., Dridri A., Sdkaoui D., (2016). Utilisation Du Sig Dans L'analyse Morphométrique Et La Prioritisation Des Sous-Bassins Versants De Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc). European Scientific Journal, 12 (6): 266-289.

Benzougagh, B., Dridri, A., Boudad, L., Kodad, O., Sdkaoui, D., et Bouikbane, H. (2017). Evaluation Of natural hazard of Inaouene Watershed River in Northeast of Morocco: Application of Morphometric and Geographic Information System approaches. International journal of innovation and applied studies, 19(1), 85 – 97.

Benzougagh, B., (2019). Analyses morphométriques et la priorisation du bassin versant. Oued Inaouène (Nord-Est du Maroc), pour la gestion du risque d'érosion hydrique. Editions universitaires européennes, ISBN 978-613-9-53422-7. Pp 69

[https://www.researchgate.net/profile/BenzougaghBrahim/publication/344390346\\_Analyse\\_Morphometrique\\_et\\_la\\_Prioritisation\\_du\\_bassin\\_versant\\_Oued\\_Inaouene\\_Nordest\\_du\\_Maroc\\_pour\\_la\\_gestion\\_du\\_risque\\_derosion\\_hydrique/links/5f6f7e37a6fdcc00863cca64/Analyse-Morphometrique-et-la-Prioritisation-du-bassin-versant-Oued-Inaouene-Nord-est-du-Maroc-pour-la-gestion-du-risque-derosion-hydrique.pdf](https://www.researchgate.net/profile/BenzougaghBrahim/publication/344390346_Analyse_Morphometrique_et_la_Prioritisation_du_bassin_versant_Oued_Inaouene_Nordest_du_Maroc_pour_la_gestion_du_risque_derosion_hydrique/links/5f6f7e37a6fdcc00863cca64/Analyse-Morphometrique-et-la-Prioritisation-du-bassin-versant-Oued-Inaouene-Nord-est-du-Maroc-pour-la-gestion-du-risque-derosion-hydrique.pdf)

Bharadwaj, A., Joshi, P.K., Snehmani., Singh, M.K., Sam, L et Gupta, R.D. (2014): Mapping debris-covered glaciers and identifying factors affecting the accuracy. Elsevier Cold Regions Science and Technology Volumes 106 – 107, pp 161-17.

Bannister E. N., 1980, Hypsometries of Michigan's Southeastern Lake Plain, Journal of Great Lakes Research, vol. 6, no2, p. 154-163.

Berhail, Sabri. (2015). Etude des processus hydrologiques de formation des crues dans le bassin versant de la Seybouse (Nord-Est Algérien). These de doctorat 3eme cycle LMD. Université Badji Mokhtar, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Département d'Hydraulique. Annaba, Algérie. Pp149

Bougdal. R , Belhai. Dj, Antoine, P. (2007). Géologie détaillée de la ville de Constantine et ses alentours : Une donnée de base pour l'étude des glissements de terrain. Bulletin du service géologique national. Vol. 18, n° 2, pp. 161 - 187, 6 fig., 14 ph. [file:///C:/Users/Manou/Downloads/g%C3%A9ologie-d%C3%A9tail%20de-la-ville-de-constantine-et-ses-alentours--une-donn%C3%A9e-de-base-pour-l%E2%80%99-%C3%A9tude-des-glissements-de-terrain%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Manou/Downloads/g%C3%A9ologie-d%C3%A9tail%20de-la-ville-de-constantine-et-ses-alentours--une-donn%C3%A9e-de-base-pour-l%E2%80%99-%C3%A9tude-des-glissements-de-terrain%20(2).pdf)

Bouillin J P. (1977). Géologie alpine de la petite Kabylie dans la région de Collo et d'El Milia (Algérie). These SC., Paris VI, 551p., 127fig., 2 pl.h.t

