



UNIVERSITÉ CADI AYYAD MARRAKECH

Faculté des sciences et techniques Marrakech

2022/2023



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de licence

EAU ET ENVIRONNEMENT

Intitulé :

**PROTECTION CONTRE LES
INONDATIONS DANS LA ZONE DE
LALLA AZIZA**

Soutenu le : 19/06/2023

Réalisé par :

SOUMAYA ELKANBOUH

KHADIJA ELHOUFI

FATIMA ELBAAMRANI

Encadré par :

**Mr. B. IGMOULAN
(FSTG)**

**Mr. R. BARAKAT
(ABHT)**

Devant le jury composé de :

Mr. B. IGMOULAN (FSTG)

Mr. J. MOUSTADRAF (FSTG)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

لَأَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَلَكَهُ يَنَابِيعَ
فِي الْأَرْضِ ثُمَّ يُخْرِجُ بِهِ زَرْعًا مُخْتَلِفًا أَلْوَانُهُ ثُمَّ
يَهِيَجُ فَتَرَاهُ مُصْفَرًّا ثُمَّ يَجْعَلُهُ حُطَامًا إِنَّ فِي ذَلِكَ
لَذِكْرًا لِّأُولِي الْأَبْصَارِ

سورة الزمر الآية 21

صدق الله العظيم

DÉDICACE

Nous dédions ce modeste travail à :

*Nos parents *

Nous tenons à prendre un moment pour vous dire combien votre soutien et votre amour signifient pour nous. Vous avez été là pour nous tout au long de notre parcours et nous ne pourrions pas être plus reconnaissantes de vous avoir à nos côtés.

Nos professeurs

Votre persévérance, votre passion et votre dévouement nous ont tous inspirés. Nous apprécions votre contribution à notre éducation et vous en sommes éternellement reconnaissantes.

REMERCIEMENT

Nous voudrions tout d'abord adresser toute notre profonde gratitude à notre encadrant interne **Monsieur BRAHIM IGMOLAN** pour son soutien et son encouragement tout au long de ce projet. Nous sommes fières d'avoir pu travailler sous votre supervision et nous sommes reconnaissantes pour tout ce que nous avons appris de vous.

Grand merci à notre examinateur **Monsieur JALAL MOUSTADRAF** professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences et techniques d'avoir accepté de faire partie de notre projet de fin d'études.

Nous remercions pour tout Cœur **Monsieur RACHID BARAKAT** pour l'encadrement qu'il nous a offert tout au long de Notre stage, pour ses conseils, sa modestie, et sa patience.

Merci infiniment à **Monsieur SAIDI MOHAMED EL MEHDI** pour sa disponibilité, son soutien, et sa gentillesse, ses conseils avisés et son suivi attentif.

Et à toute l'équipe Pédagogique du Département de géologie.

Table des matières

Outils de travail.....	10
Introduction générale.....	12
Mise en avant de l'agence du bassin hydraulique Tensift.....	13
Chapitre1 : Aperçu sur la zone d'étude	
1 Contexte administratif :.....	16
2 Contexte géographique :.....	17
3 Contexte géologique :	19
4 Contexte climatique :	19
5 Diagnostic :.....	20
Chapitre2: étude hydrologique du bassin versant Lalla Aziza	
1 Introduction :.....	24
2 La morphologie du bassin versant Lalla Aziza :	24
2.1 Délimitation du bassin :	24
2.2 Lithologie du bassin versant :	27
2.3 Propriétés géométriques du Bassin versant Lalla Aziza.....	28
2.3.1 La surface :.....	28
2.3.2 Le périmètre :	28
2.3.3 La longueur du Talweg :.....	28
2.3.4 Les Caractéristiques de forme :.....	28
2.3.5 Le relief.....	30
2.3.6 Le rectangle équivalent :.....	32
2.3.7 Dénivelé :.....	33
2.3.8 Caractéristiques des pentes :	33
2.3.9 Récapitulatif des caractéristiques physiques du bassin versant : ...	34
2.4 Réseau hydrographique.....	35
2.5 Coefficient de ruissellement.....	36
Chapitre3 : Calcul des débits de pointe	
1 Introduction :.....	40

2	Analyse hydrométriques et pluviométriques :	40
2.1	Pluviométrie :	40
2.1.1	Pluies mensuelles :	40
2.1.2	Pluies saisonnières :	40
2.1.3	Pluies annuelles :	41
2.2	Hydrométrie :	42
2.2.1	Débits mensuels :	42
2.2.2	Débits saisonniers :	42
2.2.3	Débits annuels :	43
3	Calcul du temps de concentration :	44
4	Calcul des débits de pointe :	46
4.1	Méthodes empiriques :	46
4.1.1	Mallet-Gautier :	46
4.1.2	Fuller II :	47
4.1.3	Hazan-Lazarvic :	47
4.1.4	Récapitulation du calcul de débits :	48
4.2	Méthode d'ajustement statistique :	49
4.2.1	Analyse des Graphes (Méthode visuelle) :	49
4.2.2	Analyse statistique (Méthode numérique) :	50
4.3	Transposition par La méthode de Francou-Rodier :	51
4.4	Méthode de GRADEX :	53
4.4.1	Principe :	53
4.4.2	Méthode :	53

Chapitre 4 : : Simulation hydraulique pour évaluer les stratégies de protection contre les inondations

1	Introduction :	58
2	Étapes de simulation :	58
2.1	Étape 1 : Préparation des données topographiques.	58
2.2	Étape 2 : Création de la géométrie.	59
2.3	Étape 3 : Coefficient de Manning.	60

2.4	Étape 4 : Débits et conditions aux limites.	60
2.5	Étape 5 : Simulation hydraulique.....	62
3	Résultats de la simulation.....	62
3.1	Pour une période de retour de dix ans :.....	63
3.2	Pour une période de retour de vingt ans :	63
3.3	Pour une période de retour de cinquante ans :	63
3.4	Pour une période de retour de cent ans :	63
4	Solutions et protection de la zone étudiée :	66
	Conclusion.....	67
	BIBLIOGRAPHIE.....	68
	WEBOGRAPHIE.....	69
	ANNEXES.....	70

Liste des figures

Figure 1 : La zone d'intervention de l'agence du bassin hydraulique de Tensift.....	14
Figure 2 : La situation géographique de Lalla Aziza.....	17
Figure 3 : La zone d'étude sur la carte topographique	18
Figure 4 : La zone d'étude sur la carte géologique.....	19
Figure 5 : Températures et précipitations moyennes mensuelles(exemple de l'année de 2005).....	20
Figure 6 : Tracé en plan des cours d'eau traversant le centre Lalla Aziza.....	22
Figure 7 : Délimitation du bassin versant de Lalla Aziza.....	25
Figure 8 : Vérification de la délimitation du bassin versant Lalla Aziza sur Google Earth.....	26
Figure 9 : Délimitation du bassin versant Lalla Aziza en 3D.....	26
Figure 10 : La lithologie du bassin versant Lalla Aziza.....	27
Figure 11 : Caractérisation du bassin versant.....	29
Figure 12 : Carte hypsométrique du bassin versant Lalla Aziza.....	31
Figure 13 : Courbe hypsométrique du bassin versant Lalla Aziza.....	32
Figure 14 : Rectangle équivalent du bassin versant Lalla Aziza.....	33
Figure 15 : Carte des pentes du bassin versant Lalla Aziza(en degré).....	34
Figure 16 : Réseau hydrographiques du bassin versant Lalla Aziza.....	36
Figure 17 : Carte d'occupation du sol au niveau du bassin versant Lalla Aziza.....	37
Figure 18 : Les pluies moyennes mensuelles de la station de Iloudjane(1989/90 à 2017/18).....	40
Figure 19 : Les pluies moyennes saisonnières à Iloudjine(1989/90 à 2017/18).....	41
Figure 20 : Les pluies moyennes annuelles à Iloudjane (1989/90 à 2017/18).....	41
Figure 21 : Les débits moyens mensuels de la station de Iloudjane (1975/76 à 2017/18).....	42
Figure 22 : Les débits moyens saisonniers à Iloudjane(1975/76 à 2017/18).....	43
Figure 23 : Les débits moyens annuels de la station de Iloudjane (1975/76 à 2017/18).....	43
Figure 24 : Ajustement graphique des débits instantanés maximaux annuels selon les lois statistiques.....	50
Figure 25 : Délimitation du bassin versant de Iloudjane.....	52
Figure 26 : Ajustements graphique des données de Pjmax et Qjmax par la méthode de GRADEX.....	56

Figure 27 : Prise d'écran du relevé topographique de Lalla Aziza sur AutoCAD.....	59
Figure 28 : Prise d'écran du MNT TIN sur ArcGIS.....	59
Figure 29 : Prise d'écran du MNT RASTER sur ArcGIS.....	60
Figure 30 : Les débits pour différentes périodes de retour.....	61
Figure 31 : Conditions aux limites.....	61
Figure 32 : Fenêtre de simulation de la zone d'étude.....	62
Figure 33 : La crue correspondant à une période de retour de dix ans.....	64
Figure 34 : La crue correspondant à une période de retour de vingt ans.....	64
Figure 35 : La crue correspondant à une période de retour de cinquante ans.....	65
Figure 36 : La crue correspondant à une période de retour de cent ans.....	65
Figure 37 : Simulation de la zone inondable lors de la crue centennale.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données administratives.....	16
Tableau 2 : La population de Lalla Aziza et des communes voisines.....	16
Tableau 3 : Coordonnées géographiques de la zone d'étude.....	19
Tableau 4 : Relevés météorologiques de Lalla Aziza pour l'année 2005 : températures, précipitations.....	20
Tableau 5 : Les différents types de sous-bassins et leurs critères de classification.....	29
Tableau 6 : Les caractéristiques de forme du bassin versant Lalla Aziza.....	30
Tableau 7 : Récapitulatif des caractéristiques physiques du bassin versant Lalla Aziza.....	35
Tableau 8 : La distribution de l'occupation du sol dans le bassin versant.....	37
Tableau 9 : Extraits de coefficients de ruissellement des sols nus et les zones bâties (clean water team guidance compendium for watershed Monitoring and Assessment).....	38
Tableau 10 : Récapitulatif des formules de calcul du temps de concentration.....	45
Tableau 11 : Débits calculé par la formule Mallet-Gautier.....	46
Tableau 12 : Débits calculé par la formule Fuller II.....	47
Tableau 13 : Les valeurs des paramètres k_1 et k_2 en fonction de la situation géographique de la zone et de la pluviométrie annuelle.....	48
Tableau 14 : Débits calculé par la formule Hazan-Lazarevic.....	48
Tableau 15 : Débits de pointe obtenus par les méthodes empiriques.....	48
Tableau 16 : Ajustements numériques des lois statistiques pour la période de retour 100 ans.....	51
Tableau 17 : Débits selon la loi Weibull.....	51
Tableau 18 : Transposition de l'ajustement statistique.....	53
Tableau 19 : Débit de pointe par la méthode de GRADEX.....	55
Tableau 20: Transposition de la méthode de GRADEX.....	56
Tableau 21 : Récapitulatif des débits obtenus par les trois méthodes.....	56

Outils de travail

- ❖ **ArcGIS** est une suite de logiciels dédiés aux Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), développée par la société ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.). Cette suite comprend les éléments suivants :
 - ArcMap : Il permet l'édition des fichiers au format géodatabase.
 - ArcCatalog : Il facilite la gestion des données en fournissant un accès exhaustif aux informations sur les objets édités. Il s'agit d'un système de gestion de bases de données (SGBD).
 - ArcToolbox : Il regroupe une collection d'outils de transformation des données.
- ❖ **Un MNT** (Modèle Numérique de Terrain) est une représentation numérique du relief d'une zone donnée, indiquant les valeurs d'altitude. Il permet d'analyser les pentes, l'exposition et les formes de la surface topographique de cette zone géographique. C'est une ressource précieuse pour diverses applications telles que la cartographie, la planification urbaine, la gestion des ressources naturelles et l'hydrologie.
- ❖ Le logiciel **HYFRAN-PLUS** offre la possibilité d'ajuster un large éventail de distributions statistiques. Il a été développé par l'équipe du Professeur Bernard Bobée, Professeur Émérite à l'Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau-Terre et Environnement (INRS-ETE) situé à Québec. Ce logiciel utilise le critère d'information bayésien pour déterminer la distribution qui correspond le mieux aux données analysées.
- ❖ **Surfer** est un logiciel de cartographie et de visualisation de données géospatiales en 2D et 3D utilisé dans différents domaines tels que la géologie, l'hydrologie et la géophysique. Il permet de créer des cartes claires et précises à partir de divers types de données géospatiales.
- ❖ **Global Mapper®** est un logiciel SIG puissant et convivial, conçu pour les professionnels de la géomatique. Il offre une large gamme d'outils pour visualiser, éditer, analyser et présenter des données spatiales. Grâce à son interface intuitive, il permet une utilisation facile, même pour les débutants. Global Mapper prend en charge de nombreux formats de données et aide les organisations à optimiser leurs opérations géospatiales en créant des cartes précises et en gérant efficacement leurs données.
- ❖ **HEC-RAS** est un logiciel spécialisé dans l'analyse hydraulique. Il est conçu pour modéliser les écoulements à surface libre dans les canaux naturels et artificiels, en prenant en compte les ouvrages de franchissement tels que les ponts et les barrages. Ce logiciel permet de simuler les écoulements graduellement variés en régime transitoire, ce qui

signifie qu'il peut prendre en compte les changements de débit au fil du temps. De plus, il permet d'effectuer des calculs de lignes d'eau en régime dynamique, en simulant les différents obstacles présents le long du cours d'eau.

- ❖ **AutoCAD** est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) utilisé dans les domaines de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Il permet la création de dessins techniques en 2D et en 3D, offrant des fonctionnalités avancées de modélisation, de visualisation et de documentation. AutoCAD facilite la conception précise et détaillée, permettant aux professionnels de réaliser des projets de manière efficace et collaborative.

Introduction

Une inondation se produit lorsqu'une zone pouvant être habitée, est submergée plus ou moins rapidement suite à des précipitations importantes en termes de durée ou d'intensité. La gravité de l'inondation varie en fonction des conditions météorologiques et survient généralement de manière périodique. Elle est le résultat du débordement des eaux lors d'une crue, qui peut être causé par une augmentation du débit d'un cours d'eau ou une concentration des ruissellements.

Les inondations sont considérées comme un risque naturel pouvant entraîner des pertes en vies humaines, des dommages matériels et la dégradation de l'environnement. Dans ce contexte, entre les années 1951 et 2015, le Maroc a connu au moins 35 épisodes d'inondations (www.lemonde.fr). Les crues soudaines peuvent transformer les lits asséchés des oueds en torrents violents et destructeurs, causant d'importantes pertes humaines et matérielles.

Le présent projet de recherche été réalisé dans le cadre de notre stage de fin d'études au sein de l'agence du bassin hydraulique du Tensift, avec pour objectif principal la création d'un document visant à assurer la protection des habitants de douar Lalla Aziza et de leurs biens contre ces risques. Notre approche est axée sur les enjeux environnementaux de la région, ainsi que sur les besoins spécifiques de la communauté locale en matière de protection et de prévention des inondations.

Ce rapport est structuré en **quatre grands chapitres** :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation générale de Lalla Aziza, son cadre administratif, géographique, climatique et géologique.
- La deuxième partie du rapport est dédiée à la délimitation du bassin versant à l'aide d'un logiciel SIG adapté (Système d'Information Géographique), dans le but de déterminer les caractéristiques physiques du bassin.
- Le troisième chapitre porte sur le calcul du temps de concentration, des débits de pointe pour différentes périodes de retour. De plus, cette partie du rapport a inclus une analyse fréquentielle des données pluviométriques.
- Le quatrième et dernier chapitre du rapport présente la simulation hydraulique, et des solutions aux problèmes d'inondation.

Mise en avant de l'agence du bassin hydraulique de Tensift

L'Agence du Bassin Hydraulique Tensift, communément appelée ABHT, est une institution spécialisée dans la gestion et la préservation des ressources hydrauliques de ce bassin. L'ABHT est créée dans le cadre de la loi marocaine 10-95 relative à l'eau, promulguée en 1995. Cette loi a été adoptée pour mettre en place un cadre juridique pour la gestion des ressources en eau et leur préservation, dans le but d'assurer leur utilisation équilibrée et durable. Elle a érigé un système de gestion qui repose sur la création d'Agences de Bassin Hydraulique (ABH) pour chaque bassin hydraulique du pays.

L'ABHT est un établissement public autonome qui travaille en concertation avec les différents acteurs locaux. C'est donc un acteur clé dans la mise en œuvre de la politique de l'eau au Maroc, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de vie des populations locales et à la protection de l'environnement.

Les objectifs de création des Agences de Bassins Hydrauliques :

Les Agences de Bassins Hydrauliques ont pour objectifs de :

- Planifier de manière cohérente et concertée à l'échelle du bassin hydraulique,
- Gérer de façon intégrée, décentralisée et concertée les ressources en eau ainsi que le domaine public hydraulique,
- Protéger et de conserver quantitativement et qualitativement les ressources en eau, ainsi que d'assurer une utilisation rationnelle et optimale de l'eau.

L'Agence du Bassin Hydraulique est chargée de :

- Élaborer le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau (PDAIRE).
- Veiller à l'application du PDAIRE.
- Délivrer les autorisations et les concessions d'utilisation du domaine public hydraulique.
- Fournir aides financières, prestations des services et assistance technique pour prévenir la pollution ou d'un aménagement hydraulique
- Réaliser mesures, études hydrologiques et hydrogéologiques, ...
- Réaliser les mesures de qualité.
- Proposer et exécuter les mesures réglementaires :
 - En cas de pénurie d'eau déclarée.
 - Ou pour prévenir les risques d'inondation.

- Gérer et contrôler les ressources en eau mobilisées.
- Réaliser les infrastructures de prévention contre les inondations.
- Tenir un registre des droits d'eau reconnus, des concessions et des autorisations accordés.

La Loi 10-95 sur l'Eau, Section III, Articles 20 – 24

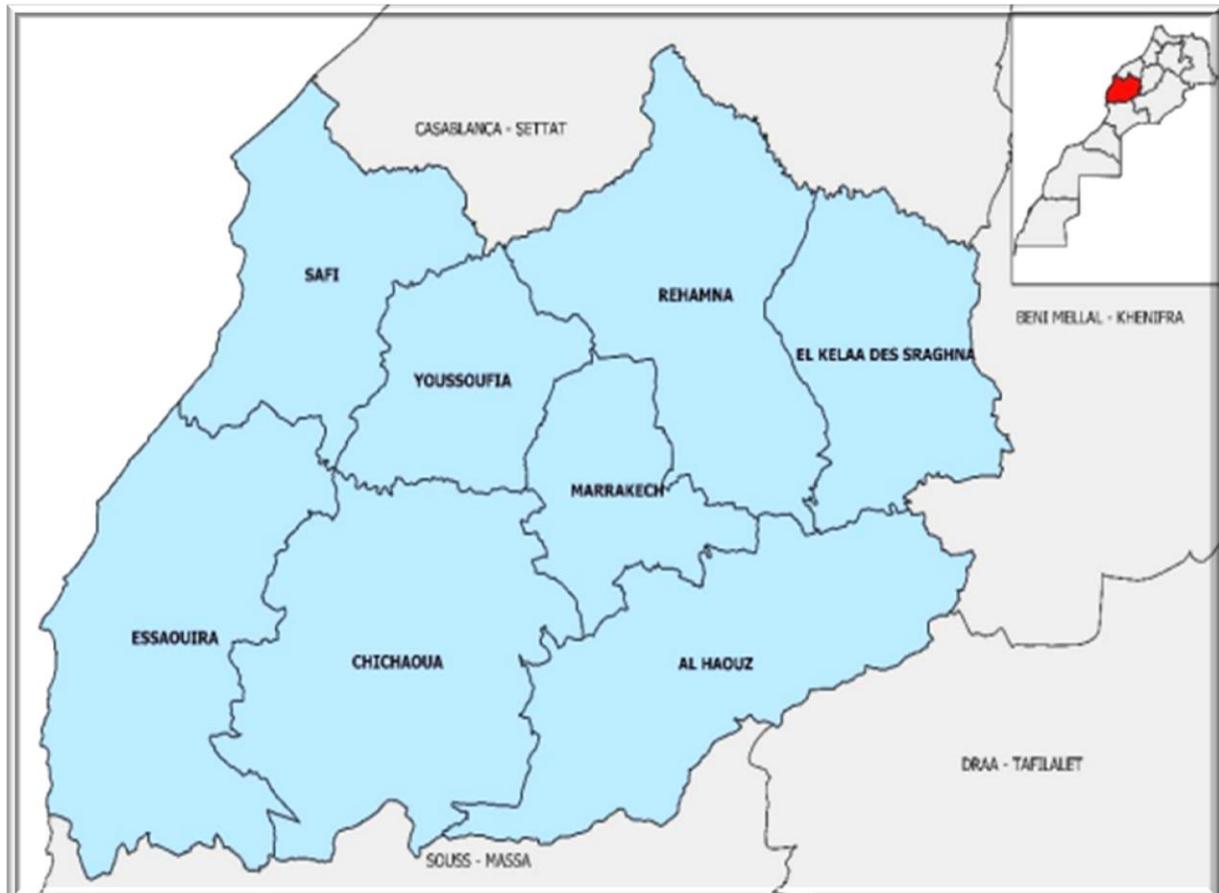


Figure 1: La zone d'intervention de l'agence du bassin hydraulique de Tensift.

