

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique  
**Département d'Hydraulique**



Département d'Hydraulique  
Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau  
Mémoire de projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

**Etude d'inondabilité de l'oued Tilghemt pour la protection de  
deux centrales de GENERAL ELECTRIC**

**ZENATI Roufaïda Syrine**

Sous la direction de Mme Saâdia BENMAMAR

Professeur

Présenté(e) et soutenue publiquement le (jj/mm/aaaa)

Composition du Jury :

Président	: M. Salim BENZIADA	MAA	ENP
Promoteurs	: Mme Saâdia BENMAMAR	Prof	ENP
	Mme Nadjoua BOUKADOUM	Chef Manager	GE
Examineurs	: Mme Meriem CHETIBI	MCB	ENP
	M. Nadir ALOUI	Ingénieur/Doctorant	ENP



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique  
**Département d'Hydraulique**



Département d'Hydraulique  
Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau  
Mémoire de projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

**Etude d'inondabilité de l'oued Tilghemt pour la protection de  
deux centrales de GENERAL ELECTRIC**

**ZENATI Roufaïda Syrine**

Sous la direction de Mme Saâdia BENMAMAR

Professeur

Présenté(e) et soutenue publiquement le (jj/mm/aaaa)

Composition du Jury :

Président :	M. Salim BENZIADA	MAA	ENP
Promoteurs :	Mme Saâdia BENMAMAR	Prof	ENP
	Mme Nadjoua BOUKADOUM	Chef Manager	GE
Examineurs :	Mme Meriem CHETIBI	MCB	ENP
	M. Nadir ALOUI	Ingénieur/Doctorant	ENP

## الملخص :

يندمج هذا العمل تحت إطار الفيضانات التي تهدد محطتين لتوليد الكهرباء من شركة جنرال إلكتريك تقعان في جنوب الجزائر، بحاسي الرمل، بولاية الأغواط. فيضانات ناتجة عن قرب المحطتين من واد تلغمت. الغرض من هذا العمل هو تكميم هذه الفيضانات وإيجاد حلول مناسبة لحماية المحطتين من الفيضانات. في هذا العمل، قدمنا مراحل جمع البيانات حتى المحاكاة: -من خلال النتائج التي تم الحصول عليها، للسيناريوهات المختلفة للفيضانات المحتمل حدوثها، من أجل: الكشف عن مناطق الخطر في محطتي الطاقة ووضع الحلول المناسبة لها لحمايتها .

سيأخذ العمل شكله النهائي عبر المراحل التالية:

- أولاً، سيكون من الضروري جمع ما يكفي من البيانات المناخية والتاريخية والمتعلقة بشكل عام بدراستنا الميدانية.  
- ثانياً، يجب تنفيذ توليف هيدرولوجي يسمح بتحديد حدود وخصائص منطقة مستجمعات المياه، التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج QGIS ، وتدفقات الفيضانات وفترات العودة الخاصة بكل منها، من أجل إنشاء لاحقاً هيدروجراف الفيضانات.

**الكلمات المفتاحية:** الفيضانات، DEM، QGIS، RUBAR20، الحل، الحماية، محطات توليد الكهرباء.

## Summary:

This work is part of the floods that threaten two General Electric power plants located in southern Algeria, in Hassi R'mel, in the Wilaya of Leghouat. Floods which are the consequence of the proximity of the two stations to the Ouadi of Tilghemt.

This work aims to: -Collect sufficient climatic, historical, and general data relating to our field study

- Make a hydrological synthesis allowing the determination of the limits and characteristics of the catchment area, obtained using the QGIS software, and of the flood flows and their respective return periods, in order to subsequently construct the flood hydrographs - Build a DEM of the study area, and use the flood hydrographs and data relating to the watershed for the hydrodynamic simulation, carried out with the RUBAR20 software - Determine the areas threatened by floods and the determination of the parameters relating to the establishment of solutions for the protection of the areas in danger of the two power station. Suggest and size adequate solutions for the protection of the two plants against flooding.

**Keywords:** Floods, DEM, QGIS, RUBAR20, solution, protection, power stations.

## Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre des inondations qui menacent deux centrales électriques de General Electric, situées dans le sud Algérien, à Hassi R'mel, dans la Wilaya de Laghouat. Inondations qui sont la conséquence de la proximité des deux stations de l'Oued de Tilghemt.

Ce travail a pour but de : - Récolter suffisamment de données climatiques, historiques, et généralement relatives à notre étude sur le terrain

- Faire une synthèse hydrologique permettant la détermination des limites et caractéristiques du bassin versant, obtenues grâce au logiciel QGIS, et des débits de crues et leurs périodes de retour respectives, pour construire par la suite les hydrogrammes de crue  
- Construire un MNA de la zone d'étude, et utiliser les hydrogrammes de crues et données relatives au bassin versant pour la simulation hydrodynamique, effectuée avec le logiciel RUBAR20 - Déterminer les zones menacées par les crues et la détermination des paramètres relatifs à l'établissement de solutionnements pour la protection des zones en danger des deux centrales – Et Proposer et dimensionner des solutions adéquates pour la protection des deux centrales contre les inondations.

**Mots clés :** Inondations, crues, MNT, QGIS, RUBAR20, solutionnement, protection, centrales.

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail à :

- Ma mère, première femme dans sa famille à finir ses études.
- Mon père, qui m'a toujours poussé de l'avant.
- Ma sœur et mes frères, prunelles de mes yeux.
- Ma grand-mère, qui, en dépit de ne pas avoir fini ses études, a tout fait pour que sa fille -ma mère- réussisse.

Que Dieu les garde tous

## Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du département Hydraulique de l'Ecole nationale Polytechnique, en réponse à la demande de l'entreprise GENERAL ELECTRIC d'effectuer une protection de ces deux centrales de Tilghemt, contre les crues de l'oued portant le même nom.

Je tiens d'abord à remercier chaleureusement ma directrice de mémoire, Mme Benmamar Saâdia, d'abord et avant tout pour ses enseignements au cours des trois dernières années. Ensuite, pour la confiance qu'elle a mise en moi pour effectuer ce travail, et pour laquelle, j'espère avoir été à la hauteur.

Je remercie également Mme Boukadoum Nadjoua, l'enseignante au sein du département Industriel de l'ENP et la Chef Manager au sein de General Electric qui a proposé ce sujet et m'a accompagnée sur le terrain, et qui m'a aidée du mieux qu'elle a pu.

Je suis reconnaissante infiniment envers Mr Gafsi Mustafa, Doyen à l'Université de Laghouat, et Mr Dahmouni Hamza, Directeur de la bibliothèque de l'Université de Laghouat, qui ont mis à ma disposition tous les moyens disponibles pour la collecte des données et la revue de la bibliographie.

Je consacre un remerciement spécial à l'équipe du chantier de la centrale N°01, qui ont rendu mes différents séjours sur le terrain plus qu'agréables, et qui ont fait preuve d'une énorme générosité dans le partage de savoir et de connaissances.

J'aimerais également exprimer ma gratitude à Mr Benziada Salim, Mme Chetibi Meriem, et Mr Aloui Nadir. D'abord, pour avoir été mes enseignants. Ensuite, pour m'avoir fait l'honneur de constituer les membres de mon jury.

Je tiens également à remercier chaleureusement Mr Bouach Ahcene, enseignant à l'université de Saad Dahlab, dans la Wilaya de Blida, pour son aide et son assistance incontestées dans l'utilisation du logiciel RUBAR20.

Enfin, et surtout, j'exprime ma gratitude la plus sincère à tous les enseignants du département Hydraulique, que j'ai eu l'occasion et la chance de connaître lors de mon parcours, et desquels j'ai pu amasser expérience, savoir et un raisonnement critique. Et qui je l'espère, seront plus que fiers de dire qu'ils m'ont eu comme étudiante sous leur aile. Je remercie également du fond du cœur mes camarades, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables et desquels j'ai également beaucoup appris, de par leur sens de l'entraide dans différents travaux que nous avons eu la chance de faire ensemble.

# Table des matières

Liste des photos	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Sigles et acronymes	
Notations.	
Présentation de General Electric	
Introduction Générale.....	16
Chapitre I.....	18
Notions sur les inondations.....	18
Introduction.....	18
1. La crue.....	18
Définition.....	18
2. Les inondations.....	18
2.1. Principales caractéristiques désignant l'aléa "Inondation".....	19
2.1.1. La période de retour "T".....	19
2.1.2. Hauteur et durée de submersion.....	20
2.1.3. Vitesse du courant.....	20
2.1.4. Volume de matière transportée.....	21
3. Types d'inondations.....	22
3.1. Inondations de plaines.....	22
3.2. Inondations par remontées de nappes phréatiques.....	24
3.3. Inondations par crues torrentielles.....	25
3.4. Inondations en milieu urbain.....	25
3.5. Inondations par rupture d'ouvrages ou d'embacle.....	26
3.6. Inondations marines.....	27
Conclusion.....	28
Chapitre II.....	29
Présentation de la zone d'étude et ses caractéristiques.....	29
Introduction.....	29
1. Description des Stations électrique de Hassi Rmel.....	30
2. Constat par rapport à notre zone d'étude et ses caractéristiques.....	32
3. Historique des inondations.....	33
3.1. En Algérie.....	33
3.2. Dans la Wilaya de Laghouat.....	34
Conclusion.....	38

Chapitre III .....	39
Synthèse hydrologique du bassin versant de l'oued de Tilghemt .....	39
Introduction.....	39
1. Notions Générales.....	39
1.1. Bassin versant.....	39
1.2. Bassins de rétention .....	39
1.3. Les écoulements peu profonds .....	40
1.4. Système d'Information Géographique .....	40
2. Détermination des débits de crue pour l'oued de Tilghemt .....	42
2.1. Description du bassin versant de l'oued Tilghemt et analyse .....	43
2.2. Calcul des caractéristiques morphométriques et hydrographiques.....	44
2.2.1. Largeur moyenne .....	45
2.2.2. Coefficient d'allongement .....	45
2.2.3. Indice de forme appelé indice de compacité de Gravelius.....	45
2.2.4. Longueur et largeur du rectangle équivalent .....	46
2.2.5. Relief .....	47
2.2.6. Pentes .....	49
2.3. Caractéristiques hydrographiques.....	50
2.3.2. Classification de Strahler .....	50
2.3.3. Profil en long de l'oued principal .....	51
3. Caractéristiques climatiques.....	52
3.1. Humidité relative .....	54
3.2. Vent.....	54
3.3. Précipitations .....	56
3.4. Ajustement des précipitations à une loi de probabilité .....	56
4. HYFRAN+ .....	58
5. Etude des crues .....	59
5.1. Calcul des débits et détermination des hydrogrammes de crue par la méthode de SOKOLOVSKI.....	60
5.2. Hydrogrammes de crue .....	61
Chapitre 4 .....	66
Simulation Hydraulique du cours d'eau.....	66
1. La Mécanique Des Fluides Numérique.....	66
1.2. Les modèles numériques en MDFN .....	67
1.2. Les logiciels de modélisation hydraulique .....	68
2. Équations de la modélisation et de la résolution des problèmes de la MDF.....	70
2.1. Les équations de Navier-Stokes .....	70
2.2. Les équations de Saint-Venant.....	73

Chapitre 5 .....	80
Ouvrages de Protection contre les inondations et solutionnement .....	80
1. OPIs .....	80
1.1. Digue de protection .....	80
1.2. Systèmes de gestion et d'évacuation des eaux pluviales .....	82
1.3. Murs anti-inondations .....	82
1.4. Aménagement des canaux .....	83
1.5. Les bassins de rétention .....	83
1.6. Les ouvrages de dérivation des eaux .....	84
1.7. Les barrières mobiles .....	84
1.8. Les systèmes de pompage .....	84
1.9. Systèmes de gestion des urgences .....	85
1.10. Assurance inondation .....	85
1.11. Systèmes d'alerte précoce .....	85
1.12. Aménagement du territoire .....	85
1.13. Solutionnement .....	85
2. Choix des OPIs .....	85
3. Dimensionnement du mur de protection .....	86
3.1. Renversement .....	87
3.2. Glissement .....	88
4. Volume des excavations .....	88
Références Bibliographiques .....	90
WEBOGRAPHIE .....	90

## Liste des photos

Photo 1-1 :	Exemple d'inondation de plaine (oued de Tilghemt avec un ruissellement suite à des averses)	25
Photo 2-1 :	Emplacement des deux centrales électriques au niveau national	32
Photo 2-2 :	Les deux centrales de GE, l'ancienne route nationale N°01, et la nouvelle route nationale N°01 (construite en 2015)	32
Photo 2-3 :	Nature rocheuse du lit du cours d'eau	34
Photo 2-4 :	Des eaux qui ruissellent dans une zone habituellement sèche, périphérique aux centrales	37
Photo 2-5 :	Submersion d'une piste au cœur de la centrale 1	37
Photo 2-6 :	Submersion partielle de l'ancienne route -Nationale N°01	38
Photo 2-7 :	Inondation d'une zone dans la centrale 1 (l'emplacement des lignes d'arbres de la centrale N°01 est à la gauche de la photo)	38
Photo 2-8 :	Ampleur des inondations dans la centrale 1	39
Photo 4-1 :	Evolution de l'inondation (après 500 minutes de son début)	74
Photo 4-2 :	Evolution de l'inondation (après 722 minutes de son début)	75
Photo 4-3 :	Evolution de l'inondation (après 1242 minutes de son début)	75
Photo 4-4 :	Evolution de l'inondation (après 1540 minutes de son début)	76
Photo 4-5 :	Evolution de l'inondation (après 1789 minutes de son début)	76
Photo 4-6 :	Evolution de l'inondation (après 2776 minutes de son début)	77
Photo 4-7 :	Evolution de l'inondation (après 4500 minutes de son début)	77
Photo 5-1 :	Système de captage et distribution des eaux de pluies dans la vallée du M'zab, Ghardaïa	81
Photo 5-2 :	Le « Pittman North Detention Basin » 100 -ème bassin de rétention de la ville de Las Vegas	83

## Liste des tableaux

Tableau 2-1 :	Historique des inondations dans la périphérie de l'Oued de Tilghemt	37
Tableau 3-1 :	Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued: Tilghemt	48
Tableau 3-2 :	Répartition Hypsométrique du bassin versant de Tilghemt	49
Tableau 3-3 :	Répartition altimétrique des superficies du bassin versant de l'Oued Tilghemt	50
Tableau 3.4 :	Calcul de l'indice de pente de ROCHE	51
Tableau 3-5 :	Classification de Strahler et de Horton de la chevelure de l'oued Tilghemt	52
Tableau 3-6 :	Récapitulatif des caractéristiques du bassin versant de la zone d'étude	53
Tableau 3-7 :	Répartition mensuelle des températures moyennes à Hassi R'mel [worldclim.org]	55
Tableau 3-8 :	Humidité relative à Hassi R'mel [worldclim.org]	56
Tableau 3-9 :	Moyennes mensuelles de l'évaporation Laghouat (1973-1980) [Azioune, 2022]	57
Tableau 3-10 :	Pluie moyenne annuelle [power.larc.nasa.gov]	58
Tableau 3-11 :	Pluies journalières maximales à Hassi R'mel de 1981 à 2023 [power.larc.nasa.gov]	53
Tableau 3-12 :	Récapitulatif des résultats obtenus avec les différents ajustements statistiques utilisés (Gumbel, Lognormal, Pearson III, et Gamma) en utilisant le logiciel HYFRAN	58
Tableau 3-13 :	Pluies fréquentielles dans la zone du bassin versant de l'oued Tilghemt	61
Tableau 3-14 :	Débits de crue pour les périodes de retour 10ans, 50 ans, et 100ans	62
Tableau 3-15 :	Hydrogramme de crue pour T=10ans	63
Tableau 3-16 :	Hydrogramme de crue pour T=50ans	64
Tableau 3-17 :	Hydrogramme de crue pour T=100ans	64
Tableau 3-18 :	Hydrogramme de crue pour T=200ans	65

## Liste des figures

Figure 3.1 :	MNA du bassin versant de l'oued de Tilghemt	46
Figure 3.2 :	Ligne de partage des eaux délimitant le bassin versant de Tilghemt – en rouge- et son chevelu hydrographique -en bleu-	47
Figure 3.3 :	Répartition hypsométrique du bassin versant de Tilghemt	50
Figure 3.4 :	Profil en long de l'oued principal de Tilghemt	54
Figure 3.5 :	Vitesses du vent mensuelles à Hassi R'mel (worldclim.org)	58
Figure 3.6 :	Hydrogrammes de crues pour les différentes périodes de retour 10ans, 50ans, 100ans et 200ans	67

## Sigles et acronymes

**ESRI** : Environmental Systems Research Institute (Institut de recherche sur les systèmes environnementaux)

**INRAE** : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

**MDF** : Mécanique Des Fluides

**MDFN** : La Mécanique des Fluides Numérique

**MNA** : Modèle Numérique d'Altitude.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain.

**OPI** : Outils de Protection contre les Inondations

**QGIS** : Quantum Geographical Information System

**SAGA** : System for Automated Geoscientific Analysis (Systèmes d'Analyses Géographiques Automatiques)

**SIG** : Système d'Information Géographique

**SL** : Surface Libre

**SRTM** : Shuttle Radar Topography Mission/ Mission topographique du Radar de la Navette

**USGS** : United States Geological Survey (Service géologique des États-Unis)

**WHO** : World Health Organization (Organisation Mondiale de la Santé).

## Notations

$A_h$  Coefficient de diffusion ( $m^2/s$ ) ;

$F_x$  : Force externe dans la direction x (N) ;

$f$  : Paramètre de Coriolis ( $N.s/m$ ) ;

$F_y$  : Force externe dans la direction y (N) ;

$F_z$  : Force externe dans la direction z (N) ;

$g$  : Champ de vecteurs de l'accélération gravitationnelle ( $m/s^2$ ) ;

$h$  : Profondeur d'eau (m) ;

$p$  : Pression (Pa) ;

$t$  : Temps (s) ;

$u$  : Champ de vecteurs de vitesse du fluide (m/s)

$u$  et  $v$  : composantes du vecteur vitesse moyenne  $\vec{u}$  dans les directions x et y respectivement (m/s) ;

$U$  : Composante du champ de vecteurs de vitesse dans la direction x (m/s) ;

$V$  : Composante du champ de vecteurs de vitesse dans la direction y (m/s) ;

$W$  : Composante du champ de vecteurs de vitesse dans la direction z (m/s) ;

$Z_s$  et la dénivellation de la surface libre d'eau ;

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide (Pa.s) ;

$\rho$  : Masse volumique du fluide ( $Kg/m^3$ ) ;

$\tau_{fx}$  et  $\tau_{fy}$  Composantes du vecteur contrainte  $\vec{\tau}_f$  dans la direction x et y respectivement ;

$\tau_{sx}$  et  $\tau_{sy}$  Composantes du vecteur  $\vec{\tau}_s$  contrainte dues au vent en surface dans la direction x et y respectivement ( $N/m^2$ ) ;

$\partial$  : Opérateur représentant la dérivée partielle ;

$\nabla$  : Opérateur nabla représentant le gradient ;

## Présentation de General Electric

General Electric (GE) est une multinationale qui opère dans divers secteurs, notamment l'aviation, la santé, les énergies renouvelables, l'électricité et la technologie numérique. Elle a été fondée en 1892 et a son siège social à Boston, dans le Massachusetts, aux États-Unis d'Amérique. La production et la distribution fiables et optimales d'énergie électrique sont une préoccupation de premier ordre dans de nombreux pays, y compris en Algérie. Sonelgaz, la compagnie nationale d'électricité et de gaz, joue un rôle essentiel dans la fourniture d'électricité aux citoyens et aux industries du pays.

Ce qui distingue GE de ses homologues américains, c'est sa vaste expérience dans le domaine de l'innovation. Depuis l'invention de l'ampoule à incandescence par Thomas Alva Edison et le regroupement de ses différentes activités sous le nom d'une seule entreprise, « l'Edison General Electric Company ». GE a toujours été à l'avant-garde des avancées technologiques et techniques, ouvrant la voie à des innovations et percées révolutionnaires qui ont profondément transformé la société à travers le temps.

En se focalisant sur neuf secteurs d'activités distincts et en capitalisant sur quatre transformations technologiques essentielles. GE a apporté des contributions exceptionnelles au progrès. Son engagement indéfectible en faveur de l'innovation a eu des répercussions mondiales sans précédent et continuera de façonner un avenir prometteur pour le monde.

GE s'est positionné comme un leader incontesté en mettant l'accent sur des domaines clés tels que l'énergie, l'aéronautique, la santé, les transports et bien d'autres. Grâce à sa recherche et à son développement incessant. GE a introduit des technologies novatrices qui ont amélioré la vie des individus, stimulé le progrès économique et favorisé le bien-être social.

L'engagement de GE envers l'innovation se manifeste également par sa contribution significative aux progrès technologiques dans des domaines tels que l'électrification, l'automatisation, et la numérisation. Grâce à ces transformations, GE a non seulement repoussé les limites de la science et de la technologie, mais a également ouvert de nouvelles perspectives pour un monde plus connecté, plus efficace et plus durable.

Ainsi, GE se distingue par son héritage d'innovation et son engagement continu à repousser les frontières de la technologie. Sa vision audacieuse et sa capacité à anticiper les besoins futurs ont fait de GE un acteur majeur de l'évolution technologique mondiale, contribuant ainsi à façonner un avenir meilleur pour l'humanité tout entière.

Dans le cadre de la demande énergétique indéfiniment croissante des différents secteurs et pour pouvoir augmenter la capacité de production d'électricité capable de répondre à cette demande, Sonelgaz développe actuellement la centrale électrique de Tilghemt 1 et Tilghemt

2 (Celui de Tilghemt 2 étant complété à 98%), des projets de centrales à gaz de MW. GE International a conclu un accord d'ingénierie, d'approvisionnement et de construction avec SPE, une filiale de Sonelgaz, pour la mise en place des centrales électriques à gaz à Hassi R'mel, La centrale utilisera une configuration à cycle ouvert et devrait avoir une capacité d'environ 780 MW.

### **Les divisions principales de GENERAL ELECTRIC**

Dans le cadre de diversification du portefeuille d'activités de GENERAL ELECTRIC, GE Vernova, GE Aerospace et GE Healthcare apportent chacun une expertise et une innovation uniques à leurs industries et champs respectifs.