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bouillin J P. (1986). Le bassin maghrébin : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'Ouest des Alpes. Bull. Soc. Géol. France. 2(4), série 8, 547-558.
- Belarbi, L. (2019). Prévention et gestion des risques naturels, comportement des villes algériennes face au risque d'inondation, cas de Ghardaïa. Thèse de doctorat en science. Université Salah Boubnider Constantine 3. Faculté d'architecture Et d'urbanisme. Pp. 317
- Boughouass, S. (2018). La gestion du risque dans une perspective de développement urbain durable cas de Constantine. Thèse de doctorat en science. Université Salah Boubnider Constantine 3. Faculté d'architecture Et d'urbanisme. Pp 330
- Cohen E., 2001, Dictionnaire de gestion, Repères, La Découverte, 415 p
- Coiffait, P.E., 1992. Un bassin post-nappes dans son cadre structural : l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord-Orientale). Thèse Doctorat Es-Sciences, Paris.
- D'Ercole R., Pigeon P. (1999). L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique. Annales de Géographie, n°608, pp. 339-357
- Dauphiné A. (2003). Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer. Collection U, Armand Colin, Paris, 288 p.
- Das B, Bordoloi R, Thungon LT, Paul A, Pandey PK et al. (2020). An integrated approach of GIS, RUSLE and AHP to model soil erosion in West Kameng watershed, Arunachal Pradesh. Journal of Earth System Science, 129(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1356-6>.
- Defossez S. (2009). Evaluation Des Mesures De Gestion Du Risque Inondation application Au Cas Des Basses Plaines De L'aude. Géographie. Université Paul Valéry- Montpellier III, Français. <NNT : 2009MON30073>. <tel-00542397> pp 22
- Didier, D., Bernatchez, P., & Dumont, D. (2017). Systèmes d'alerte précoce pour les aléas naturels et environnementaux : virage ou mirage technologique ? Revue des sciences de l'eau, 30(2), 115-146. <https://doi.org/10.7202/1042922ar>
- Durand Delga M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berberie. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, N.S., Bull. n°39, pp 89-131, 9 fig.
- Durand Delga M. (1971). Les unités mésozoïques métamorphiques d'El Milia à Texanna (Algérie) et leur cadre structural. Bull. Soc. Géol. France, (7), Paris, pp. 328-377.
- Durand Delga M et Fontboté J.M. (1980). Le cadre structural de la méditerranée Occidentale. Mémoire du BRGM, n°15, pp. 57-85.
- Dridri A., Fadan A., (2001). Rôle du contrôle structural dans la mise en place du réseau hydrographique de Sebou et d'Inaouène entre Fès et Oued Amlil (Maroc). Bulletin de l'Institut scientifique Rabat, section Science de la Terre, 2001, n° 23, 67-77.
- Dahri N, Abida H (2017). Monte Carlo simulation-aided analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping in Gabes Basin (southeastern Tunisia). Environ Earth Sci 76, 302. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6619-4>.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Das B, Singh SK (2016). Ground water potential zone mapping of semi-arid region of Kalaburgi and Yadgir districts of North Karnataka: A geospatial analysis approach. *Int. J. Curr. Res*, 8(3), 28-797.
- Das B, Paul A, Bordoloi R, Tripathi OP, Pandey PK (2018). Soil erosion risk assessment of hilly terrain through integrated approach of RUSLE and geospatial technology: a case study of Tirap District, Arunachal Pradesh. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 373-381.
- Das B, Bordoloi R, Thungon LT, Paul A, Pandey PK et al. (2020). An integrated approach of GIS, RUSLE and AHP to model soil erosion in West Kameng watershed, Arunachal Pradesh. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-1356-6>.
- Dahri N, Abida H (2017). Monte Carlo simulation-aided analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping in Gabes Basin (southeastern Tunisia). *Environ Earth Sci* 76, 302. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6619-4>.
- Das B, Singh SK (2016). Ground water potential zone mapping of semi-arid region of Kalaburgi and Yadgir districts of North Karnataka: A geospatial analysis approach. *Int. J. Curr. Res*, 8(3), 28-797.
- Dauphiné A. (2003). *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Collection U, Armand Colin, Paris, 288 p.
- Escaffre E. (2014). « Les sociétés face aux risques » : présentation, analyse et mise en œuvre de ce sujet d'étude en classe de seconde bac professionnel. Master métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation Lettres, histoire, géographie. Education, HAL Id: dumas-01261589 <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01261589>. P 6-48.
- Faye Cheikh. (2018). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : cas du bassin versant de la Gambie. (bassin continental Guineo-Sénégalais). *Revue Marocaine de Géomorphologie*. N°2. PP 110- 127. ISSN: 2508-9382. <http://revues.imist.ma/?journal=remageom>
- Forest, T. (2019). Réduction du risque lié aux inondations du ruisseau Pratt, Coaticook, par modélisation hydrologique et mise en place d'un système d'alerte précoce (Doctoral dissertation, Université Laval).
- Folke C, S Carpenter, T Elmqvist, L.H Gunderson, C.s. Holling, B Walker . (2002). *resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations*, report for the Swedish Environmental Advisory Council, Stockholm, Sweden, Ministry of the environment.
- Greco. F .(1992). *Bazinul Hârtibaciului*. Elemente de morfohidrografie, Edit. Academiei, București, 160 p
- Greco. F . (2004), *Quantification of some elements of drainage basins in Romania*, *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, vol . **25**, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Torino, p.29 – 36, 8 fig., 8 tabb

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Greco F., Mathys N, Zavoianu I., Comanescu L. (2005). *Le réseau de drainage et la vulnérabilité à l'érosion en bassins-versants alpins (Draix – Alpes Françaises ; Slanic – Carpates Roumaines)*, în vol., *Geomorphology in Regions of Environmental Contrasts*, Abstracts Volume, Sixth International Conference on Geomorphology, sept. 7- 11, 2005, Zaragoza (Spain).

Greco F., Zăvoianu I., Zaharia L., Comănescu L. (2007), *Analyse quantitative du réseau hydrographique du bassin versant du Slănic (Roumanie)*, *Physio-Géo–Géographie Physique et Environnement*, vol.I, nr.1, p 79 – 93, 10fig., 5 tab.,

Greco F., Ghita C., Albu M., Cîrciumaru E (2011) *Geomorphometric Analysis On The Some Riverbeds In The Romanian Plain*, *International Journal Of The Physical Sciences* Vol. 6(30), Pp.7055-7064, 2011,  
Available Online At [Http://Www.Academicjournals.Org/Ijps](http://Www.Academicjournals.Org/Ijps) Doi: 10.5897/Ijps11.913, Issn 1992 - 1950 ©2011(Academic Journals, Isi, Factor Impact Referinta Domeniu 2,04

Greco F (2018), *Geomorfologie Dinamică Pluvio-Fluvială. Teorie Şi Aplicații*, Editura Universitară, Bucuresti 480 P.,

Greco F, Benabbas C, Teodor M, Yakhlefoune M, Sandulache I, Manchar N, Kharchi T.E, Vişan G. (2021). Risk of Dynamics of the River Stream in Tectonic Areas. Case studies: Curvature Carpathian - Romania and Maghrebian Chain – Algeria. *Forum Geografic. Studii si cercetari de geografie si protectia mediului*, vol XX, nr1/2021, pp 5-22. doi.org/10.5775/fg.2021.021.i

Groupe intergouvernemental sur l'évolutions du climat (GIEC, 2002). Evalué les informations scientifiques relatives au changement climatique.