Chapitre 1 : Aperçu sur la zone d'étude

Chapitre 1 : Aperçu sur la zone d'étude

1-Contexte administratif :

L'objet d'intérêt de cette étude concerne la commune de Lalla Aziza.

Tableau 1: Données administratives.

Région	Marrakech-Safi
Province	Chichaoua
Commune	Lalla Aziza
Bassin	Lalla Aziza
Oued	Seksawa

Selon les données du recensement de la population et de l'habitat de 2014 publiées par le Haut-Commissariat au Plan (HCP) du Maroc, la population de la commune de Lalla Aziza est d'environ 8500 habitants, soit 2.28 % de la population totale de la province de Chichaoua.

Tableau 2: La population de Lalla Aziza et des communes voisines.

Communes	Lalla Aziza	Ait Haddou	Imindounit	Irholen	Sidi Ghanem
Populations (En 2014)	8448	6263	11363	5854	10099

Recensement de la population et de l'habitat de 2014 publiées par (HCP)

- On note que la province de Chichaoua est découpée en deux Pachaliks, avec quatre annexes administratives, quatre cercles et 35 communes territoriales. **Lalla Aziza** appartient au cercle d'Imi n'Tanout, à côté de 8 autres communes (Nifa, Oued EL Bour, Ain Tazitount, Afella Issen, Irouhalen, Sidi Ghanem, Ait Haddou Youssef, Timezgadiouine.)

2-Contexte géographique :

Lalla Aziza est donc un douar situé dans la province de Chichaoua, dans la région de Marrakech-Safi, au Maroc. Elle se trouve dans la partie nord-est de la région, à environ 160 Km à l'est de la ville d'Essaouira. La commune se situe à 128 Km de la ville de Marrakech, accessible par la (RR212 et la RP2032). Elle est également à 38 Km de la commune urbaine d'Imi n'Tanout, et éloigné d'environ 50 Km à l'est de l'Oued Tensift, qui est le principal cours d'eau de la région.

Cette commune est délimitée :

- Au Nord par les communes Douirane et Sidi Ghanem.
- A l'Est par la commune d'Imindounit.
- Et à l'Ouest par la commune Irohale et Sidi Ghanem.
- Au Sud par la commune d'Ait Haddou Youssef.

Lalla Aziza est traversé par l'oued de Seksawa qui est contrôlé par la station d'Ilojdane.

Carte de la situation géographique de Lalla Aziza

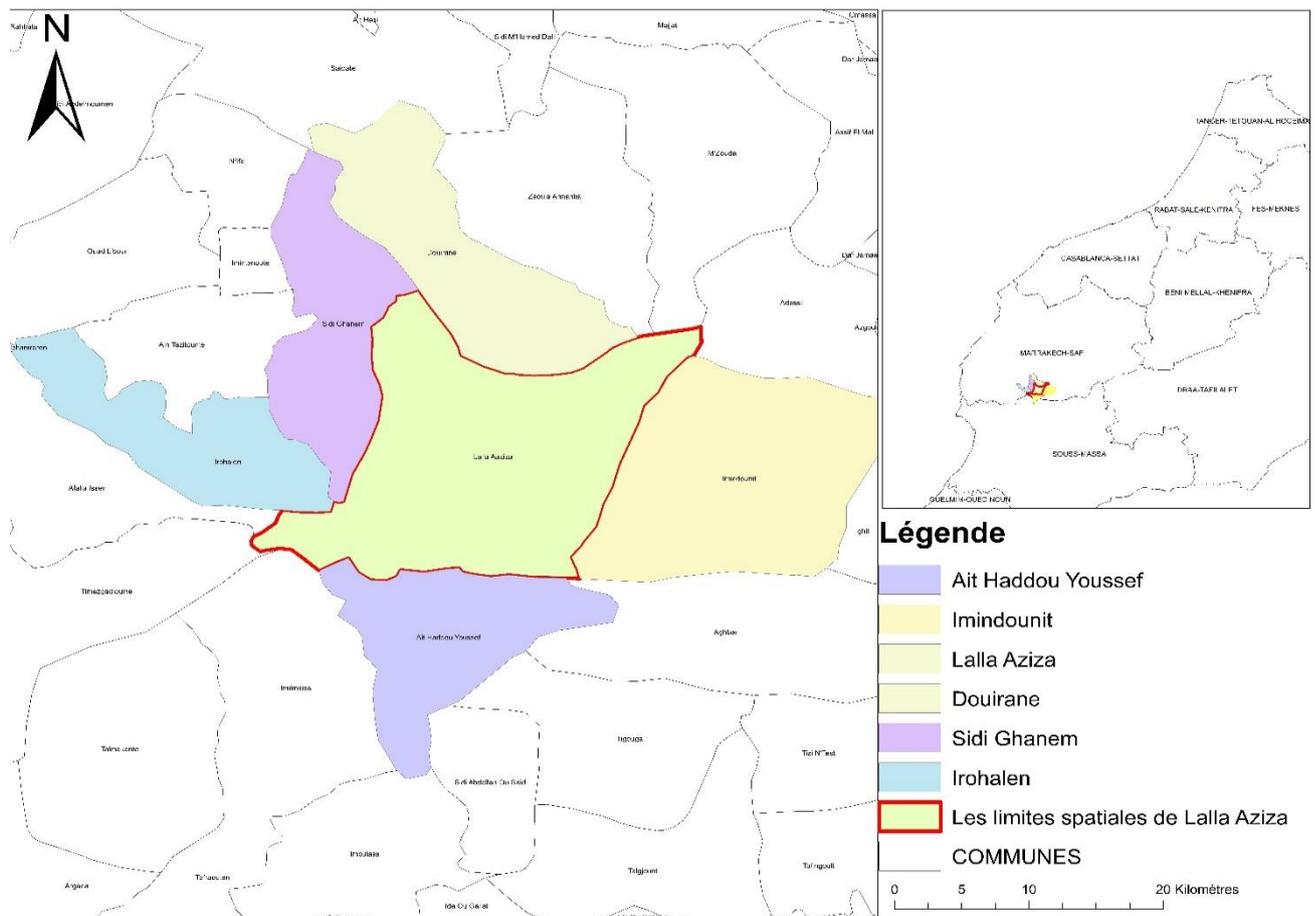
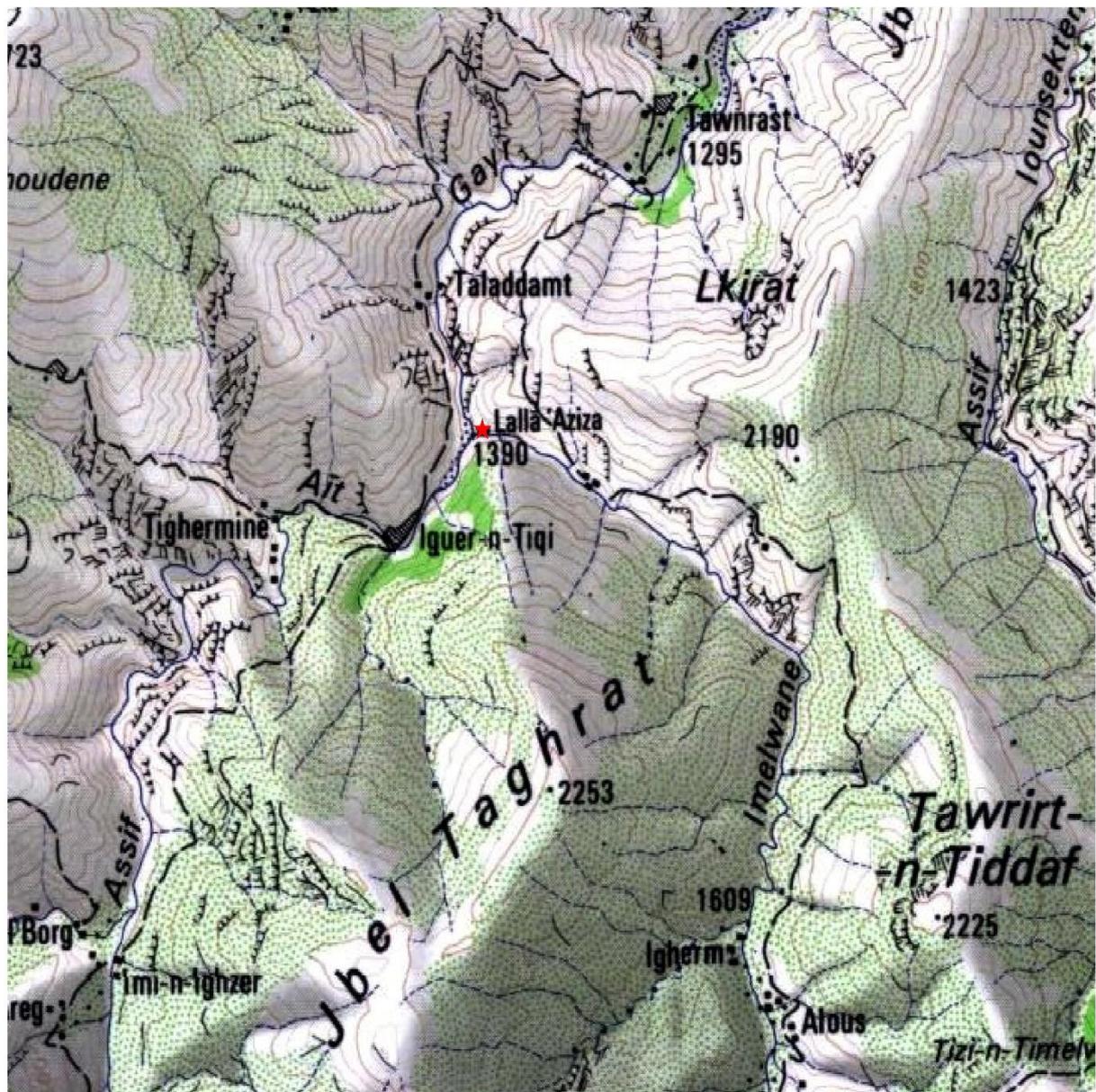


Figure 2 : Situation géographique de Lalla Aziza.



Echelle 1:100 000
 Kilomètre 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Kilomètres

Cours d'eau permanent (1), intermittent (2)

Figure 3 : La zone d'étude sur la carte topographique.

Tableau 3: Coordonnées géographiques de la zone d'étude.

	Coordonnées en degrés décimale	Coordonnées en degrés minutes seconde
LONGITUDE	-8.6999474	8°41'59.81"O
LATITUDE	31.0816473	31°04'53.93"N

3-Contexte géologique :

La géologie de la région de Lalla Aziza est dominée par des roches métamorphiques telles que des schistes, des gneiss et des quartzites.

Le massif du Haut Atlas occidental, où se trouve notre région d'étude, est structuré par de nombreuses failles et plis, témoignant d'une intense activité tectonique. Ces mouvements géologiques ont joué un rôle clé dans la formation de la chaîne de montagnes, qui continue de s'élever lentement jusqu'à ce jour.

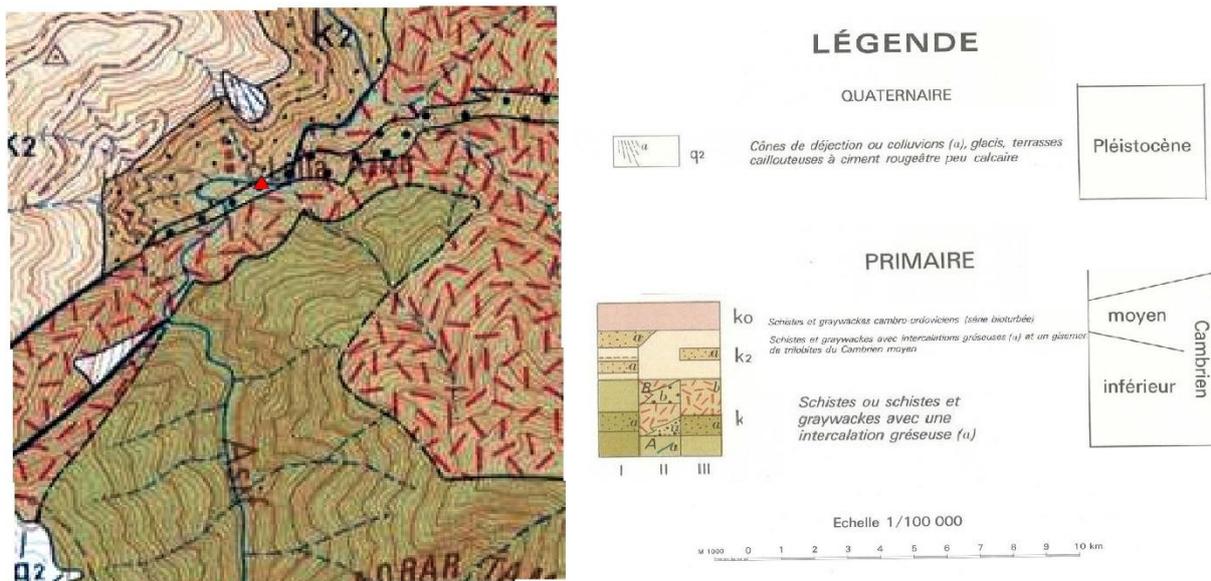


Figure 4 : La zone d'étude sur la carte géologique.

Extrait de la carte géologique d'Imi n'Tanout.

4-Contexte climatique :

La région de Lalla Aziza est nichée dans les montagnes du Haut Atlas occidental, et elle est soumise aux influences du climat méditerranéen continental. Conformément à la classification de Köppen-Geiger, jouit d'un climat tempéré méditerranéen avec des étés chauds et secs.

En moyenne, la température annuelle est de 19,7°C, bien que les températures puissent varier considérablement en fonction de l'altitude. Les précipitations annuelles moyennes sont de 290,6mm (en 2005), ce qui représente une quantité significative pour une région montagnaise, bien qu'elles soient plus abondantes en hiver qu'été.

En raison de son altitude élevée, la région de Lalla Aziza peut connaître des variations importantes de conditions climatiques d'une vallée à l'autre ou d'un sommet à l'autre. Ces variations peuvent affecter considérablement les niveaux de précipitations, les températures et les types de flore et de faune que l'on peut trouver dans chaque zone. (Planificateur.a-contresens.net).

Tableau 4: Relevés météorologiques de Lalla Aziza pour l'année 2005 : températures, précipitations.

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Octob	Nov	Déc
11.9 °C	13.8 °C	16.5 °C	18 °C	21 °C	24.4 °C	28.2 °C	28.3 °C	25 °C	20.9 °C	16.1 °C	12.6 °C
30.6mm	30.6mm	29.3mm	38.2mm	18.1mm	17.4mm	28.4mm	6.8mm	14.4mm	21.4mm	32.4mm	23mm

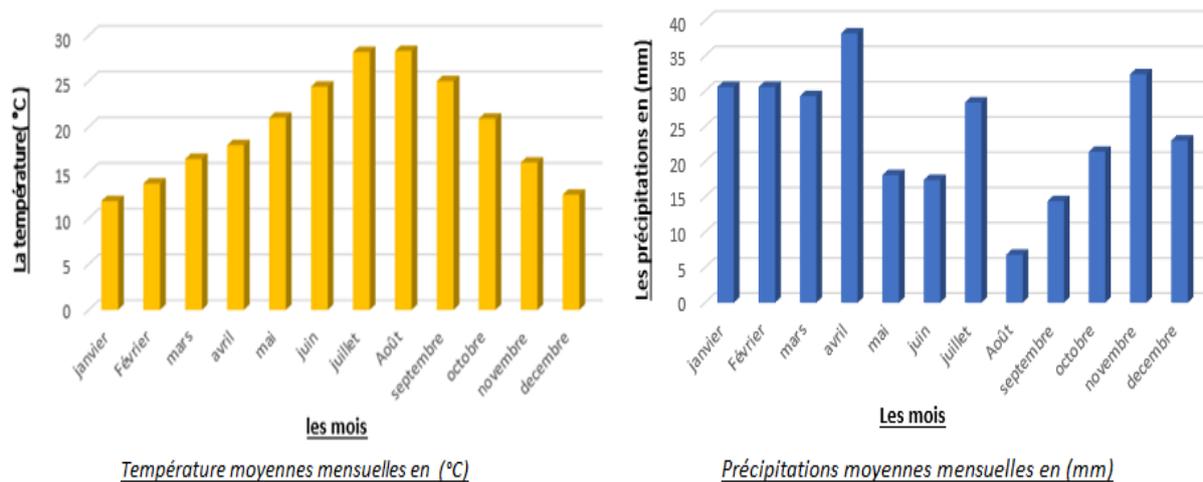


Figure 5 : Températures et précipitations moyennes mensuelles (exemple de l'année de 2005).

Des précipitations moyennes de 6.8mm font du mois d'Août le mois le plus sec. En Avril, les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 38.2mm

5-Diagnostic :

Le centre du village est marqué par la présence remarquable de deux ravins (chaâbat) qui s'étendent gracieusement jusqu'à la rive de l'Oued Seksawa. Les ravins sont encaissés dans des formations géologiques naturelles caractérisées par des couches rocheuses ou des falaises qui se dressent verticalement ou inclinées dans le paysage.

- **Oued Seksawa** : Le centre Ait Moussa est implanté sur la rive droite de l'oued seksawa de part et d'autre de la RP2032. Cet emplacement l'expose aux effondrements dû au sapement des berges.

Il est à noter qu'une digue en gabion était implantée sur la rive droite pour sa protection mais a été emportée par une crue en 1989.

- **Chaâbat Ighzer Oumassine** : Elle borde le centre de la partie est et présente un lit bien encaissé et ne présente actuellement aucun danger pour les constructions car ils sont implantés en hauteur.

Néanmoins des sapements sont constatés sur la rive droite en amont immédiat de l'ouvrage de franchissement de la RP2032 constitué d'un dalot triple de 2.00m×2.00m.

- **Chaâbat Ighzer Izarifen** : Elle borde le centre de la partie nord-ouest et présente un lit bien encaissé d'une largeur de 4 à 6m et elle présente danger imminent pour les constructions implantées sur ses berges notamment 'Dar Taliba' et le lycée (voir les images annexes). Elle franchit la RP2032 par deux buses de 800mm dont la débitance apparaît insuffisante pour transiter les débits de la crue centennale.

(Voir les images annexes.)