#### **GE VERNOVA**

GE VERNOVA à la vision commune de façonner un avenir énergétique différent, ce qui nécessite une approche différente, défi qu'elle se promet de relever avec détermination et de tout cœur. En tirant parti des ressources, de l'expertise et de l'état d'esprit avant-gardiste de l'entreprise. GE VERNOVA aspire à créer un monde propulsé par l'énergie durable et laissant un impact positif durable sur les générations actuelles et futures. Ils visent à électrifier le monde tout en contribuant activement aux efforts de décarbonisation, reconnaissant l'urgence de faire face à la crise climatique. Cette mission est ancrée dans le nom de la division :

"Ver" / "verde" désigne les écosystèmes verdoyants et luxuriants de la Terre, "Nova", du latin "novus", fait référence à une nouvelle ère innovante d'énergie à faible émission de carbone que GE Vernova contribuera à offrir. [[www.governova.com](http://www.governova.com)]

Représentant l'héritage de l'entreprise, son lien avec les écosystèmes de la terre et leur engagement à inaugurer une ère innovante d'énergie à faible émission de carbone. Collectivement, puisque l'énergie nécessaire est disponible, il est possible d'initier un changement profond et façonner un avenir meilleur pour tous. En résumé, GE Vernova est entièrement dédié à l'accélération de la transition vers des solutions énergétiques fiables, abordables et durables.

#### **GE AEROSPACE**

GE Aerospace est largement reconnu à l'échelle mondiale en tant que principal fournisseur de moteurs à réaction et de turbopropulseurs, ainsi que de systèmes intégrés spécifiquement conçus pour répondre à diverses applications aéronautiques. Leur expertise concerne également les avions commerciaux, militaires, d'affaires et l'aviation en générale. La mission de GE AEROSPACE consiste à développer des technologies de moteur innovantes

qui améliorent l'efficacité énergétique et les performances globales des moteurs d'avion, contribuant ainsi à faire progresser l'industrie aéronautique.

En tant que leader de l'industrie, ils s'engagent à repousser les limites de l'innovation dans le domaine des moteurs aéronautiques. Ils investissent continuellement dans la recherche et le développement pour proposer des solutions de pointe qui répondent aux exigences les plus strictes en matière de performance, de fiabilité et de durabilité, et leur objectif est de propulser l'industrie aéronautique vers de nouveaux horizons en fournissant des moteurs puissants, efficaces et respectueux de l'environnement.

## **GE HEALTHCARE**

GE Healthcare jouit d'une reconnaissance mondiale en tant que fournisseur de premier plan de technologies médicales, offrant des solutions complètes dans les domaines de l'imagerie, du diagnostic et de la recherche en sciences de la vie. GE Healthcare se consacre à la transformation de la prestation des soins de santé en fournissant des technologies, des équipements et des services médicaux de pointe. Sa mission consiste à améliorer les résultats pour les patients, à renforcer les capacités de diagnostic et à accroître l'accès à des soins de santé de qualité grâce à des solutions innovantes.

Au fil des ans, General Electric a été impliqué dans le développement et la fabrication d'une large gamme de produits, notamment des locomotives, des turbines, des éclairages, des appareils et des équipements industriels. Plus récemment, la société a également fait des progrès dans des domaines tels que les solutions numériques, l'analyse de données et l'automatisation industrielle.

Il convient de noter que bien que GE dispose d'un portefeuille d'activités vaste et diversifié, il a subi diverses transformations et efforts de restructuration ces dernières années pour rationaliser ses opérations et se concentrer sur ses activités principales.

L'objectif nouvellement défini de GE est :

« We rise to the challenge of building a world that works».

« Nous relevons le défi de construire un monde qui fonctionne

## Introduction Générale

L'extraction et le traitement du gaz naturel à Hassi R'Mel ont joué un rôle crucial dans le développement économique de la Wilaya de Laghouat et de l'Algérie dans son ensemble. Le champ gazier de la ville, connu sous le nom de champ Hassi R'Mel, a joué un rôle déterminant dans la fourniture de ressources énergétiques à usage domestique et dans le soutien de la position de l'Algérie en tant que grand exportateur de gaz. Bien que Hassi R'Mel ne soit pas un grand centre urbain, son importance réside dans sa contribution au secteur énergétique algérien et son rôle de plaque tournante pour la production et le traitement du gaz. Elle met en valeur l'importance de la Wilaya de Laghouat dans le paysage économique Algérien et sert de porte d'entrée pour explorer les magnifiques paysages désertiques du Sahara.

Parmi les plus importants oueds dans la wilaya de Laghouat, citons :

1. Oued M'zi : C'est l'un des principaux oueds de la wilaya de Laghouat. Il prend sa source dans les monts du Djebel Amour et traverse la ville de Laghouat avant de se diriger vers le sud-ouest.
2. Oued Chélif : Bien que l'Oued Chélif ne soit pas exclusivement situé dans la wilaya de Laghouat, il mérite d'être mentionné car il traverse plusieurs wilayas, y compris Laghouat dans lequel on retrouve un de ses tronçons. Il est l'un des plus longs oueds d'Algérie (le plus long avec une longueur de 733 km) et prend sa source dans les montagnes de l'Atlas saharien et son embouchure se trouve près de la ville de Mostaganem dans la mer Méditerranée.
3. Oued Messaad : Cet oued traverse la ville de Messaad, ville qui lui a donné son nom. Il est alimenté par plusieurs affluents et est très important pour l'agriculture locale et régionale.

En ce qui concerne Hassi R'mel. Il y existe plusieurs oueds -où lits de rivières temporaires- qui contribuent à l'écoulement des eaux dans la région désertique. Les oueds situés à proximité de Hassi R'Mel sont :

1. Oued El Abtal : Cet oued est à l'ouest de Hassi R'Mel, Il traverse les zones désertiques de la région et peut être actif pendant les périodes de pluie ou lors de la fonte des neiges des montagnes environnantes.

2. Oued Rhoufi : Situé à l'est de Hassi R'Mel, cet oued joue un rôle important dans le drainage des eaux de la région. Il peut être alimenté par les précipitations et les eaux de ruissellement provenant des zones environnantes.
3. Oued Draa : Bien que l'Oued Draa ne soit pas directement adjacent à Hassi R'Mel, il est l'un des plus longs et importants oueds d'Algérie et mérite d'être mentionné car il traverse la région voisine, celle de Ghardaïa. Il s'étend sur des centaines de kilomètres et est alimenté par plusieurs affluents tout au long de son parcours.

Tous ces oueds peuvent varier considérablement en termes d'écoulement et de présence d'eau en fonction des conditions météorologiques. Dans un environnement désertique, ils peuvent être généralement secs et s'activer uniquement pendant les périodes de précipitations, et surtout, aussi surprenant que ça puisse paraître, ces oueds quoique désertiques, ont la capacité de causer des inondations très importantes dans les zones désertiques, causant des dégâts considérables lors de leur occurrence. Parmi les oueds qui peuvent s'avérer être problématiques, celui qui nous intéresse est celui de Tilghemt, il est situé dans la commune de Hassi R'mel, et comme les autres cours d'eau régionaux, on peut observer un problème de crue à chaque saison humide. Crues qui causent d'importantes inondations [Rechachi, 2017].

La méthodologie adoptée est la suivante :

Dans le premier chapitre, les notions de bases sur les inondations : Leurs caractéristiques et leurs types, et quelques définitions de base ont été introduites.

Dans le second chapitre, la présentation de la zone est abordée, ses propriétés énoncées. Le recueil historique des inondations dans la région est établi, avec quelques photos pour illustrer les différentes occurrences de ces phénomènes. Enfin, à partir de cela, les types d'inondations qui caractérisent la zone sont tirés.

Dans le troisième chapitre, une synthèse hydrologique est effectuée dans le but de déterminer les débits de crues et les périodes de retours qui nous intéressent, et leurs hydrogrammes de crue équivalente.

Dans le quatrième chapitre, la simulation hydrodynamique des inondations de période de retour choisie dans le cours d'eau est effectuée. Les caractéristiques de la vague de crue sont déterminées, et les zones les plus menacées par l'inondation sont identifiées.

Dans le cinquième chapitre, les différents types d'ouvrages de protection contre les inondations sont présentés et un certain nombre de solutions est proposé pour la protection des centrales électriques.

# Chapitre I

## Notions sur les inondations

### Introduction

Avant d'entamer l'étude d'inondabilité, la définition de la crue, de l'inondation, et des principaux types d'inondations et de leurs caractéristiques s'impose.

### 1. La crue

Beaucoup d'hydrauliciens, d'hydrologues et d'autres spécialistes et de praticiens ignorent la définition exacte du terme « crue ». Cette dénomination vocable est souvent mal comprise, utilisée à tort et à travers, et confondue avec le terme « inondation ». Quel est donc sa définition ?

#### Définition

La crue est l'augmentation du débit d'eau qui s'écoule dans une rivière et peut affecter l'ensemble du lit majeur. De nombreux géographes et hydrologues considèrent qu'une rivière est en crue lorsque son débit est trois à cinq fois supérieur à son débit moyen. De manière pratique, on considère qu'une rivière est en crue lorsque les débits deviennent significatifs par rapport à son débit habituel. La crue critique est dite, lorsque son débit peut entraîner des inondations dans les zones riveraines.

Une crue se caractérise par son hydrogramme, un graphique qui montre les variations de débit au fil du temps. Plus précisément, la partie ascendante de l'hydrogramme est appelée "la crue", tandis que la partie descendante est appelée "la décrue". Une crue est définie par différents critères tels que son origine, sa durée, sa fréquence, son débit maximal et son volume [Salomon, 1997].

### 2. Les inondations

Le terme « inondation » est un terme météorologique souvent utilisé, et ce depuis l'antiquité. La première notion du genre a été mentionnée dans les textes religieux anciens, notamment dans la bible, à travers la mention du déluge. Les mentions et observations les plus récentes ont quant à elles vu le jour avec l'apparition des civilisations modernes. Il y a plusieurs récits historiques relatant les inondations qui se sont produites dans la vallée du Nil, certains remontent à 5000 ans A.C. D'autres récits témoignent également d'inondations qui ont eues lieu en Mésopotamie, ceux-ci remontent à 3000 ans AC.

Les inondations ont donc toujours été au cœur des préoccupations majeures des civilisations modernes. Il convient donc de bien définir ce terme.

**Étymologie** : Le mot inondation vient du latin “inundatio” qui signifie submersion.

**Définition** : Les inondations sont le phénomène météorologique le plus répandu dans le monde, elles définissent le phénomène qui consiste en la submersion de terres et de zones habituellement sèches (non submergées).

Le risque d'occurrence du phénomène est déterminé par deux facteurs, à savoir l'aléa et la vulnérabilité. L'aléa peut être défini comme la probabilité de survenance d'un phénomène physique. Par exemple, le débit centennal est défini comme le débit qui a une chance sur cent d'être dépassé au cours d'une seule année. Ses caractéristiques comprennent son intensité, son étendue, sa fréquence et sa durée. Quant à la vulnérabilité, elle désigne les personnes, les biens et les activités qui sont susceptibles de subir des dommages lorsque l'aléa se produit.

On peut alors décrire l'inondation comme le phénomène ou une zone qui est ordinairement sèche et hors-submersion, devenue inondée partiellement ou totalement par une submersion qui peut être lente ou rapide. Le risque d'inondation étant le fruit de deux composantes : L'eau qui peut déborder de son lit habituel -lit mineur- et l'homme qui s'installe dans l'espace appelé espace alluvial et qui décrit toutes les terres qu'un cours d'eau peut potentiellement inonder -lit majeur-. L'importance d'une inondation dépend de différents paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse de courant et la durée de la crue. Paramètres conditionnés par la précipitation et par l'état du bassin versant et des caractéristiques de son cours d'eau, paramètres qui peuvent être modifiés, voir, aggravés par la présence et les différentes activités humaines [Cortes, 2006 ; Merabet, 2006].

## **2.1. Principales caractéristiques désignant l'aléa “Inondation”**

Quatre paramètres sont indispensables pour désigner l'aléa inondation.

### **2.1.1. La période de retour “T”**

La période de retour d'une inondation fait référence à l'intervalle de temps moyen entre les occurrences d'une ampleur ou d'une gravité spécifique d'un événement d'inondation à un endroit particulier, Il s'agit d'un concept statistique utilisé pour estimer la probabilité qu'une inondation d'une certaine ampleur se produise au cours d'une année donnée. La période de retour est souvent exprimée en années et est calculée sur la base de données historiques ou d'analyses statistiques d'enregistrements d'inondations. Par exemple, si une inondation a une période de retour de 100 ans, cela signifie qu'en moyenne, une inondation d'une ampleur similaire devrait se produire une fois au moins tous les 100

ans à cet endroit. Il est important de noter que la période de retour ne garantit pas qu'une inondation se produira exactement à l'intervalle spécifié. Il s'agit d'une probabilité statistique qui aide à évaluer le risque et à planifier les mesures d'atténuation des inondations. De plus, l'exactitude des estimations de la période de retour dépend de la qualité et de la longueur des données historiques disponibles pour l'analyse.

### **2.1.2. Hauteur et durée de submersion**

La hauteur et la durée de submersion lors d'une inondation peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment l'intensité et la durée des précipitations, la topographie de la zone, la capacité des systèmes de drainage et les caractéristiques de la rivière ou du plan d'eau concerné. Voici quelques points généraux à considérer : Hauteur de submersion : La hauteur de submersion fait référence à la distance verticale entre le niveau de l'eau lors d'une inondation et le sol ou le point de référence. Elle peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres, selon la gravité de l'inondation. Dans les zones basses ou les zones mal drainées, la hauteur de submersion peut être plus élevée. Durée de submersion : La durée de submersion fait référence à la durée pendant laquelle une zone reste sous l'eau pendant une inondation. Elle peut aller de quelques heures à plusieurs jours voire semaines, selon le débit de l'eau, le volume des précipitations et l'efficacité des systèmes de drainage. La hauteur et la durée de la submersion peuvent avoir des impacts significatifs sur la zone touchée et ses habitants. Des niveaux d'eau plus élevés et une submersion prolongée peuvent entraîner des dommages plus graves aux infrastructures, aux bâtiments et aux cultures, ainsi que des risques pour la sécurité et la santé humaine. Il est important de noter que la hauteur et la durée de la submersion peuvent varier considérablement en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque inondation. Les autorités locales, les agences hydrologiques et les organisations de gestion des inondations surveillent et évaluent généralement ces facteurs pour fournir des prévisions et des avertissements d'inondation précis aux communautés touchées [Merabet, 2006].

### **2.1.3. Vitesse du courant**

La vitesse du courant fait référence à la vitesse à laquelle l'eau s'écoule lors d'une inondation, La vitesse peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment le gradient ou la pente du terrain, le volume et l'intensité des précipitations, la taille de la zone de drainage et les caractéristiques de la rivière ou du plan d'eau concerné. En général, la vitesse d'une inondation peut varier de relativement lente à rapide. Les crues lentes peuvent avoir des vitesses de quelques centimètres par seconde, tandis que les crues rapides peuvent atteindre des vitesses de plusieurs mètres par seconde. Les crues éclair, qui se caractérisent par leur apparition soudaine et leur forte intensité, ont souvent des vitesses extrêmement

rapides, à titre d'exemple, à partir de 0,5 m/s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec le risque d'être emporté par les flots ou d'être gravement blessé par un objet charrié par le courant. La vitesse d'une inondation est un facteur important à prendre en compte lors de l'évaluation des dommages potentiels et des risques associés à l'inondation. Des vitesses plus élevées peuvent entraîner une puissance plus érosive, entraînant le déplacement des sédiments, l'érosion des berges et des dommages accrus aux infrastructures et aux biens, dans le cas des inondations désertiques, une vitesse plus élevée signifie le déplacement d'apports importants de sable. Il est important de noter que la vitesse d'une inondation peut varier dans différentes sections d'une rivière ou d'un plan d'eau. Elle est généralement plus élevée dans le chenal principal que dans les zones de plaine inondable, où l'eau peut s'étaler et ralentir, Les autorités locales et les agences hydrologiques mesurent et surveillent souvent les vitesses d'inondation pour mieux comprendre et prévoir le comportement des eaux de crue et pour éclairer les efforts d'intervention d'urgence.

#### **2.1.4. Volume de matière transportée**

Le volume de matériaux transportés lors d'inondations peut varier considérablement en fonction des caractéristiques de l'inondation, telles que l'intensité et la durée des précipitations, la taille du bassin versant, la pente du terrain et le type de sol et de végétation présents. Lors d'une inondation, l'eau agit comme une puissante force érosive, capable de ramasser et de transporter des sédiments, des débris et d'autres matériaux. Le volume de matériaux transportés peut comprendre des particules de sol, des roches, de la végétation et des débris d'origine humaine. Le volume de matériaux transportés lors d'une crue est généralement quantifié en termes de décharge de sédiments ou de charge de sédiments. Le rejet de sédiments fait référence à la quantité de sédiments transportés par l'eau qui coule, généralement mesurée en volume par unité de temps (par exemple, mètres cubes par seconde). La charge sédimentaire fait référence à la quantité totale de sédiments transportés pendant toute la durée de l'inondation. Le volume de matériaux transportés lors des crues peut avoir des implications importantes pour la géomorphologie des cours d'eau et des masses d'eau. Cela peut entraîner une érosion des berges, des dépôts dans les zones inondables et des changements dans la morphologie des canaux. Un transport excessif de sédiments peut également affecter la qualité de l'eau, les écosystèmes aquatiques et les infrastructures humaines. La surveillance et l'étude du volume de matériaux transportés lors des inondations sont importantes pour comprendre la dynamique des systèmes fluviaux, évaluer les risques liés aux sédiments et mettre en œuvre des stratégies efficaces de gestion des inondations. Ces informations peuvent aider à concevoir des mesures appropriées de contrôle des sédiments, des plans de gestion des plaines inondables et des initiatives de

contrôle de l'érosion. Dans le cas des inondations désertiques, le sable cause un problème colossal puisqu'il est entraîné par les flots, constituant un volume de matière transportée très important. Plus encore, son mélange à l'eau transforme celle-ci en boue lourde, dense et visqueuse qui emporte tout sur son passage, et qui est capable de noyer le meilleur des nageurs.

### **3. Types d'inondations**

Le phénomène générateur d'une inondation peut soit être la pluie dont l'intensité dépasse la capacité d'absorption du sol donné. Dans ce cas, il sera question de classer et distinguer les inondations provoquées par des crues à cinétique lente ou à cinétique rapide. Les crues à cinétique lente sont les :

- Inondations de plaines,
- Remontées de nappes phréatiques.

Les crues à cinétique rapide quant à elles peuvent être des :

- Crues torrentielles,
- Ruissellements.

Si la pluie n'y est pour rien dans une inondation, deux autres cas peuvent se présenter. Le premier consiste en les circonstances locales souvent reliées à l'activité humaine, qui, combinées à d'autres paramètres météorologiques peuvent causer une inondation, comme par exemple dans le cas de rupture d'une digue. Le deuxième cas, en dehors des pluies exceptionnelles et des circonstances locales, est l'action des mers (marées). On peut également identifier un quatrième cas d'inondations qui survient lors d'événements de tempêtes tropicales dans le monde, il peut être considéré comme un cas à part ou comme une combinaison des cas précédents [Ledoux, 2006].

Pour pouvoir par la suite identifier à quel type(s) d'inondation(s) nous avons affaire par la suite, il est indispensable de souligner les caractéristiques de chaque type d'inondation :

#### **3.1. Inondations de plaines**

Les inondations de plaines font référence aux événements d'inondation qui se produisent dans les zones basses, généralement caractérisées par un terrain plat ou en pente douce. Ces zones sont souvent adjacentes à des rivières, des lacs ou des régions côtières, où la terre est susceptible d'être inondée pendant les périodes de hauts niveaux d'eau. Elles sont communes dans les bassins versants moyens à grands (supérieur à 500 km<sup>2</sup>). Les caractéristiques des inondations des basses terres comprennent :

- Emplacement : les inondations de plaines produisent principalement dans les zones à faible gradient d'altitude, telles que les plaines inondables, les plaines côtières et les régions de delta. Ces zones sont plus sujettes aux inondations en raison de leur proximité avec les plans d'eau et de leur topographie relativement plate, qui permet à l'eau de se répandre sur une plus grande surface.
- Variation saisonnière : Les inondations des basses terres peuvent se produire au cours de différentes saisons, selon les conditions climatiques et hydrologiques de la région, Ils peuvent être associés à de fortes pluies, à la fonte des neiges, à des tempêtes tropicales ou à des ondes de marée dans les zones côtières.
- Cinématique : Les inondations des basses terres ont souvent un début lent, les niveaux d'eau augmentant progressivement sur une longue période. Cette lente augmentation est due à l'importance du bassin versant et au temps nécessaire à l'eau pour s'écouler en aval. Par conséquent, les inondations de plaine peuvent persister pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines.
- Hauteur de l'eau peu profonde : Dans les inondations des basses terres, l'eau est généralement peu profonde, bien qu'elle puisse varier en fonction de l'ampleur de l'inondation. L'eau se répand sur une vaste zone, ce qui donne une hauteur relativement uniforme à travers la plaine inondable.
- Transport et dépôt de sédiments : Les crues des basses terres transportent souvent une quantité importante de sédiments, qui peuvent se déposer sur la plaine inondable à mesure que l'eau ralentit. Ce dépôt de sédiments peut contribuer à la fertilité des sols et à la formation de terres agricoles fertiles.
- Impact : Les inondations des basses terres peuvent avoir des impacts importants sur les infrastructures, y compris les routes, les ponts et les bâtiments, ainsi que sur les activités agricoles. La présence prolongée d'eau peut endommager les cultures, perturber les réseaux de transport et causer des dommages structurels aux bâtiments.
- Impact et importance écologique : Quoique désastreuses pour l'homme, les inondations de plaines donnent naissance aux plaines inondables des basses terres fournissent des habitats essentiels pour diverses plantes, animaux et espèces aquatiques. Les événements d'inondation aident à maintenir l'équilibre écologique de la région.



Photo 1-1. Exemple d'inondation de plaine (oued de Tilghemt avec un ruissellement suite à des averses)

### **3.2. Inondations par remontées de nappes phréatiques**

Les inondations par débordement indirect correspondent à des événements où la montée des eaux se produit par la remontée de la nappe phréatique qui atteint la surface et/ou par l'infiltration d'eau dans les différents réseaux d'assainissement. Ces phénomènes entraînent divers désordres et perturbations qui peuvent avoir de graves conséquences.