Gilbert Cl. (2009). La vulnérabilité : une notion vulnérable ? À propos des risques naturels, in Becerra S., Peltiers A, *risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Paris, L'Harmattan, p 23-40.

Gendreau N, Lang M, 1999. La méthode inondabilité du CEMAGREF, cours ENGREF « Modélisation mathématique pour l'évaluation et la gestion des risques ».

Gleyze J.F., (2002). Le risque, institut géographique national, laboratoire Cogit.pp 256. [http://recherche.ign.fr/labos/cogit/pdf/RAPPORTS/Gleyze\\_rapport\\_risque.pdf](http://recherche.ign.fr/labos/cogit/pdf/RAPPORTS/Gleyze_rapport_risque.pdf)

Gleyze J.F. 2005. La vulnérabilité structurelle des réseaux dans un contexte de risques, thèse, université Paris 7.

Gravilius. H. (1914). *Grundrifi der gesamten Gewcissekunde. Band I: Flufikunde (Compendium of Hydrology, Vol. I. Rivers, in German)*. Goschen, Berlin, Germany.

Gélard J.P. (1969). Le flysch à base schisto-gréseuse de la bordure méridionale du massif de Chettala : le flysch maurétanien (Grande Kabylie). *Bull. Soc. Géol. France* XI : 676-68

Guellals S et al. (1973). Permis d'Ain Reggada, rapport interne. (BEICIP-SONATRACH), 19 fig., 27 pl. 167p.

Gherissi. Radia. (2018). *Modélisation Hydrologique D'un Bassin Versant En Climat Méditerranéen Par L'approche Conceptuelle Globale. Cas De L'oued Lakhdar (Ex : Chouly)*