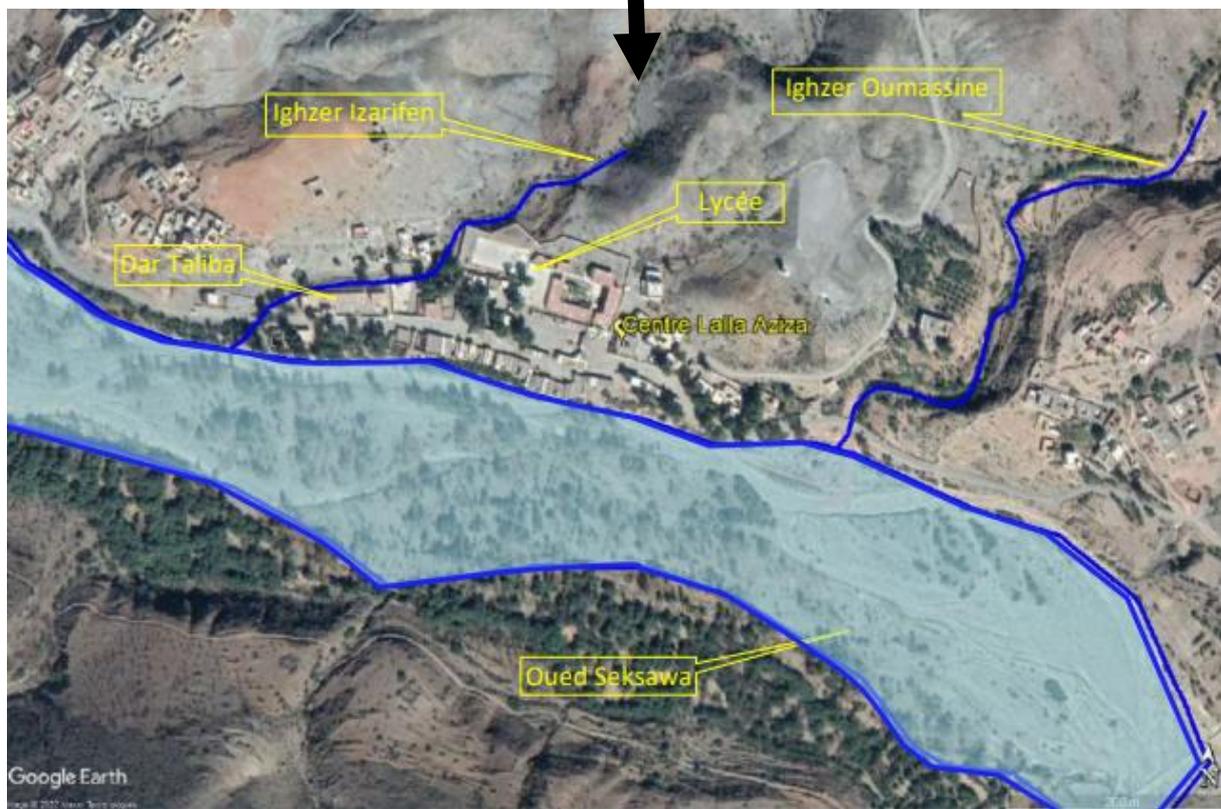


Figure 6 : Tracé en plan des cours d'eau traversant le centre Lalla Aziza.

Chapitre 2 : étude hydrologique du bassin versant « Lalla Aziza »

Chapitre 2 : étude hydrologique du bassin versant « Lalla Aziza » :

1-Introduction :

L'étude hydrologique d'un bassin versant est une analyse importante pour comprendre les risques d'inondations dans une région donnée. Cette analyse permet de déterminer comment l'eau se déplace à travers le bassin versant lors d'événements pluvieux extrêmes, ce qui est crucial pour la prévention et la gestion des inondations.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la morphologie du bassin versant et déterminer certains paramètres géométriques de ce dernier.

2-La morphologie du bassin versant Lalla Aziza :

Afin de mener une analyse approfondie de la circulation de l'eau dans une région donnée, il est indispensable d'avoir une connaissance approfondie de la morphologie du bassin versant qui englobe sa structure et ses caractéristiques physiques.

2.1 Délimitation du bassin :

Pour délimiter le bassin versant de Lalla Aziza, nous nous sommes basés sur le modèle numérique de terrain (MNT) d'une résolution de 30 mètres tiré à partir de l'institut américain des études géologiques (United States Geological Survey.)

ArcGIS offre la possibilité d'automatiser plusieurs tâches, telles que la délimitation du bassin versant, la mesure de surface et de périmètre, le calcul de la pente du bassin et du cours d'eau, le logiciel permet également une classification des altitudes en tranches préétablies.

Pour délimiter un bassin versant sur une carte topographique, on se base sur :

- La disposition du réseau hydrographique.
- La disposition des courbes de niveau.
- Les crêtes des montagnes et les points cotés.

Grâce à une juxtaposition des deux cartes topographiques au 1/100.00 d'Imi n'Tanout et Igli nous avons pu délimiter notre bassin versant et ainsi calculer ses caractéristiques géomorphologiques.

Délimitation du bassin versant de LALLA AZIZA

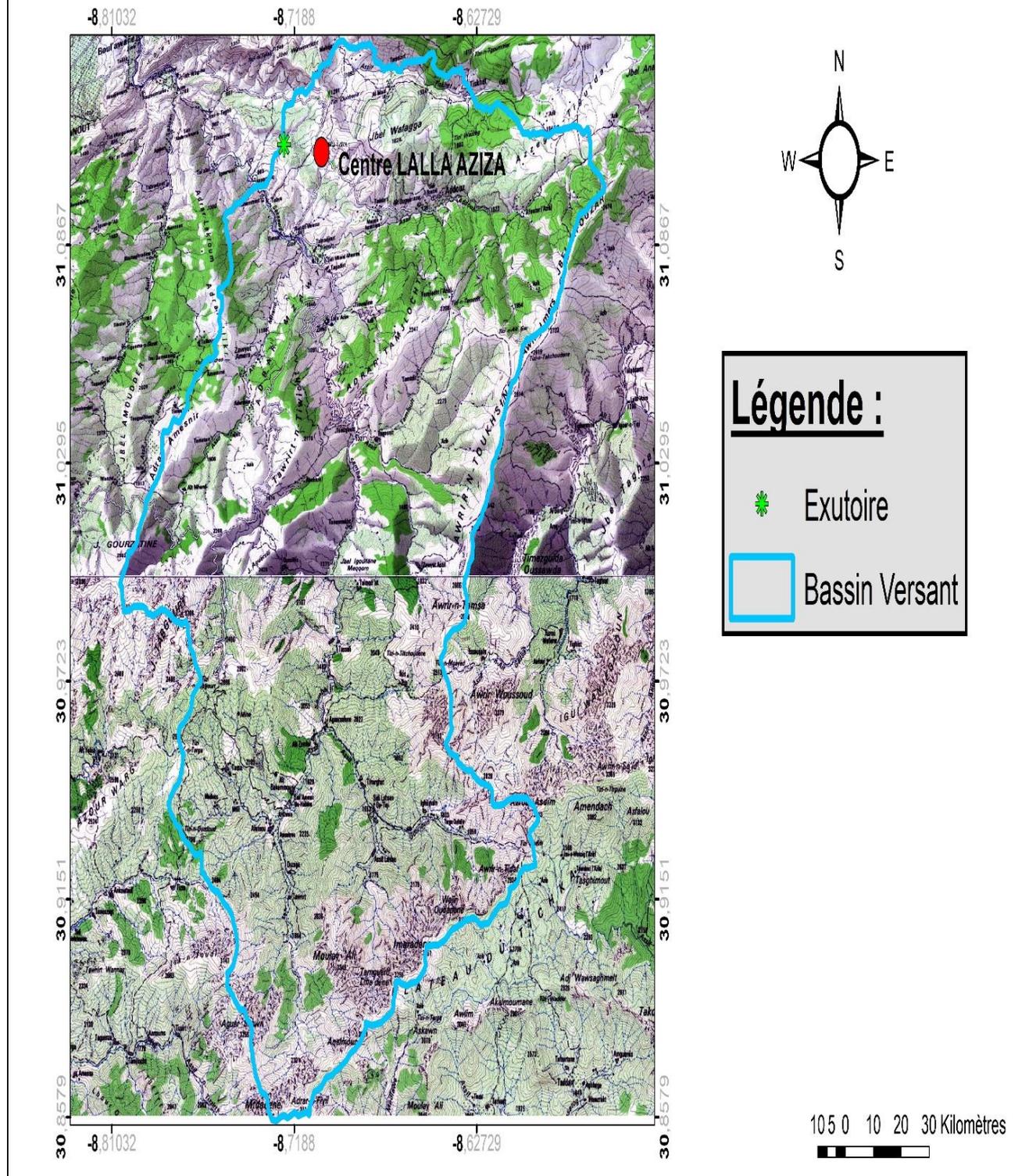


Figure7 : Délimitation du bassin versant de Lalla Aziza.

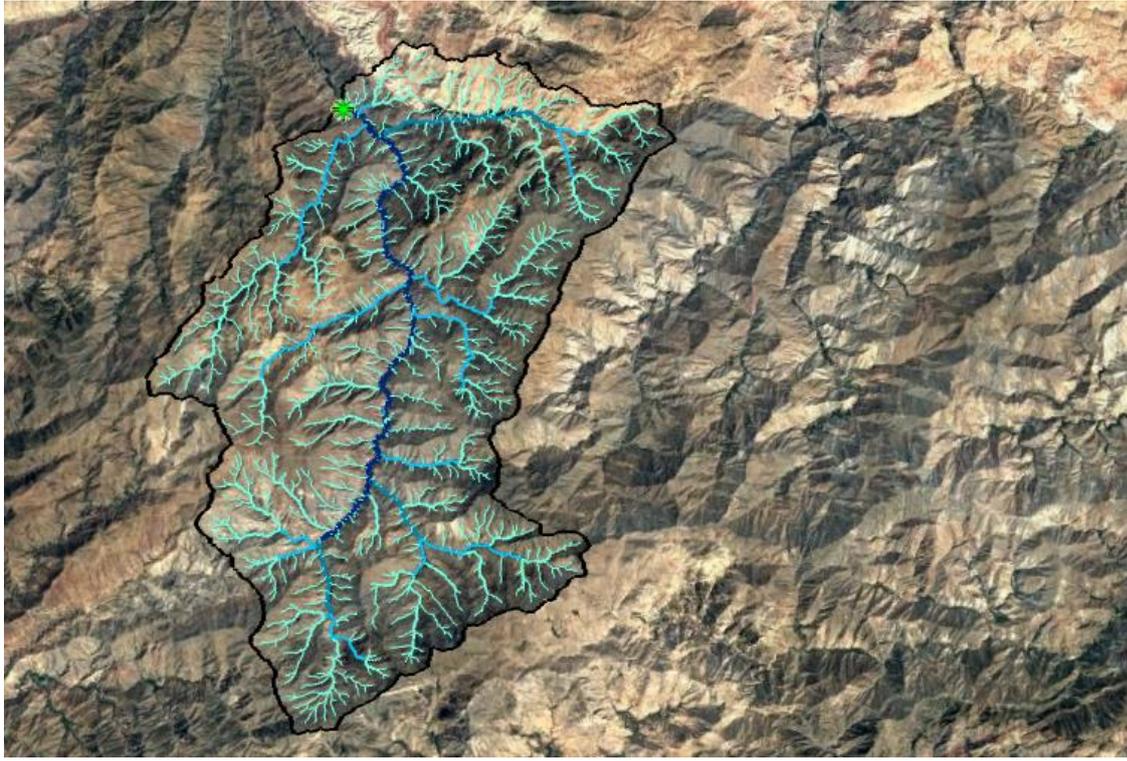


Figure 8 : Vérification de la délimitation du bassin versant Lalla Aziza sur Google Earth.

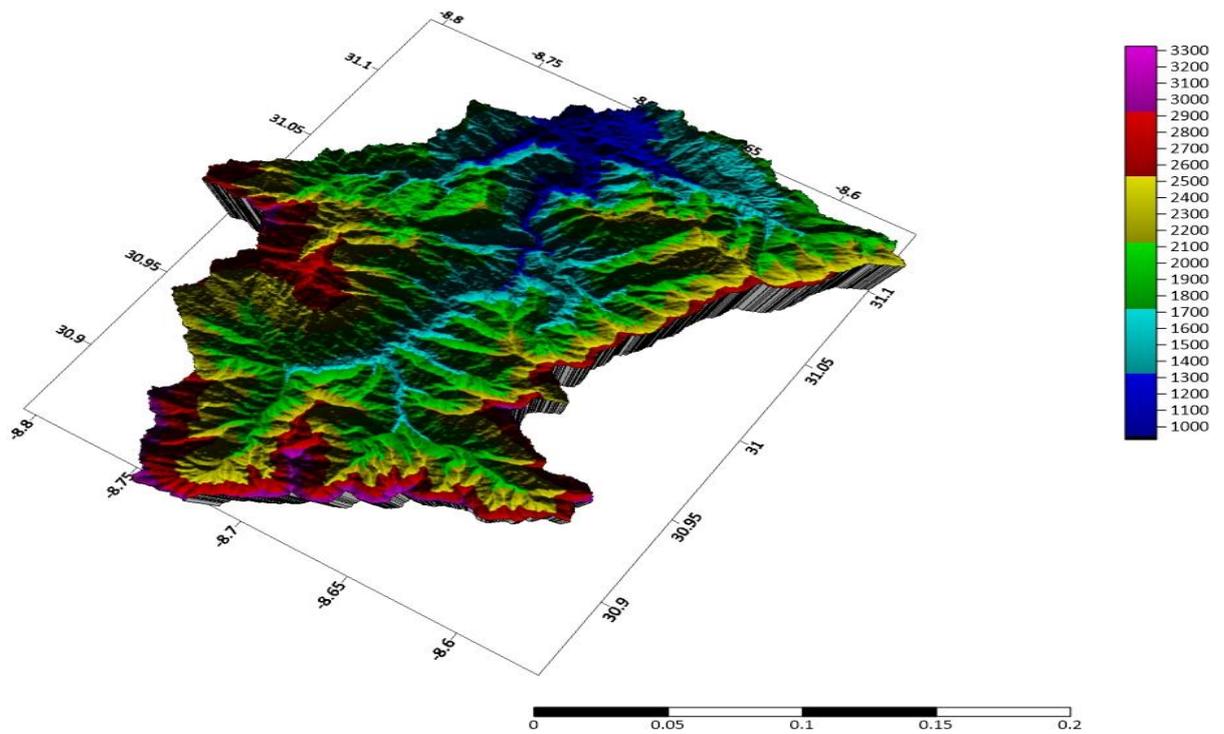


Figure 9 : Délimitation du bassin versant Lalla Aziza en 3D.

L'exutoire de notre bassin est proche du centre de Lalla Aziza, il s'étend jusqu'au douar Ait Moussa.

2.2 Lithologie du bassin versant :

La lithologie a une influence très importante sur l'écoulement, car elle agit sur plusieurs paramètres qui peuvent le modifier (perméabilité, porosité et la composition chimique). Dans le cas d'un terrain perméable la probabilité du risque de crues violentes est faible parce qu'il amortit la crue par l'absorption d'une partie des eaux ruisselées et vice versa.

Dans notre cas, le bassin se caractérise par un pourcentage élevé de formations imperméables, dominées par des schistes, des argiles et des calcaires, ce qui le rend particulièrement vulnérable aux inondations.

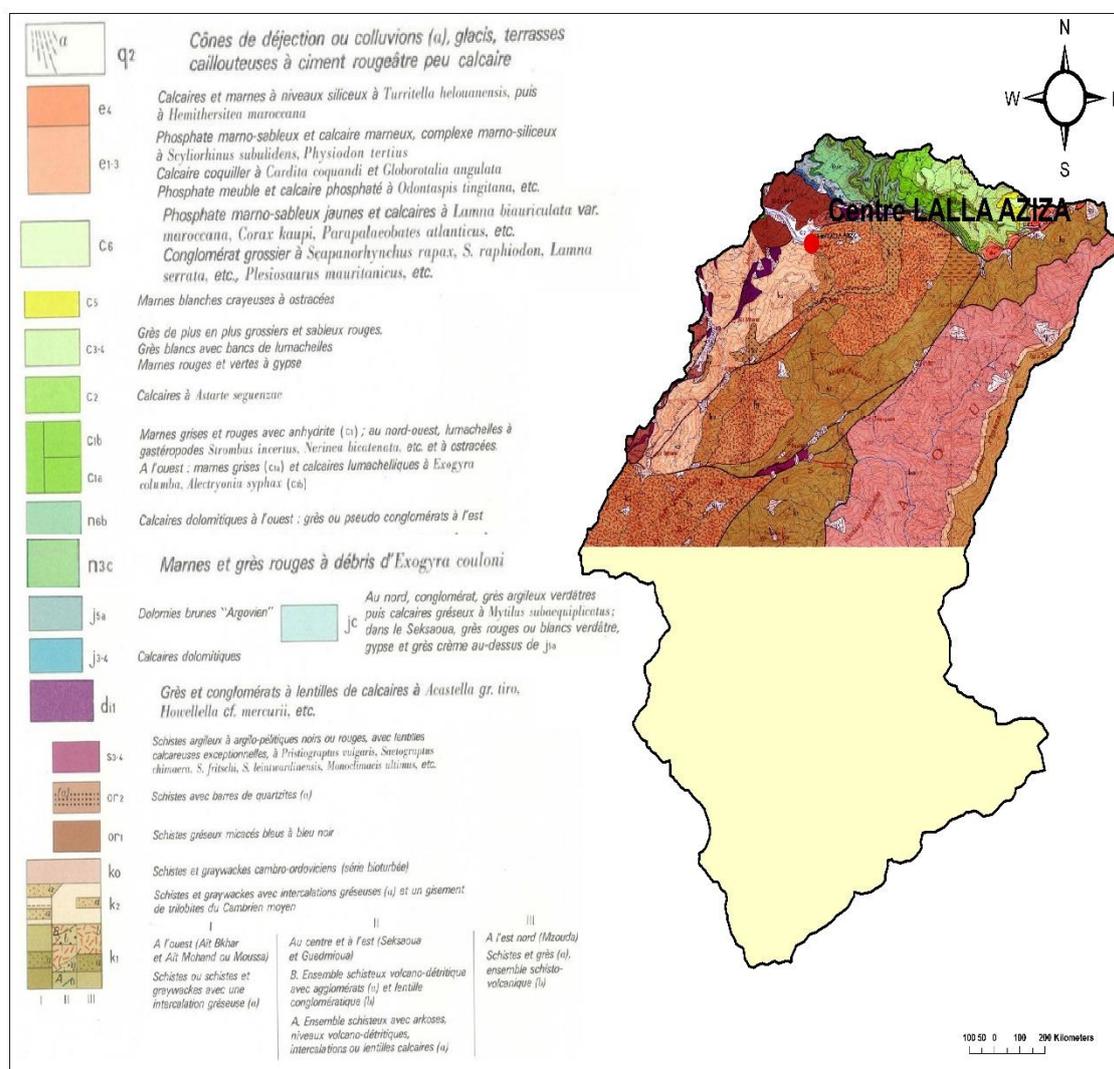


Figure 10 : La lithologie du bassin versant Lalla Aziza.

Remarque : Étant donné que le bassin versant de Lalla Aziza est situé à cheval sur les deux cartes géologiques d'Imi n'Tanout et d'Igli, mais que la carte géologique d'Igli n'est pas encore disponible, la description lithologique du bassin n'est pas complète.

2.3 Propriétés géométriques du Bassin versant Lalla Aziza

2.3.1 La surface :

L'étude de la superficie facilite la compréhension du mécanisme de l'écoulement parce que la superficie influence le débit de l'écoulement et par conséquent la vitesse et le temps d'écoulement.

Le calcul de la superficie se fait grâce à la délimitation du bassin à l'aide d'une carte topographique sur ArcGIS ou à l'aide d'un planimètre ou bien sur autres logiciels de cartographie.

Pour le bassin versant Lalla Aziza, il s'étale sur une superficie de $402,82 \text{ Km}^2$.

2.3.2 Le périmètre :

Le périmètre d'un bassin versant, mesuré à l'aide d'un curvimètre ou d'un logiciels SIG, il correspond à la ligne qui définit sa limite extérieure, c'est-à-dire la ligne de crête des montagnes qui l'entourent.

Le périmètre de notre bassin versant vaut $106,33 \text{ Km}$.

2.3.3 La longueur du Talweg :

La longueur du talweg peut être calculée à l'aide de Google Earth en sélectionnant le plus grand cours d'eau. Cette longueur donne également une idée sur la durée nécessaire pour que l'eau parcoure l'ensemble du bassin versant et atteigne l'exutoire.

La longueur du plus grand talweg vaut : $36,4 \text{ Km}$.

2.3.4 Les Caractéristiques de forme :

a. L'indice de Gravius (compacité K_G) :

Sert à qualifier la forme du bassin (et le comparer à un cercle de même surface pour lequel $K_G = 1$).

L'indice de compacité permet d'évaluer le réseau de drainage :

- Plus le bassin est compact, plus sa forme est ramassée. Plus l'indice de Gravelius est faible, plus le temps de rassemblement des eaux vers l'exutoire sera court.