Les remontées sous bâtisses sont fréquentes lors de ces inondations, provoquant des infiltrations d'eau dans les structures et des dommages aux fondations. Les ouvrages souterrains tels que les tunnels, les parkings souterrains et les caves peuvent être inondés, ce qui entraîne des problèmes d'accès, de sécurité et de dégradation des infrastructures.

Les pentes et les remblais peuvent être déstabilisés en raison de l'excès d'eau et de la saturation du sol, ce qui peut conduire à des glissements de terrain et à des affaissements du terrain. Ces mouvements de terrain peuvent endommager les structures et mettre en danger la sécurité des personnes.

Les réseaux publics tels que les réseaux d'égouts, d'eau potable et de drainage sont également affectés par ces inondations. Les canalisations peuvent être surchargées,

entraînant des perturbations dans la distribution d'eau, des débordements d'égouts et des problèmes de traitement des eaux usées.

De plus, les pressions exercées par l'eau sous les constructions peuvent entraîner des dommages structurels et une détérioration des fondations. Les bâtiments peuvent être soumis à des contraintes importantes et à des risques d'effondrement.

Tous ces désordres et perturbations soulignent l'importance de la gestion et de la prévention des inondations indirectes. Des mesures telles que la surveillance de la nappe phréatique, l'amélioration des systèmes de drainage, la conception adéquate des structures et l'application de normes de construction résistantes aux inondations sont essentielles pour minimiser les risques et les conséquences de ces types d'inondations [Boubchir, 2007].

### **3.3. Inondations par crues torrentielles**

Les crues torrentielles sont des événements imprévisibles et brutaux qui sont la conséquence d'événements pluvieux intenses et localisés qui sont souvent des orages convectifs. Conventionnellement parlant, la crue est considérée comme torrentielle lorsque le temps nécessaire pour l'écoulement d'une goutte du point le plus hydrologiquement éloigné et l'exutoire est inférieur à 12h (ou 24h pour certains auteurs). Pour une analyse plus précise, les spécialistes ont retenu cinq éléments qui définissent la crue torrentielle : la rapidité de la réponse du cours d'eau, son nombre de Froude, sa pente, le transport solide, et les effets de la crue. Ces crues sont communes dans le bassin méditerranéen, dans les zones montagneuses et elles peuvent être aggravées par la petite taille du bassin versant et les fortes pentes qu'on peut y trouver.

Une autre caractéristique clé des crues torrentielles et leur fort apport solide qui engendre d'importantes modifications du cours d'eau. Les dommages qu'elles causent sont importants de par la vitesse considérable des eaux (souvent boueuses à cause du transport solide élevé), [Ledoux, 2006].

### **3.4. Inondations en milieu urbain**

Les inondations urbaines regroupent les inondations qui se produisent dans les zones urbaines, telles que les villes ou les villages, en raison de précipitations excessives ou d'autres facteurs. Ces inondations sont spécifiquement associées aux caractéristiques uniques des environnements urbains, notamment les surfaces pavées et bétonnées, les systèmes de drainage des eaux pluviales et la présence de bâtiments et d'infrastructures. Les inondations urbaines peuvent être causées par divers facteurs, notamment :

1. **Précipitations intenses** : des pluies abondantes ou prolongées peuvent dépasser la capacité des systèmes de drainage urbain, entraînant une accumulation rapide d'eau dans les rues, les trottoirs et d'autres surfaces urbaines.
2. **Infrastructure de drainage insuffisante** : Les systèmes de drainage des eaux pluviales inadéquats ou obsolètes, y compris les drains, les égouts et les ponceaux, peuvent ne pas être en mesure de gérer le volume accru d'eau lors de fortes pluies.
3. **Urbanisation et changements dans l'utilisation des terres** : Le développement urbain peut modifier le paysage naturel, en substituant les surfaces perméables (comme les couverts végétaux) par des surfaces imperméables. Cette transition des terres peut augmenter le ruissellement et réduire l'absorption naturelle d'eau du sol, aggravant ainsi les risques d'inondation.
4. **Topographie** : Les zones urbaines situées dans des zones en basse altitude, donc, inondables sont particulièrement vulnérables, car l'eau a tendance à s'accumuler et à converger dans ces régions.

Les stratégies de gestion des inondations urbaines impliquent souvent l'amélioration des infrastructures de drainage, et la mise en œuvre de systèmes de gestion des eaux pluviales. Il est important de noter que les inondations urbaines peuvent avoir des causes complexes et sont influencées par divers facteurs propres à chaque zone urbaine. Une gestion efficace des inondations urbaines nécessite une compréhension globale des conditions locales et la mise en œuvre de mesures d'atténuation appropriées [Ledoux, 2006 ; Merabet 2006].

### **3.5. Inondations par rupture d'ouvrages ou d'embâcle**

Les inondations par rupture d'ouvrages ou d'embâcles se réfèrent à des situations où des structures artificielles, telles que des barrages, des digues ou des embâcles naturels, cèdent sous la pression de l'eau, provoquant une inondation soudaine et importante. Lorsque des barrages ou des digues se rompent, une grande quantité d'eau est libérée en aval de l'ouvrage, permettant une onde de crue destructrice (la hauteur de l'onde de crue est égale au niveau de l'eau qui est emmagasiné dans la retenue, d'où l'ampleur cataclysmique de ce genre de phénomènes). Cette rupture peut être causée par des facteurs tels que des précipitations intenses, une défaillance structurelle, des phénomènes géologiques, des embâcles qui exercent une pression excessive sur l'ouvrage, ou une combinaison des causes précédentes. Les embâcles se produisent lorsque des débris, tels que des troncs d'arbres, des branches, des débris flottants ou des sédiments, s'accumulent et bloquent le cours d'eau, obstruant ainsi l'écoulement normal de l'eau. Lorsque la pression de l'eau devient trop importante, l'embâcle peut céder brusquement, provoquant une

libération soudaine de l'eau retenue en amont et une inondation rapide, pratiquement instantanée en aval. Ces inondations par rupture d'ouvrages ou d'embâcles sont particulièrement dangereuses car elles se produisent souvent de manière imprévisible et peuvent causer des dégâts considérables. Les zones comprises en aval de l'ouvrage ou de l'embâcle sont les plus vulnérables, car elles exposent directement à la libération rapide et puissante de l'eau. La prévention de ces types d'inondations implique une surveillance et une maintenance régulières des ouvrages retenus, des digues et des embâcles. Il est essentiel de s'assurer que ces structures sont en bon état, capables de résister aux pressions hydrauliques, et de mettre en place des protocoles de gestion des embâcles pour minimiser les risques. En cas de rupture d'ouvrage ou d'embâcle, il est crucial d'avoir des plans d'urgence et des systèmes d'alerte précoce en place pour évacuer rapidement les populations à risques et minimiser les pertes humaines et matérielles. La gestion des risques liés à ces inondations implique également la mise en œuvre de mesures structurelles et non structurelles pour réduire les conséquences potentielles, telles que la création de zones d'évacuation, la sensibilisation du public et la planification de l'aménagement du territoire pour éviter les zones à risque élevé [Boubchir, 2007 ; Ledoux, 2006 ; SPPPI, 2004].

**L'étude minutieuse des digues est primordiale**, car le grand drame de ce type d'événements tragiques, et que les digues qui se rompent et causent ce type d'inondations ont dans certains cas été placées comme OPI (ouvrage de protection contre les inondations), et au lieu de remplir leur fonction, elles engendrent le contraire.

### **3.6. Inondations marines**

Les inondations marines, également connues sous le nom d'inondations côtières ou de marée, font référence aux inondations qui se produisent le long des zones côtières en raison de l'élévation du niveau de la mer ou de l'impact de conditions météorologiques extrêmes telles que les tempêtes, les ouragans ou les tsunamis. Ces inondations peuvent affecter à la fois les régions côtières et les zones basses situées à proximité des estuaires, des deltas ou des embouchures des rivières. Les inondations marines sont principalement causées par une combinaison de facteurs, notamment les marées hautes, les ondes de tempête et l'influence de forces astronomiques telles que l'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil. Les marées hautes peuvent provoquer des inondations temporaires dans les zones côtières, en particulier lors des grandes marées lorsque les forces gravitationnelles de la lune et du soleil sont alignées. Les ondes de tempête, en revanche, se produisent lorsque des vents forts associés à des tempêtes ou des ouragans poussent l'eau vers la côte, entraînant une augmentation rapide et significative du niveau de la mer. Ces surtensions peuvent provoquer des inondations et une érosion côtière importantes, entraînant des dommages matériels, des perturbations des infrastructures et des pertes de vie potentielles. Dans certains cas, les

inondations marines peuvent également être déclenchées par des tsunamis, qui sont généralement causés par l'activité sismique sous l'océan. Les tsunamis génèrent des vagues puissantes qui peuvent parcourir de longues distances et inonder les zones côtières, provoquant des inondations dévastatrices et des destructions généralisées. Elles ne sont pas à confondre avec les inondations d'eaux salées par remontées de nappe, comme celles qui sont à l'origine des Chotts dans le sud Algérien, fruit de la remontée des eaux saumâtres de la nappe de l'Albien [SPPPI, 2004].

## **Conclusion**

Maintenant que les différents types d'inondations et leurs caractéristiques ont été définis, il convient de garder seulement ceux qui touchent notre zone d'étude.

# Chapitre II

## Présentation de la zone d'étude et ses caractéristiques

### Introduction

Dans le présent chapitre, il sera question de déterminer les types d'inondations qui concernent notre zone d'étude. A cette fin, il convient de présenter la zone étudiée et ses attributs géographiques, géotechniques, climatiques et hydrologiques, pour pouvoir désigner les types d'inondations qui menacent celle-ci. Il est également impératif d'établir un historique des inondations qui ont eue lieu dans la zone par le passé, afin d'avoir une idée sur l'ampleur de ces inondations et des dégâts qu'elles ont causé - et qu'elles sont susceptibles de causer si elles se reproduisent.

### 1. Présentation de la zone d'étude

La Wilaya de Laghouat la 29<sup>ème</sup> wilaya en Algérie, située dans la région du Sahara. Elle couvre une superficie d'environ 25 057 kilomètres carrés. Elle est bordée par plusieurs autres wilayas : Tiaret au nord, Djelfa à l'est, Ghardaïa au sud et Naama à l'ouest. La ville de Laghouat, est la capitale de la wilaya du même nom et constitue un important centre économique et culturel de la région. Elle est située à une altitude d'environ 750 mètres au-dessus du niveau de la mer et compte une population d'environ 150 000 habitants. La wilaya de Laghouat se caractérise par un paysage désertique avec de vastes étendues de plaines sablonneuses, de plateaux rocheux et d'oasis dispersées. Le climat est aride, avec des étés chauds et des hivers doux et extrêmement froids. L'agriculture dans la région est principalement basée sur l'agriculture oasisienne, où les palmiers dattiers, les légumes et certaines cultures céréalières sont cultivés. La ville est également connue pour son riche patrimoine historique et culturel, elle présente un mélange de styles architecturaux influencés par diverses civilisations qui ont traversé la région, notamment les Berbères, les Romains, les Arabes et les Français. Parmi les sites remarquables, citons l'ancien Ksar (village fortifié), la Grande Mosquée et les ksours traditionnels (greniers fortifiés).

Parmi ses communes, celle qui nous intéresse est la commune Hassi R'mel. Elle est située dans la partie sud-est de la Wilaya de Laghouat, à environ 350 kilomètres au sud d'Alger. La ville est située au cœur du désert du Sahara, connu pour ses vastes étendus de dunes et ses paysages arides. Hassi R'Mel revêt une grande importance au sein de la Wilaya de Laghouat en raison de sa situation stratégique et de son rôle dans le secteur de l'énergie. Elle est

réputée pour être un important centre de production et de traitement de gaz naturel en Algérie et la ville se trouve au sommet du plus grand gisement de gaz naturel africain, contribuant de manière significative aux ressources énergétiques de l'Algérie.

## **1. Description des Stations électrique de Hassi Rmel**

L'énergie électrique joue un rôle crucial en Algérie, faisant office de colonne vertébrale au développement économique, aux infrastructures et au bien-être de la société du pays. L'Algérie, avec ses différentes ressources énergétiques, y compris le gaz naturel et les ressources renouvelables, sait reconnaître l'importance d'un réseau électrique fiable et efficace pour alimenter sa population, les différents services publics, et ses diverses industries.

Dans ce cadre, deux stations électriques à cycle combiné ont été construites dans la commune de Hassi R'mel, dans la wilaya de Laghouat dans le sud Algérien. Ces deux centrales étendues sur une surface de plus ou moins 430 000 m<sup>2</sup>, sont bordées par la nationale 1 et la centrale mixte au Sud-Ouest et par l'oued de Tilghemt à leur Nord-Est. Leurs vulnérabilités au débordement de cet Oued précisément, fait l'objet de notre étude. Et cela, dans le but de protéger ces deux centrales des potentielles inondations qui pourraient les toucher.

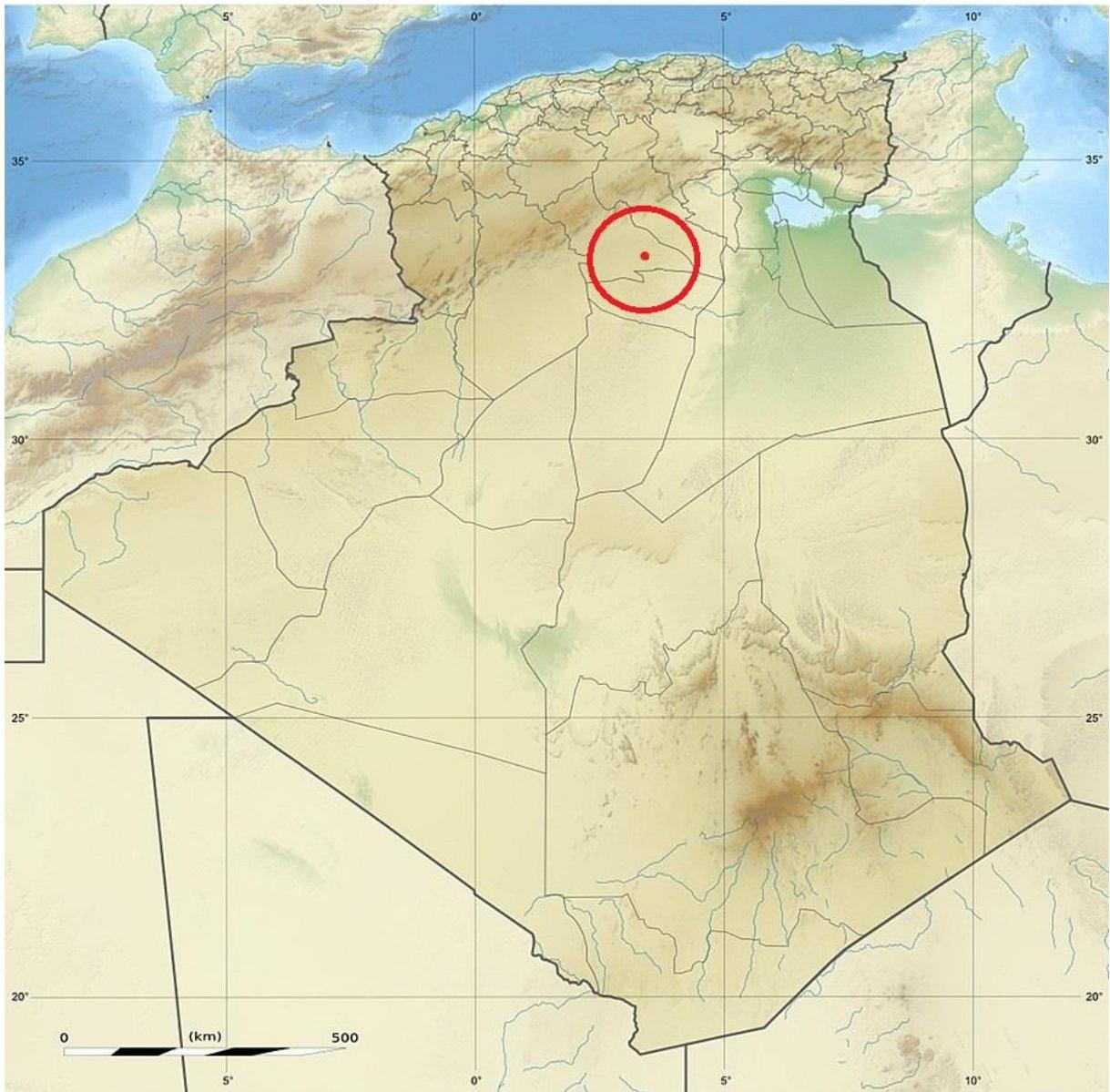


Photo 2-1- Emplacement des deux centrales électriques au niveau national



Photo 2-2- Les deux centrales de GE, l'ancienne route nationale N°01, et la nouvelle route nationale N°01 (construite en 2015)

## **2. Constat par rapport à notre zone d'étude et ses caractéristiques**

Son emplacement : Situées en plein milieu désertique, les deux centrales ne sont pas exposées aux inondations marines. Aussi, de par le fait que cette zone est désertique, dans le sens climatique et urbain, elle n'est pas concernée par les inondations urbaines (il est question d'inondations urbaines qui se produisent dans les grandes villes avec des surfaces conséquentes et un nombre élevé d'habitants. Un réseau d'évacuation des eaux pluviales a néanmoins été dimensionné et mis en place en raison des modifications apportées à la zone par l'imperméabilisation de celle-ci. Cela permet, entre autres la libre circulation des véhicules en temps pluvieux. Plus encore, au nord-ouest de la centrale thermique N°01, là où la route commence à longer nos deux centrales, la route a été surélevée suite aux travaux de 2015 effectués après l'inondation ayant eu lieu la même année. En dessous de celle-ci, un pertuis renvoie les eaux déchargées par l'affluent - né d'un détournement d'un cours d'eau- qui vient à l'ouest des deux centrales vers celles-ci, dans ce cas, on parle d'inondations par ruissellement.

Géologie et type de sol : A première vue, la zone paraît recouverte d'une épaisse couche de sable, ce n'est pas le cas. La couche de sable étant superficielle, le type du sol est rocheux et donc imperméable, ce qui éloigne entièrement l'hypothèse d'inondations par remontées de nappes phréatiques. Aussi, parce que la roche est recouverte par la couche de sable superficielle, chaque nouvelle averse et chaque nouveau ruissellement entraîne d'importants transports solides. Et cela en absence du couvert végétal et d'obstacles en général qui pourraient ralentir l'eau. Les caractéristiques citées ci-dessus sont celles des inondations torrentielles.



Photo 2-3- Nature rocheuse du lit du cours d'eau

Aussi, malgré la cinématique rapide des inondations en zone désertique. Celles-ci sont considérées comme des **inondations de plaines** également. Ceci est dû au fait que le lit du cours d'eau dans ces zones, n'est jamais défini, et en cas de débordement, sa largeur peut atteindre des centaines de mètres, voire, des kilomètres.

Par la suite dans notre étude, si on décide d'implémenter un quelconque ouvrage de protection, comme une digue par exemple, il aura lieu d'étudier sa conception minutieusement pour pouvoir assurer qu'elle ne pourra pas se rompre et engendrer le phénomène qu'on voudrait justement éviter, et qui est l'inondation par rupture de digue.

### **3. Historique des inondations**

#### **3.1. En Algérie**

L'Algérie, à travers tout son territoire national, a connu plusieurs inondations au fil des années. Voici quelques exemples d'inondations qui ont eu lieu dans plusieurs endroits du pays:

1. Inondations de Bab El Oued (Alger) en 2001 : Les inondations à Bab El Oued en septembre 2001, elles ont été parmi les plus meurtrières de l'histoire de l'Algérie. Les

fortes pluies ont provoqué des inondations soudaines et des glissements de terrain importants, entraînant la mort de plusieurs centaines de personnes et causant d'importants dégâts matériels.

2. Inondations de Tipaza en 2001 : En novembre 2001, des pluies torrentielles ont provoqué des inondations dans la région de Tipaza, notamment dans la ville de Cherchell. Les inondations ont causé des dommages considérables aux infrastructures, aux habitations et aux terres agricoles.
3. Inondation de Ghardaïa en 2008 : la région de Ghardaïa, dans le sud de l'Algérie, a été touchée par de fortes pluies en 2008 qui ont contribué à l'avènement des inondations, aggravées par une digue qui a été emportée en raison de ces fortes pluies, entraînant la submersion partielle de la ville et l'inondation des environs à des kilomètres à la ronde. L'inondation a provoqué des déplacements de population, des dommages aux habitations et des perturbations majeures dans la région. Son débit a été estimé à 3000 m/s.
4. Inondations de Bab Ezzouar, Alger en 2018 : En novembre 2018, des pluies intenses ont provoqué des inondations dans la commune de Bab Ezzouar à Alger. Les rues ont été submergées, les infrastructures ont été endommagées et des véhicules ont été emportés par les eaux.
5. Inondations de Tamanrasset en 2019 : En mars 2019, des pluies diluviennes ont causé des inondations dans la ville de Tamanrasset, située à l'extrême sud de l'Algérie. Les inondations ont affecté les habitations, les routes et les infrastructures locales, et beaucoup de gens ont perdu la vie lors de cet épisode tragique.

Cette liste ne représente qu'un infime pourcentage des inondations qui ont touché l'Algérie, le pays continue d'observer une multitude d'autres événements du genre.