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (Tafna Nord-Ouest Algérien). Thèse de Doctorat En Sciences de la Terre. Université de Tlemcen. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers. Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.
- Hallil, A. (2023). L'évaluation de la vulnérabilité urbaine face aux risques d'inondations, Cas de la ville d'El Bayadh. Thèse de doctorat LMD. Université Mohamed Boudiaf M'Sila. Institut de gestion des techniques urbaines. Pp 175.
- Haoues C. (2017). Étude Des Risques Majeurs Et Niveau De Vulnérabilité Dans La Vallée De L'oued Labiod (Spatialisation Et Modélisation). Université De Batna 2 Mostefa Ben Boulaid, Institut Des Sciences De La Terre Et De L'univers, Département De Géographie Et Aménagement Du Territoire, Thèse de Doctorat en Sciences. Spécialité : Aménagement du Territoire
- Hadley R.F., and Schumm S.A., (1961). Sediment sources and drainagebasin characteristics in upper Cheyenne River basin: U. S. Geol. SurveyWater-Supply Paper 1531-B.
- Hajam RA, Hamid A, Bhat S. (2013): Application of Morphometric Analysis for Geo-hydrological studies using Geo-Spatial Technology a case Study of Vishav Drainage Basin. Hydrol Current research, Volume 4, Issue 3, pp 1-12.
- Horton R. E., (1932). Drainage basin characteristics. Transactions A.Geophysical Union, 13, 350-361. Horton R.E. Drainage basin characteristics. Trans Am Geophys Union. 13, 1932, 350-361
- Horton R. E., (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Geol. Soc. Amer. Bull., Vol.56, pp.275-370
- Humbert J., (1990). Intérêt de la densité de drainage pour régionaliser les données hydrologiques en zone montagneuse. Hydrology in Mountainous Regions. I -Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990). IAHS Publ. no. 193,1990, p 373-380.
- Hammami, S., Zouhri, L., Souissi, D., Souei, A., Zghibi, A., Marzougui, A., & Dlala, M. (2019). Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). Arabian Journal of Geosciences, 12(21).
- Kireche O. (1993). L'évolution géodynamique de la marge tellienne des Maghrébides d'après l'étude du domaine parautochtone schistosé. Thèse Doct. IST-USTHB. 328p.
- Kervern, G.Y (1995). Éléments fondamentaux des cindyniques, paris, Economica, coll. « gestion poche ».
- Khan M. L. (1991). the impact of local elites on disaster preparedness planning: the location of the flood shelters in northern Bangladesh. Disasters n°4
- Kateb, Z. (2020). Etude de l'influence des paramètres hydrologiques sur la production de sédiments d'un bassin versant. Cas du bassin versant du barrage de Beni Haroun. Thèse de doctorat LMD. Faculté de Technologie. Université Aboubakr Belkaïd. Tlemcen. Algérie. Pp 143
- Lakache H. (2022). Etude de la variabilité des apports hydrologiques des oueds Rhumel-Endja au barrage Béni Haroun (Algérie Orientale). Enjeux du climat et de l'environnement. These de doctorat 3eme cycle. Université des frères mentouri constantine1. Pp 317.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ledoux B. (2006). La gestion du risque inondation. Lavoisier, Paris, 770 p
- Leikine M. (1971). Etude géologique des Babors occidentaux (Algérie). Thèse d'état, Paris VI, 536 p.
- Laabidi A., El Hmaidi A., Gourari L., El Abassi M., 2016. Apports du modèle numérique de terrain MNT à la modélisation du relief et des caractéristiques physiques du bassin versant du moyen Beht en amont du barrage El Kansera (Sillon Sud Rifain, Maroc), European Scientific Journal, vol. 12, no29, p. 258-288. DOI: 10.19044/esj.2016.v12n29p258
- LuminoCity3D.org <https://luminocity3d.org/WorldPopDen/#3/20.00/10.00> consulté le 20.02.2024 à 11.09h
- Maquaire O. (2002). Aléas géomorphologiques (Mouvements de terrain) : processus, fonctionnement, cartographie, Mémoire d'habilitation à Diriger des recherches. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 219p.
- Munich Re. (2015). International disaster database de la compagnie de réassurance Munich Re
- Metzger P., D'Ercole R., 2011, « les risques en milieu urbain : éléments de réflexion, EcoGéo, n°18
- Mathieu J.P (1991). Dictionnaire de physique, paris, masson.
- Monte, B. E. O., Goldenfum, J. A., Michel, G. P., & de Albuquerque Cavalcanti, J. R. (2021). Terminology of natural hazards and disasters: A review and the case of Brazil. International Journal of Disaster Risk Reduction, 52, 101970. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101970>
- Manche Y (1998). Cartographie multirisque : une méthode semi-automatique. Revue ingénieries eau, agriculture, territoires, n° spécial 1998 « risques naturels » du CEMAGREF : risques naturels : avalanches, crues, inondations, laves torrentielles, incendies de forêt. 1998, pp 115-119
- MANCHE, Y. 1996. Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels, Mémoire de DEA « Modélisation des processus d'organisation spatiale et aide à la décision », Université Joseph Fourier, Cemagref, Grenoble, 35 p.
- 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 (N.W Algérien). Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid. Département d'hydraulique. Tlemcen. Algérie pp 199
- Mortureux, Y. (2002). Analyse préliminaire de risques
- Miller V.C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, Technical report,3, Department of Geology, Columbia University, New York.
- Melton M.A. (1957). An analysis of relations among elements of climate, surface properties and geomorphology, project NR 389042, Tach. Rep. 11, Columbia University.
- Melton M.A. (1958). Geometric properties of mature drainage system and their representation in an E4 phases space.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Mesa. L.M., (2006). Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucuman, Argentina): *Environmental Geology*, V, 50, pp. 1235-1242.
- Magesh N. S., Chandrasekar N., 2012.- GIS model-based morphometric evaluation of Tamiraparani subbasin, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India. *Arab J Geosci* DOI 10.1007/s12517-012-0742-z., Pp 131-144.
- Mardy, Z ; Weissenberger, S et Waub, J-P. (2023). Caractérisation du bassin versant de la rivière Mulet (Roche-à-Bateau, Haïti) à l'aide d'outils de géomatique, *Géocarrefour* [En ligne], 97/3. URL :<http://journals.openedition.org/geocarrefour/22751> ; DOI :<https://doi.org/10.4000/geocarrefour.22751>
- MUSY A., 2005, Cours d'hydrologie générale. Laboratoire d'hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Lausanne (Suisse), Ecole Polytechnique Fédérale.
- Miller, V.C. (1953). A quantitative geomorphologic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, project NR 389042, Tech Rept 3. Columbia University. Department of Geology. ONR Geography branch, New York.
- Miller, V.C. (1959).
- Montgomery, D.R and Dietrich, W.E. (1989). Source areas, drainage density and channel initiation. *Water resources research*, Vol.25, pp 1907-1918.
- Melton., (1958). Correlations structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents. *Journal of Geology*, 66: 442–460.
- Miller V.C., (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics on the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee, Proj. NR 389-9042, Tech Rep 3, Columbia University, Department of Geology, ONR, New York.
- Musy A., 2005. Cours d'hydrologie générale. Laboratoire d'hydrologie et Aménagements (HYDRAM), Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne (Suisse).
- Mihi A, Tarai N, Chenchouni H (2019). Can palm date plantations and classification be used as a proxy to fight sustainably against desertification and sand encroachment in hot drylands? *Ecol Indic* 105: 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.027> .
- Magesh. N. S., N. Chandrasekar., (2012). GIS model-based morphometric evaluation of Tamiraparani subbasin, Tirunelveli district, Tamil Nadu, India. *Arab J Geosci* DOI 10.1007/s12517-012-0742-z
- Maref. Noureddine. (2019). Démarche méthodologique d'adaptation d'un système de prévision aux risques d'inondation en Algérie, cas du bassin versant de l'Oued Mekerra (N.W Algérien). Thèse de doctorat LMD. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. Faculté De Technologie. Département D'hydraulique. pp 199
- Mebarki, A. 2005. Hydrologie des bassins de l'Est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat d'état. Université de Mentouri de Constantine 1.
- Mihi A, Tarai N, Chenchouni H (2019). Can palm date plantations and classification be used as a proxy to fight sustainably against desertification and sand encroachment in hot drylands? *Ecol Indic* 105: 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.027> .