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

- A : surface du bassin en Km^2
- P : périmètre du bassin en Km

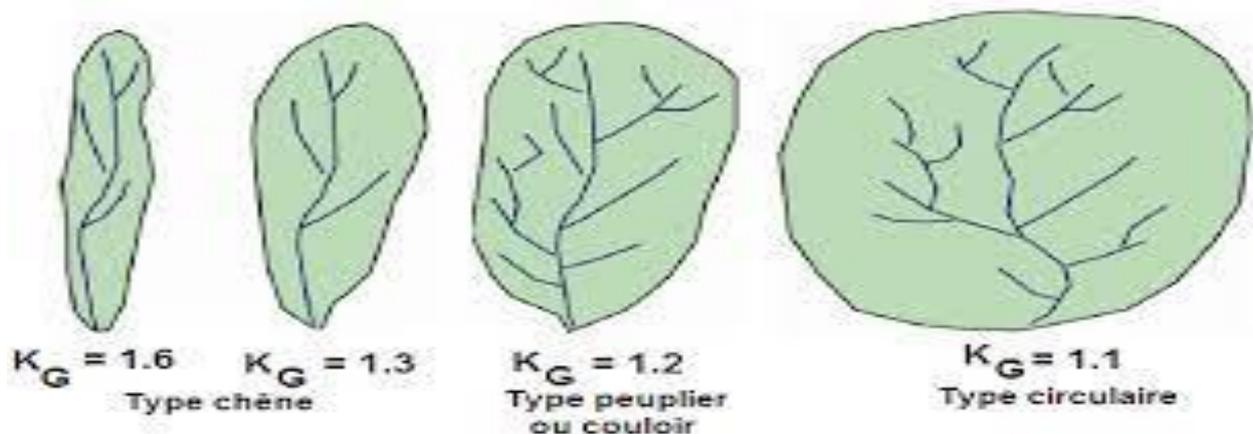


Figure 11 : Caractérisation du bassin versant.

b. L'indice de Horton :

Il exprime le rapport de la surface du BV sur la longueur du cours d'eau principal.

$$K_H = \frac{A}{L^2}$$

- A : surface du bassin en Km^2 .
- L : longueur du talweg en Km.

La classification des sous bassins par type en fonction de l'indice de forme de Horton (1945) et l'indice de compacité de Gravelius (1914) est donnée selon le tableau suivant :

Tableau 5: Les différents types de sous-bassins et leurs critères de classification.

Forme du bassin	Indices
Allongée	$K_H < 1$ et $K_G \geq 1.5$
Ramassée	$K_H > 1$ et $K_G \leq 1.5$

c. L'indice de circularité du bassin versant (R_C) :

La circularité d'un bassin versant correspond au rapport entre sa surface et celle d'un cercle ayant le même périmètre. (European Scientific Journal ,2016) :

$$R_C = \frac{4\pi \cdot A}{P^2}$$

- A : Surface en Km^2 .
- P : Périmètre en Km.

Si la valeur de circularité du bassin s'approche de 1, elle indique une forme quasi circulaire (singh1992), avec une pente relativement faible.

Plus sa valeur s'éloigne de 1, plus la forme du bassin est allongée.

Tableau 6: Les caractéristiques de forme du bassin versant Lalla Aziza.

Indice de Gravilus	1,494 \approx 1,5
Indice de Horton	0,30
Indice de circularité	0,44
Forme du bassin Lalla Aziza	Allongé

2.3.5 Le relief

Le relief affecte l'écoulement, car plusieurs paramètres hydrométéorologiques sont liés à l'altitude (telles que les précipitations, les températures, etc.). De plus, la vitesse d'écoulement est influencée par la pente.

Il est possible de déterminer le relief en utilisant des indices ou des courbes représentatives telles que la courbe hypsométrique, qui est obtenue à partir d'une carte représentant les tranches d'altitude.

a) Carte hypsométrique

La carte hypsométrique est une représentation graphique des différentes altitudes ou niveaux d'élévation d'un territoire donné. Elle est utilisée pour visualiser et représenter les variations du relief : les montagnes, les plaines et les vallées.

Dans le bassin de Lalla Aziza les tranches d'altitude sont comprises entre 938 et 3329 m.

La carte hypsométrique de Lalla Aziza

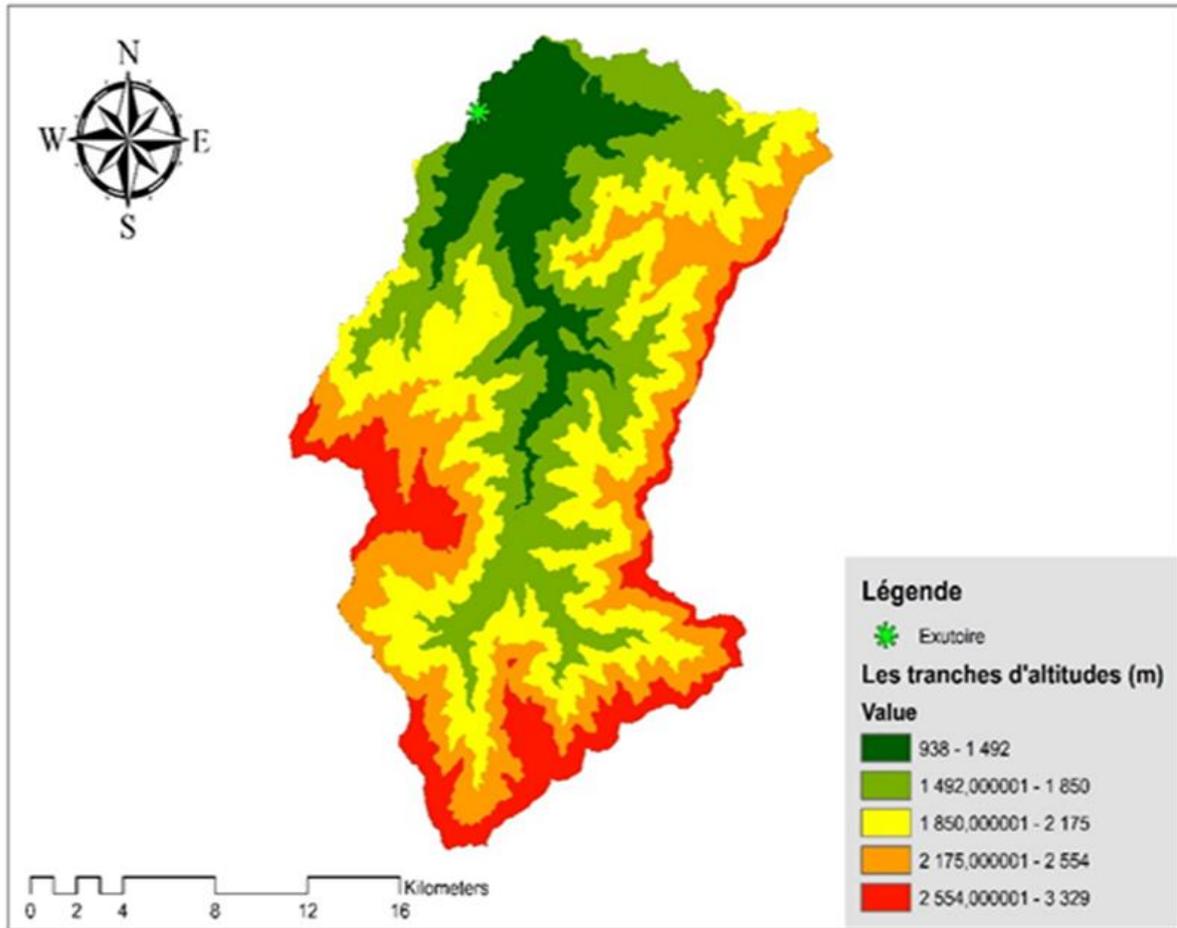


Figure 12 : Carte hypsométrique du bassin versant Lalla Aziza.

b) Courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique est utilisée pour représenter le relief en décrivant comment les altitudes varient. Elle est établie en classifiant les différentes altitudes et en mesurant les surfaces correspondantes à chaque tranche d'altitude, auxquelles sont attribués les pourcentages de la surface totale.

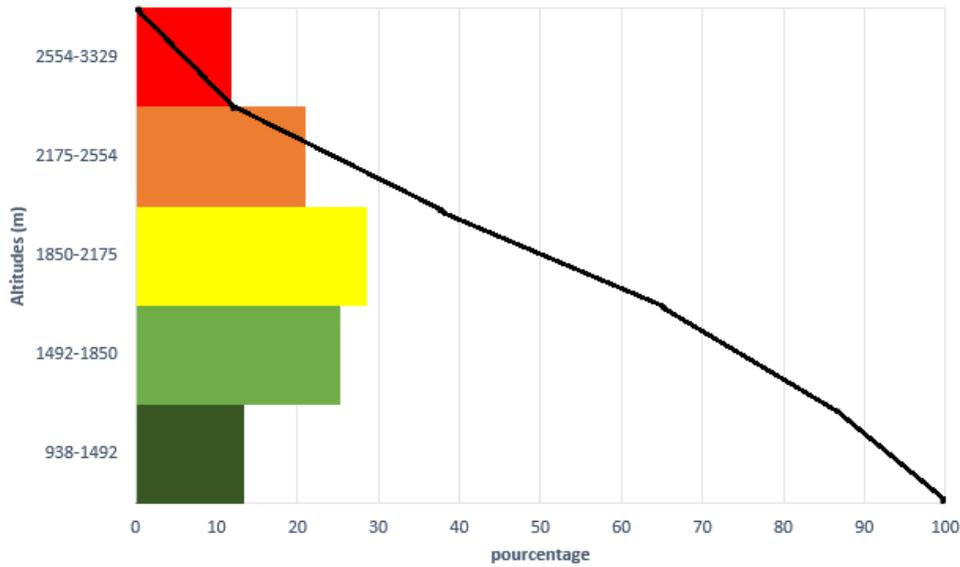


Figure 13 : Courbe hypsométrique du bassin versant Lalla Aziza.

Le bassin versant Lalla Aziza présente une faible inclinaison, avec une altitude maximale de 3329 mètres et une altitude minimale de 938 mètres. La majeure partie du bassin (28,50 %) est composée de terrains situés entre 1850 et 2175 mètres d'altitude.

2.3.6 Le rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent, encore appelé rectangle de Gravelius, il correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant (HADDAJI,2019). Cette notion a été introduite pour comparer le comportement hydrologique de deux bassins. Les dimensions du rectangle équivalent peuvent être calculées en kilomètres en utilisant les relations suivantes :

$$L = \frac{1}{2} \cdot K_G \cdot \sqrt{\pi \cdot A} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot K_G} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{1}{2} K_G \cdot \sqrt{\pi \cdot A} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot K_G} \right)^2} \right)$$

- L : la longueur du rectangle équivalent en Km.
- l : la largeur du rectangle équivalent en Km.
- K_G : L'indice de forme de Gravelius.
- A: La surface du bassin versant en Km^2 .

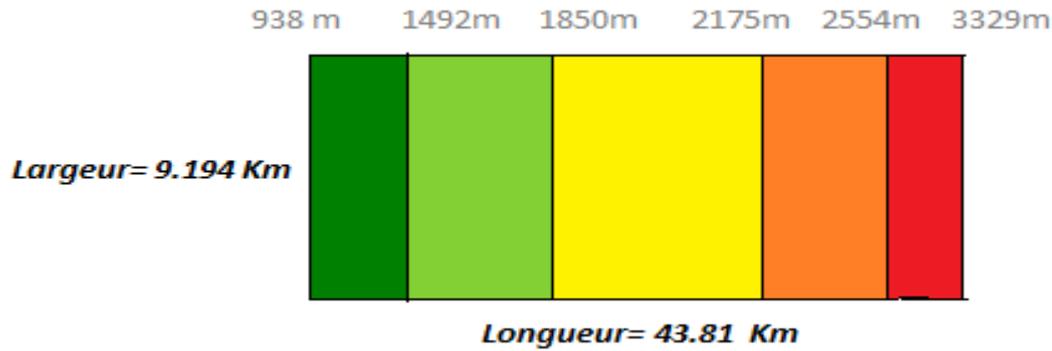


Figure 14 : Rectangle équivalent du bassin versant Lalla Aziza.

2.3.7 Dénivelé :

Il s'agit de la différence entre l'altitude maximale H_{max} et l'altitude minimal H_{min} . Ces points sont référencés par des données géographiques.

$$D = H_{Max} - H_{min}$$

Dans notre cas D=2391m

2.3.8 Caractéristiques des pentes :

La pente du bassin I_m se calcule en utilisant la relation suivante :

$$I_m = \frac{H_{Max} - H_{Min}}{L}$$

- H_{Max} : Altitude maximale en m.
- H_{Min} : Altitude minimale en m.
- L : longueur du talweg en m.

On trouve que la pente vaut 0,065 Donc 6,5 %.

On a $H_{Moy}=1991,76$ donc 1991,76 est l'altitude au- dessus de laquelle est située 50% de la superficie du BV.

La pente d'un cours d'eau peut varier de manière irrégulière en fonction des structures géologiques qu'il traverse, et elle a tendance à diminuer généralement de l'amont vers l'aval.

La carte des pentes quantifie les inclinaisons des versants d'un bassin versant. Elle offre une vue d'ensemble des versants pentus et plats. Elle est obtenue automatiquement à partir du traitement d'un MNT. Cette carte est un outil précieux pour évaluer la topographie du bassin versant, identifier les zones à risque et faciliter la planification des utilisations des terres et la gestion des ressources hydriques.

Les classes de pente sont déduites d'un modèle numérique de terrain. D'une résolution de 30 m.

carte des pentes du bassin versant de LALLA AZIZA (en degré)

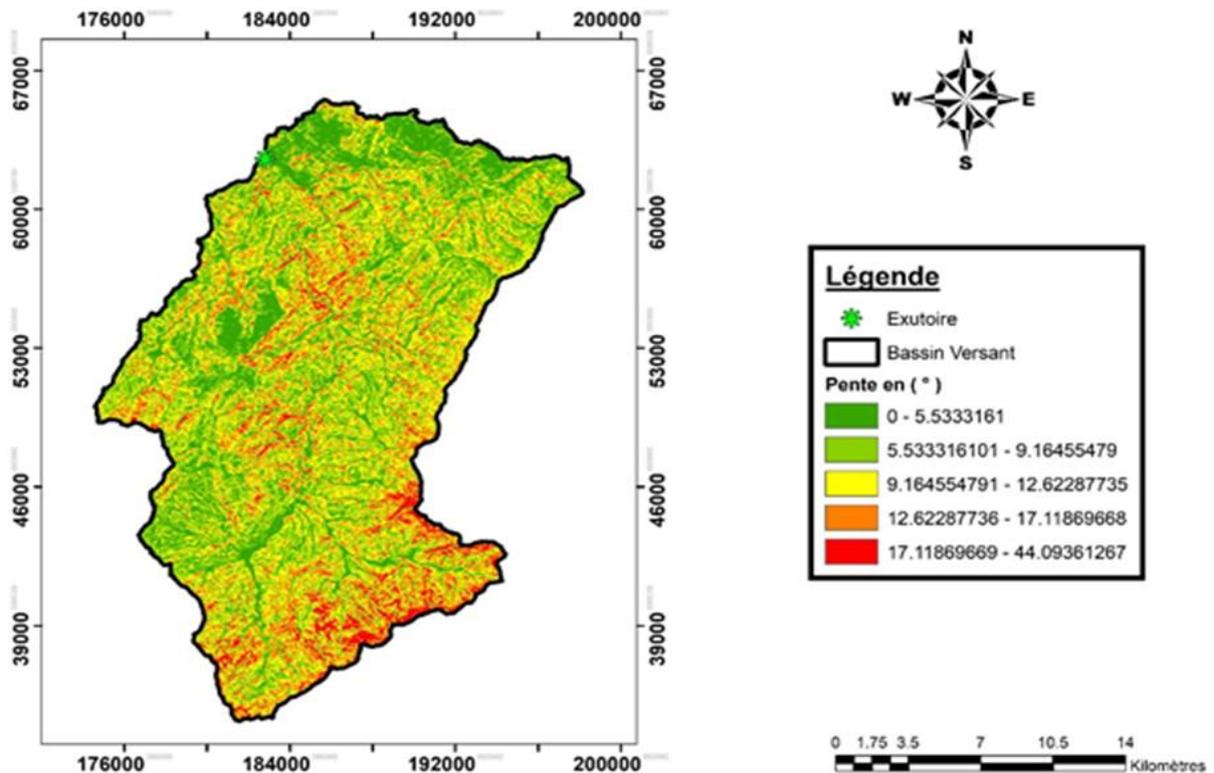


Figure 15 : Carte des pentes du bassin versant Lalla Aziza (en degré).

Les pentes varient entre 0° et 44° avec la localisation des pentes plus forte au sud du bassin c'est-à-dire dans les plus hautes altitudes (2554-3329m).

2.3.9 Récapitulatif des caractéristiques physiques du bassin versant :

Tableau 7: Récapitulatif des caractéristiques physiques du bassin versant Lalla Aziza.

PARAMETRE	VALEUR
Surface	402,82 Km ²
Périmètre	106,33 Km
Longueur du talweg	36,4 Km
Indice de Gravius	1,494
Indice de Horton	0,30
Indice de circularité	0,447
Le rectangle équivalent	Longueur=43,81 Km Largeur=9,194 Km
Dénivelé	2391
Pente moyenne du bassin	0,065
Altitude maximale	3329m
Altitude moyenne	1991,76m
Altitude minimale	938m
PENTES	Maximale=44,09° Moyenne=9,33° Minimale=0°

2.4-Réseau hydrographique

La carte du réseau hydrographique permet de bien visualiser la distribution des différentes voies qui permet le passage de l'eau.

On note que les inondations les plus ravageantes peuvent avoir lieu dans l'aval à cause du cumule d'eau et la forme aplatie du relief.

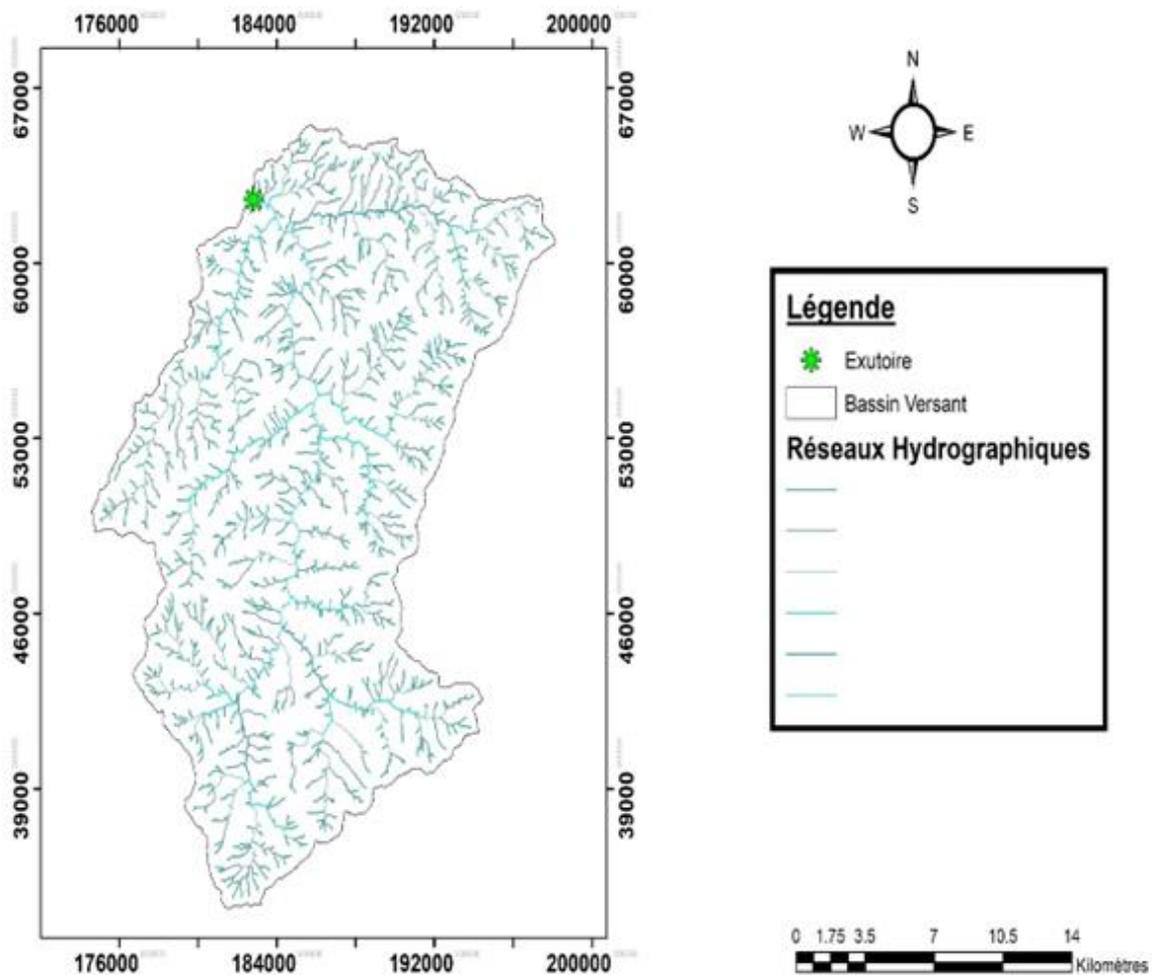
Pour évaluer la quantité des canaux présents dans notre bassin on peut calculer ce qu'on appelle la densité de drainage qui permis d'évaluer l'érosion. Tels qu'une densité de drainage élevée peut indiquer une concentration élevée des canaux et par conséquent, un risque élevé d'érosion. Ce paramètre est utilisé également pour caractériser le degré de fragmentation. Plus la densité de drainage est élevée plus le bassin est fragmenté, avec des cours d'eau plus nombreux et plus courts.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

- D_d : densité de drainage en Km^{-1} .
- L_i : longueur de cours en Km.
- A : surface du bassin versant en Km^2 .