### **3.2. Dans la Wilaya de Laghouat**

Les inondations sont des événements très récurrents dans la wilaya de Laghouat, cela est dû au fait qu'elle est traversée par une multitude d'importants oueds (M'zi, un tronçon du Chélif) qui débordent souvent, le tableau ci-dessous regroupe un certain nombre de ces inondations :

Tableau 2-1 : Historique des inondations dans la périphérie de l'Oued de Tilghemt

Date	Lieu spécifique d'occurrence	(Wilaya/Commune)	Bilan des dégâts recensés
15.09.1942	Oued M'zi	Laghouat –ksar el Hirane	Lame d'eau ruisselée : environs 80 mm
16.11.1942	Oued M'zi	Laghouat –ksar el Hirane	Lame d'eau ruisselée : environs 70 mm
24.04.1943	Oued M'zi	Laghouat –ksar el Hirane	Q = 25 m <sup>3</sup> / s
10.12.1943	Oued M'zi	Laghouat	Q = 403 m <sup>3</sup> / s et lame d'eau ruisselée d'environ 125 cm
09.09.1944	Oued M'zi	Laghouat	Débit estimé à Q = 54 m <sup>3</sup> /s
11.08.1955	Oued M'zi	Laghouat	-
13 au 14.10.1957	Oued M'zi	Laghouat – Benacer Ben Chohra	Lame d'eau ruisselée : environs 0,9m
14.01.1961	Oued M'zi	Laghouat	Débit estimé à Q = 120 m <sup>3</sup> /s
1969	Oued M'zi	Laghouat	Débit estimé à Q = 422 m <sup>3</sup> /s
1986	Oued M'zi	Laghouat	Débit estimé à Q = 357 m <sup>3</sup> / s et lame d'eau ruisselée : environs 0,85 m
Du 5 au 8.03.1988 (Début de l'averse le 05/03 à 14h00)	Oued M'zi	A travers toutes les communes de wilaya	Superficie des zones inondées : estimée à 3,748 ha ; 320 effondrements de Maison

### 3.3. La zone de l'oued de Tilghemt

Les dernières inondations remontent à 2015, celles-ci ont causé beaucoup de dégâts matériels. Elles ont notamment, causé la dégradation de beaucoup d'équipements et la mise en arrêt momentanée du chantier. Les images suivantes confirment les témoignages des victimes.



Photo 2-4 : Des eaux qui ruissellent dans une zone habituellement sèche, périphérique aux centrales



Photo 2-5 : Submersion d'une piste au cœur de la centrale 1



Photo 2-6: Submersion partielle de l'ancienne route -Nationale N°01-



Photo 2-7 : Inondation d'une zone dans la centrale 1 (l'emplacement des lignes d'arbres de la centrale N°01 es à la gauche de la photo)



Photo 2-8 : Ampleur des inondations dans la centrale 1

Des inondations ont également eu lieu en 1994 et 1995, années pendant lesquelles plusieurs zones dans le territoire national ont été touchées par des inondations (notamment, l'oued M'zi, dans lequel la hauteur à partir du substratum du cours d'eau a atteint les 14 mètres, inondant le pont à l'entrée de la ville de Laghouat et emportant un convoi militaire).

Les habitants locaux se souviennent également d'inondations importantes ayant eu lieu pendant 2001 et 2008.

## **Conclusion**

Maintenant que les caractéristiques de la zone et celles des inondations qui sont susceptibles de s'y produire sont connues. Il faut quantifier ces inondations.

# Chapitre III

## Synthèse hydrologique du bassin versant de l'oued de Tilghemt

### Introduction

Dans le présent chapitre, le but est de quantifier la crue qui a le plus de chance de se produire tout en causant le plus de dégâts. Consensuellement, la crue étudiée et utilisée en hydraulique pour la conception d'ouvrages divers et variés. Notamment les ouvrages de protection contre la crue bicentennale. Autrement dit, c'est la crue qui a une chance sur cent de se produire lors d'une seule l'année. Cependant, dans cette étude, la crue **bi** centennale sera celle qui sera étudiée. Premièrement, parce qu'un petit bassin versant est plus susceptible d'être touché par une crue importante par comparaison avec un grand bassin versant. Ceci est dû au fait que le temps de concentration d'un bassin versant relativement petit est inférieur à celui d'un bassin versant plus grand. Et cela, si un certain nombre de conditions sont réunies (intensité de pluie élevée et durée d'averse prolongée). Deuxièmement, la zone étudiée reste encore méconnue dans ce domaine. Les données disponibles s'étendent sur à peine 43 ans, et rien n'empêche que des évènements pluvieux plus intenses conduisant à des inondations plus importantes se soient produits par le passé. Pour déterminer celle-ci, il est impératif d'introduire quelques notions de base qui nous permettront de déterminer les paramètres qui nous intéressent. Aussi, un certain nombre de logiciels seront utilisés dans ce chapitre, logiciels qui seront introduits graduellement.

### 1. Notions Générales

#### 1.1. Bassin versant

Un bassin versant (BV) est la zone dont l'ensemble des eaux est redirigée vers un même point (le plus bas en altitude de la zone) qu'on appelle exutoire. Il est délimité par la ligne de partage des eaux qui correspond en générale à une ligne de crête, le bassin versant est l'unité de base d'une quelconque étude hydrologique.

#### 1.2. Bassins de rétention

Les bassins de rétention comme leur nom l'indique sont des zones de rétention des eaux de ruissellement ou d'eaux pluviales. Ceci résulte du fait que ces bassins ne possèdent pas un exutoire. Dans ce cas, l'eau est stockée jusqu'à ce qu'elle ruisselle (si la terre est

perméable), que le bassin déborde, ou par le biais des prélèvements effectués par l'être humain (pompage, etc..).

### **1.3. Les écoulements peu profonds**

Un écoulement est considéré comme peu profond lorsque la profondeur du fluide est relativement petite par rapport aux autres dimensions impliquées dans l'écoulement.

Dans le contexte de l'hydraulique des écoulements surfaciques, la condition de faible profondeur est souvent exprimée en termes de rapport de la profondeur de l'écoulement ( $h$ ) à une échelle de longueur caractéristique ( $L$ )-en générale, la longueur considérée et la largeur au miroir ( $B$ ) qui représente la distance la plus courte entre les deux berges au niveau de la surface libre. Si le rapport  $\frac{h}{L}$  est petit, généralement inférieur à 0,1 ( $\frac{h}{L} < 0,1$ ), on dit que l'écoulement est peu profond.

Cette distinction est importante car les écoulements peu profonds peuvent être modélisés différemment des écoulements profonds en utilisant des équations simplifiées. Ainsi l'équation de Saint-Venant est couramment utilisée pour modéliser les écoulements des rivières ou des canaux peu profonds.

Il convient de noter que la notion de "faible profondeur" peut varier selon le contexte. Par exemple, dans le domaine de l'océanographie, un écoulement peut être considéré comme peu profond si la profondeur est faible par rapport à la longueur d'onde des vagues ou aux caractéristiques de l'écoulement en question.

En hydraulique, les écoulements peu profonds sont régis par les équations de Saint-Venant, ces dernières sont utilisées pour les calculs dans divers logiciels de modélisation hydraulique, notamment le logiciel RUBAR20, qui utilise les équations de Saint-Venant 2D par volume finis.

### **1.4. Système d'Information Géographique**

Dans le cadre d'une étude d'inondabilité, il est impératif de délimiter le bassin versant de l'oued étudié, son réseau hydrographique (le chevelu) et d'extraire le maximum d'informations à partir de ces derniers. Les logiciels qui nous permettent d'effectuer cela sont les SIG.

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont des systèmes informatiques conçus pour capturer, stocker, manipuler, analyser et afficher des données spatiales ou géographiques. La technologie SIG est utilisée pour gérer, analyser et visualiser un large

éventail d'informations sur le monde physique, telles que l'utilisation des sols, la densité de population, les ressources en eau, les réseaux de transport et les risques naturels.

Le SIG implique généralement une combinaison de matériel, de logiciels et de données. Le matériel comprend des ordinateurs, des tablettes ou des smartphones qui peuvent exécuter un logiciel SIG. Ainsi que des périphériques tels que des récepteurs GPS et des scanners qui peuvent collecter des données. Le logiciel est conçu pour traiter et analyser des données spatiales et peut inclure des applications spécialisées pour des tâches spécifiques telles que la création de cartes ou l'analyse de données. Les données utilisées dans le SIG comprennent des données géographiques, telles que des cartes et des images satellite, ainsi que des données non géographiques, telles que des données démographiques ou des résultats d'enquête.

La technologie SIG est utilisée dans divers domaines, notamment l'urbanisme, la gestion de l'environnement, la santé publique, les transports et la gestion des ressources naturelles. Il peut être utilisé pour soutenir la prise de décision, générer des cartes et des rapports et identifier des modèles et des tendances dans les données géographiques [WHO, 1999].

Parmi les SIG les plus utilisés, on cite :

1. ArcGIS : Il s'agit d'une suite de logiciels développés par ESRI qui sont largement utilisés dans l'industrie SIG. Il comprend des applications de bureau, de serveur et mobiles pour la gestion, l'analyse et la cartographie des données,
2. QGIS : Il s'agit d'un progiciel SIG gratuit et open source qui est populaire parmi les utilisateurs SIG du monde entier. Il fournit une large gamme d'outils pour l'analyse des données et la cartographie,
3. GRASS GIS : Il s'agit d'un autre progiciel SIG gratuit et open source largement utilisé dans la communauté SIG. Il fournit des outils d'analyse de données raster et vectorielles, ainsi que de traitement et de visualisation d'images.
4. MapInfo Pro : il s'agit d'un progiciel SIG commercial largement utilisé dans des secteurs tels que les télécommunications, les services publics et les transports. Il comprend des outils de gestion, d'analyse et de cartographie des données.
5. Google Earth Pro : Il s'agit d'un progiciel SIG populaire qui fournit des capacités d'imagerie satellite et de cartographie 3D, Il peut être utilisé pour une variété d'applications, y compris la planification urbaine, la gestion de l'environnement et la gestion des ressources naturelles.
6. Global Mapper : Il s'agit d'un progiciel SIG commercial qui fournit des outils d'analyse de données, de cartographie et d'analyse de terrain. Il est largement utilisé dans des

industries telles que l'exploitation minière, le pétrole et le gaz et la gestion de l'environnement.

7. SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses), est un logiciel de système d'information géographique open source qui fournit une large gamme d'algorithmes et d'outils de géotraitement pour l'analyse et la modélisation spatiales.

SAGA propose une collection complète d'algorithmes géoscientifiques couvrant divers domaines tels que l'analyse de terrain, l'hydrologie, le traitement d'images, la géostatistique, les statistiques spatiales, etc. Il est connu pour son ensemble complet d'outils pour le traitement des modèles numériques d'élévation (DEM) et la réalisation d'analyses de terrain.

Dans QGIS, le logiciel SAGA est intégré en tant que fournisseur de traitement, ce qui signifie que vous pouvez accéder et utiliser les algorithmes SAGA directement dans l'environnement QGIS. La boîte à outils SAGA de QGIS vous permet d'appliquer des algorithmes SAGA à vos données spatiales, d'effectuer des tâches de géotraitement avancées et de mener des analyses spécialisées.

La boîte à outils SAGA de QGIS offre un large éventail de fonctionnalités, notamment l'analyse des pentes, l'accumulation de flux, la classification du terrain, la modélisation hydrologique, l'analyse du rayonnement solaire, la classification des images, l'interpolation géostatistique, etc. Ces outils sont accessibles via la boîte à outils de traitement de QGIS, où vous pouvez trouver et utiliser les algorithmes SAGA pour vos travaux d'analyse géospatiale.

En tirant parti de la boîte à outils SAGA dans QGIS, il est possible de tirer parti des puissantes capacités de géotraitement offertes par SAGA pour effectuer des analyses spatiales avancées et tirer des informations précieuses de vos données géospatiales.

Ce ne sont là que quelques exemples des nombreux progiciels SIG disponibles. Le choix du logiciel dépend de facteurs tels que l'application spécifique, le niveau d'expertise technique et le budget disponible.

## **2. Détermination des débits de crue pour l'oued de Tilghemt**

On commencera d'abord par délimiter le bassin versant de l'oued de Tilghemt et donner ses caractéristiques morphométriques. Ensuite, on présentera les données climatologiques nécessaires à notre étude. Enfin, on pourra quantifier les débits de crue et on utilisera ces résultats dans le chapitre suivant pour pouvoir faire notre simulation hydraulique.

## 2.1. Description du bassin versant de l'oued Tilghemt et analyse

On commencera par la délimitation de celui-ci avec l'usage du logiciel QGIS, on utilisera la version 1.16 du logiciel, ancienne version certes, mais celle-ci reste la dernière version compatible avec la boîte à outils SAGA qui nous permettra grâce à ses différents algorithmes, de délimiter le bassin versant de l'oued Tilghemt et d'effectuer son analyse morphométrique.

Pour effectuer les différentes analyses sur le logiciel QGIS, des MNT extraits du USGS seront utilisés. Ceux-ci sont de type SRTM 1 Arc-second global, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) est une mission de cartographie topographique réalisée à l'aide d'un radar embarqué à bord de la navette spatiale Endeavour de la NASA en février 2000. L'objectif principal de la mission était de collecter des données topographiques précises de la surface de la Terre, en particulier des informations sur l'élévation du terrain.

SRTM a fourni des données topographiques mondiales à une résolution de 1 arc-seconde, ce qui correspond à environ 30 mètres de résolution sur le terrain.

Ces données SRTM1 ont été largement utilisées dans de nombreux projets et applications nécessitant une connaissance précise de l'élévation du terrain à l'échelle mondiale, raison pour lesquelles ces MNT sont utilisés dans cette étude.

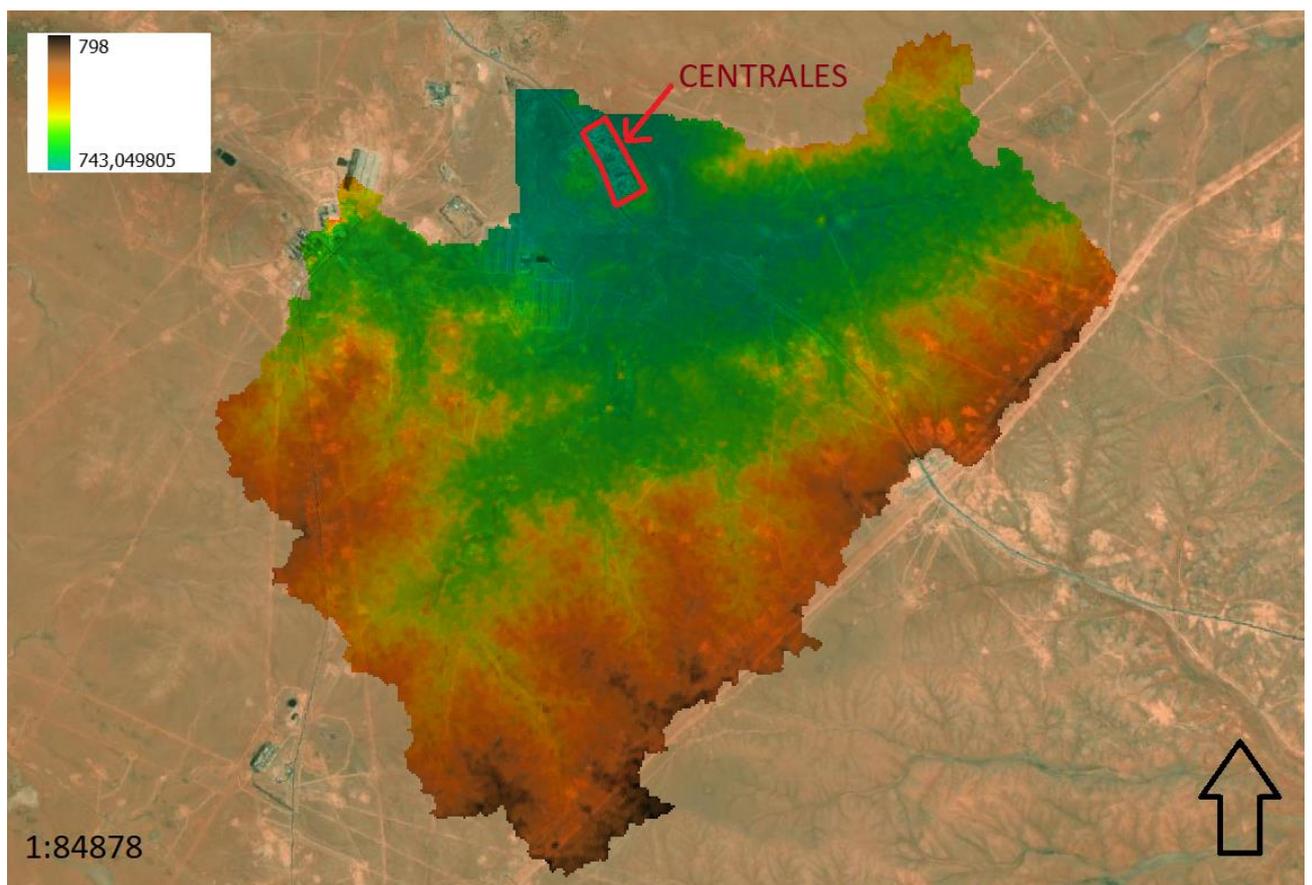


Figure 3.1 : MNA du bassin versant de l'oued de Tilghemt

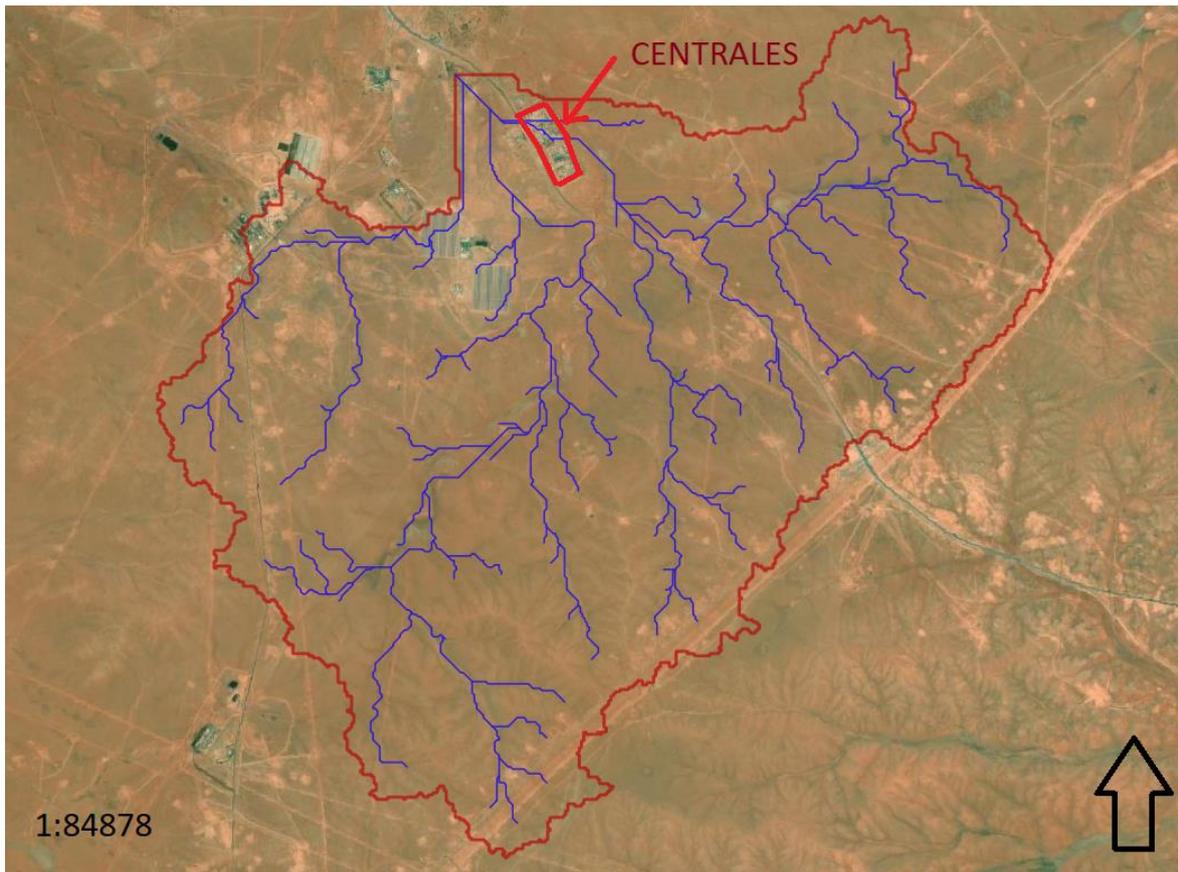


Figure 3.2 : Ligne de partage des eaux délimitant le bassin versant de Tilghemt – en rouge- et son chevelu hydrographique -en bleu-

Après avoir déterminé le MNA de notre bassin versant, ses limites, et son chevelu hydrographique. Il est facile d'obtenir les caractéristiques physiques de celui-ci, notamment : Sa superficie, son périmètre, la longueur du thalweg principal... etc, et de calculer à partir de ceux-ci le reste des caractéristiques physiques qui seront utilisés dans les divers logiciels et calculs.

## 2.2. Calcul des caractéristiques morphométriques et hydrographiques

En plus des caractéristiques de base (caractéristiques qu'on peut directement extraire) et qui sont : Le périmètre du BV, sa superficie, l'altitude minimale, l'altitude maximale et la longueur du cours d'eau principal. D'autres caractéristiques doivent être déterminées :

La largeur moyenne, le coefficient d'allongement et l'indice de compacité de Gravelius sont des indicateurs sur la forme du bassin versant, connaître la forme de notre bassin versant est une donnée impérative à la vérification du temps de concentration et de sa justesse.

### 2.2.1. Largeur moyenne

La largeur moyenne d'un bassin versant est définie comme la valeur de la superficie du bassin versant divisée par la longueur du thalweg principal. Cela permet de calculer une mesure moyenne de la largeur du bassin versant le long de son cours d'eau principal. Elle peut également servir comme indice de forme du bassin versant, car, plus cette valeur est petite (inférieure à zéro) et plus le bassin versant correspondant est allongé, cela allonge donc considérablement le temps de concentration de celui-ci.

$$B_{moy} = \frac{S}{L}$$

Avec,

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

L : longueur du thalweg le plus long (Km).

### 2.2.2. Coefficient d'allongement

Le coefficient d'allongement génère une valeur numérique qui représente l'allongement relatif de la forme géographique. Plus la valeur du coefficient d'allongement est proche de 1, plus la forme est considérée comme proche d'une forme circulaire ou régulière. À l'inverse, plus la valeur du coefficient d'allongement est supérieure à 1, plus la forme est considérée comme allongée ou étirée.

Il est obtenu à partir de la relation :

$$C_a = \frac{L^2}{S}$$

### 2.2.3. Indice de forme appelé indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité de Gravelius génère une valeur numérique qui représente la compacité de la forme géographique. Plus la valeur de l'indice est proche de 1, plus la forme est considérée comme compacte. À l'inverse, plus la valeur de l'indice est éloignée de 1, plus la forme est considérée comme étirée ou complexe.