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Podgorski, T. (2000). Ruissellement en conditions de mouillage partiel. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Mezhoud, L. (2021). La vulnérabilité face aux risques naturels étude de cas la ville de Constantine. Thèse de doctorat en science. Université des Frères Mentouri Constantine 1. Faculté Des Sciences De La Terre, De La Géographie Et De L'aménagement Du Territoire. Pp 355
- Nag, S.K. (1998). Morphometric analysis using remote sensing techniques in the Chaka Sub-basin, Purulia District, West Bengal. *Journal of the Indian Society Of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 1 and 2, pp 69-76.
- Nouri M, Ozer A et Ozer P. (2016). Etude préliminaire sur le risque d'inondation en milieu urbain (Algérie). *Geo-Eco-Trop.* 40, 3, n.s: 201-208.  
[https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub\\_403\\_02.pdf](https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_403_02.pdf).
- Olivier Laganier. Un couplage de modèles hydrologique et hydraulique adapté à la modélisation et à la prévision des crues à cinétique rapide – Application au cas du bassin versant du Gardon (France).. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2014. Français. ffnNT : 2014EMSE0749. <https://theses.hal.science/tel-01126972>
- Obert D. (1981). Etude géologique des Babors orientaux (domaine tellien, Algérie). Thèse d'état, Paris VI, 645 p.
- PNUD. (2004). Human development report 1996- economic growth and human development. Rapport du PNUD.
- Provitolo D. (2012). the contribution of science and technology to meeting the challenge of risk and disaster reduction in developing countries: from concrete examples to the proposal of a conceptual model of resiliency vulnerability, in Bolay J.C. et al ., technologies ans innovations for development, France, Springer-Verlag
- Plot-Vicard E., 2010, L'information diffusée par l'exploitant sur le risque nucléaire : quelle réponse aux attentes des parties prenantes ? Thèse de doctorat en sciences de gestion, Université Paris-Dauphine.
- Panizza, M. 1987. Geomorphological hazard assessment and the analysis of geomorphological risk, international geomorphology, Part I, edited by V. Gardner, pp. 225-229.
- RIMHE, Revue Interdisciplinaire sur le Management, l'Humanisme et l'Entreprise n°2 - NE - mai-juin-juillet 2012 - VARIA
- Raoult J F. (1969). Nouvelles données sur les Flyschs du Nord du Kef Sidi Dris et dans la zone du Col des Oliviers (Nord du Constantinois, Algérie). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), t. XI, pp 516-543, 2 fig.
- Raoult J F. (1974). Géologie du centre de la chaine numidique (Nord – Constantinois, Algérie). *Mém. Soc. Géol. Fr.*, N.S., t. LIII, n°121, 164 p., 62 fig., 11 pl.h.t.
- Reddy. G.P.O., Maji. A.K et Gajbhiye. K.S., 2004. Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India - a remote sensing and GIS approach. *Applied Earth Observation and Geoinformation*. V. 6, pp.1–16.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000–1017
- Roche, M., (1963). *Hydrologie de surface*, ORSTOM. Editions Gauthier-Villars. Paris. 430p.
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000–1017
- Schumm. S.A. (1956). The Evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletins*, 67(5), 597-646.
- Schumm. S.A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 74, no 9, p 1089 – 1100.
- Strahler A. N. Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. In: Chow VT (ed.) *Handbook of applied hydrology*. McGraw Hill Book Co., New York, 1964, 4-76.
- Soni, S. (2017). Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique. *Appl Water Sci* 7, 2089–2102. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0395-2>.
- Sanchez, M ; Thiery, D. (1981). Détermination de débits d'un cours d'eau par analyse typologique du bassin versant application à 17 cours d'eau Bretons, rapport du bureau de recherches géologiques et minières. Ecole nationale supérieure de géologie de Nancy, département Eau. 81 SGN 892 Eau. Pp 58. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/81-SGN-892-EAU.pdf>
- Strahler A.N., 1952, Hypsometric (area-altitude curve) analysis of erosional topography, *Geological Society of America Bulletin*, vol. 63, p. 1117-1141.
- Strahler., (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Am. Geophys. Union*, 38: 913-920.
- Strahler A N., (1964). *Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks*, VT Chow (ed), *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw Hill Book Company, New York, 4–11.
- Strahler A N., (1964). *Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks*. *Handbook of applied hydrology*, Ed. Ven Te Chow, 04, 9 – 76.
- Schumm S.A ., (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bull Geol Soc Am* 67:597–646.
- Schumm S. A., (1963). *Geological Society of America Bulletin Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains*, (9). doi:10.1130/0016-7606(1963)74.
- Smith K G., (1950). Standards for grading textures of erosional topography. *Am. J. Sci.*, 248: 655-668
- Schumm, S. A., 1956.- *Evolution of Drainage System and Slope in Badlands of Perth*
- Saaty TL (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Samanta, S., Koloa, C., Pal, D. K., & Palsamanta, B. (2016). Flood risk analysis in lower part of Markham river based on multi-criteria decision approach (MCDA). *Hydrology*, 3(3), 1–13.
- Saaty TL (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
- Samanta, S., Koloa, C., Pal, D. K., & Palsamanta, B. (2016). Flood risk analysis in lower part of Markham river based on multi-criteria decision approach (MCDA). *Hydrology*, 3(3), 1–13
- Smith, A.O. (1991). Succession and failures in post-disaster resettlement. *Disasters*, n°1.
- Seddini A (2019). Démarche méthodologique d'adaptation d'un système de prévision aux risques d'inondation en Algérie, cas du bassin versant de l'Oued Mekerra (N.W Algérien). Thèse de doctorat. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. Faculté De Technologie. Département D'hydraulique. pp 199
- Thomas J, Joseph S, Thrivikramji K.P, Abe. G. (2011). Morphometric analysis of the drainage system and it's hydrological implications in the rain shadow regions, Kerala, India. *J Geographical Sci.* 21(6), pp 1077 – 1088.
- Torterotot, J.P., 1993. le cout des dommages dus aux inondations. Estimation et analyse des incertitudes, thèse de doctorat ENPC en Sciences et techniques de l'environnement.
- Umair A., Syed A A., (2014). Analysis of Drainage Morphometry and Watershed Prioritization of Romushi - Sasar Catchment, Kashmir Valley, India using Remote Sensing and GIS Technology. *International Journal of Advanced Research* (2014), Volume 2, Issue 12, P5-23
- UNISDR: Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (SFDRR), The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Sendai, Understanding disaster risk: foundational concepts and principles <https://www.preventionweb.net/understanding-disaster-risk>, consulté le 25 October 2023 à 10.33h.
- Van Der Leeuw S.E., Ashan Leygonie Ch. (2001). a long-term perspective on resilience in social-natural system, working papers of the santa Fe Institute, n°01-08-042
- Vila J.M. (1980). La chaine alpine d'Algérie Orientale et des confins algéro-Tunisiens. Thèse Sci. Univ. Paris VI. 665p
- Vincy MV, Rajan B, PradeepKumar AP. (2012). Geographic information system based morphometric characterization of sub-watersheds of Meenachil river basin, Kottayam district, Kerala, India. *Geocarto int.* 27(8), pp 661 – 684.
- Wybo, J.-L. (2009). Le retour d'expérience : un processus d'acquisition de connaissances et d'apprentissage. *Economica*.
- Wisner B, Blaikie P, Cannon T, Davis, I. (2004). *at risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*, Londres, Routledge, 2 ed
- Wildi W. (1983). La chaine tello rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du trias au Miocène. *Rev. Géol. Dyn. Géog. Phys.*, (24), 3, pp 201-297.
- Young W.J., Marston F.M. et Davis J.R., 1996. Nutrient exports and land use in Australian catchments. *Journal of environmental management*, 47, 183p.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Yahiaoui A (2012). Inondations torrentielles cartographie des zones vulnérables en Algérie du Nord (cas de l'oued Mekerra, wilaya de Sidi Bel Abbès), Thèse présentée Doctorat, Ecole nationale polytechnique, 185p