La Densité de drainage dans notre cas vaut : $1,05 Km^{-1}$.

carte des réseaux hydrographiques du bassin versant de LALLA AZIZA



2.5- Coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est souvent calculé pour estimer la quantité d'eau qui s'écoule à la surface du sol plutôt que de s'infiltrer.

Le fait de calculer ce paramètre va nous donner une idée et des indications sur la gestion des inondations, la disponibilité des ressources en eau.

Un coefficient de ruissellement élevé indique une faible capacité d'infiltration et forte probabilité d'inondation.

Pour calculer ce coefficient nous avons besoin de réaliser une carte d'occupation de sol sur laquelle nous allons déterminer les surfaces des différents types de sols :

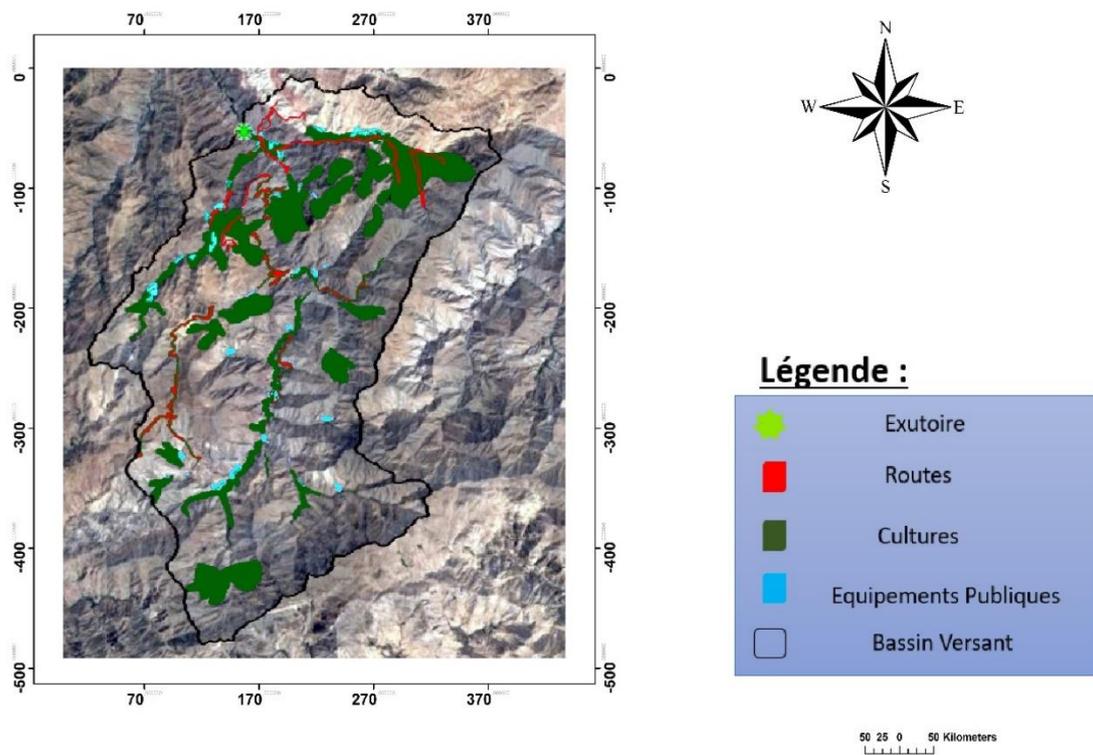


Figure 17 : Carte d'occupation du sol au niveau du bassin versant Lalla Aziza.

D'après cette carte on trouve que :

Tableau 8: La distribution de l'occupation du sol dans le bassin versant.

<i>Occupation du sol</i>	<i>Surface en Km²</i>
<i>Cultures</i>	<i>66,72</i>
<i>Routes</i>	<i>8,24</i>
<i>Equipements publics</i>	<i>4,03</i>
<i>Sols nus</i>	<i>323,83</i>

Tableau 9: Extraits de coefficients de ruissellement des sols nus et les zones bâties (clean water team guidance compendium for watershed Monitoring and Assessment).

<u>L'utilisation des terres</u>	<u>Couverture</u>	<u>Coefficient de ruissellement</u>
Terre agricole	Sol compacté nu lisse	0.3-0.6
	Sol tassé nu rugueux	0.2-0.5
Résidentiel	Zones familiales	0.3-0.5
	Multi pavillons,détachés	0.4-0.6
	Multi pavillons,attachés	0.6-0.75
Route	Bitume	0.7-0.95

Suivant les types d'occupation des sols nous pourrions se référer aux valeurs fournies à titre indicatif dans le tableau suivant :

Cultures	Routes	Equipements publics	Sols nus
13,344	6,798	1,612	145,72

Donc on déduit que :

$$C_r = \frac{\sum S_i}{A}$$

- C_r : coefficient de ruissellement.
- S_i : La surface multipliée par le coefficient de ruissellement selon le type.
- A : Surface du bassin versant en Km^2 .

Donc on trouve que : $C_r = 0,41$. C'est-à-dire que 41% de l'eau de pluie qui tombe sur la surface s'écoulera plutôt que de s'infiltrer dans le sol.

Chapitre 3 : Calcul des débits de pointe

Chapitre 3 : calcul des débits de pointe

1-Introduction :

Ce chapitre a pour but de calculer les débits par des formules empiriques, ajustement statistique, et par la méthode de GRADEX. Les débits avec lesquelles nous avons travaillé ont une grande importance dans la simulation hydraulique, car ils permettent de prévoir les inondations, de dimensionner les infrastructures et de prendre des décisions de gestion des crues.

2-Analyse hydrométriques et pluviométriques :

2.1 Pluviométrie :

2.1.1 Pluies mensuelles :

Il est constaté que, durant ces 30 dernières années, les mois les plus pluvieux sont janvier, février, mars, avril et novembre. Alors que, les mois de mai, juin, juillet, août et septembre, les précipitations n'excèdent pas 15,5 mm, généralement sous forme d'orage. Lorsque la pluie tombe de manière prolongée, le sol devient saturé. Si cette période est suivie par une période de sécheresse, le sol forme une croûte qui va empêcher l'infiltration de l'eau et par conséquent, favorise le ruissellement.

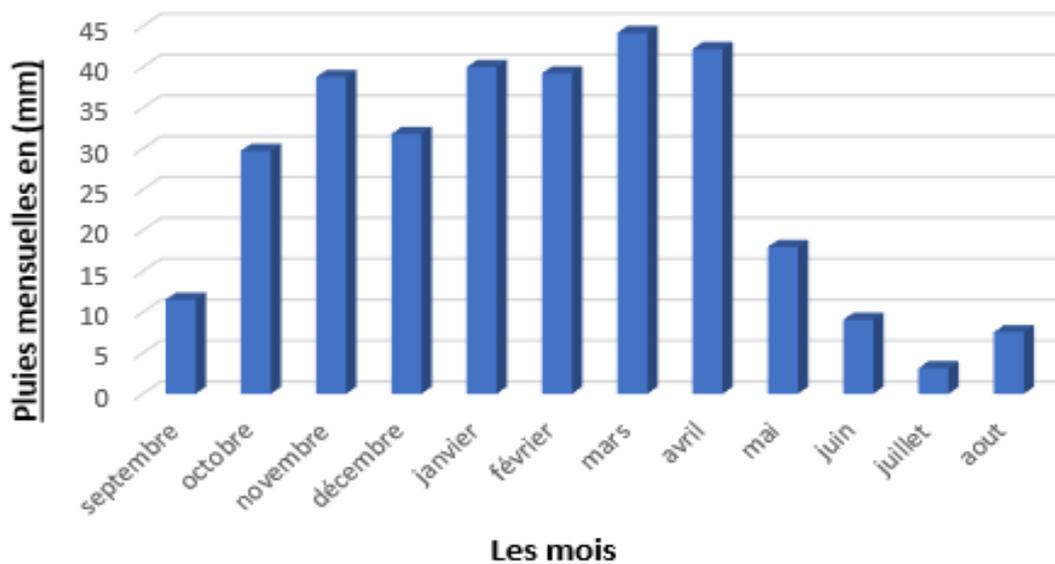


Figure 18 : Les pluies moyennes mensuelles de la station de Iloudjane (1989/90 à 2017/18)

2.1.2 Pluies saisonnières :

La figure ci-dessous montre qu'au niveau du bassin étudié, la saison la plus pluvieuse est l'hiver cette saison représente une pluie forte qui atteint 14,33mm. Et l'été correspond à la saison la plus sèche avec une pluie de 3,7mm.

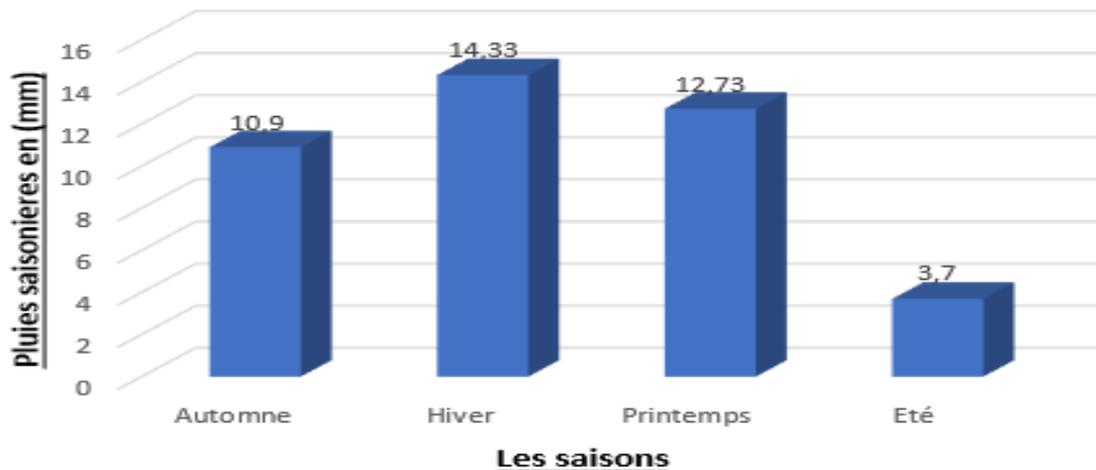


Figure 19 : Les pluies moyennes saisonnières à Iloudjine (1989/90 à 2017/18).

2.1.3 Pluies annuelles :

Les pluies annuelles moyennes ont été calculées en additionnant les moyennes mensuelles de chaque année. Dans notre bassin, la figure 20 illustre les variations annuelles des précipitations. On peut noter que les années 1990,1996,2003,2005 et 2014 ont été Extrêmement pluvieuses. Au cours de ces années, la station a enregistré des précipitations abondantes dépassant les 500mm. Parmi ces années, deux ont été remarquablement sèches : 1992 et 2011, avec des précipitations faibles atteignant respectivement 146,1 mm et 131,5mm.

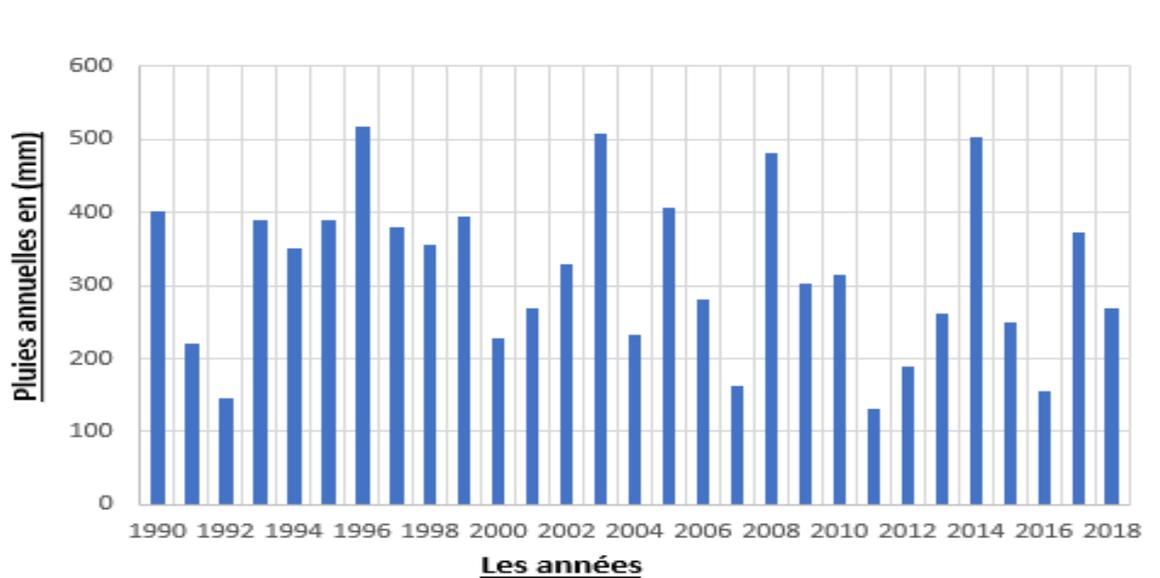


Figure 20 : Les pluies moyennes annuelles à Iloudjane (1989/90 à 2017/18).

2.2 Hydrométrie :

2.2.1 Débits mensuels :

La figure 21 présente la variation des débits moyens mensuels interannuels à la station d'Iroudjane. On remarque que les débits mensuels les plus élevés correspondent aux mois où les précipitations sont également élevées. L'analyse graphique montre une augmentation des débits pendant les mois d'hiver, avec une valeur maximale de débit atteint $1,743 \text{ m}^3/\text{s}$ en mars. Suivie d'une diminution plus marquée en août, avec un débit égal à $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$.

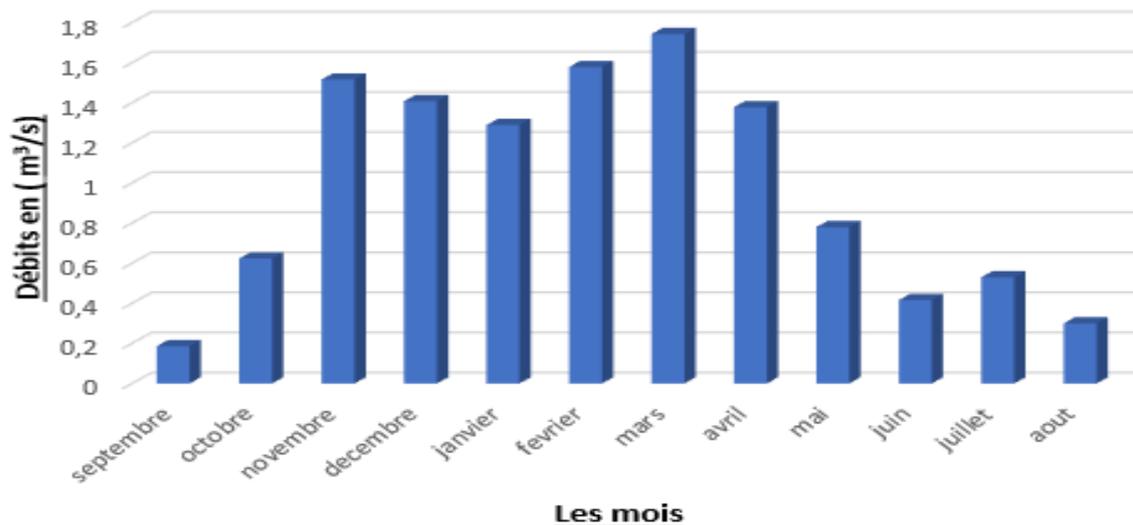


Figure 21 : Les débits moyens mensuels de la station de Iroudjane (1975/76 à 2017/18).

2.2.2 Débits saisonniers :

Les débits saisonniers sont déduits à partir des débits mensuels, La figure 22 présente la variation saisonnière des débits au niveau de la station d'Iroudjane.

Nous constatons trois régimes différents à l'exutoire. Le premier est une chute de débit intervient de l'automne à l'hiver, puis une augmentation de l'hiver au printemps. Et encore une chute de débit intervient entre le printemps et l'été.

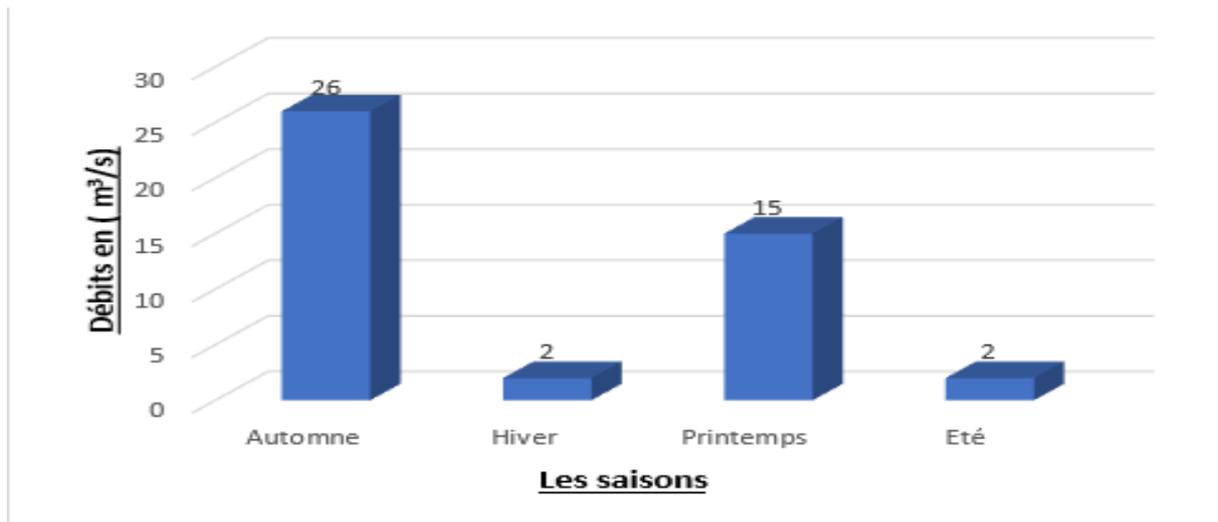


Figure 22 : Les débits moyens saisonniers à Iloudjane (1975/76 à 2017/18).

2.2.3 Débits annuels :

Sur la figure 23, il est observable que plusieurs années se caractérisent par des débits élevés, tels que les années 1988/89, 1995 /1996, 2009/2010 et 2014/2015 qui atteignent respectivement : $44.744m^3/s$, $42.003m^3/s$, $45.188m^3/s$, $34.176m^3/s$. Et Les années à faibles débits sont 1986/87 et 1998/1999 avec un minimum égal à $0.230 m^3/s$.