- Valeurs proches de 1 : Une valeur de l'indice proche de 1 indique une forme géographique compacte, généralement avec des contours réguliers, Cela peut correspondre à des zones bien planifiées, des frontières bien définies ou des entités territoriales géographiquement cohérentes.
- Valeurs inférieures à 1 : Des valeurs inférieures à 1 indiquent une forme géographique moins compacte, avec des contours plus irréguliers ou étirés. Cela peut

correspondre à des zones géographiques allongées, des enclaves ou des territoires fragmentés.

Calculé par la relation suivante :

$$I_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Avec, P le périmètre du bassin versant (Km).

#### 2.2.4. Longueur et largeur du rectangle équivalent

Elles sont évaluées avec les formules suivantes :

$$L_e = \frac{I_c \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{I_c} \right)^2} \right]$$

$$l_e = \frac{I_c \sqrt{S}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{I_c} \right)^2} \right]$$

Avec,

$L_e$  : Longueur équivalente (Km) et

$l_e$  : largeur équivalente (Km).

Les caractéristiques morphométriques sont calculées et regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3-1 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Tilghemt

Caractéristiques	Symbole	Valeur	Unité
Superficie	S	70,46	Km <sup>2</sup>
Périmètre	P	61,79	Km
Altitude minimale	H <sub>min</sub>	743,05	m
Altitude Maximale	H <sub>max</sub>	798	m
Longueur du cours d'eau principal	L	10,33	Km
Largeur moyenne	B <sub>moy</sub>	6,82	Km
Coefficient d'allongement	C <sub>a</sub>	1,51	#

Indice de compacité de Gravelius	$I_c$	2,06	#
Longueur équivalente	$L_e$	22,50	Km
Largeur équivalente	$l_e$	8,39	Km

D'après les résultats obtenus, le bassin versant de Tilghemt est allongé et de forme compacte.

### 2.2.5. Relief

Le relief influe sur l'écoulement des eaux, Il est défini par la manière dont la surface du bassin versant est répartie en fonction de l'altitude. Pour construire la courbe hypsométrique, on représente les altitudes  $H_i$  en ordonnée et le cumul des surfaces partielles en abscisse.

Tableau 3-2 : Répartition Hypsométrique du bassin versant de Tilghemt

Surface (Km <sup>2</sup> )	Surfaces partielles (%)	Surface cumulées (%)	Élévation (m)
17,70	25,12	25,12	753,05
17,23	24,45	49,57	763,05
16,59	23,54	73,11	773,05
13,30	18,88	92,00	783,05
5,46	7,75	99,74	793,05
0,18	0,26	100,00	798,00

A partir des données du tableau ci-dessus, on peut établir la courbe hypsométrique du bassin versant de Tilghemt :

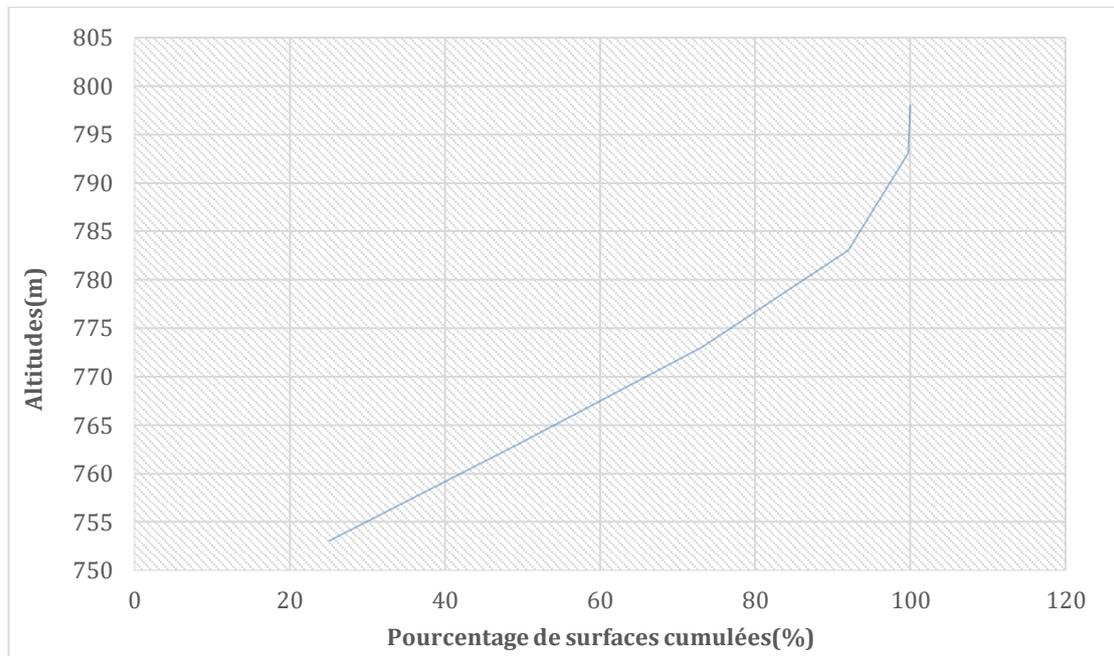


Figure 3.3 : Répartition hypsométrique du bassin versant de Tilghemt

### 3.3.2.5 Altitude moyenne

L'altitude moyenne pondérée est calculée par la relation suivante :

$$H_{\text{moy}} = \frac{\sum S_i H_i}{S}$$

Le calcul de l'altitude moyenne est donné dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-3 : Répartition altimétrique des superficies du bassin versant de l'Oued Tilghemt

Altitudes moyennes partielles $H_i$ (m)	Surfaces partielles $S_i$ (Km <sup>2</sup> )	$H_i * S_i$
753,05	17,70	13327,62
763,05	17,23	13145,54
773,05	16,59	12821,95
783,05	13,30	10418,27
793,05	5,46	4328,51
798,00	0,18	144,21
Somme	70,46	54186,11
Altitude moyenne $H_i$ (m)		769,08

### 2.2.6. Pentes

Les différentes pentes (pente du thalweg principale, pente moyenne...etc.) sont des paramètres très importants, en plus des paramètres déterminés précédemment (Largeur moyenne du BV, indice de compacité de Gravelius... etc.). Elles nous permettront d'avoir une idée sur la vitesse des écoulements et le temps de concentration des différentes crues. A titre d'exemple, un bassin versant allongée avec une pente très faible aura des temps de concentrations très élevés.

#### i. Pente moyenne

Elle est définie par la relation :

$$I_g = \frac{H}{L_e}$$

Avec,

H : la dénivelée totale

$L_e$  : la longueur du rectangle équivalent.

#### ii. Indice de pente de ROCHE

L'indice de pente de roche, également connu sous le nom d'indice de rugosité de terrain, est une mesure utilisée pour évaluer la raideur ou la pente d'une surface rocheuse. Cet indice est généralement utilisé dans le domaine de la géomorphologie et de l'étude des pentes pour quantifier la rugosité ou la complexité du terrain.

L'indice de pente est calculé avec la relation :

$$I = \left( \frac{1}{\sqrt{L_e}} \right) \sum \sqrt{S_i (H_i - H_{i-1})}$$

Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-4 : Calcul de l'indice de pente de ROCHE

Altitudes moy partielles $H_i$ (m)	Surfaces partielles $S_i$ ( $Km^2$ )	$\sqrt{\text{Racine}(S_i(H_i - H_{i-1}))}$
753,05	17,70	13,30
763,05	17,23	13,13
773,05	16,59	12,88

783,05	13,30	11,54
793,05	5,46	5,20
798	0,18	#
Somme	70,46	56,04
	Indice de pente de ROCHE I(%)	11,81

### iii. Pente du cours d'eau principal

Le temps que mettent les débits le long du cours d'eau dépend directement de la longueur du trajet et de sa pente. La pente moyenne est calculée en prenant en compte de la différence de niveau entre la source  $h_1$  et l'exutoire  $h_2$ , et la distance  $L$  entre les deux points. On peut également obtenir la pente moyenne du cours d'eau en utilisant une relation qui tient compte de la répartition hypsométrique.

La formule de la pente moyenne est la suivante :

$$P_{\text{moy}} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

## 2.3. Caractéristiques hydrographiques

Dans cette partie, il sera question de déterminer le nombre de cours d'eau dans le BV, leur étendue et leurs longueurs. Et cela, pour avoir une idée générale du réseau hydrographique, et en déterminer certaines de ses caractéristiques.

Il existe plusieurs classifications en ce qui concerne les réseaux hydrographiques, l'une des plus courantes est la classification de Horton.

### 2.3.1. Classification de Horton

Elle consiste à classer les cours d'eau en fonction de leur ordre. Le premier ordre correspond aux cours d'eau sans affluents, le second correspond aux cours d'eau dont les affluents sont les cours d'eau du premier ordre. etc. Le dernier ordre correspond au cours d'eau qui ne sont pas des affluents. Il est ensuite question de compter le nombre de tronçons dans chaque ordre et la somme de leur longueur.

### 2.3.2. Classification de Strahler

Cette classification hiérarchise les cours d'eau en attribuant un ordre à chaque segment. Les segments d'ordre 1 sont les affluents sans tributaire, les segments d'ordre 2

sont formés par la confluence de deux affluents de premier ordre, et ainsi de suite. On remarque que la classification de Strahler représente celle de Horton avec en moins, le calcul du nombre de cours d'eau de chaque ordre et leur longueur.

Il est à noter que nous avons utilisé les segments d'ordre de Strahler égal ou supérieurs à 5, car ce sont les plus « significatifs », ceux d'ordre égal ou inférieur à 4 sont en général des cours d'eau éphémères et leur distribution spatiale varie fortement dans le temps.

La classification a été faite dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-5 : Classification de Strahler et de Horton de la chevelure de l'oued Tilghemt

N° ordre	N° ordre de Strahler	Nombre	Longueur (Km)
1	5	76	55,97
2	6	40	30,96
3	7	26	21,41
4	8	8	3,36
Somme		150	111,70

### 2.3.3. Profil en long de l'oued principal

C'est une représentation graphique de l'élévation du terrain le long de l'oued principal. Souvent, il est tracé depuis la source jusqu'à l'exutoire, illustrant comment l'altitude du terrain change à mesure que la rivière s'écoule, on peut le considérer comme une coupe transversale effectuée sur la surface terrestre et qui montre le relief sur lequel le cours d'eau principal s'écoule.

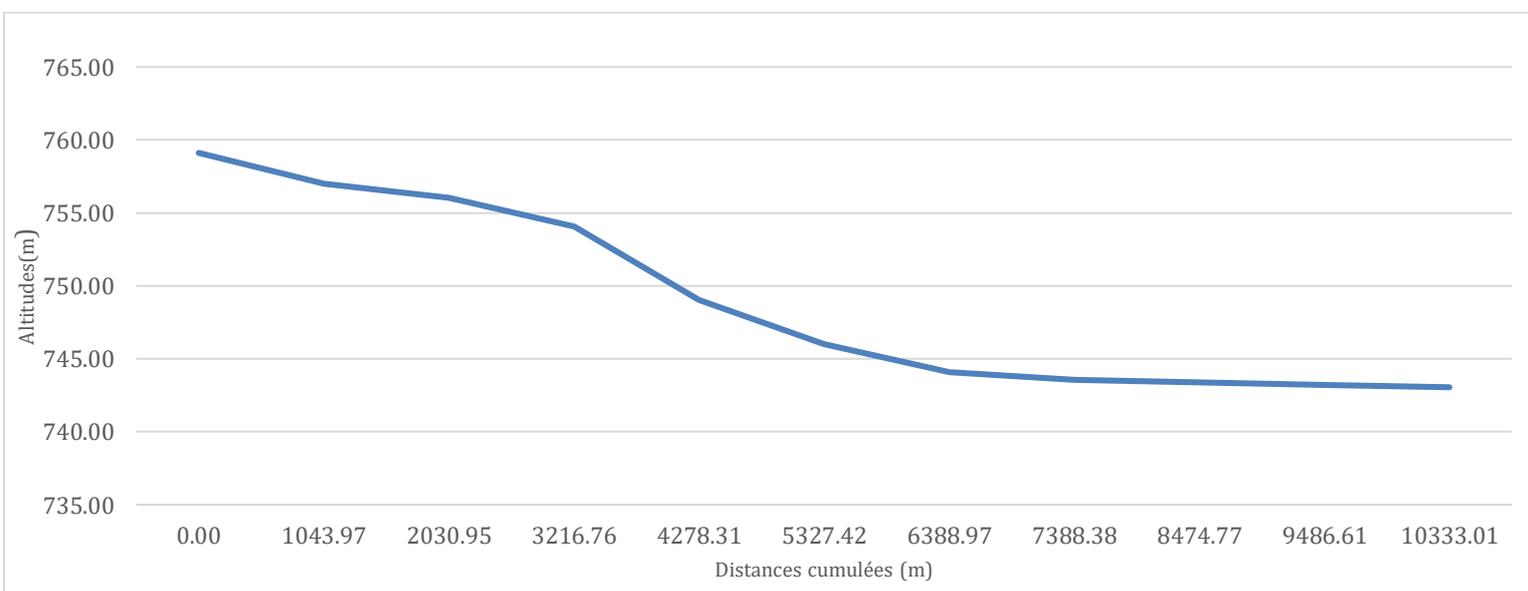


Figure 3.4 : profil en long de l'oued principal de Tilghemt

Tableau 3-6 : Récapitulatif des caractéristiques du bassin versant de la zone d'étude

Paramètre		Symbole	Unité	Valeur
Surface		S	Km <sup>2</sup>	70,46
Périmètre		P	Km	61,80
Altitude	Maximale	H <sub>max</sub>	m	798,00
	Minimale	H <sub>min</sub>	m	743,05
	Moyenne	H <sub>moy</sub>	m	769,08
Longueur	Thalweg principal	L	Km	10,33
Pente moyenne		P <sub>moy</sub>	%	1,50
Longueur	Rectangle équivalent	L <sub>e</sub>	Km	22,50
Largeur		l <sub>e</sub>	Km	8,39
Indice	Compacité	I <sub>c</sub>	-	2,06
	Roche	I	Km	11,81
Densité de drainage		D <sub>d</sub>	Km <sup>-1</sup>	1,59
Coefficient d'allongement		C <sub>a</sub>	-	1,51

Notons que la densité de drainage est égale à la longueur totale des cours d'eau divisée par la surface du bassin versant.

### 3. Caractéristiques climatiques

Les caractéristiques climatiques qui régissent le débit d'une rivière font référence aux différents facteurs météorologiques qui influencent l'écoulement de l'eau dans un oued. Ces caractéristiques climatiques jouent un rôle crucial dans la détermination de la quantité, du

moment et de la variabilité du débit fluvial. Cependant, dans le cadre de cette étude, un certain nombre de paramètres seront cruciaux pour la partie « pendant la crue » et d'autres le seront pour la partie « après la crue ». Les crues désertiques étant très subites et rapides, les paramètres comme l'évaporation et la température ne sont pas conséquentes pendant la crue, l'évaporation étant un phénomène qui montre son importance sur des périodes plus longues dans le temps. Comme par exemple après les crues, lorsque celle-ci jouera un rôle majeur dans l'évaporation des eaux accumulées dans la zone en raison de la pente très faible du terrain dans la partie avale du bassin versant ( $1.9 \cdot 10^{-4}$ ). En parallèle, des paramètres comme le vent seront cruciaux pendant l'épisode de crue, car si celui-ci se déchaîne dans la direction de l'écoulement de l'oued en plein milieu d'une crue, il amplifiera l'ampleur de la crue et causera la formation de vagues qui augmenteront la hauteur des eaux. D'autre part, les paramètres telles que la saisonnalité nous permettent d'établir des constats généraux tels que les suivants : les précipitations les plus importantes en été enregistrées en 1999 pendant les mois d'octobre et de décembre (la crue la plus importante ayant eu lieu en décembre), et la majorité des inondations sont enregistrées entre les mois de septembre et d'avril. La variabilité climatique est un paramètre qui renvoie constamment aux changements climatiques et à leurs différents effets : précipitations importantes qui commencent à apparaître hors saison et l'occurrence des inondations pendant la période sèche (août).

Présentation des caractéristiques climatiques qui affectent le débit des rivières : elles comprennent :

1. Saisonnalité : La distribution saisonnière des précipitations et des variations de température affecte les débits d'écoulement dans les rivières. Par exemple, dans les régions où les saisons humides et sèches sont distinctes, le débit des rivières peut varier considérablement entre les périodes de fortes et de faibles précipitations.
2. Variabilité climatique : Les variations climatiques à long terme telles que le changement climatique, peuvent influencer les régimes de précipitations, les régimes de température, et le climat en général, entraînant des changements dans les régimes d'écoulement des oueds.
3. Température : Le paramètre évident qui affecte le régime d'un cours d'eau est la température, l'augmentation de celle-ci peut entraîner : Evaporation, fontes de glaces et de neiges... entraînant l'augmentation des débits dans les cours d'eau,

Tableau 3-7 : Répartition mensuelle des températures moyennes à Hassi R'mel  
(worldclim.org)

Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
$T_{min}(^{\circ}C)$	3,2	4,0	7,5	10,9	15,2	20,8	25,4	24,3	19,5	14,0	7,6	3,9
$T_{moy}(^{\circ}C)$	10,3	11,5	15,3	19,4	24,5	30,1	35,2	33,6	27,4	21,6	14,6	10,7
$T_{max}(^{\circ}C)$	15,5	16,7	20,4	24,3	29,5	34,8	40,0	38,4	32,3	26,3	19,5	15,7

### 3.1. Humidité relative

L'humidité relative est une mesure de la quantité d'humidité présente dans l'air par rapport à la quantité maximale d'humidité que l'air peut contenir à une température donnée. Elle est exprimée en pourcentage et influencée par la température de l'air et la quantité réelle de vapeur d'eau dans l'air. À mesure que la température de l'air augmente, la quantité maximale d'humidité que l'air peut contenir augmente également. Par conséquent, tous les autres facteurs étant constants, l'humidité relative diminue à mesure que la température augmente, même si la quantité réelle d'humidité dans l'air reste la même.

Tableau 3-8 : Humidité relative à Hassi R'mel (worldclim.org)

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr	Mai.	Juin.	Juil.	Aôu	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Humidité relative (%)	54	47	43	38	33	31	24	29	42	47	56	60

### 3.2. Vent

Un autre paramètre qui peut avoir un effet significatif sur le ruissellement dans un cours d'eau est la vitesse du vent. En voici quelques effets courants :

- a) Évaporation accrue : Lorsque le vent souffle sur la surface de l'eau, il augmente l'évaporation en emportant les gouttelettes présentes à la surface.
- b) Cela peut réduire le volume d'eau disponible dans le cours d'eau et potentiellement réduire le ruissellement.
- c) Formation de vagues : Un vent fort peut générer des vagues à la surface de l'eau. Ces vagues peuvent provoquer une agitation supplémentaire et augmenter la turbidité de l'eau. Cela peut entraîner une augmentation du transport de sédiments et du ruissellement.

- d) Effet sur la répartition spatiale du ruissellement : Le vent peut influencer la répartition spatiale du ruissellement en poussant l'eau dans une direction prédominante, Par exemple, un vent constant soufflant dans une direction particulière peut déplacer l'eau vers un côté du cours d'eau, entraînant un ruissellement plus important sur cette partie.
- e) Le vent peut également accélérer le processus d'évaporation, ce qui peut affecter le bilan hydrique de la zone et potentiellement réduire le ruissellement.

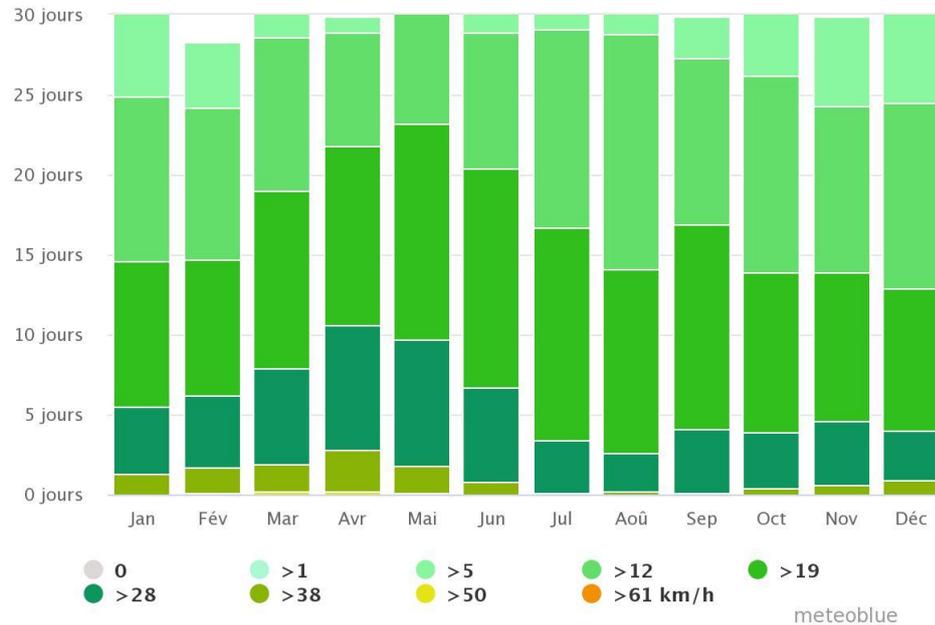


Figure 3.5 : Vitesses du vent mensuelles à Hassi R'mel (worldclim.org)

Évaporation et évapotranspiration : L'évaporation est le processus par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état de vapeur, généralement à partir des masses d'eau de surface. L'évapotranspiration fait référence à l'évaporation combinée de la surface terrestre et à la transpiration des plantes. Des taux d'évaporation et d'évapotranspiration plus élevés peuvent réduire la quantité d'eau disponible pour le débit des rivières.

Tableau 3-9 : Moyennes mensuelles de l'évaporation de Laghouat (1973-1980) [Azioune, 2022]

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Somme
E(mm)	61	57	52	52	37	41	52	60	85	98	96	95	786
$\frac{E_{mensuelle}}{E_{annuelle}}$ (%)	7,76	7,25	6,62	6,62	4,71	5,22	6,62	7,63	10,8	12,5	12,21	12,09	100

On remarque que les valeurs les plus élevées sont enregistrées pendant les mois chauds (de mai jusqu'à août), avec des valeurs qui varient entre 85mm et 98mm, qui es la valeur max enregistrées pendant le mois de juin.