Zebiri Abdehamid. Évaluation du risque d'inondation à Constantine : méthodologie d'approche. In: Méditerranée, tome 80, 3-4- 1994. Géographie physique de l'Algérie orientale. pp. 23-30 ; doi : <https://doi.org/10.3406/medit.1994.2855> [https://www.persee.fr/doc/medit\\_0025-8296\\_1994\\_num\\_80\\_3\\_2855](https://www.persee.fr/doc/medit_0025-8296_1994_num_80_3_2855).

Annexe A

Annexe A : Caractéristiques morphométriques des bassins versants (Oued Rhumel, Oued Ziad et Oued Mgharouel)

	Paramètres morphométriques	Formules	Unités	Référence	O. Rhumel	O. Ziad	O. Mgharouel	
Caractéristiques géométriques	Surface (s)	Calculé par ArcGIS	Km <sup>2</sup>	Horton, 1945	5336.79	12.09	9.25	
	Périmètre (P)	Calculé par ArcGIS	Km	Horton, 1945	405.22	16.42	16.95	
Caractéristiques de forme	Indice de Compacité (Kc)		/	Gravelius (1914)	1.57	1.33	1.57	
	Rectangle Equivalent	Longueur (L)	$L = \frac{Kc \times \sqrt{S}}{1.128} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right)$ S: surface du B.V Kc : indice de compacité	Km	Roche (1963)	171.82	6.20	7.11
		Largeur (l)	$l = \frac{Kc \times \sqrt{S}}{1.128} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.128}{Kc} \right)^2} \right)$ S: surface du B.V	Km	Roche (1963)	31.52	1.95	1.30

## Annexe A

			Kc : indice de compacité					
	Rapport d'allongement		$Re = \frac{1.128\sqrt{S}}{L}$ S : surface du B.V L : longueur du rectangle équivalent	/	Shumm (1956)	0.94	0.47	0.52
	Rapport de Circularité		$Rci = \frac{(4 \times \pi \times S)}{p^2}$ S : surface du B.V P : périmètre du B.V	/	Miller (1959)	0.41	0.56	0.4
	Facteur de Forme		$Ff = \frac{S}{(L_{bv})^2}$ S : surface du B.V : Longueur du B.V $L_{bv}$	/	Horton (1945)	0.69	0.17	0.21
Caractéristiques d'altitude	Altitude à 5%		Elle correspond à l'altitude au point 5% de la courbe hypsométrique	m	/	1052	890	940
	Altitude à 95%		Elle correspond à l'altitude au point 95% de la courbe hypsométrique	m	/	377	450	558
	Altitude maximale (Hmax)		Déterminé à partir de la courbe Hypsométrique (hauteur maximal)	m	/	1150	991.61	1091.81
	Altitude minimale (Hmin)		Déterminé à partir de la courbe Hypsométrique (hauteur minimal)	m	/	152	350	537.96
				$H_{moy} = \sum \frac{Ai \times hi}{A}$	m	/	808.95	671.5