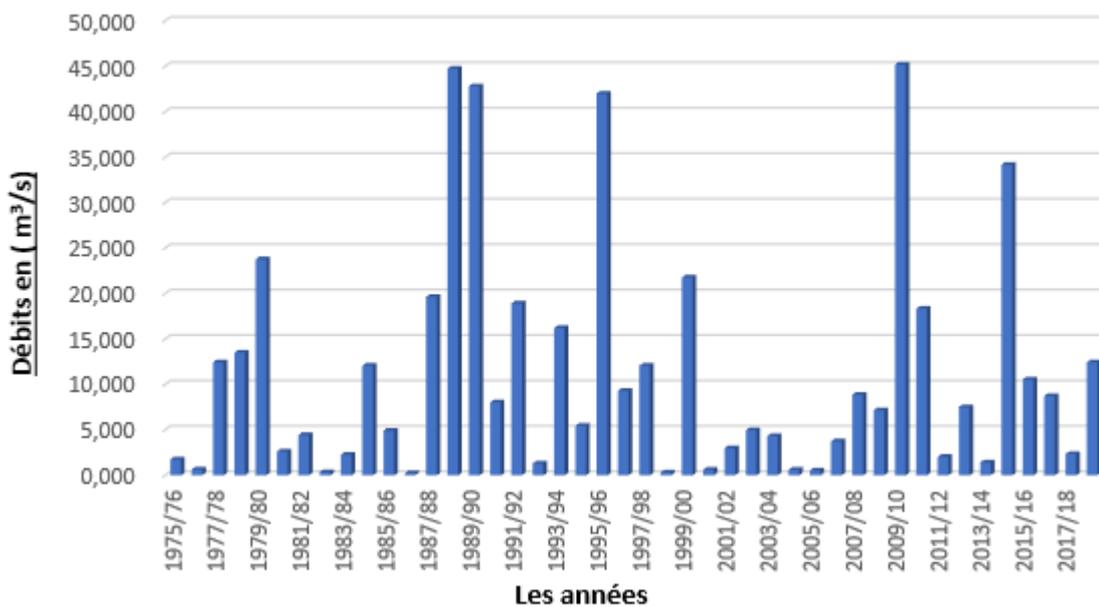


Figure 23 : Les débits moyens annuels de la station de Iloudjane (1975/76 à 2017/18).

3 Calcul du temps de concentration :

Le temps nécessaire pour que tout le bassin versant contribue au ruissellement est appelé le temps de concentration (TC). Il est défini comme le temps au bout duquel la particule d'eau tombée dans la zone la plus éloignée du bassin va atteindre l'exutoire. Plusieurs formules sont utilisées au Maroc, (Ouarda, 2001)

Le temps de concentration est une mesure importante dans la modélisation hydrologique, car il permet de déterminer le délai entre le moment où la pluie cesse de tomber et le moment où le ruissellement direct atteint son pic ou se stabilise. Il est influencé par divers facteurs tels que la pente du terrain, l'état de saturation des sols, la capacité d'infiltration et la géométrie du bassin versant.

Le tableau ci-dessus présente quelques formules empiriques avec lesquelles on peut calculer le temps de concentration :

Tableau 10: Récapitulatif des formules de calcul du temps de concentration.

Formules	Paramètres nécessaires
<p><u>Giondotti :</u></p> $T_c(h) = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L_R}{0,8\sqrt{h}}$	<ul style="list-style-type: none"> • A : surface en Km^2 • L_R : longueur du rectangle équivalent en Km • h: La différence entre altitude moyenne du bassin et l'altitude minimal en m
<p><u>Ventura :</u></p> $T_c(h) = 0,13 \cdot \sqrt{\frac{A}{I}}$	<ul style="list-style-type: none"> • A : La surface du bassin en Km^2 • I : la pente moyenne du bassin versant (m/m)
<p><u>Turrazza :</u></p> $T_c(h) = \frac{0,108}{\sqrt{I}} \sqrt[3]{AL}$	<ul style="list-style-type: none"> • I : la pente moyenne du bassin versant (m/m) • A : Surface du bassin en Km^2 • L : longueur du talweg en Km
<p><u>Kiripich :</u></p> $T_c(h) = 0,945 \frac{L^{1,155}}{D^{0,385}}$	<ul style="list-style-type: none"> • L : longueur du talweg en Km. • D : dénivelé en m.
<p><u>Ven Te CHOW :</u></p> $T_c(h) = 52,64 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{A}}\right)^{0,64}$	<ul style="list-style-type: none"> • A : surface du bassin en Km^2 • L : longueur du talweg en Km
<p><u>Mockus :</u></p> $T_c(h) = \frac{L^{0,8} \cdot \left(\frac{1000}{82} - 9\right)^{1,67}}{20837 \cdot \sqrt{A}}$	<ul style="list-style-type: none"> • L : longueur du talweg en Km • A : surface en Km^2
<p><u>Espagnol :</u></p> $T_c(h) = \frac{L^{0,77}}{I^{0,1925}}$	<ul style="list-style-type: none"> • L : Longueur du talweg en Km • I : Pente moyenne du bassin versant en m/m

La formule de Giondotti est considérée comme plus précise, car elle prend en compte la morphologie du bassin versant, la longueur des cours d'eau et d'autres caractéristiques hydrologiques, ce qui permet une meilleure estimation du temps de concentration. De plus dans notre cas le résultat que donne cette formule est plus précis et logique :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L_R}{0,8\sqrt{h}} = \mathbf{5,62h}$$

4 Calcul des débits de pointe :

4.1 Méthodes empiriques :

En hydraulique, plusieurs formules empiriques sont utilisées pour estimer les débits dans les canaux, les conduites et les systèmes de drainage.

Les formules empiriques pour estimer les débits dans un bassin versant tiennent compte les facteurs suivants : la surface, les caractéristiques morphologiques, les précipitations...

4.1.1 Mallet-Gautier :

La formule de Mallet-Gauthier permet l'estimation des débits de crues de période de retour T pour un bassin donné. Sa forme générale s'écrit par :

$$Q = 2 \times K \times \text{Log}(1 + a \times H) \times A \times (1 + 4 \times \text{Log}T - \text{Log}A)^{0,5} \times L^{-0,5}$$

Q : débit maximal pour la période de retour T en m^3/s .

A : surface du bassin versant en Km^2 .

L : longueur du bassin versant en Km.

H : hauteur moyenne annuelle de pluie en m.

a : coefficient $20 < a < 30$ (au Maroc $a=20$).

K=2 (valeur variant de 0,5 à 6. Il a été décrété de la prendre égale à 2 au Maroc depuis les inondations de 1996.)

Tableau 11: Débits calculé par la formule Mallet-Gautier.

Temps de retour (ans)	Débits (m^3/s)
10	361,8
20	443,6
50	532,7
100	591,3

4.1.2 Fuller II :

La formule de Fuller permet l'estimation des débits de crues de projet de période de Retour T pour un bassin urbain ou rural donné, par la relation :

$$Q_T = \left(1 + (a \times \text{Log}T)\right) \times \left(A^{0,8} + \frac{8}{3} \times A^{0,5}\right) \times \frac{4}{3} \times \frac{N}{100}$$

Q_T : débit maximal pour la période de retour T en m^3/s .

T : Période de retour (10,20,50,100 ans).

a : coefficient variant entre 0,7 et 0,8 au Maroc, nous adoptons $a=0,8$

A : Superficie du bassin versant en Km^2 .

N : Coefficient régional pris égal à 80 en plaine, 85 en région accidentée et 100 en montagne. Nous prenons $N = 85$.

Tableau 12: Débits calculé par la formule Fuller II.

Temps de retour (ans)	Débits(m^3/s)
10	356,7
20	404,4
50	467,5
100	515,3

4.1.3 Hazan- Lazarevic :

Dans leur étude, (Hazan1969) a adapté la formule pour permettre le calcul du débit de crue projeté pour une période de retour millénaire (T = 1000) dans les bassins du Nord et du Sud-Est du Maroc. Cette formule a été établie en synthétisant des informations provenant de différents bassins versants du Maroc. Elle utilise des paramètres tels que la superficie du bassin versant (A) en kilomètres carrés, la pluviométrie moyenne de la zone étudiée et la localisation géographique. En utilisant ces données, la formule permet d'estimer le débit de pointe pour différentes périodes de retour :

$$Q(1000) = K_1 \times A^{K_2}$$

- A : Surface du bassin en Km^2 .
- Les valeurs des paramètres K_1 et K_2 dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie annuelle.

Tableau 13: Les valeurs des paramètres k_1 et k_2 en fonction de la situation géographique de la zone et de la pluviométrie annuelle. (Lamrani, K., Oudour, K., EL HARRAB, C.2021)

	Province nord			Moyen Atlas		Haut Atlas
	RIF					
	Central	Occidental	Oriental			
K_1	15,55	9,78	7,58	13,51	13,47	9,38
K_2	0,776	0,793	0,808	0,613	0,587	0,742
Pluviométrie	1000-1300	800-1000	600-800	700-900	500-700	200-400

- Dans le cas du bassin versant Lalla Aziza : $K_1 = 9,38$ Et $K_2 = 0,742$.

La transposition des débits des crues milléniales aux débits de récurrence T peut être effectuée en utilisant la formule du Fuller I, qui s'exprime de la manière suivante :

$$Q(T) = \frac{Q(1000) \times (1 + a \text{Log} T)}{(1 + a \text{Log}(1000))}$$

- $Q(T)$: débit de pointe en m^3/s pour la période de retour T.
- a : Coefficient régional variant de 0,8 à 2 pour le Maroc. Nous prenons $a = 2$.

Tableau 14: Débits calculé par la formule Hazan- Lazarevic.

Temps de retour (ans)	Débit (m^3/s)
10	344,5
20	413,6
50	505
100	574,2

4.1.4 Récapitulation du calcul de débits :

Tableau 15: Débits de pointe obtenus par les méthodes empiriques.

	Mallet-Gautier	Fuller II	Hazan- Lazarevic
Q (10)	361,8	356,7	344,5
Q (20)	443,6	404,4	413,6
Q (50)	532,7	467,5	505
Q (100)	591,3	515,3	574,2

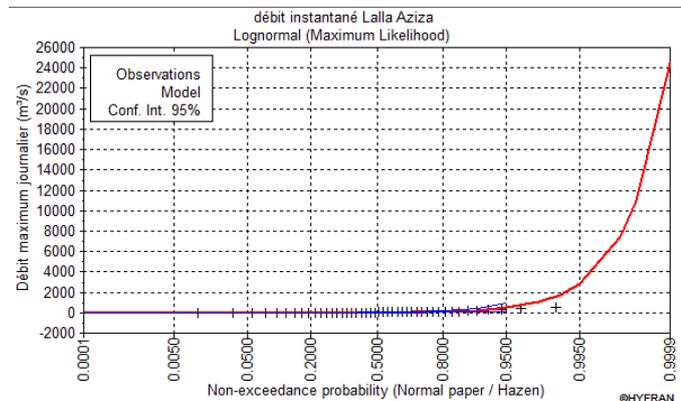
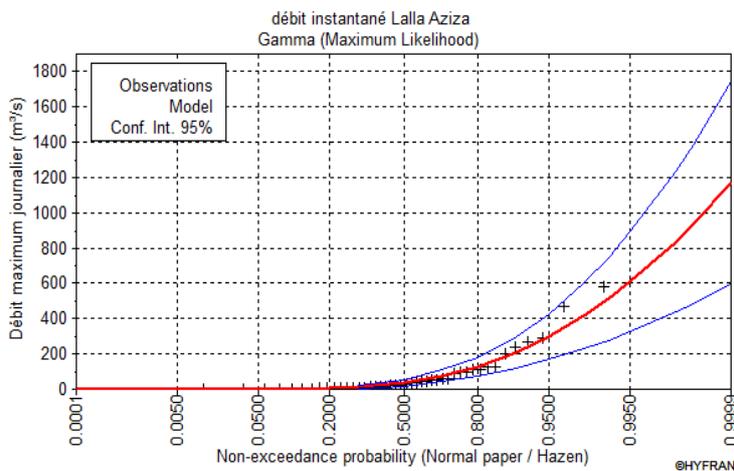
4.2 Méthode d'ajustement statistique :

Dans le cadre de cette méthode probabiliste, l'objectif principal était de déterminer les débits de pointe pour les bassins jaugés en ajustant les débits maximaux instantanés enregistrés à la station de jaugeage de Iloudjane. À des lois statistiques spécifiquement conçues pour traiter les données hydrologiques extrêmes. Pour ce faire, les données ont été ajustées à l'aide du logiciel HYFRAN-PLUS en utilisant plusieurs modèles probabilistes, afin de sélectionner le meilleur modèle.

La série des débits enregistrés a été ajustée en utilisant les lois suivantes : Gamma, LogNormal, Gumbel, GEV et Weibull. Pour chaque loi, un tableau récapitulatif des paramètres statistiques a été obtenu. La loi retenue correspond à celle qui offre le meilleur ajustement, c'est-à-dire celle qui présente les valeurs les plus faibles pour les critères d'information d'Akaike (AIC) et de Bayes (BIC). Cette approche permet de choisir la loi statistique qui capture le mieux le comportement des débits extrêmes enregistrés, afin de fournir des estimations précises des débits de pointe pour différentes périodes de retour. (ouahidy, choukri 2018)

4.2.1 Analyse des Graphes (Méthode visuelle) :

Les figures ci-dessous sont obtenus à l'aide du HYFRAN-PLUS, visuellement on peut conclure que parmi les 6 graphes celui de la loi Weibull a le meilleur ajustement de la variable débit maximal journalier.



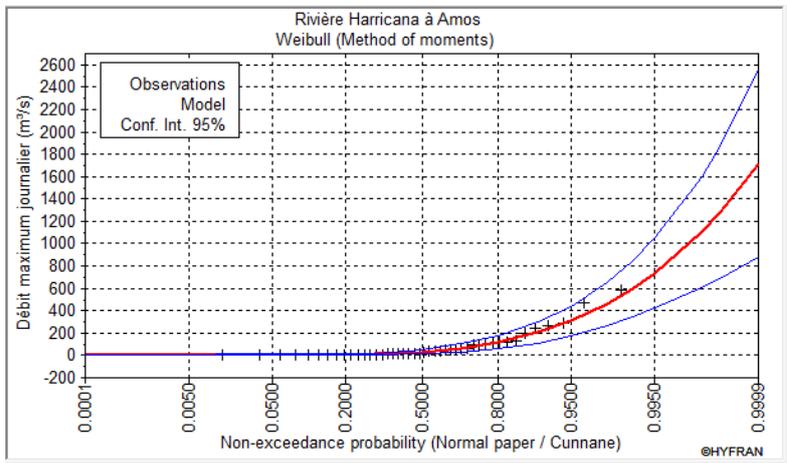
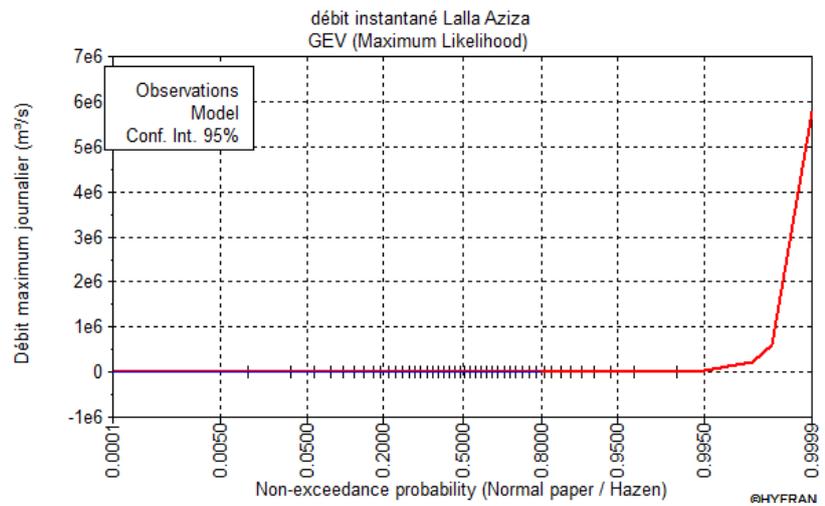
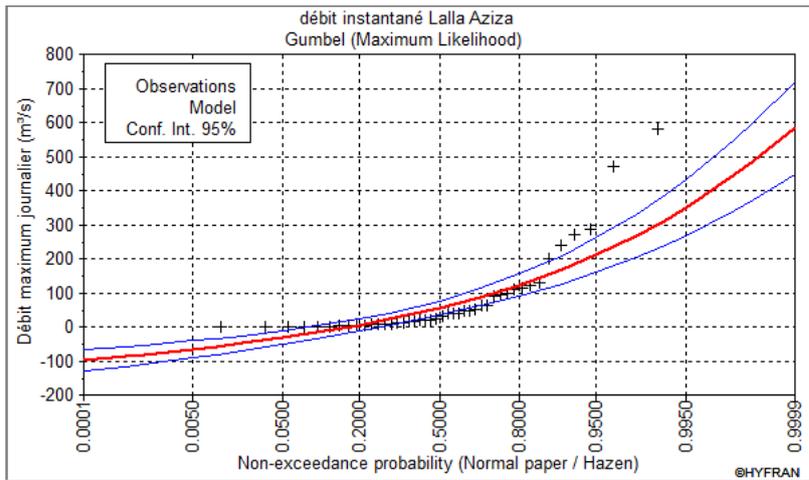


Figure 24 : Ajustement graphique des débits instantanés maximaux annuels selon les lois statistiques.

4.2.2 Analyse statistique (Méthode numérique) :

Tableau 16: Ajustements numériques des lois statistiques pour la période de retour 100 ans.

	100		
	Débit estimé	BIC	AIC
Weibull	592,556	458,347	454,778
LogNormal	1774,823	459,666	456,098
Gamma	512,788	460,093	456,525
GEV	8585,969	470,473	465,121
Gumbel	307,826	518,740	515,172

L'ajustement numérique confirme que la loi de Weibull est la plus appropriée pour l'estimation du débit. Cette loi permet d'estimer les débits pour différentes périodes de retour, comme illustré dans le tableau ci-dessous :

Tableau 17: Débits selon la loi Weibull.

Période de retour (ans)	Débit en (m^3/s)
10	205
20	306
50	461
100	593

4.3 Transposition par La méthode de Francou-Rodier :

Permet l'estimation des débits de crue pour un bassin non jaugé par analogie avec d'autres bassins versants régionaux similaires et limitrophes. Les critères de similitude sont essentiellement la morphologie (particulièrement relief, forme, pentes) et le régime pluviométrique. Le débit de crue de projet pour une période de retour T, $Q_{max}(T)$ d'un bassin B1 non jaugé est calculé par transposition d'un autre bassin B2 semblable à l'aide de la formule suivante :

$$Q_T = 10^6 \times \left(\frac{A_1}{10^8} \right)^{\left(1 - \frac{K_T}{10}\right)}$$

- Q_T : Débit du bassin versant Lalla Aziza (m^3/s).
- A_1 : Superficie du Bassin versant Lalla Aziza en Km^2 .
- K_T : Coefficient de francou-Rodier.

Le coefficient de francou-Rodier est calculé en appliquant la formule suivante :

$$K_T = 10 \times \left(1 - \frac{\text{Ln} \left(\frac{Q_T}{10^6} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{A_2}{10^8} \right)} \right)$$

- Q_T : Débit estimé par l'ajustement pour une période de retour T (m^3/s).
- A_2 : Superficie du bassin versant de Iloudjane.