### 3.3. Précipitations

La quantité, l'intensité et la distribution des précipitations dans le bassin versant de l'oued ont un impact direct sur l'afflux d'eau dans la rivière. Des précipitations plus élevées entraînent généralement une augmentation du débit enregistré dans les oueds. Dans la partie suivante, nous allons déterminer la valeur des débits pour les périodes de retour 10ans, 50ans et 100ans et les hydrogrammes de crue y correspondant. A cette fin, nous utiliserons une série de pluies annuelles maximales d'une longueur de n=43 (entre 1981 et 2023).

#### 3.5.1.1. lame d'eau précipitée sur le bassin versant

Pour calculer la lame d'eau précipitée sur le bassin versant, on doit ~~procéder par~~ appliquer la méthode de THIESSEN sur notre bassin versant, et sur lequel les données de plusieurs stations de mesures sont disponibles. Il est également possible d'obtenir directement la valeur de la lame d'eau ruisselée à travers le site [power.larc.nasa.gov](http://power.larc.nasa.gov) comme suis :

Tableau 3-10 : Pluie moyenne annuelle [[power.larc.nasa.gov](http://power.larc.nasa.gov)]

Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Juin.	Juil.	Août.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	TOTAL
100,2	52,73	142,38	110,74	94,92	31,64	10,55	63,30	232,03	142,38	121,29	89,65	1191,79

La lame d'eau moyenne qui ruisselle sur l'intégralité du bassin versant de l'oued de Tilghemt es de 1192 mm.

### 3.4. Ajustement des précipitations à une loi de probabilité

L'ajustement des précipitations à une loi de probabilité est un processus statistique qui vise à trouver la distribution de probabilité qui correspond le mieux aux données observées des précipitations. Cela permet de modéliser et de caractériser la distribution des précipitations, ce qui peut être utile dans de nombreuses applications hydrologiques et climatologiques, comme pour déterminer les pluies journalières maximales pour des périodes de retour données.

Dans ce qui suit, l'ajustement se fera avec une série de pluies journalières maximales ( $P_{jmax}$ ) de longueur n = 43 (de 1981 à 2023), avec l'utilisation du logiciel HYFRAN+ :

Tableau 3-11 : Pluies journalières maximales à Hassi R'mel de 1981 à 2023

[power.larc.nasa.gov]

N°	P <sub>jmax</sub> (mm)	Année	11	22,54	1991	22	19,41	2002	33	13,15	2013
1	6,12	1981	12	13,93	1992	23	14,4	2003	34	7,79	2014
2	8,8	1982	13	14,84	1993	24	25,38	2004	35	15,25	2015
3	2,63	1983	14	13,96	1994	25	8,84	2005	36	33,32	2016
4	14,12	1984	15	9,66	1995	26	13,99	2006	37	8,24	2017
5	17,28	1985	16	10,43	1996	27	13,94	2007	38	9,57	2018
6	11,09	1986	17	6,87	1997	28	29,91	2008	39	11,36	2019
7	9,16	1987	18	4,27	1998	29	17,56	2009	40	9,86	2020
8	7,92	1988	19	39,67	1999	30	10,72	2010	41	36,85	2021
9	8,18	1989	20	8,13	2000	31	24,13	2011	42	25,01	2022
10	12,92	1990	21	8,19	2001	32	9,99	2012	43	13,08	2023

**i. Ajustement à la loi de Gumbel**

La loi de Gumbel (distribution de type I de Gumbel), est une distribution de probabilité utilisée pour modéliser les extrêmes et les événements rares. Elle est couramment utilisée pour ajuster les valeurs maximales ou minimales observées dans différentes variables, telles que les précipitations extrêmes, les débits de crue, les températures maximales, et pleins d'autres applications dans le domaine de l'hydrologie et en dehors de celui-ci.

**ii. Ajustement à la loi de Pearson de type 3 :**

La distribution de Pearson de type III, est une distribution statistique utilisée pour modéliser une large gamme de variables continues, Il s'agit d'une distribution flexible qui peut se rapprocher de diverses formes, y compris des distributions symétriques, positivement asymétriques et négativement asymétriques,

**iii. Ajustement à la loi Log normal**

Une méthode utilisée pour transformer des données avec une distribution asymétrique en une distribution plus symétrique ou approximativement normale. Cette transformation peut être utile lors d'analyses statistiques qui supposent une distribution normale ou lorsqu'il faut réduire l'influence des valeurs extrêmes. L'ajustement logarithmique normal est effectué en prenant le logarithme népérien (ln) des valeurs de données. Cette transformation a pour effet de compresser d'avantage les valeurs les plus grandes que les valeurs les plus petites, ce qui contribue à réduire l'asymétrie des données. En appliquant le logarithme naturel à chaque valeur de données, les valeurs transformées résultantes présenteront généralement une asymétrie réduite et une distribution plus

symétrique. Les données transformées peuvent ensuite être utilisées pour des analyses statistiques ultérieures ou une modélisation qui suppose une distribution normale.

#### **iv. Ajustement à la loi Gamma**

La distribution gamma est une distribution de probabilité continue couramment utilisée pour modéliser des données positives et asymétriques.

### **4. HYFRAN+**

Ce logiciel sera utilisé dans cette étude pour modéliser et analyser les extrêmes dans les séries temporelles de précipitations. Ce qui nous permettra par la suite d'utiliser les valeurs obtenues pour la conception des hydrogrammes de crues.

#### **Définition**

HYFRAN+ est un logiciel de modélisation hydrologique développé par l'Institut national d'hydrologie et de gestion de l'eau (INHGA) en Roumanie. C'est un outil complet utilisé pour l'analyse et la simulation hydrologiques. HYFRAN+ intègre divers modèles et algorithmes hydrologiques pour simuler et analyser les précipitations et le ruissellement, le bilan hydrique, la prévision des crues et la gestion des ressources en eau. Le logiciel offre une gamme de fonctionnalités, notamment le prétraitement des données, l'étalonnage du modèle, la simulation et l'analyse des variables hydrologiques. Il permet aux utilisateurs de saisir des données météorologiques et hydrologiques, d'appliquer différents modèles et méthodes, et de générer des résultats et des rapports pour la prise de décision dans la gestion des ressources en eau et la prévision des crues.

Dans cette étude, plusieurs ajustements ont été fait, suivant plusieurs modèles statistiques, les valeurs gardées par la suite seront les maximales pour les périodes de retour, 10 ans, 50ans, 100 ans, et 200ans.

Il faut noter que plusieurs logiciels de ce type existent, par exemple, le logiciel « Hydrolab » es très populaire parmi les praticiens. Cependant, le logiciel HYDFRAN+ possède la caractéristique d'effectuer le test d'adéquation : Le test d'adéquation est une méthode statistique utilisée pour évaluer si un échantillon de données suit une certaine distribution théorique. L'objectif principal de ce test est de déterminer si les données observées proviennent d'une distribution spécifique ou si elles diffèrent de manière significative de cette distribution.

Tableau 3-12 : Récapitulatif des résultats obtenus avec les différents ajustements statistiques utilisés (Gumbel, Lognormal, Pearson III, et Gamma) en utilisant le logiciel

HYFRAN+

T(ans)	Fréquence	Gumbel	Log normal	Pearson type 3	Gamma	Adoptée
2	0,500	13,1	12,5	12,5	12,9	13,1
5	0,800	20,6	19,9	20,4	20,7	20,7
10	0,900	25,5	25,3	25,8	25,8	25,8
20	0,950	30,3	31,0	31,0	30,6	31,0
50	0,980	36,4	38,8	37,5	36,6	38,8
100	0,990	41,1	45,1	42,4	41	45,1
200	0,995	45,7	51,8	47,2	45,3	51,8
1000	0,999	56,3	68,8	58,2	54,9	68,8

Les tests d'adéquation sur les différentes lois d'ajustement donnent tous des niveaux de signification égaux à 1%, cela signifie qu'il y'a 1% de chance de se tromper lorsque l'hypothèse  $H_0$  est considérée comme juste, les deux hypothèses étant :

$H_0$  : L'échantillon de données suit la distribution théorique de la loi d'ajustement correspondante.

$H_1$  : L'échantillon de données ne suit pas la distribution théorique de la loi d'ajustement correspondante.

Dans ce cas, les résultats obtenus sont excellents.

Tableau 3-13 : Pluies fréquentielles dans la zone du bassin versant de l'oued Tilghemt

T(ans)	Fréquence	$P_{jmax}$ (mm)
10	0,900	25,8
50	0,980	38,8
100	0,990	45,1
200	0,995	51,8

## 5. Etude des crues

Lorsqu'il s'agit de prévoir le débit d'une crue, il est nécessaire d'associer une probabilité d'occurrence au dépassement d'un débit spécifique, Les méthodes empiriques reposent sur la corrélation observée entre les caractéristiques des bassins versants et les débits de crue à estimer (Laborde, 2003).

### 5.1. Calcul des débits et détermination des hydrogrammes de crue par la méthode de SOKOLOVSKI

La méthode de Sokolovski est une méthode populaire chez les hydrologues Nords Africains, Celle-ci tient compte de tous les paramètres caractéristiques du bassin versant et à maintes fois fait ses preuves en donnant des débits proches des valeurs mesurées pendant les épisodes de crue [Daifallah, 2017].

$$Q_{\max} = \frac{0,28}{T_c} SPKf$$

Avec,

S : superficie du bassin versant ( $Km^2$ ) ;

P : pluie de durée

$T_c$  et de fréquence donnée (mm) ;

K : coefficient de ruissellement égal à :  $K = 0,95$  ;

f : coefficient de forme de l'hydrogramme égal à 1,3 pour un lit large et l'absence de végétation sur un sol rocheux.

En ce qui concerne P, on calcule ce paramètre de la manière suivante :

$$P = P_{j_{\max}} \left( \frac{t}{24} \right)^b$$

P : Pluie fréquentielle de durée  $T_c$  (mm),

$P_{j_{\max}}$  : Pluie journalière maximale pour une période de retour choisie,

t : Durée de l'averse prise égale au temps de concentration ( $T_c$ )

et b : Exposant climatique (calculé et égal à 0,272 )

$T_c$  est défini au moyen de la relation de Snyder :

$$T_c = C (L^{0.6}) (S^{0.4})$$

Avec,

S : Surface du bassin versant,

L : Longueur du thalweg principal,

C : coefficient propre au bassin versant (la valeur  $C=0,4$  a été choisie en raison de la nature rocheuse du sol).

On trouve :

$$T_c = 8,91 \text{ heures}$$

Les valeurs des débits extrêmes pour différentes périodes de retour de la zone d'étude - Tilghemt- calculés avec la formule de Sokolovski sont portées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3-14 : Débits de crue pour les périodes de retour 10ans, 50 ans, et 100ans

$T(ans)$	$P_{j_{max}}(mm)$	$P(mm)$	$Q_{max}(m^3/s)$
10	25,8	20,33	55,61
50	38,8	47,37	129,57
100	45,1	66,49	181,86
200	51,8	92,21	252,16

Le débit avec lequel les ouvrages seront dimensionnés est le débit bicentennal :

$$Q_{max} = 252,16(m^3/s)$$

## 5.2. Hydrogrammes de crue

Sokolovski considère que l'hydrogramme est assimilé à deux équations paraboliques, l'une pour la montée (crue) et l'autre pour la descente (décru) :

$$\text{Pour la crue : } Q = Q_{max} \left( \frac{t}{t_m} \right)^2$$

$$\text{Pour la décrue : } Q = Q_{max} \left( \frac{t_d - t}{t_d} \right)^3$$

Avec,  $t_m$  : Temps de montée,  $t_d$  : Temps de décrue.

Il faut noter aussi que Sokolovski considère que le temps de montée est égal au temps de concentration, donc :  $t_m = t_c = 8,91$  heures

Le temps de décrue est donné par :  $t_d = \gamma t_m$

Avec,  $\gamma$  : Coefficient estimé à partir de certaines caractéristiques physiques du cours d'eau et de son bassin versant, Dans notre cas nous avons un sol rocheux, nous prenons donc :

$$\gamma = 2,7$$

On trouve :  $t_d = 24,06$  heures

Le temps de base est :  $t_b = t_m + t_d = 32,97$  heures

Dans les tableaux suivants sont donnés les hydrogrammes de crues pour différents débits et différentes périodes de retour.

Tableau 3-15 : Hydrogramme de crue pour T = 10ans

T(ans)	200	T(heures)	T/Tm	(T/tm) <sup>2</sup>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	t <sub>d</sub> -T	(t <sub>d</sub> -T/t <sub>d</sub> )	(t <sub>d</sub> - T/t <sub>d</sub> ) <sup>3</sup>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Q(Snyder)	252,2	0	0	0	0				
tm(h)	8,91	1	0,109	0,012	0,661				
td(h)	24,06	2	0,218	0,048	2,642				
tb(h)	32,97	3	0,327	0,107	5,945				
		4	0,436	0,190	10,570				
		5	0,545	0,297	16,510				
		6	0,654	0,428	23,780				
		7	0,763	0,582	32,370				
		8	0,872	0,760	42,280				
		9	0,981	0,962	53,510				
		9,176	1	1	55,620				
		10				13,775	0,556	0,172	9,56
		11				12,775	0,516	0,137	7,63
		12				11,775	0,475	0,107	5,97
		13				10,775	0,435	0,082	4,58
		14				9,7752	0,395	0,061	3,42
		15				8,7752	0,354	0,044	2,47
		16				7,7752	0,314	0,031	1,72
		17				6,7752	0,273	0,020	1,14
		18				5,7752	0,233	0,013	0,70
		19				4,7752	0,193	0,007	0,40
		20				3,7752	0,152	0,004	0,20
		21				2,7752	0,112	0,001	0,08
		22				1,7752	0,072	4 . 10 <sup>-4</sup>	0,02
		23				0,7752	0,031	3. 10 <sup>-5</sup>	0

Tableau 3-16 : Hydrogramme de crue pour T=50ans

T (ans)	200	T (heures)	T/Tm	(T/tm) <sup>2</sup>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	t <sub>d</sub> -T	(t <sub>d</sub> -T/t <sub>d</sub> )	(t <sub>d</sub> - T/t <sub>d</sub> ) <sup>3</sup>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Q(Snyder)	252,2	0	0	0	0				
tm(h)	8,91	1	0,109	0,012	1,539				
td(h)	24,06	2	0,218	0,048	6,156				
tb(h)	32,97	3	0,327	0,107	13,85				
		4	0,436	0,190	24,62				
		5	0,545	0,297	38,47				
		6	0,654	0,428	55,40				
		7	0,763	0,582	75,41				
		8	0,872	0,760	98,49				
		9	0,981	0,962	124,70				
		9,176	1	1	129,60				
		10				13,775	0,556	0,172	21,590

		11				12,775	0,516	0,137	17,220
		12				11,775	0,475	0,107	13,480
		13				10,775	0,435	0,082	10,330
		14				9,7752	0,395	0,061	7,713
		15				8,7752	0,354	0,044	5,580
		16				7,7752	0,314	0,031	3,882
		17				6,7752	0,273	0,02	2,568
		18				5,7752	0,233	0,013	1,591
		19				4,7752	0,193	0,007	0,899
		20				3,7752	0,152	0,004	0,444
		21				2,7752	0,112	0,001	0,177
		22				1,7752	0,072	4.10 <sup>-4</sup>	0,046
		23				0,7752	0,031	3.10 <sup>-5</sup>	0,004

Tableau 3-17 : Hydrogramme de crue pour T=100ans

T (ans)	200	T (heures)	T/Tm	(T/tm) <sup>2</sup>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	t <sub>d</sub> -T	(t <sub>d</sub> -T/t <sub>d</sub> )	(t <sub>d</sub> - T/t <sub>d</sub> ) <sup>3</sup>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Q(Snyder)	252,2	0	0	0	0				
tm(h)	8,91	1	0,109	0,012	2,16				
td(h)	24,06	2	0,218	0,048	8,64				
tb(h)	32,97	3	0,327	0,107	19,44				
		4	0,436	0,19à	34,56				
		5	0,545	0,297	54,00				
		6	0,654	0,428	77,76				
		7	0,763	0,582	105,80				
		8	0,872	0,76à	138,20				
		9	0,981	0,962	175,00				
		9,176	1	1	181,90				
		10				14,775	0,596	0,212	38,570
		11				13,775	0,556	0,172	31,260
		12				12,775	0,516	0,137	24,930
		13				11,775	0,475	0,107	19,520
		14				10,775	0,435	0,082	14,960
		15				9,7752	0,395	0,061	11,170
		16				8,7752	0,354	0,044	8,081
		17				7,7752	0,314	0,031	5,621
		18				6,7752	0,273	0,02	3,719
		19				5,7752	0,233	0,013	2,303
		20				4,7752	0,193	0,007	1,302
		21				3,7752	0,152	0,004	0,643
		22				2,7752	0,112	0,001	0,256
		23				1,7752	0,072	4.10 <sup>-4</sup>	0,067

Tableau 3-18 : Hydrogramme de crue pour T=200ans

T (ans)	200	T (heures)	T/Tm	(T/tm) <sup>2</sup>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	t <sub>d</sub> -T	(t <sub>d</sub> -T/t <sub>d</sub> )	(t <sub>d</sub> - T/t <sub>d</sub> ) <sup>3</sup>	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Q(Snyder)	252,2	0	0	0	0				
tm(h)	8,91	1	0,109	0,012	2,995				
td(h)	24,06	2	0,218	0,048	11,98				
tb(h)	32,97	3	0,327	0,107	26,95				
		4	0,436	0,190	47,92				
		5	0,545	0,297	74,87				
		6	0,654	0,428	107,80				
		7	0,763	0,582	146,70				
		8	0,872	0,76	191,70				
		9	0,981	0,962	242,60				
		9,176	1	1	252,20				
		10				13,775	0,556	0,172	43,34
		11				12,775	0,516	0,137	34,57
		12				11,775	0,475	0,107	27,07
		13				10,775	0,435	0,082	20,74
		14				9,7752	0,395	0,061	15,49
		15				8,7752	0,354	0,044	11,2
		16				7,7752	0,314	0,031	7,794
		17				6,7752	0,273	0,02	5,157
		18				5,7752	0,233	0,013	3,194
		19				4,7752	0,193	0,007	1,806
		20				3,7752	0,152	0,004	0,892
		21				2,7752	0,112	0,001	0,354
		22				1,7752	0,072	4.10 <sup>-4</sup>	0,093
		23				0,7752	0,031	3.10 <sup>-5</sup>	0,008

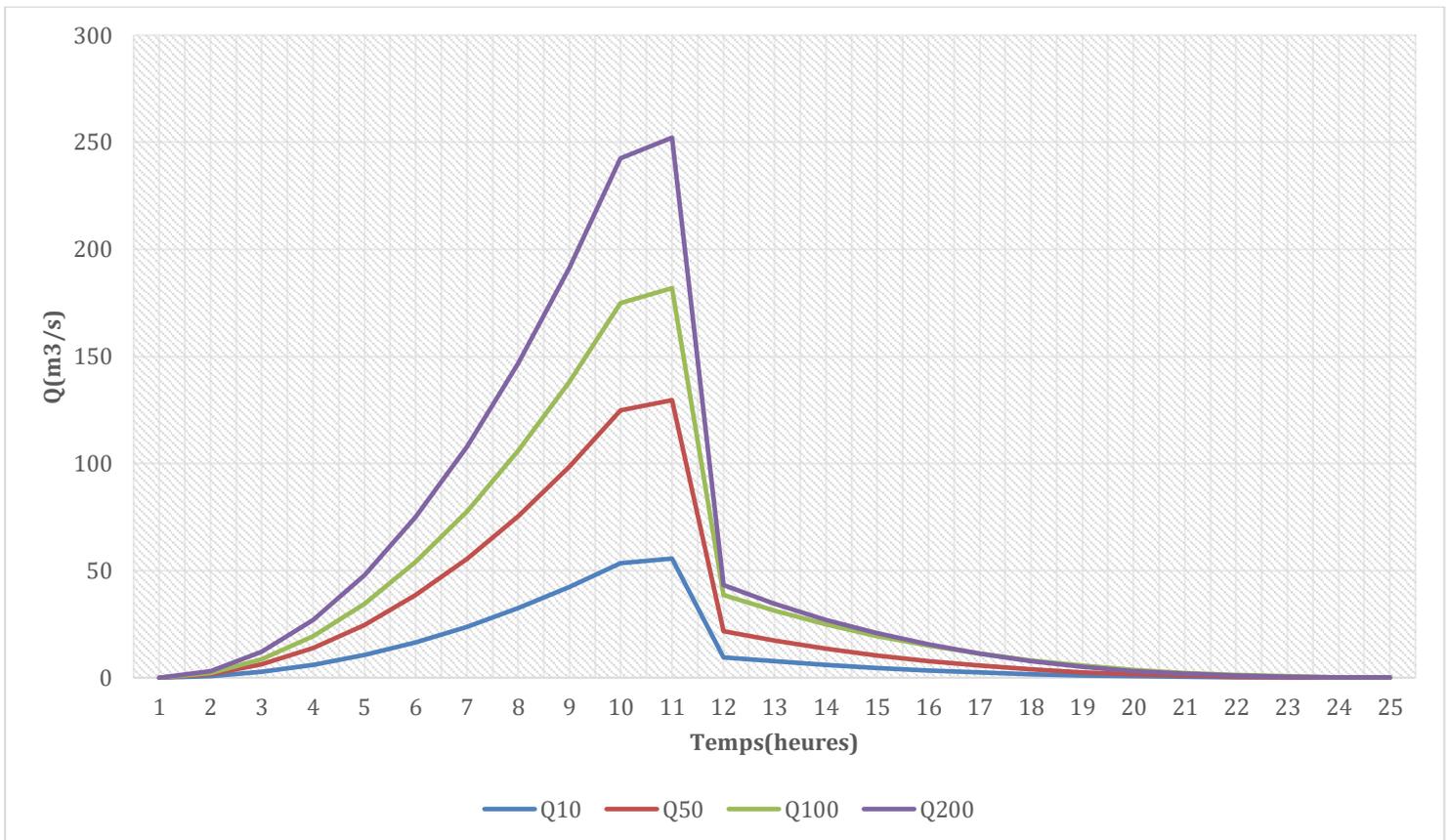


Figure 3.6 : Hydrogrammes de crues pour les différentes périodes de retour 10ans, 50ans, 100ans et 200ans

Après l'obtention des hydrogrammes de crue pour les différentes périodes de retour 10 ans, 50 ans, 100 ans, et 200 ans, il faut maintenant utiliser ces données dans un logiciel de modélisation hydraulique pour procéder à l'étude d'inondation demandée.