## Annexe A

	Altitude Moyenne (Hmoy)	Ai : aire comprise entre deux courbes de niveau en (km <sup>2</sup> ) hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau en (m) A : superficie totale du bassin versant en (Km <sup>2</sup> )					
	Altitude médiane	Elle correspond à l'altitude au point 50% de la courbe hypsométrique	m	/	827	670	698
Caractéristiques du relief	Indice de pente globale (Ig)	$Ig = Du/Leq$ Du : dénivelée utile Leq : longueur du rectangle équivalent	m/Km	/	3.93	7.09	5.37
	Dénivelée utile (Du)	Du= H5 - H95	m	/	975	440	382
	Dénivelée spécifique (Ds)	$Ds = Ig\sqrt{S}$ Ip: indice de pente globale A: surface du B.V	m	/	414.19	246.16	163.34
	Relief du bassin (Rb)	$Rb = H_{max} - H_{min}$ Hmax : hauteur maximale Hmin : la hauteur minimale	m	Hadley et Schumm, 1961	1570	641.61	533.85
	Rapport du relief (Rr)	$Rr = R/L$ R : relief du bassin L : longueur du bv		Schumm, 1963	0.017	0.099	0.085
	Relief relatif (Rr)	$Rr = H \times 100/P$ H : relief du bassin P : périmètre du bassin.		Schumm, 1963	3.87	39.07	33.03

## Annexe A

	Nombre de Rugosité (Rn)	$Rn = H \times Dd/1000$ H : relief du bassin Dd : densité de drainage		Schumm, 1963	0.96	2.62	2.67
Caractéristiques du réseau hydrographique	Ordre du réseau hydrographique	Classification de Strahler		Strahler, 1957	Ordre 7	Ordre 5	Ordre 4
	Longueur du Thalweg principal (Lp)	Calculé par ArcGIS	km	/	158.58	7.46	8.38
	Densité de drainage (Dd)	$Dd = Lx \times S$ Lx : longueur totale des cours d'eaux. S : surface du B.V	Km/Km <sup>2</sup>	Horton, 1945	0.60	4.08	4.77
	Fréquence de drainage F	$F = N/S$ N : nombre total des cours d'eaux de tous les ordres S : surface du bassin versant		Horton, 1945	0.24	16.21	16.65
	Texture de drainage T	$T = N/P$ N : nombre total des cours d'eaux de tous les ordres P : périmètre du bassin versant		Horton, 1945	3.1	11.93	9.09
	Constant Channel maintenance (C)	$C = 1/Dd$ Dd : densité de drainage		Horton, 1945	1.66	0.24	0.21
	Coefficient de Torrentialité (Ct)	$Ct = Dd \times (N/S)$ N : nombre des cours d'eaux d'ordre 1 S : surface du B.V Dd : densité de drainage		Horton, 1945	0.14	48.63	57.78

## Annexe A

Temps de concentration (Tc)	$Tc = \frac{4\sqrt{A \times 1.5 \times Lp}}{0.8\sqrt{Hmoy - Hmin}}$ <p>A : surface du B.V Lp : longueur du thalweg principal Hmoy : altitude moyenne Hmin : altitude minimale</p>	Heur	Giandotti, 1937	25.74	1.85	2.15
Rapport de bifurcation (Rb)	$Rb = \frac{Nu}{Nu + 1}$ <p>Nu : Nombre total des cours d'eau d'ordre "u". Nu+1 : Nombre de segments d'ordre supérieur</p>		Shumm (1956)	3.99	3.48	5.10
Rapport des longueurs (Rl)	$Rl = \frac{Lu}{Lu - 1}$ <p>Lu: Lu-1:</p>		Horton, 1945	449.52	2.18	3.64
Vitesse d'écoulement	$V_R = \frac{Lp}{T_C}$ <p>Lp : Longueur du thalweg principal en (km). Tc : temps de Concentration en (heure).</p>		Podgorski, 2000	4.16	4.53	4.26
Indice de sinuosité (Is)	$Is = L / l$		Greco, 2018	1.47	1.33	0.99

Annexe A

		L : longueur du cours d'eau principal l : longueur de la distance en ligne droite ( pour chaque segment qui a changé direction prencipal)					
--	--	---	--	--	--	--	--

## Flood risk modelling using HEC-RAS and GIS in the semi-urban watershed of Oued Ziad (Constantine, North-Eastern Algeria)

Manel YAKHLEFOUNE<sup>1\*</sup>, Chaouki BENABBAS<sup>2</sup>, Florina GRECU<sup>3</sup>, Abdeldjalil BELKENDIL<sup>4</sup>, Takki-Eddine KHARCHI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Urban Techniques and Environment, Institute of Urban Techniques Management, University of Constantine3, Constantine, Algeria. Geo-prospective, Environment, and Development Laboratory

<sup>2</sup> Territory Planning Research Center, Constantine, Algeria

<sup>3</sup> Department of Geomorphology, Pedology, Geomatics, Faculty of Geography, University of Bucharest, Bucharest, Romania

<sup>4</sup> Department of Hydraulic Engineering, Faculty of Science and Technology, University of Tlemcen, Tlemcen, Algeria. Laboratory 60: Water Resources Valorization