Pour qu'on puisse faire la transposition il est nécessaire de faire une délimitation du bassin versant d'Iloudjane :

Délimitation du bassin versant de SEKSAOUA à ILOUDJANE

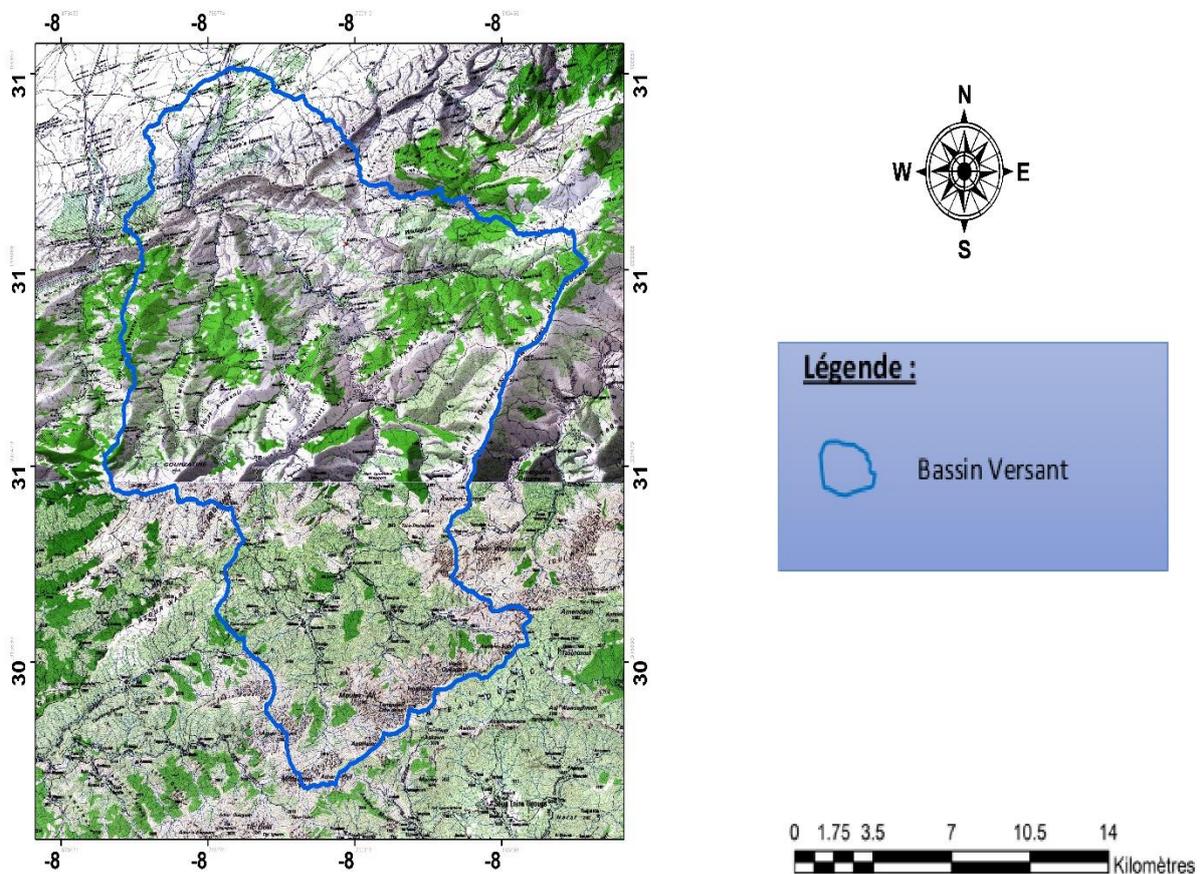


Figure 25 : Délimitation du bassin versant Iloudjane.

Après avoir faire la délimitation du bassin Iloudjane on a trouvé que :

$A_2=570 \text{ Km}^2$
$P_2=127,78 \text{ Km}$

Les résultats de la transposition sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 18: Transposition de l'ajustement statistique.

Station de référence (Iloudjane)			Zone d'étude (Lalla Aziza)
Temps de retour	$Q_T(\text{Weibull})$ En m^3/s	K_T	Q_T en m^3/s
10 ans	205	2,96	159,2
20 ans	306	3,29	239,8
50 ans	461	3,63	365,9
100 ans	593	3,84	475

4.4 Méthode de GRADEX :

4.4.1 Principe :

Parmi les approches les plus utilisées au Maroc pour l'estimation des crues, et pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques est celle de GRADEX.

Cette méthode est applicable aux bassins versants dont la superficie peut aller jusqu'à 5000 km² et le temps de concentration de ruissellement ou d'écoulement est de 1 h à 4 jours. La méthode se base sur l'information apportée par la loi de probabilité de la série temporelle de pluie pour les valeurs fortes observées chaque année (Pluie maximale journalière).

4.4.2 Méthode :

La conduite de la méthode du GRADEX se fait à travers les étapes suivantes (Ahattab,2016) :

- Etudier la variable aléatoire « pluie reçue par le bassin versant en 24 heures » ;
l'ajuster selon la loi de GUMBEL et calculer son GRADEX moyen de pluie ;
- Calculer le temps de concentration du bassin ;
- Transformer le GRADEX de pluie journalière en un GRADEX de pluie correspondant au temps de concentration ;
- Considérer un débit décennal de saturation pour le bassin, sauf recommandation justifiée différente ;
- Extrapoler la fonction de répartition des débits au-delà de la période de saturation correspondante au débit de saturation considéré (la période de retour de 10ans est recommandée par les auteurs de la méthode) par une droite de pente égale au

GRADEX de pluie convertie en valeur de débit en se basant sur la surface du bassin versant ;

- Pour une plus grande sécurité dans le calcul, appliquer un coefficient de pointe pour transformer le débit moyen max en un débit de pointe.

Remarque : le débit doit être exprimé en mm.

Pour passer du débit extrapolé au débit de pointe on utilise la relation suivante (Lamrani, K., Oudour, K., EL HARRAB, C.2021) :

$$Q_P = C_P \times Q_{EXT}$$

- Q_P : Débit de pointe en m^3/s .
- C_p : le coefficient de pointe.
- Q_{EXT} : Débit extrapolé en m^3/s .

C_p Est obtenu par la formule suivante :

$$C_P = \frac{Q_{inst}}{Q_j}$$

- Q_{Inst} : débit instantané maximum en m^3/s .
- Q_j : débit maximum journalier en m^3/s .

Au niveau de la station d'Iloujdane le **coefficient de pointe vaut : 2,97**.

Pour calculer le débit en utilisant la méthode de GRADEX il faut déterminer :

- ✓ Le rang : r.
- ✓ Le Fréquence de non-dépassement FND par la formule suivante :

$$FND = 1 - \frac{1 - \frac{1}{2}}{n}$$

➤ n : le nombre d'années de la série .

- ✓ Ensuite on calcule la variable réduite U :

Ecart type	La pluie moyenne en (mm)	1/a	P_0 (mm)
13	41,5	10,17	35,6

$$U = -Ln(-Ln(FND))$$

- ✓ Enfin on détermine les paramètres d'ajustement :

La courbe des pluies est tracé en utilisant la formule suivante :

$$P = \frac{1}{a}y + P_0$$

Et pour la courbe des débits :

$$Q = \frac{1}{a}y + Q_0$$

Donc : $Q_0 = Q_{2,25} - \frac{1}{a}y$

On trouve :

1/a	10,17
Q_{2,25}	7,43
Y	2,25
Q₀	-15,45

D'après les étapes précédentes on obtient :

Tableau 19 : Débits de pointe par la méthode de GRADEX.

T	F	FND	Y	Q mm	Q _j (m ³ /s)	Q _P
10	0,10	0,90	2,25	7,43	49,0	145,7
20	0,05	0,95	2,97	14,76	97,4	289,5
50	0,02	0,98	3,90	24,23	159,9	475,4
100	0,01	0,99	4,60	31,33	206,7	614,7

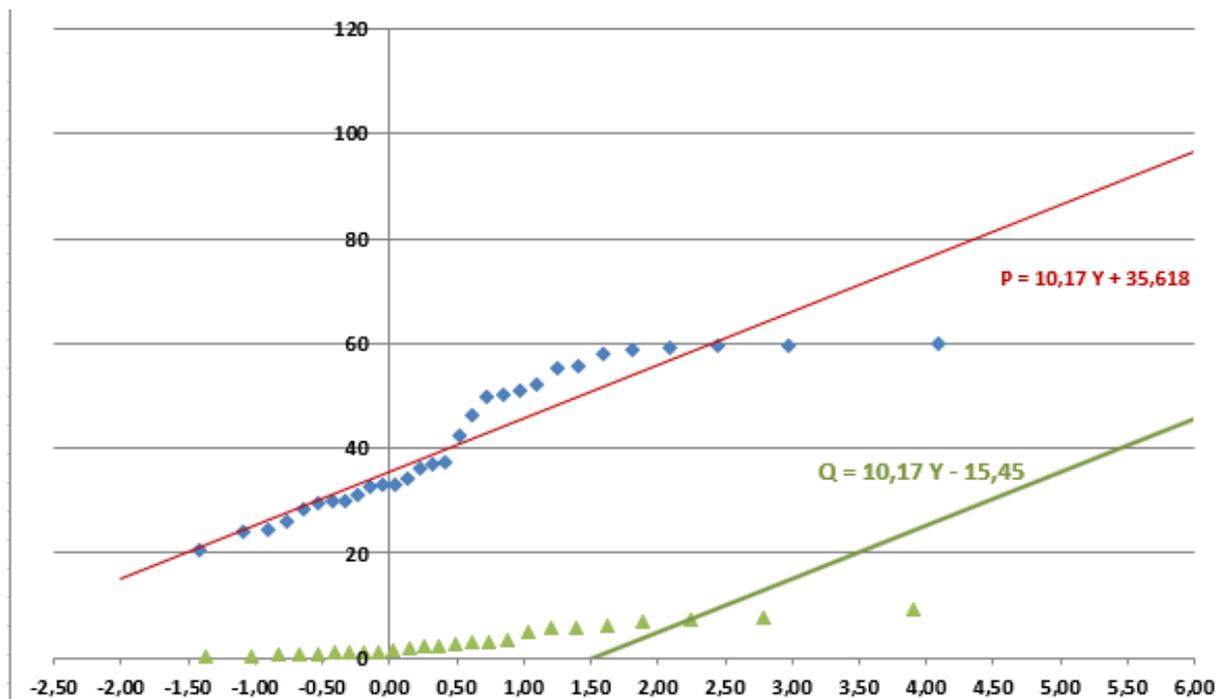


Figure 26 : Ajustements graphique des données de P_{jmax} et Q_{jmax} par la méthode de GRADEX.

Tableau 20 : Transposition de la méthode de GRADEX.

T	Q_P	K_T	Q_T
10 ans	145,7	2,86	140,6
20 ans	335,1	3,37	264,9
50 ans	475,4	3,66	379,8
100 ans	614,7	3,87	493

Tableau 21 : Récapitulatif des débits obtenus par les trois méthodes

T	Méthodes empiriques (moyennes)	Méthode d'ajustement statistique	Méthode de GRADEX
10 ans	354,33	159,2	140,6
20 ans	420,53	239,8	264,9
50 ans	501,73	365,9	379,8
100 ans	560,26	475	493

La méthode de GRADEX est une approche fiable et éprouvée pour calculer le débit de pointe

Chapitre 4 : Simulation hydraulique pour
évaluer les stratégies de protection contre
les inondations

Chapitre 4 : Simulation hydraulique pour évaluer les stratégies de protection contre les inondations

1 Introduction :

La simulation hydraulique est une technique qui permet de prédire le comportement de l'eau dans des systèmes hydrauliques. Et de cartographier les zones inondables à partir des débits de pointe de 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans. Pour suggérer des solutions qui correspondent aux types de problèmes.

2 Étapes de simulation :

HEC-RAS est un logiciel capable de simuler différents types de régimes d'écoulement. Il permet également de simuler l'évolution de la qualité de l'eau, les zones inondables ou encore les ruptures de digues. (Hydro-blog.com)

La simulation réalisée est de type 2D.

2.1 Étape 1 : Préparation des données topographiques.

Pour faire une simulation hydraulique on aura besoin du relevé topographique de la zone d'étude. La qualité de la modélisation dépend étroitement de la qualité des données topographiques.

Cette étape a été réalisée par le logiciel AutoCAD, permet de réaliser des dessins, des conceptions et des modélisations 2D et 3D précis à l'aide de solides, de surfaces, d'objets maillés. (Figure 27)

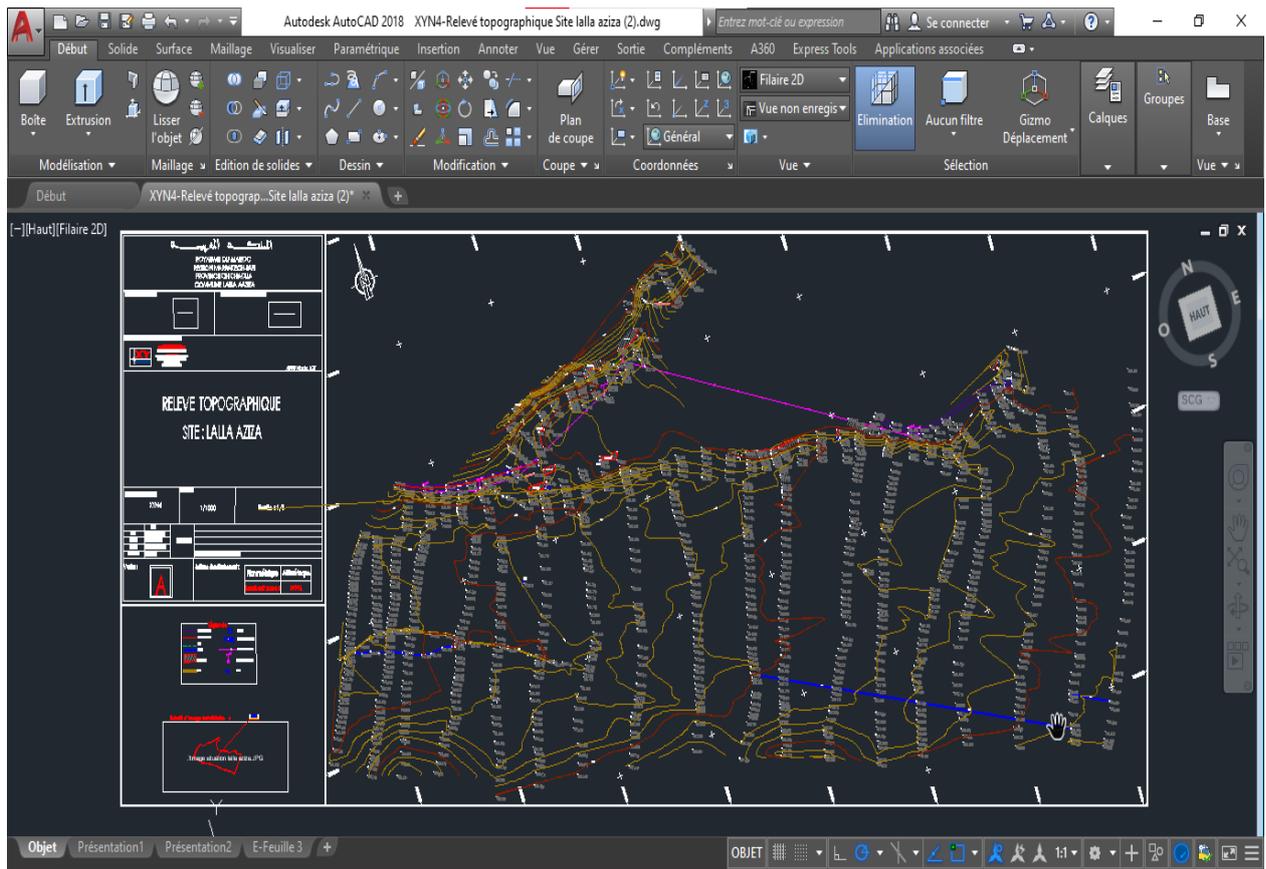


Figure 27 : Prise d'écran du relevé topographique de Lalla Aziza sur AutoCAD.

2.2 Étape 2 : Création de la géométrie.

Le logiciel ArcGIS utilise le modèle numérique de terrain 'MNT TIN' comme fond topographique optimal pour le modèle hydraulique HEC-RAS, assurant une représentation précise du terrain à grande échelle. Ainsi, la conversion du MNT en 'MNT TIN', suivie de la conversion en 'MNT RASTER' est nécessaire. (Figures 28 et 29)

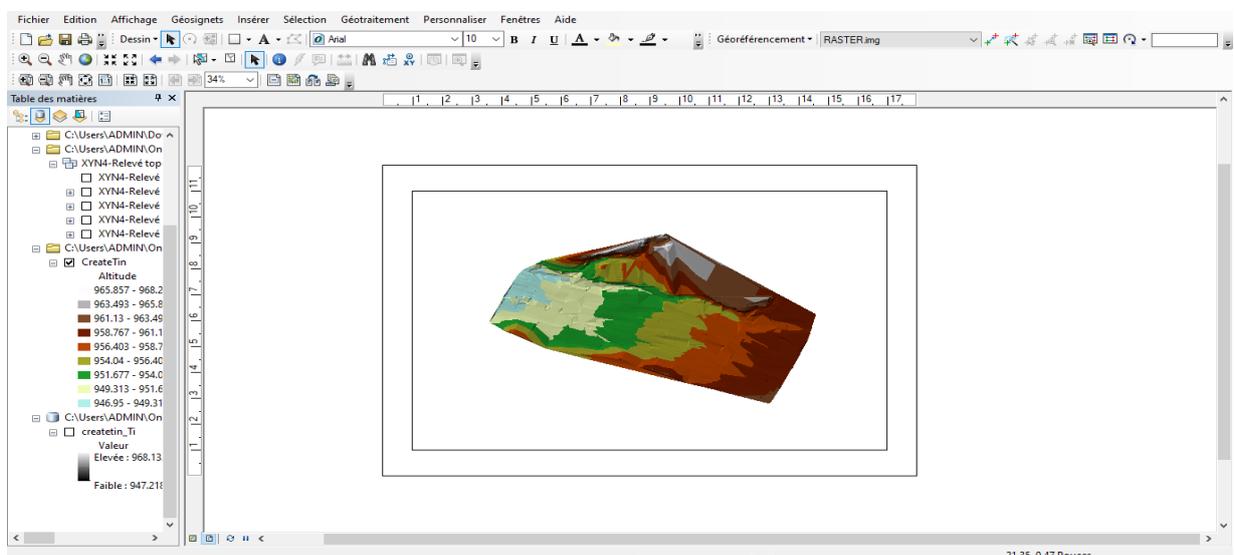


Figure 28: Prise d'écran du MNT TIN sur ArcGIS.

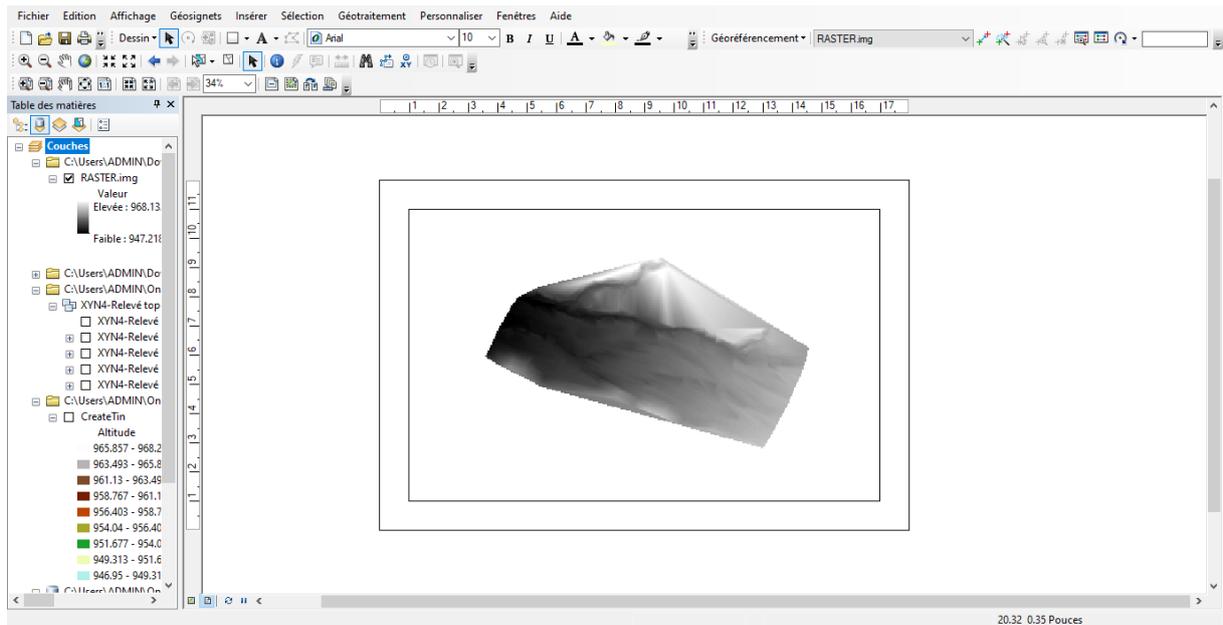


Figure 29: Prise d'écran du MNT RASTER sur ArcGIS.

2.3 Étape 3 : Coefficient de Manning.

Le coefficient de Manning représente la valeur de rugosité d'un segment de rivière. Entre autres, il détermine la friction qu'exerce la forme physique de la rivière sur l'eau qui s'écoule (Chadwick et al.,2013).