## Chapitre 4

# Simulation Hydraulique du cours d'eau

Dans le présent chapitre, il est question de modéliser les résultats obtenus dans les chapitres précédents pour pouvoir observer la simulation de la crue centennale et les dégâts que celle-ci est susceptible de causer.

Avant de commencer ce chapitre, Il faut d'abord introduire certaines définitions et notions.

### 1. La Mécanique Des Fluides Numérique

La Mécanique des Fluides Numérique (MDFN) est une branche de la mécanique des fluides qui utilise l'analyse numérique et les algorithmes pour résoudre et analyser les problèmes liés à l'écoulement des fluides, des gaz et des systèmes multiphasiques. Les simulations de la MDFN impliquent généralement la résolution des équations gouvernantes de l'écoulement des fluides (équations de Navier-Stokes) à l'aide de méthodes de calcul, telles que les méthodes de différences finies, de volumes finis ou d'éléments finis. La MDFN a une large gamme d'applications dans divers domaines, tels que l'aérospatiale, l'automobile, le génie chimique et le génie environnemental, pour n'en nommer que

quelques-uns. Elle peut être utilisée pour étudier l'aérodynamique des avions et des automobiles, simuler l'écoulement des fluides et le transfert de chaleur dans les processus industriels, analyser les courants océaniques et les conditions météorologiques et concevoir des systèmes énergétiques efficaces, entre autres applications.

## **1.2. Les modèles numériques en MDFN**

Il existe plusieurs modèles numériques qui peuvent être utilisés en MDFN. En fonction de l'application spécifique et du niveau de précision requis, voici quelques-uns des modèles numériques les plus couramment utilisés en MDFN :

1. Méthode des différences finies : Cette méthode se rapproche des équations aux dérivées partielles régissant l'écoulement des fluides en utilisant des différences finies à des points discrets dans l'espace et le temps.
2. Méthode des volumes finis : cette méthode discrétise les équations gouvernantes en divisant le domaine de calcul en volumes de contrôle, puis en résolvant les variables de flux aux limites de ces volumes.
3. Méthode des éléments finis : cette méthode divise le domaine de calcul en un maillage de petits éléments, puis elle se rapproche de la solution en résolvant les variables de flux aux nœuds des éléments.

En plus des trois méthodes précédentes, qui ont été les plus couramment utilisées de par le fait qu'elles aient été les premières qui ont vu le jour, d'autres méthodes ont été développées par la suite, On cite :

1. Méthodes spectrales : Ces méthodes utilisent des transformées de Fourier ou d'autres fonctions de base pour approximer la solution en termes de développement en série.
2. Méthode Lattice Boltzmann : Cette méthode simule l'écoulement en modélisant le mouvement des particules, qui représentent le fluide, et en résolvant l'équation de Boltzmann qui régit leur comportement.
3. Méthode des particules dans la cellule : Cette méthode combine la simulation de fluide avec une simulation de particules, où les particules représentent la phase dispersée dans un écoulement multiphasique.
4. Méthode de l'hydrodynamique des particules lissées : cette méthode représente le fluide comme une collection de particules et résout leur mouvement à l'aide de noyaux (fonctions de Kernel) lissées.

## 1.2. Les logiciels de modélisation hydraulique

Il faut préciser qu'il y a énormément de logiciels de modélisation hydraulique, dans notre cas, nous allons nous limiter à choisir parmi les logiciels de simulation d'écoulement en eaux peu profondes. Autrement dit, les logiciels qui nous intéressent dans le cadre de notre étude.

Il existe plusieurs options logicielles qui peuvent être utilisées pour une étude d'inondation impliquant des problèmes d'eau peu profonde et des problèmes de mécanique des fluides, Voici quelques exemples :

1. **Delft3D** : un progiciel largement utilisé qui comprend des modèles d'écoulement d'eau peu profonde 1D, 2D et 3D, ainsi que des simulations de transport de sédiments et de morpho dynamique.
2. **HEC-RAS** : Un logiciel développé par le "US Army Corps of Engineers" qui est couramment utilisé pour la modélisation du débit des rivières et des plaines inondables, Il comprend des modèles 1D et 2D et peut simuler à la fois un écoulement stable et instable.
3. **MIKE Flood** : Un logiciel complet de modélisation des inondations développé par DHI, qui comprend à la fois des modèles 1D et 2D d'écoulement des eaux peu profondes, ainsi que des structures pluviométriques-ruissellement et hydrauliques.
4. **FLOW-3D** : un logiciel de MDFN à usage général qui peut être utilisé pour simuler des écoulements à surface libre, y compris des problèmes d'eau peu profonde.
5. **OpenFOAM** : Un progiciel CFD gratuit et open-source qui comprend plusieurs solveurs pour la modélisation des écoulements en eaux peu profondes.
6. **TUFLOW** : un logiciel qui comprend des modèles 1D et 2D pour simuler l'écoulement de l'eau, le transport des sédiments et la qualité de l'eau dans les rivières et les plaines inondables.
7. **FLO-2D** : Il s'agit d'un progiciel de modélisation des inondations 2D qui peut simuler les inondations causées par la pluie, la fonte des neiges et les ruptures de barrage. Il est couramment utilisé pour la cartographie des plaines inondables, l'analyse des risques d'inondation et la planification d'urgence.
8. **LISFLOOD-FP** : Il s'agit d'un progiciel de modélisation hydrodynamique qui permet de simuler les inondations dans les rivières et les plaines inondables. Il est couramment utilisé pour la prévision des inondations, l'évaluation des risques d'inondation et la planification d'urgence.

9. **Flowmaster** : C'est un progiciel qui peut être utilisé pour l'étude des inondations en eaux peu profondes. Il s'agit d'un logiciel de modélisation hydraulique 1D qui peut simuler l'écoulement dans des conduits fermés, y compris des tuyaux, des ponceaux, des canaux et des fossés. Il peut être utilisé pour l'analyse des inondations dans les systèmes de drainage urbain, la gestion des eaux pluviales et la cartographie des plaines inondables. Cependant, il convient de noter que Flowmaster est principalement un logiciel 1D et peut ne pas convenir à des simulations 2D plus complexes d'écoulements d'eau peu profonde.
10. **RiverFlow2D** : C'est un logiciel qui entre dans la catégorie des logiciels d'étude des inondations en eaux peu profondes, Il s'agit d'un logiciel de modélisation hydraulique 2D qui peut simuler les écoulements à surface libre, y compris les écoulements fluviaux, les inondations, les ondes de tempête et les courants de marée. Il utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations 2D des eaux peu profondes et peut gérer les conditions aux limites complexes, le transport des sédiments et les problèmes de qualité de l'eau. RiverFlow2D peut être utilisé pour un large éventail d'applications, y compris la cartographie des risques d'inondation, la gestion des plaines inondables et la conception technique des rivières.
11. **Rubar20** : C'est un progiciel développé par l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA), RUBAR20 signifie « Ruissellement Urbain » qui se traduit par « Urban Runoff » en anglais.

Il a été spécifiquement conçu pour simuler les processus hydrologiques urbains et le ruissellement généré dans les zones urbaines. Il s'agit d'un logiciel de modélisation hydraulique 2D qui se concentre sur l'analyse et la simulation du ruissellement de surface, de l'infiltration et du drainage en milieu urbain. Le logiciel prend en compte diverses caractéristiques urbaines telles que les bâtiments, les routes, les trottoirs et les espaces verts pour modéliser les interactions complexes entre les précipitations, le ruissellement de surface et les systèmes de drainage. Aussi, comme ça a été mentionné sur le site de l'INRAE, l'un des buts de ce logiciel est le : « Développement d'un code de calcul hydrodynamique et morphologique robuste permettant de simuler des inondations extrêmes y compris dues à des ruptures de digues », autrement dit, le développement d'un code qui permet l'étude des cas extrêmes tels que les inondations.

L'objectif principal de RUBAR20 est d'aider les urbanistes, les ingénieurs et les chercheurs à mieux comprendre et gérer le comportement hydrologique dans les zones urbaines. Il permet l'évaluation des risques d'inondation, la conception et l'évaluation des systèmes de drainage et l'analyse de l'impact du développement urbain sur le ruissellement des eaux.

Parmi les logiciels cités ci-dessus, RUBAR20 sera utilisé pour notre modélisation. Les quelques raisons qui justifient ce choix :

1. Simulation de la morphodynamique : Rubar20 est spécialement conçu pour prendre en compte les interactions entre l'hydrodynamique et la morphologie des cours d'eau. Il permet de simuler les variations du lit, l'érosion et la sédimentation, ainsi que les effets de la végétation sur la dynamique fluviale.
2. Modélisation des écoulements complexes : Le logiciel Rubar20 dispose d'outils pour modéliser des écoulements complexes, tels que les écoulements en régime transitoire, les écoulements à surface libre, les écoulements en régime non uniforme et les écoulements en régime mixte.
3. Analyse des risques d'inondation : Rubar20 peut être utilisé pour évaluer les risques d'inondation en simulant les écoulements dans les cours d'eau, en analysant les débits et les hauteurs d'eau, et en déterminant les zones susceptibles d'être inondées.
4. Gestion des cours d'eau : Le logiciel Rubar20 permet d'évaluer l'efficacité des aménagements fluviaux et des mesures de gestion des cours d'eau. Il permet de simuler différentes configurations, de tester des scénarios d'aménagement et d'évaluer leur impact sur la dynamique fluviale.

Maintenant que le choix du logiciel est effectué, il faut définir les équations avec lesquelles celui-ci effectue les calculs et approximations. Le logiciel RUBAR20 utilise -comme la majorité de ses homologues, les équations de Saint-Venant bidimensionnelles par volume fini.

## 2. Équations de la modélisation et de la résolution des problèmes de la MDF

### 2.1. Les équations de Navier-Stokes

La modélisation et la résolution numérique des problèmes de mécanique des fluides impliquent l'utilisation d'équations mathématiques pour décrire le comportement des fluides. Les équations les plus couramment utilisées sont les équations de Navier-Stokes, qui sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie d'un fluide. Les équations de Navier-Stokes sont données par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

Avec :  $\rho$  : Masse volumique du fluide ( $\text{Kg/m}^3$ ) ;  $t$  : Temps (s) ;  $\nabla$  : Opérateur nabla représentant le gradient ;  $u$  : Champ de vecteurs de vitesse du fluide (m/s)

Cette équation indique que le taux de variation de la masse volumique ( $\rho$ ) par rapport au temps ( $t$ ) plus la divergence du flux massique ( $\rho u$ ) est égale à zéro,  $u$  représente le vecteur vitesse [Hunt, 1968].

1. L'équation de conservation de quantité de mouvement suivant  $x$  :

$$\rho \left( \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + \rho g_x + F_x$$

2. L'équation de conservation de quantité de mouvement suivant  $y$  :

$$\rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) + \rho g_y + F_y$$

3. L'équation de conservation de quantité de mouvement suivant  $z$  :

$$\rho \left( \frac{\partial W}{\partial t} + u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} + w \frac{\partial W}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) + \rho g_z + F_z$$

Avec,

$\rho$  : Masse volumique du fluide ( $\text{Kg/m}^3$ )

$t$  : Temps (s)

$U$  : Composante du champ de vecteurs de vitesse dans la direction  $x$  (m/s)

$V$  : Composante du champ de vecteurs de vitesse dans la direction  $y$  (m/s)

$W$  : Composante du champ de vecteurs de vitesse dans la direction  $z$  (m/s)

$p$  : Pression

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

$g$  : Champ de vecteurs de l'accélération gravitationnelle ( $\text{m/s}^2$ )

$F_x$  : Force externe dans la direction  $x$  (N)

$F_y$  : Force externe dans la direction  $y$  (N)

$F_z$  : Force externe dans la direction  $z$  (N)

$V$  : Composante du champ de vecteurs de vitesse dans la direction  $y$  [Hunter, 1968].

Ces équations peuvent être résolues numériquement à l'aide de méthodes telles que les méthodes de différences finies, les méthodes de volumes finis et les méthodes spectrales, Ces méthodes discrétisant l'espace et le temps, et approximant les équations de Navier-Stokes en un système d'équations algébriques qui peut être résolu à l'aide d'algorithmes numériques.

Les équations de Navier-Stokes peuvent également être couplées à d'autres équations pour modéliser des phénomènes tels que la turbulence, la combustion, la convection naturelle, etc. Les méthodes numériques peuvent être adaptées à ces modèles couplés pour résoudre des problèmes complexes de mécanique des fluides,

Il serait idéal d'utiliser les équations de Navier-Stokes pour la résolution numérique d'un quelconque problème de la mécanique des fluides, cependant, la complexité de ces équations nous empêche de procéder de la sorte, citons quelques points qui illustrent cette difficulté et qui nous poussent à utiliser les équations d'Euler ou celles de Saint-Venant :

1. Efficacité de calcul : la résolution des équations de Navier-Stokes nécessite la résolution d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui tiennent compte à la fois des termes convectifs et visqueux, Ces équations sont exigeantes en termes de calcul et nécessitent la résolution d'un grand nombre d'équations, En revanche, les équations d'Euler et les équations de Saint-Venant sont plus simples et plus efficaces en termes de calcul, ce qui les rend plus adaptées aux simulations CFD pratiques,
2. Applicabilité aux écoulements incompressibles : Les équations d'Euler et les équations de Saint-Venant sont valables pour les écoulements incompressibles, où la densité du fluide reste constante, Cette hypothèse est souvent raisonnable pour de nombreuses applications d'ingénierie, telles que l'écoulement de l'eau dans les rivières, les canaux et les conduites, où les variations de densité de fluide sont négligeables,
3. Négligence des effets visqueux : Les équations d'Euler négligent les effets visqueux et les équations de Saint-Venant apportent certaines simplifications dans la représentation des pertes par frottement dans l'écoulement en canal ouvert, Bien que cela néglige les détails fins du comportement des fluides, cela est acceptable pour de nombreux problèmes d'ingénierie où l'accent est mis principalement sur les schémas d'écoulement globaux, les forces et les calculs d'énergie plutôt que sur le comportement visqueux précis,
4. Adapté aux flux à grande échelle : les équations d'Euler et de Saint-Venant sont particulièrement bien adaptées à la modélisation des flux à grande échelle, tels que le débit des rivières, les courants océaniques ou les flux atmosphériques, Dans ces cas, les forces dominantes sont liées aux variations de pression et à l'accélération convective, rendant plus appropriées les simplifications des équations d'Euler ou de Saint-Venant,

Cependant, il est important de noter qu'il existe des cas où les équations de Navier-Stokes sont nécessaires, par exemple lorsque l'on considère des écoulements très visqueux, des écoulements compressibles ou des écoulements près de limites solides où les effets de la couche limite sont importants. Dans de tels cas, des techniques numériques et des ressources informatiques plus avancées sont nécessaires pour résoudre avec précision les équations de Navier-Stokes. Dans l'ensemble, le choix d'utiliser les équations d'Euler, les équations de Saint-Venant ou les équations de Navier-Stokes dépend du problème spécifique, du niveau de précision requis et des ressources de calcul disponibles. Les ingénieurs et les scientifiques sélectionnent avec soin les modèles mathématiques appropriés en fonction de ces considérations pour obtenir des simulations précises et efficaces pour des applications pratiques.

## **2.2. Les équations de Saint-Venant**

Les équations de Saint-Venant : Ces équations sont souvent utilisées pour modéliser les écoulements de surface libre et peu profonds, tels que les écoulements de rivières et de canaux, elles sont dérivées des équations de Navier-Stokes, plusieurs hypothèses simplificatrices sont faites pour y parvenir.

Les équations de Saint-Venant sont une forme simplifiée des équations complètes de Navier-Stokes qui sont couramment utilisées pour l'analyse de l'écoulement en canal ouvert et des écoulements en eaux peu profondes, Voici un aperçu du processus de dérivation :

### **Hypothèses**

1. Le débit est constant, c'est-à-dire qu'il ne change pas avec le temps, Le flux est incompressible, ce qui signifie que la densité est constante, L'écoulement est irrotationnel, ce qui implique que la vorticité est négligeable.
2. L'écoulement est peu profond, ce qui signifie que la profondeur de l'écoulement est beaucoup plus petite que la longueur caractéristique.

### **Simplification des équations de Navier-Stokes**

Pour simplifier les équations de Navier-Stokes, Il faut négliger les termes convectifs et les termes d'accélération dans les équations de quantité de mouvement, En supposant :

1. Une répartition de la pression hydrostatique.
2. Une profondeur d'écoulement constante à travers le canal.

Intégration verticale : Intégrer les équations simplifiées verticalement sur la profondeur de l'écoulement pour obtenir des équations moyennées en profondeur.

Hypothèse de pentes douces : En supposant que la pente du lit est petite, de sorte que les changements de vitesse dans la direction horizontale soient faibles par rapport aux changements verticaux.

Les équations résultantes, connues sous le nom d'équations de Saint-Venant, décrivent la conservation de la masse (équation de continuité) et la conservation de la quantité de mouvement (équation de quantité de mouvement) dans un écoulement d'eau peu profonde, elles forment un système d'équations aux dérivées partielles qui peuvent être résolues numériquement pour simuler le comportement des écoulements en canal ouvert et en eaux peu profondes.

Il est important de noter que, puisque la dérivation des équations de Saint-Venant implique des hypothèses simplificatrices, Leur applicabilité est limitée à des types spécifiques de flux et de conditions, Les équations complètes de Navier-Stokes fournissent une description plus complète de l'écoulement des fluides, mais sont plus gourmandes en calcul à résoudre.

Les équations de Saint-Venant sont les suivantes :

Equation de continuité :

$$\frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) + \frac{\partial Z_s}{\partial t} = 0$$

Equations de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + f(hv) + A_h \Delta(hu) + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{fx}}{\rho}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + f(hu) + A_h \Delta(hv) + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{fy}}{\rho}$$

Avec,

$u$  et  $v$  composantes du vecteur vitesse moyenne  $\vec{u}$  dans les directions  $x$  et  $y$  respectivement (m/s)

$h$  profondeur d'eau(m)

$Z_s$  et la dénivellation de la surface libre d'eau

$\tau_{fx}$  et  $\tau_{fy}$  Composantes du vecteur contrainte  $\vec{\tau}_f$  dans la direction  $x$  et  $y$  respectivement

$\tau_{sx}$  et  $\tau_{sy}$  Composantes du vecteur  $\vec{\tau}_s$  contrainte dues au vent en surface dans la direction  $x$  et  $y$  respectivement(N /m<sup>2</sup> )

$A_h$  Coefficient de diffusion (m<sup>2</sup>/s )

$f$  Paramètre de Coriolis (N.s/m)

g accélération de la gravité ( $m/s^2$ ), t le temps (s).

Pour la modélisation hydraulique, il faut commencer par créer le MNA de notre zone d'étude. A cette fin, nous allons utiliser une image satellite extraite de Google Earth Pro. Sur celle-ci, le MNA de la centrale et de ses environs est construit manuellement à travers les différents relevés topographiques mis à disposition (ceux fournis par GE, à travers Google Earth Pro, et à travers le MNT obtenu à travers QGIS). La construction du MNA se fait à travers l'outil Fudaa Modeleur, après l'obtention du MNA, on utilise ce dernier travers l'outil Fudaa Prepro pour introduire nos hydrogrammes de crue et les données relatives à l'écoulement. Enfin, on exécute notre programme et on obtient un fichier contenant les résultats, sur celui-ci, nous pouvons observer l'évolution de la crue et de ses différents paramètres, notamment les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement. A travers ces résultats, nous pouvons calculer un certain nombre de paramètres qui nous seront très utiles par la suite :

La simulation sur RUBAR20 a été effectuée sur une durée de 4500s dans la simulation, chaque seconde dans la simulation équivaut à 1 minute dans la réalité. Donc au total, notre simulation s'étend sur 75h en temps réel, ou 3 jours et 3 heures.

Quelques images de l'évolution de l'inondation à travers le temps sont données ci-dessous.



Photo 4-1 : Evolution de l'inondation (après 500 minutes de son début)



Photo 4-2 : Evolution de l'inondation (après 722 minutes de son début)

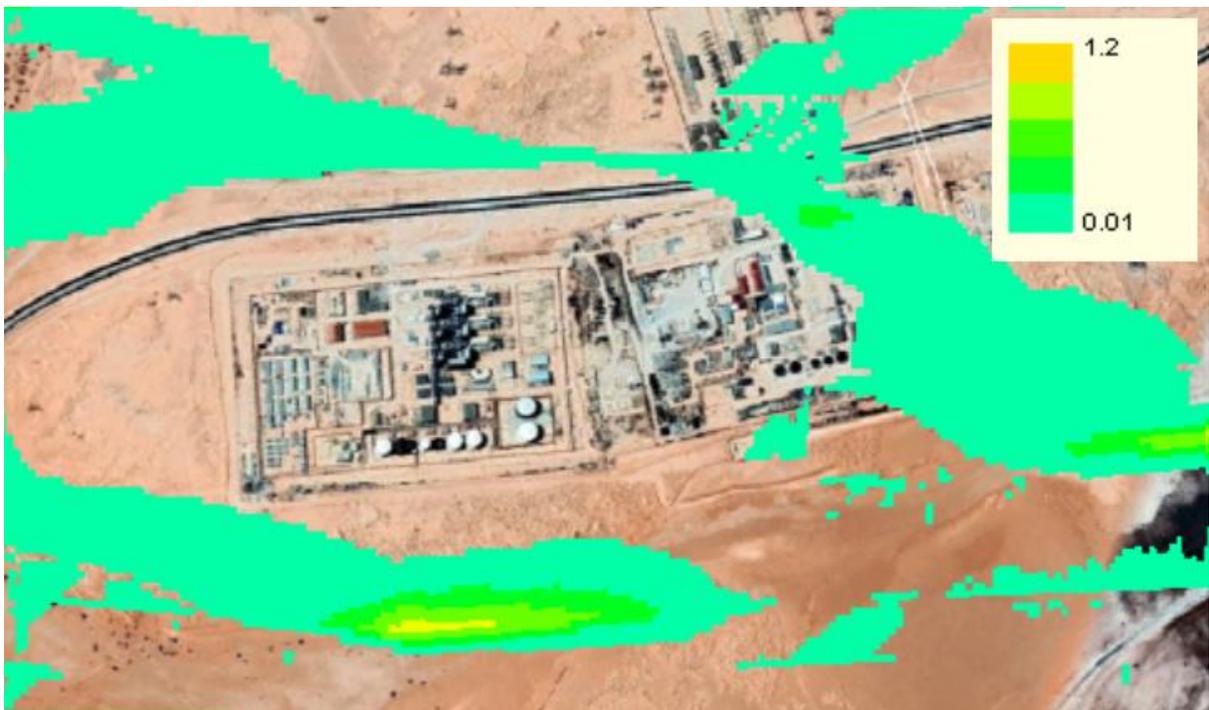


Photo 4-3 : Evolution de l'inondation (après 1242 minutes de son début)



Photo 4-4: Evolution de l'inondation (après 1540 minutes de son début)



Photo 4-5 : Evolution de l'inondation (après 1789 minutes de son début)



Photo 4-6 : Evolution de l'inondation (après 2776 minutes de son début)



Photo 4-7 : Evolution de l'inondation (après 4500 minutes de son début)

Continuer la simulation l'inondation au-delà de cette limite serait inutile, l'eau qui est visible dans la dernière image ne sera pas pour autant évacuée, celle-ci stagnera jusqu'à ce qu'elle s'évapore en raison de la pente très faible du lit de l'oued au niveau de la centrale.