\* Corresponding author: manel.yakhlefoune@univ-constantine3.dz

Received on 03-05-2023, reviewed on 05-06-2023, accepted on 12-06-2023

### Abstract

The study of flood risk in Algerian cities has become essential given the multiple issues at stake (urbanization, urban sprawl, easements, infrastructure, soil structure, etc.), which constitute vulnerable elements, as well as their frequency and repetition in time and space. This has become a problem for the city and the urban environment, particularly in large metropolises such as Constantine. The watershed of Oued Ziad located in the northwestern part of the city of Constantine has experienced exceptional flooding, causing loss of life and property in the Jebli Ahmed agglomeration in the Hamma Bouziane township. The main objective of this research is to identify the factors aggravating the risk of flooding in the Oued Ziad watershed, to analyze the frequency of maximum daily rainfall to determine peak flows for different return periods of 10, 20, 50, 100 and 1000 years, and to map the extent of the flood hazard in the Oued Ziad watershed for a centennial flow, using geographic information systems and HecRas software. The simulation results show the overflow of Oued Ziad on national road N°27, affecting a part of the agglomeration located downstream by a centennial peak flow equal to 50.98 m<sup>3</sup>/s and a water height exceeding 3 m, which confirms the extent of the area exposed to risk during the flood that occurred on 19/9/2018. The field survey shows that several anthropic factors increase the risk of flooding while the capacity of the existing hydraulic structures is insufficient to evacuate water during floods, which requires the development of this watercourse and its banks to protect the population and its property from the risk of flooding and to reduce the impact on the city's environment and socio-economic activities.

**Keywords:** *Constantine, Flood risk, hydrological modelling, geographic information system, Hec-Ras, Oued Ziad watershed*

### Introduction

Natural hazards constitute a real environmental problem, threatening people and their property, the environment, and infrastructure. Among natural hazards, floods constitute one of the world's worst natural disasters causing significant human, material, and economic losses. Over the last decade, there have been multiple investigations carried out utilizing spatial analysis to evaluate flood and sedimentation management in large geographical areas. (Rai and Mohan, 2014; Mătreăță et al., 2016; Grecu, 2016; Grecu et al., 2017; Costache et al., 2020; Jalilzadeh and Behzadi, 2020; Nkwunonwo et al., 2020; Ongdas et al., 2020; Tegenie and Berhe, 2021; Abdelshafy and Mostafa, 2021; Xafoulis et al., 2022), these extreme hydro-climatic events due essentially to the complex interaction and concomitance of several topographical, geological, hydrological and meteorological factors, are often intensified by climate change which

increases their frequency and repetition in time and space (Lasri 2019; Práválie and Costache, 2014). The risk of flooding is not a characteristic of the urban environment. High population density and soil impermeabilization increase the probability of flooding due to urban runoff, especially in areas with steep slopes (Nkwunonwo et al., 2020). In general, flooding is limited to the overflow of water from river beds. In the case of cities, flooding includes the amount of water that appears in public spaces, including water resulting from non-functioning sewage systems.

Flooding has become one of the most frequent and devastating natural disasters in Algeria (Derdour et al., 2017), the country's northern territories being highly threatened by this phenomenon. Indeed, the main physical features as well as the natural characteristics of these territories (aggressive climate, type of fragile plant cover, soil sealing, nature of the hydrographic network (shape, density), tend to favour torrential flows (Grecu, 2018a), which induces the overflowing of wadi beds, thus



Nom et Prénom : YAKHLEFOUNE Manel

Titre : Vulnérabilité et risque d'inondation vers une stratégie de prévention et d'adaptation cas de la ville de Constantine

Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Gestion des techniques urbaines

### Résumé

L'étude du risque d'inondation dans les villes algérienne est devenue indispensable au vu des multiples enjeux qui existent (urbanisation, extension urbaine, servitudes, infrastructures, structure du sol...), ainsi que sa fréquence et sa répétition dans le temps et dans l'espace Ceci est devenu une problématique pour la ville et l'environnement urbain, notamment dans les grandes métropoles telle Constantine qui de par sa situation bordière des oueds, est vulnérable au risque d'inondation, ce qui exige une meilleure connaissance du phénomène en vue d'arriver à des stratégies reposant sur l'idéologie de prévention, d'adaptation et d'atténuation du risque.

Cette étude porte sur la cartographie du risque inondation dans le bassin versant d'Oued Rhumel en utilisant le Processus d'Analyse Multicritère Hiérarchique (Analytical Hierarchy Process « AHP »). Cette approche intégrative permettra d'évaluer les différents facteurs géoenvironnementaux, urbains et structuraux à la fois influençant l'aléa et la vulnérabilité au risque d'inondation pour déterminer les zones a risque dans ce bassin, ensuite nous procéderont à cartographier le risque d'inondation dans les deux bassins versants d'Oued Ziad et Oued Mgharouel par croisement de l'aléa et de la vulnérabilité, ces derniers en été cartographié en utilisant la modélisation hydraulique par logiciel HECRAS en complémentarité avec les systèmes d'informations géographiques (SIG) dans le but de connaître, d'identifier et quantifier la vulnérabilité de la ville de Constantine face au risque d'inondations afin de réduire l'impact de ce dernier sur l'homme et ses bien, ainsi que sur l'environnement et les activités socio-économiques, pour assurer une ville résiliente en se basant sur une stratégie de prévention, d'adaptation et d'atténuation du risque qui s'inscrit dans une logique de développement durable de la ville. Il s'agit ici de proposer des cartes d'aide à la décision par l'élaborer d'un document scientifique et technique.

Mots clés : Gestion du risque, Inondation, Aléa, Vulnérabilité, Prévention, Constantine, SIG, HECRAS

Directeur de thèse : BENABBAS Chaouki - Université Constantine 3

Co-Directrice de Thèse : GRECU Floare – Université de Bucharest Roumanie

Année Universitaire : 2023-2024