Il faut noter que les paramètres suivants ont été utilisés pour la simulation :

Coefficient de frottement (Strickler) :  $K_s = 40 \left( \frac{1}{\sqrt[3]{m.s}} \right)$

Viscosité dynamique :  $\mu = 150 \text{ m}^2/\text{s}$

Pas de temps de 1 seconde.

A partir de la simulation précédente, il est possible d'estimer les caractéristiques maximales de l'écoulement et même d'établir le graphe de l'évolution du volume d'eau de la crue. Les résultats suivants sont obtenus :

Le volume total de l'eau qui menace la centrale N°01 à son Nord-Ouest est donc de :

$$\mathbf{V_{\max} = 1674 \text{ m}^3.}$$

La vitesse maximale qu'à atteint l'eau aux limites de la centrale est  $\mathbf{v_{\max} = 2,5 \text{ m/s}}$ .

La hauteur maximale qu'à atteint l'eau aux abords de la centrale est de  $\mathbf{h_{\max} = 1,2 \text{ m}}$ .

A partir de ces résultats, nous pouvons passer à la dernière étape de notre étude et dimensionner les potentiels solutionnements adéquats.

# Chapitre 5

## Ouvrages de Protection contre les inondations et solutionnement

Dans le présent chapitre, il sera question de dimensionner les solutions adéquates pour protéger notre zone d'étude, il est nécessaire de souligner que la zone qui est en risque d'inondation et de submersion est la zone de la centrale N°01, et que le risque provient du pertuis situé au Nord-ouest de celle-ci. Aussi, notre solutionnement se concentrera sur cette partie de la centrale.

Avant tout chose, commençons par donner quelques exemples de solutionnements et ouvrages de protection.

### 1. OPIs

Les Ouvrages de Protection contre les Inondations ou OPI, désignent les ouvrages ou sous-ouvrages qui font partie d'un plus grand système dont la fonction principale ou l'une de ses fonctions secondaires consiste en l'isolation d'une zone contre une source d'eau susceptible d'inonder la zone protégée. La protection contre les inondations peut être naturelle : couverts végétaux qui ralentissent l'écoulement, Retenues surfaciques qui jouent le rôle de bassins de rétention.

Parmi les OPI les plus récurrent, il y a :

#### 1.1. Dignes de protection

Les digues sont des ouvrages hydrauliques de génie civil qui servent à contenir les eaux des cours d'eau et à prévenir les débordements. Elles sont construites le long des rives, formant une barrière solide contre les crues. Les digues sont généralement construites en utilisant des matériaux tels que le sol compacté, le béton armé ou les gabions (structures en treillis métallique remplis de pierres).

Pour garantir leur efficacité, les digues peuvent être renforcées avec des revêtements étanches. Ces revêtements, tels que des géotextiles, des géomembranes ou des matériaux composites, sont appliqués sur la surface de la digue pour empêcher les infiltrations d'eau et minimiser les risques de fuite.

De plus, les digues peuvent être équipées de dispositifs de drainage pour évacuer l'eau accumulée à l'intérieur de la digue. Des drains perforés ou des canaux de drainage sont installés à des intervalles réguliers pour intercepter l'eau qui s'infiltré à travers la digue et la rediriger vers l'extérieur. Cela permet de réduire les pressions hydrostatiques à l'intérieur de la digue, améliorant ainsi sa stabilité.

Par ailleurs, les digues peuvent également être équipées de systèmes de surveillance pour détecter les signes de défaillance potentielle. Des capteurs de pression, des inclinomètres, des piézomètres et d'autres instruments de mesure sont utilisés pour surveiller en continu les variations de pression, les mouvements de terrain et d'autres paramètres importants. Cela permet d'identifier rapidement les problèmes et de prendre des mesures correctives avant qu'une défaillance majeure ne se produise.

Enfin, lors de la conception et de la construction des digues, il est crucial de prendre en compte les caractéristiques hydrauliques de la zone concernée, telles que les débits d'eau attendus, la hauteur des crues et la nature du sol. Des études hydrauliques détaillées et des modèles de simulation numérique sont utilisés pour évaluer les charges hydrauliques et dimensionner les digues de manière appropriée.

L'objectif principal des digues est de fournir une protection fiable contre les inondations en maintenant l'eau à l'intérieur du lit du cours d'eau. Cependant, il est important de noter que les digues ne sont pas infaillibles et peuvent être soumises à des risques tels que l'érosion et les défaillances structurelles. Par conséquent, une gestion régulière de l'entretien et des inspections est essentielle pour assurer la fiabilité et la durabilité des digues de protection contre les inondations.

Quelques exemples réels de digues de protection contre les inondations sont donnés ci-dessous :

- a) Digue de protection des Pays-Bas (Delta Works) : Les Pays-Bas sont un pays vulnérable aux inondations en raison de sa géographie basse et de la proximité de la mer. Le système de digues des Delta Works est l'un des plus grands et des plus complexes au monde. Il comprend des digues, des barrages mobiles, des écluses et des estacades pour protéger le pays contre les inondations marines.

- b) Digue de protection de la Nouvelle-Orléans (Louisiane, États-Unis) : Après le passage de l'ouragan Katrina en 2005, la ville de la Nouvelle-Orléans a mis en place un système de digues de protection. Le système comprend des digues, des canaux de dérivation, des pompes et des structures de contrôle des écoulements pour réduire les risques d'inondation causés par les ouragans et les crues du fleuve Mississippi.
- c) Digue de protection du fleuve Yangtsé (Chine) : Le fleuve Yangtsé en Chine est le plus long fleuve du pays et est également sujet à des crues importantes. Des digues massives ont été construites le long du fleuve pour protéger les zones habitées et les terres agricoles des inondations. Des dispositifs de décharge et des canaux de dérivation sont également utilisés pour réguler les débits d'eau pendant les crues.

### **1.2. Systèmes de gestion et d'évacuation des eaux pluviales**

Ces systèmes sont conçus pour collecter et gérer les eaux de pluie et de ruissellement afin de prévenir les inondations. Ils peuvent comprendre des bassins de rétention, des toits verts, jardins pluviaux, et d'autres aménagements qui ne cessent d'être développés et perfectionnés.



Photo 5-1 : Système de captage et distribution des eaux de pluies dans la vallée du M'zab, Ghardaïa

### **1.3. Murs anti-inondations**

Un mur anti-inondation est une structure verticale en béton, en acier ou en matériaux composites qui est érigée le long des rives d'un cours d'eau ou autour d'une zone à risque d'inondation. Sa principale fonction est de bloquer l'écoulement de l'eau pendant les périodes de crue. Les murs anti-inondations sont souvent construits à une hauteur suffisante

pour résister aux débordements prévus. Ils peuvent être permanents ou démontables, offrant ainsi une protection rapide lorsqu'elle est nécessaire. Les murs anti-inondations peuvent être équipés de portes, de vannes ou d'autres dispositifs pour permettre un contrôle du débit d'eau.

#### **1.4. Aménagement des canaux**

L'aménagement des canaux et des rivières vise à modifier ces cours d'eau pour améliorer leur écoulement et réduire les risques d'inondation. Différentes techniques sont utilisées dans le cadre de ces aménagements. Voici quelques exemples :

- a) **Dragage** : Le dragage consiste à enlever les sédiments et les dépôts accumulés au fond des canaux et des rivières. Cela permet d'augmenter la capacité d'écoulement de l'eau en éliminant les obstructions et en réduisant les risques d'engorgement.
- b) **Élargissement des canaux** : L'élargissement des canaux implique l'augmentation de leur largeur. Cela permet d'augmenter leur capacité à transporter de plus grandes quantités d'eau. En élargissant les canaux, on réduit également les risques d'engorgement et d'inondation.
- c) **Redressement des canaux** : Le redressement des canaux consiste à rectifier leur tracé afin de réduire les méandres et les courbes prononcées. Cela permet d'améliorer l'écoulement de l'eau en réduisant les pertes d'énergie et en augmentant la vitesse d'écoulement. Le redressement des canaux peut également aider à prévenir les accumulations de sédiments et les risques de colmatage.
- d) **Seuils régulateurs** : Les seuils régulateurs sont des structures construites transversalement aux canaux et aux rivières pour contrôler le niveau d'eau. Ils sont utilisés pour réguler le débit et maintenir des niveaux d'eau appropriés. Les seuils régulateurs permettent de limiter les crues et les débordements en régulant le flux d'eau.
- e) **Écluses** : Les écluses sont des ouvrages hydrauliques utilisés pour contrôler le niveau d'eau et faciliter la navigation. Elles sont souvent utilisées dans les rivières navigables et les canaux pour réguler le débit, maintenir des niveaux d'eau constants et faciliter le passage des embarcations.

#### **1.5. Les bassins de rétention**

Des bassins construits en amont des zones à protéger pour emprisonner et stocker une partie du débit, retarder son écoulement vers l'aval, et minimiser celui qui arrive à l'aval. Elles peuvent également servir de moyen de recharge des nappes phréatiques.



Photo 5-2 : Le « Pittman North Detention Basin » 100<sup>ème</sup> bassin de rétention  
De la ville de Las Vegas

### **1.6. Les ouvrages de dérivation des eaux**

Comme les canaux de dérivation et les cours d'eau artificiels (La différence majeure entre le canal et le cours d'eau étant que le cours d'eau est un ouvrage "sauvage", il suffit de creuser en longueur et de créer une dépression à l'apparence sauvage, le canal quant à lui est aménagé, son fond et ses berges sont bétonnés et sa section est géométrique). Les canaux de dérivation sont des ouvrages qu'on construit pour détourner une partie, ou l'intégralité du débit d'un oued pour le détourner.

### **1.7. Les barrières mobiles**

Les barrières mobiles, telles que les barrières anti-inondations ou les sacs de sable, peuvent être déployées rapidement pour protéger les zones vulnérables lorsqu'une inondation se produit. Elles sont faciles à installer et à retirer, ce qui en fait une solution temporaire mais efficace pour la protection contre les inondations.

### **1.8. Les systèmes de pompage**

Les systèmes de pompage sont utilisés pour évacuer rapidement l'eau des zones inondées vers des endroits plus sûrs. Les pompes peuvent être installées dans des stations de pompage ou utilisées de manière mobile pour drainer les zones inondées.

Les OPI précédentes étaient de type « physique », c'est-à-dire qu'elles représentent des solutions palpables qui ont pour but la prévention et la protection contre les inondations.

Cependant, d'autres systèmes existent, et ces derniers peuvent être classés comme étant des systèmes « logistiques » qui aident à la gestion, avant, et pendant l'occurrence des inondations :

### **1.9. Systèmes de gestion des urgences**

Il s'agit de systèmes mis en place pour aider à gérer la réponse aux inondations, y compris les plans d'évacuation, les systèmes de communication et les abris d'urgence.

### **1.10. Assurance inondation**

Il s'agit d'un type d'assurance qui peut aider à protéger les propriétaires contre les dommages causés par les inondations en offrant une compensation financière pour les pertes subies lors d'une inondation.

### **1.11. Systèmes d'alerte précoce**

Ces systèmes utilisent des technologies telles que des capteurs et des images satellites pour détecter les changements dans les niveaux d'eau et fournir une alerte précoce d'inondations potentielles. Malgré la performance de ces systèmes, leur avantage se limite généralement au fait qu'ils avertissent les personnes dans les zones de risque pour qu'elles évacuent les lieux, ils nous accordent rarement suffisamment de temps pour sécuriser et sauver les biens matériels.

### **1.12. Aménagement du territoire**

Il s'agit de réglementer l'utilisation des terres dans les zones inondables afin de minimiser les risques de dommages dus aux inondations. Cela peut inclure des mesures telles que des restrictions de zonage, des codes de construction et la préservation des plaines inondables naturelles. De plus, ça englobe également la responsabilité des autorités concernées à effectuer des études méticuleuses avant la réalisation d'un quelconque projet de construction dans une zone donnée.

### **1.13. Solutionnement**

Maintenant que toutes les données sont réunies, il est possible d'effectuer le choix et dimensionnement de nos ouvrages.

## **2. Choix des OPIs**

1. Commençons par le plus évident, une partie de la crue de l'oued menace la partie Nord-Est de la centrale. Cependant, les vitesses d'écoulement et les hauteurs d'eau n'atteignant pas des grandeurs alarmantes, cette partie peut être protégée à l'aide

d'un mur en béton armé. Le dimensionnement de celui-ci **dépend** des hauteurs d'eau et vitesses qui menacent le côté Nord-Ouest.

2. Pour le côté Nord-Ouest, la zone la plus menacée, plusieurs solutions sont à envisager :
  - a) La solution la plus évidente est de demander à l'état la révision de la conception de la nouvelle route nationale N°01, pour une éventuelle condamnation du pertuis initial et le déplacement de celui-ci vers l'aval de la centrale où il ne risquera plus de menacer notre zone.
  - b) La construction d'un canal de dérivation des eaux qui longe la nouvelle route nationale N°01 et qui empêche l'arrivée de l'eau vers le pertuis. Cependant, les dimensions de celui-ci seront trop grandes (Surface de la section transversale  $S = 50,482\text{m}^2$  pour évacuer seulement la moitié du débit bicentennal) et il risquera de déstabiliser la route et de causer des effondrements.
  - c) La construction d'un mur autour de la centrale, suffisamment résistant pour bloquer le passage de la crue bicentennale et isoler la centrale de celle-ci.
  - d) Faire des excavations sur la partie qui apporte de l'eau vers le pertuis et créer une retenue surfacique.

### 3. Dimensionnement du mur de protection

Pour ce faire, il suffit d'utiliser la relation qui nous permet de vérifier qu'un mur résiste au renversement :

$$\frac{M_s}{M_d} = K \quad \text{et} \quad M_i = \rho_i * L * l * h * d$$

Avec,

$M_s$  : Moment des forces stabilisantes (Kg.m) ;

$M_d$  : Moment des forces déstabilisantes (Kg.m)

et  $K_r$  coefficient de sécurité au renversement ;

$\rho_i$  : masse volumique du matériau ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) ;

$L$  : Longueur sur laquelle s'applique la force (m) ;

l : largeur ou profondeur sur laquelle s'applique la force(m) ;

h : hauteur sur laquelle s'applique la force(m) ;

d : distance entre le point d'application de la force et celui pris comme référence pour le calcul des moments (on prendra le point au coin interne -par rapport à la centrale- du mur (m).

Et la relation qui nous permet de vérifier qu'un mur résiste au glissement :

$$\frac{\text{Somme des charges verticales}(f)}{\text{Somme des charges horizontales}} = K_g$$

Avec : charge verticale (Kg), charge horizontale (Kg), f : coefficient de frottement égal à 0,8 pour notre type de sol.

### 3.1. Renversement

Pour le renversement, nous avons comme force stabilisante : poids propre du mur et comme force déstabilisante celle de l'eau chargée.

$$M_d = M_e = \rho_e * L * l * h * d$$

Notons que :

$\rho_e$  : masse volumique d'une eau très chargée en sable, on prend  $\rho_e = 1600 \text{Kg/m}^3$  ;

L=L ongueur du mur au Nord-Est de la centrale, on prend L= 510m ;

l : l'épaisseur du mur, on prend l = 0,3 m,

h : la hauteur, on prend  $h_{\text{eau}} = 1,2 \text{m}$  ;  $d_{\text{eau}} = 0,3 \text{m}$  et  $d_{\text{mur}} = 0,15 \text{m}$ .

Nous allons prendre  $K_r = 1,3$ .

Il faut déterminer  $M_s$  pour ces valeurs puis  $h_{\text{mur}}$  pour ces valeurs :

$$M_d = M_e = (1600)(510) (1,2) (0,3) (0,3) = 88128 \text{ Kg.m}$$

On en déduit :  $M_s = K_r (M_d) = 1,3 * (88128) = 114566,4 \text{ Kg.m}$

$$\text{Donc : } h_{\text{mur}} = M_s / (L * l * d) * \rho_b = 4992 / \rho_b$$

- Si on prend un béton de qualité moyenne dont la masse volumique  $\rho_b=2200 \text{ Kg/m}^3$ , on trouve :  $h_{\text{mur}} = 2,27 \text{ m}$
- Si on prend un béton de bonne qualité dont la masse volumique  $\rho_b=2500 \text{ Kg/m}^3$ , on trouve :  $h_{\text{mur}} = 2,00 \text{ m}$

### 3.2. Glissement

Vérifions la condition au glissement pour un mur de  $h = 2\text{m}$  construit avec un béton de masse volumique  $\rho_b = 2500 \text{ Kg/m}^3$ .

Comme charge verticale nous avons celle du mur et comme charge horizontale nous avons celle de l'eau.

$$\frac{\text{Somme des charges verticales}(f)}{\text{Somme des charges horizontales}} = \frac{\text{charge du mur}(f)}{\text{charge de l'eau}} = \frac{\rho_b.L.l.h(f)}{\rho_e.L.l.h} = \frac{2500(510)(0,3)(2)(0,8)}{1000(510)(0,3)(1,2)} = 3,33$$

On trouve  $K_g = 3,33$  ce qui est plus que satisfaisant comme résultat (en général, des valeurs de 1,3 à 1,5 sont préconisées).

### 4. Volume des excavations

Dans le cas où les excavations sont effectuées, celles-ci devront avoir le volume de la crue, donc  $V_{\text{excavations}} = V_{\text{crue}} = 1674 \text{ m}^3$ .

Pour ce volume, on peut excaver un bassin de rétention de 3 mètres de profondeur, sur une surface de  $S = 625\text{m}^2$  ( $25\text{m} \times 25\text{m}$ ). Le seul inconvénient sera que celui-ci se remplira de sable au fur et à mesure. À long terme, il faudra construire un nouveau bassin à chaque fois que la nécessité se présente (après une crue importante ou plusieurs crues relativement faibles), sinon, il faudra vider le bassin initial du sable qui s'y sera amassé.

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail a permis l'étude des crues sahariennes. Plus spécifiquement, celles qui menacent la région de Hassi R'mel dans la wilaya de Laghouat. Il a été possible de quantifier ces crues, d'établir les hydrogrammes de crue les décrivant, et simuler le comportement de l'Oued Tilghemt en réponse à la crue bicentennale. Pour enfin, déterminer les zones menacées d'être inondées, et établir des ouvrages de protection capable de faire face à cette crue bicentennale et aux dégâts qu'elle est susceptible de causer.

Cette étude a été effectuée à l'aide de plusieurs logiciels. Notamment, QGIS pour délimiter le bassin versant de notre oued, son réseau hydrographique et ses différentes caractéristiques. HYFRAN+ pour les ajustements statistiques de nos données pluviométriques, et RUBAR20 pour la simulation hydrodynamique des inondations.

Les solutions proposées dans cet humble travail ont été conçues pour contrer au maximum le risque qui menace notre zone d'étude. Néanmoins, ce travail ne propose pas toutes les solutions existantes et envisageables. Il propose uniquement qu'un certain nombre de solutions seulement, des solutions qui sont fiables et bien étudiées.

## Références Bibliographiques

- ALI AZOUAOU, Fathellah. *Simulation de la crue d'octobre 2008 dans la commune de Ghardaia via le code de calcul rubar20*. 2009. Thèse de doctorat. École Nationale Polytechnique.
- AMANDINE, Cortes. L'appropriation active du risque inondation : intérêts et limites de la réglementation. *Etude de cas entre Seyssel et Bregnier Cordon (Haut Rhône), Rapport de stage Ingénieur Maître-Institut de la Montagne*, 2006.
- AZIOUNE, Rokia et TATAR NÉE BOULKHEDID, Hafiza. *L'inondation en milieu urbain et le changement climatique dans le nord-est algérien étude de cas*. 2022. Thèse de doctorat. Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- DAIFALLAH, Tarek, HANI, Azzedine, et SAYAD, Mouldi. Prédétermination des débits de crue par différentes méthodes. Cas du bassin versant d'El Kébir Ouest à Ain-Charchar (Nord-Est algérien). *Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie*, 2017, vol. 34, p. 74-84.
- HUNT, G. E. An Introduction to Fluid Dynamics. By GK Batchelor. Pp. 615. 75s.(Cambridge.). *The Mathematical Gazette*, 1968, vol. 52, no 380, p. 206-207.
- KADIR, Omar. *Délimitation des zones inondables: cas de l'Oued Sebaou*. 2006. Thèse de doctorat. Ecole nationale polytechnique.
- LEDOUX, Bruno. *La gestion du risque inondation*. Éditions Tec & Doc, 2006.
- MERABET, Abbés. Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations. *Mémoire de Magister, Université de Djilali Liabes-Sidi Bel Abbés*, 2006.
- MERABET, Elhoussaine. *Simulation de la crue centennale de l'oued Belghanem (W. Ghardaïa) via le logiciel HEC-RAS*. 2015. Thèse de doctorat.
- RECHACHI, Miled Zohra. *Impact de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation des sols en régions arides et semi arides : cas de la région du Ziban*. 2017. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- SALOMON, Jean-Noël. *L'homme face aux crues et aux inondations*. Presses Univ de Bordeaux, 1997.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, et al. Geographical information systems (GIS): mapping for epidemiological surveillance. *Weekly Epidemiological Record= Relevé épidémiologique hebdomadaire*, 1999, vol. 74, no 34, p. 281-285.

## WEBOGRAPHIE

- <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- <https://www.worldclim.org/data/index.html>
- <https://www.governova.com>
- <https://www.8newsnow.com/monsoon/monsoon-detention-basin/>