Dans notre cas $n=0.03$. (Voir l'annexe)

2.4 Étape 4 : Débits et conditions aux limites.

Cette étape sert à spécifier les conditions limites et les débits pour les différentes périodes de retour (10,20,50,100 ans). (Figure30)

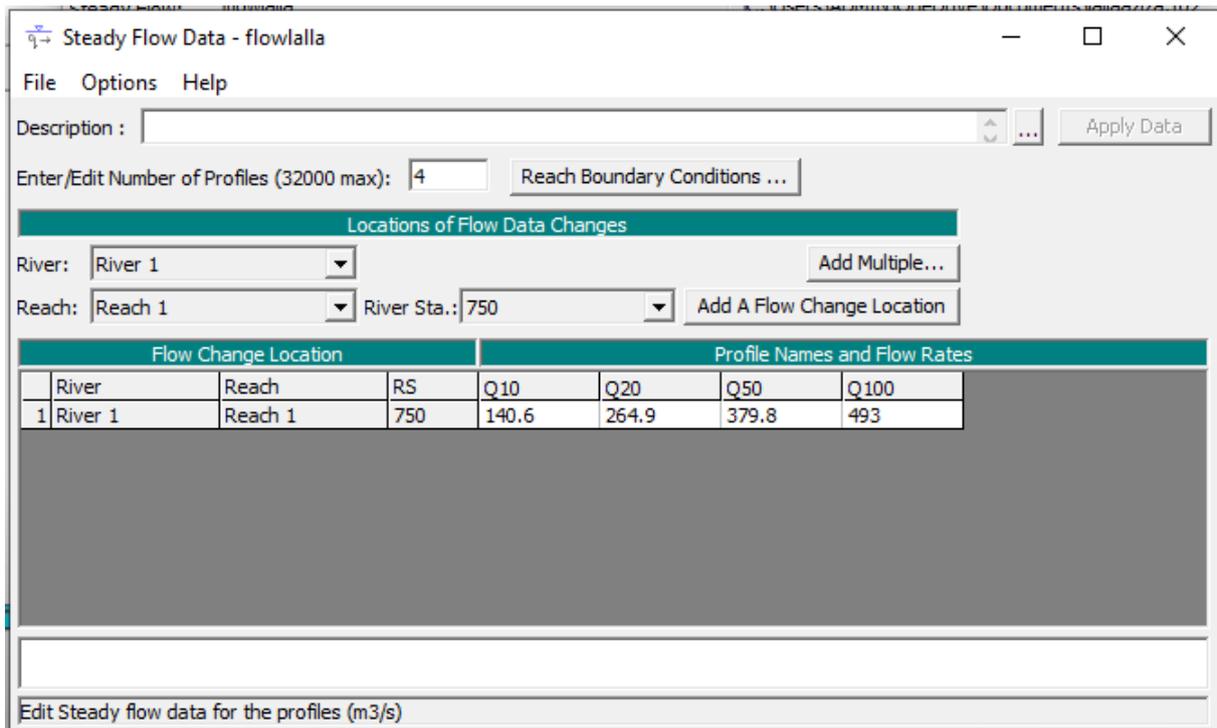


Figure30 : Les débits pour différentes périodes de retour.

Le modèle est encadré par deux conditions aux limites amont et aval définies comme étant les plans d'eau correspondant à une pente hydraulique égale à la pente du lit de l'oued. (Figure 31)

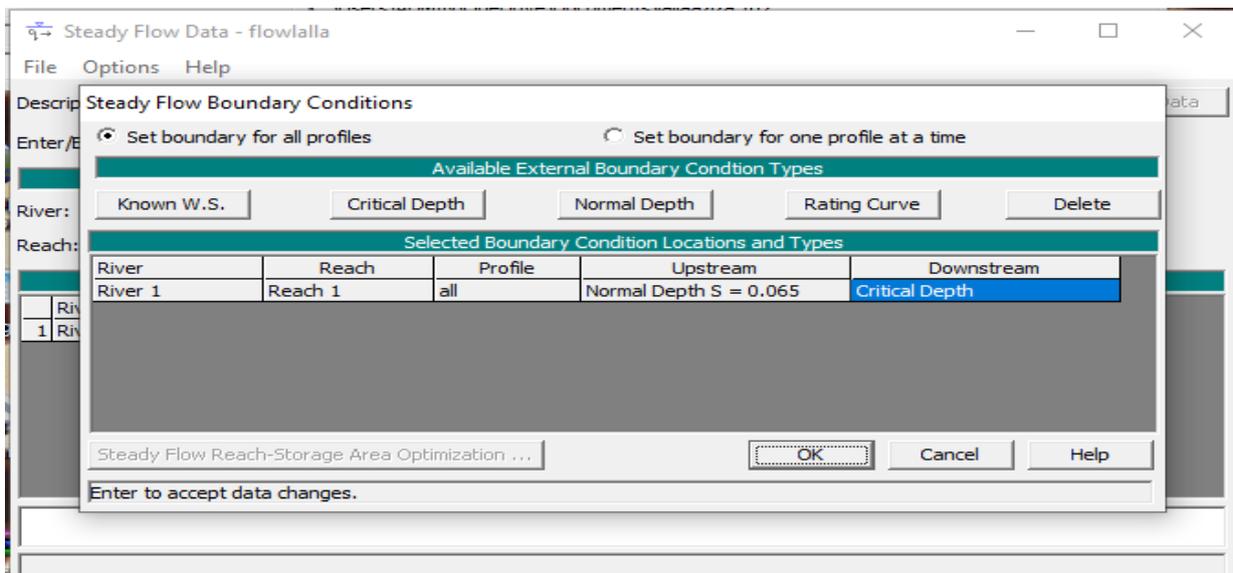


Figure 31 : Conditions aux limites.

2.5 Étape 5 : Simulation hydraulique.

C'est l'étape finale de la simulation. Elle est effectuée une fois toutes les données sont traitées : débits en périodes de retour, conditions aux limites et le coefficient de Manning. (Figure 32)

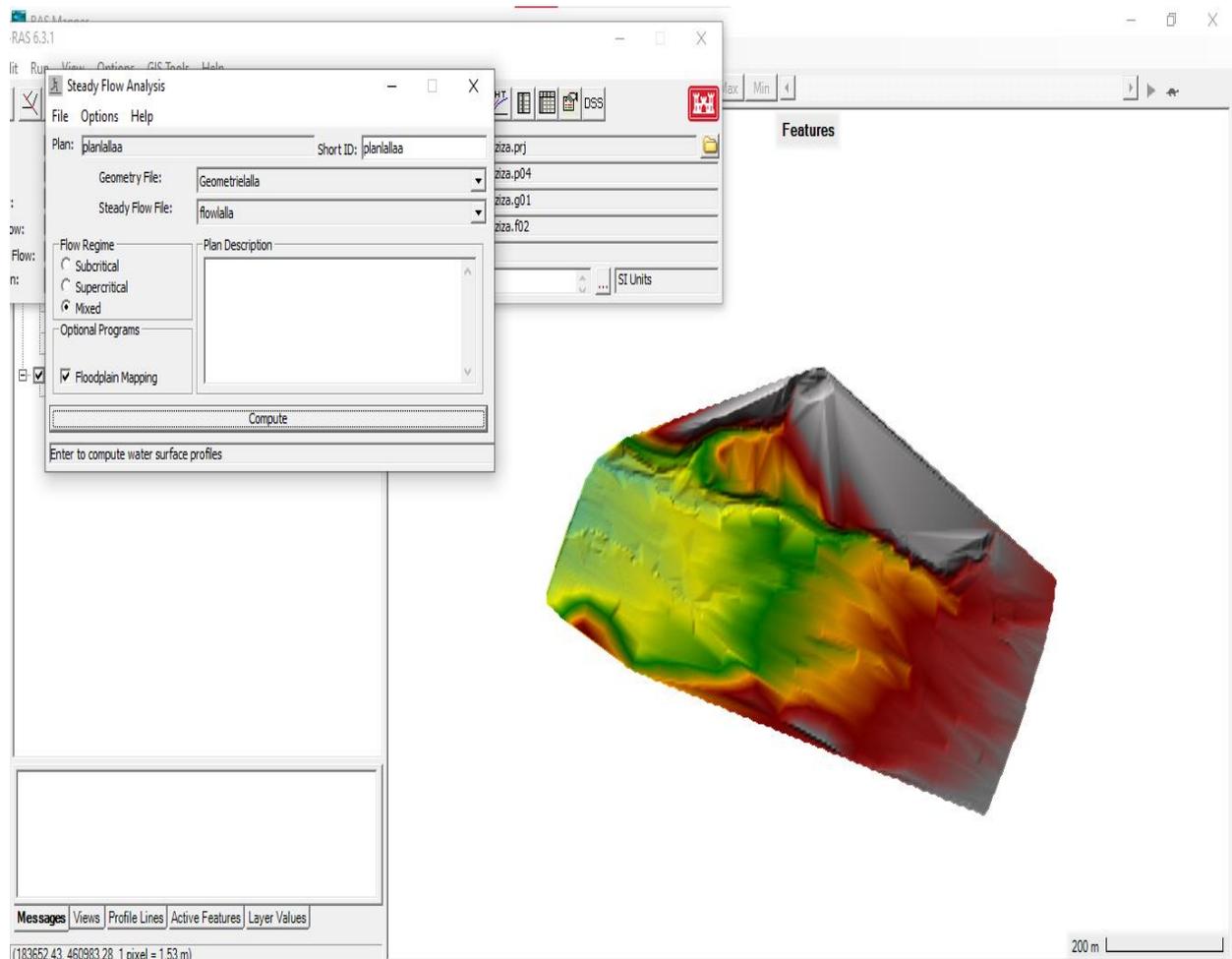


Figure 32 : Fenêtre de simulation de la zone d'étude.

3 Résultats de la simulation

L'utilisation du logiciel HEC-RAS, nous a permis d'intégrer plusieurs paramètres de calcul pour simuler l'ampleur des crues correspondant aux périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans. Les résultats de ces simulations sont illustrés dans les figures 33 à 36.

3.1 Pour une période de retour de dix ans :

Pour la crue décennale on remarque qu'il n'y a aucun débordement dans la partie aval. En revanche on observe un faible débordement dans la partie centrale de la rive droite et la partie amont de l'oued. (Figure 33)

3.2 Pour une période de retour de vingt ans :

Pour la crue vingtennale on remarque qu'il n'y a aucun débordement dans la partie aval. À l'opposé on observe que le débordement devient plus important dans la partie amont de l'oued et la partie centrale de la rive droite et il atteint les constructions. (Figure 34)

3.3 Pour une période de retour de cinquante ans :

Le passage de la crue cinquantiennale provoque l'augmentation des débordements à la fois en amont et en aval, ainsi que sur les rives gauche et droite de la partie centrale. (Figure 35)

3.4 Pour une période de retour de cent ans :

Pour la crue centennale, on constate que les débordements s'étendent notamment dans la partie amont et la partie centrale de la rive droite, atteignent même les constructions. (Figure 36)



Figure 33 : La crue correspondant à une période de retour de dix ans.



Figure 34 : la crue correspondant à une période de retour de vingt ans.



Figure35 : La crue correspondant à une période de retour de cinquante ans.



Figure 36 : La crue correspondant à une période de retour de cent ans.



Figure 37 : Simulation de la zone inondable lors de la crue centennale

4 Solutions et protection de la zone étudiée :

D'après les résultats de la simulation hydraulique, nous proposons deux solutions pour résoudre les problèmes des inondations dans la zone étudiée :

- ✚ La reconstruction d'une digue en gabion, mais avec un renforcement accru par rapport à l'ancienne.
- ✚ Nous suggérons également la construction d'un canal trapézoïdal en béton pour diriger efficacement l'eau de ruissellement vers l'exutoire, avec un revêtement de protection aux cotés.

Concernant la première solution le prix pour les dimensions de 2 m x 1 m x 1 m est de 450 à 500 dh. Sachant que le matériel nécessaire (les galets et les blocs de roches.) est disponible sur place. De plus, la conception en 2x1x1 (soit 2 mètres cubes) est la plus appropriée pour ce type d'aménagement. Si le prix est de 500 dh, alors le coût total pour l'aménagement de 415 mètres serait de 207 500 dh.

Conclusion

Cette étude s'est penchée sur la problématique des inondations dans le bassin de Lalla Aziza qui est une région montagnarde marocaine. Elle vise aussi l'analyse des différents aspects liés à ce phénomène.

En délimitant le bassin versant de la zone étudiée on a constaté que la réponse hydrologique est influencée par plusieurs facteurs tels que la morphologie du bassin, la pluviométrie, l'hydrométrie...

Arc GIS nous a permis la délimitation et la caractérisation du bassin d'une superficie de $402,82 \text{ Km}^2$ et d'un périmètre de $106,33 \text{ km}$. Les résultats du rectangle équivalent montrent que la forme du bassin versant est allongée.

Pour estimer les débits de crue au niveau du bassin non jaugé de Lalla Aziza, nous avons utilisé les données du bassin versant voisin d'Illoudjane (bassin jaugé), puis nous les avons extrapolées au point non jaugé. Le calcul des débits de pointe est effectué par différentes méthodes, parmi lesquelles la méthode de GRADEX est considérée comme étant la plus fiable.

Cette simulation hydraulique nous a facilité l'exploration des causes fondamentales des inondations dans la zone étudiée. En outre, en analysant les schémas d'écoulement de l'eau, nous avons pu délimiter les zones à risque de débordement de l'oued Seksawa où il peut affecter les équipements et les maisons.

Il convient de noter que des mesures de protection contre les inondations ont été prises par le passé. Cependant, leur sous-dimensionnement a conduit à leur rupture, et a donc aggravé la sévérité des inondations. Par conséquent, il est essentiel d'accorder une importance primordiale à un dimensionnement adéquat de ces aménagements de protection.

BIBLIOGRAPHIE

Laabidi.A,El Hmaidi.A,Gourari.L,EL Abassi Mourad. Apports du modèle numérique de terrain MNT à la modélisation du relief et des caractéristiques physiques du bassin versant du Moyen Beht en amont du Barrage El Kansera (Sillon Sud Rifain, Maroc): European Scientific Journal October 2016 edition vol.12, p: 263

Singh V.P., Elemental hydrology. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.973p

The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment State Water Resources Control Board 5.1.3. FS-(RC) 2011.

Ouarda T.B M, Gingras, H., Bobée, B., Lemonier, M. Synthèse des méthodes simples de régionalisation [Rapport] : rapport de recherche. - Québec : INRS-Eau. 2001.

Hazan, R. et Lazarevic,D. Détermination des débits maximum et hydrogramme de crues [Rapport]. - Rabat : Office National des Irrigations. 1969. pp. 354-361

Lamrani,K., Oudour,K., EL HARRAB,C . Etude hydrologique du bassin versant de Tnine Ourika (Haut Atlas, Maroc) : mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech ,2021. p :43-49-50.

OUAHIDY A, CHOUKRI M. Etude hydro-pluviométrique et estimation des débits de pointe du bassin versant de la Rheraya (Maroc) : mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech,2018. p : 42.

AHATTAB, J. Réadaptation des méthodes d'estimation de crues aux données hydrologiques extrêmes récentes des bassins versants de Tensift et Essaouira, Thèse de doctorat.2016. p87.

ELHADDAJI, A. Etude de protection contre les inondations au niveau du douar Lalla Aariba,commune de Nifa,province de Chichaoua : mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech ,2019. p :19-42.

WEBOGRAPHIE

https://planificateur.acontresens.net/afrique/maroc/marrakech_tensift_al_haouz/lalla_aziza/2543752.html . Consulté le 11/05/2023, à 14 :15.

<http://earthexplorer.usgs.gov> . Consulté le 27/04/2023, à 09 :25.

<https://www.google.com/search?q=georachid&oq=georachid&ags=chrome..69i57j0i19i512l2j0i10i19i512j0i19i512l2j0i10i19i512l2j0i19i512j0i19i30.7034j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8> . Consulté le 06/05/2023, à 11 :00.

<https://hydro-blog.com/hec-ras/> Consulté le 01/06/2023, à 18 :03.

ANNEXES



Image A : sapement de la berge droite de l'oued de seksawa.



Image B : traversée de la RP2032 par dalot.



Image C : Lit bien encaissé de chaâbat Ighzer Oumassine



Image D : sapement de la berge droite d'ighzer Oumassine.



Image E : ouvrage de franchissement de la RP2032 : Dalot triple de 2.00×2.00m envasé



Image F : lit bien encaissé d'ighzer Izarifen au niveau du lycée



Image G : empiètement du mur de Dar Taliba sur la berge gauche



Image H : Empiètement du mur du lycée sur la berge gauche



Image I : ouvrage de franchissement de la RP2032 : deux buses envasées

Tableau A : Pluies mensuelles en mm (1989/90 à 2017/18).

Mois	Pluies mensuelles en (mm)
Septembre	11,52
Octobre	29,74
Novembre	38,76
Décembre	31,81
Janvier	39,99
Février	39,23
Mars	44,18
Avril	42,21
Mai	17,98
Juin	9,07
Juillet	3,14
Aout	7,55

Tableau B : Pluies saisonnières en mm (1989/90 à 2017/18)

Saison	Pluies en (mm)
Automne	10,9
Hiver	14,33
Printemps	12,73
Été	3,7

Tableau C : Pluies annuelles en mm (1989/90 à 2017/18).

Année	Pluies en (mm)
1989	244,4
1990	401,5
1991	221,7
1992	146,1
1993	389,4
1994	350,5
1995	390
1996	518,1
1997	380,9
1998	355,4
1999	394,6
2000	229
2001	268,6
2002	329,9
2003	508,3
2004	231,6
2005	405,9
2006	280,5
2007	162,4
2008	482,2
2009	302
2010	314,3
2011	131,5
2012	188,2
2013	262,6
2014	502
2015	248,6
2016	156
2017	372,2
2018	269,8

Tableau D : Les débits moyens mensuels de la station de Iloudjane (1975/76 à 2017/18).

Mois	Débit mensuels m^3/s
Septembre	0,186
Octobre	0,623
Novembre	1,516
Décembre	1,408
Janvier	1,289
Février	1,578
Mars	1,743
Avril	1,378
Mai	0,78
Juin	0,416
Juillet	0,53
Aout	0,3

Tableau E : Les débits moyens saisonniers à Iloudjane (1975/76 à 2017/18)

Saisons	Débits en m^3/s
Automne	26
Hiver	2
Printemps	15
Eté	2

Tableau F : Les débits moyens annuels de la station de Iloudjane

Les années	Débits en m^3/s
1975/76	1,748
1976/77	0,651
1977/78	12,437
1978/79	13,492
1979/80	23,780
1980/81	2,617
1981/82	4,422
1982/83	0,353
1983/84	2,263
1984/85	12,068
1985/86	4,906
1986/87	0,230
1987/88	19,635
1988/89	44,744
1989/90	42,808
1990/91	8,031
1991/92	18,918
1992/93	1,307
1993/94	16,211
1994/95	5,453
1995/96	42,003
1996/97	9,303
1997/98	12,062
1998/99	0,323
1999/00	21,779
2000/01	0,629
2001/02	2,991
2002/03	4,950
2003/04	4,316
2004/05	0,613
2005/06	0,540
2006/07	3,753
2007/08	8,862
2008/09	7,165
2009/10	45,188
2010/11	18,346
2011/12	2,037
2012/13	7,492
2013/14	1,420
2014/15	34,176
2015/16	10,532
2016/17	8,721
2017/18	2,336
2018-19	12,430

Tableau G : Débit maximal journaliers en m^3/s .

Année	Date	Max
1975	02/05/1976	4,100
1976	05/01/1977	1,575
1977	06/09/1977	20,888
1978	18/01/1979	31,600
1979	10/09/1979	46,872
1980	08/09/1980	7,250
1981	09/05/1982	15,201
1982	22/12/1982	1,190
1983	16/11/1983	7,250
1984	15/01/1985	13,400
1985	02/05/1986	6,160
1986	10/10/1986	10,100
1987	04/12/1987	38,900
1988	10/11/1988	580,000
1989	24/07/1990	287,000
1990	31/03/1991	49,000
1991	06/12/1991	113,000
1992	02/01/1993	21,700
1993	10/11/1993	128,000
1994	15/04/1995	8,000
1995	15/12/1995	62,000
1996	08/04/1997	18,504
1997	08/02/1998	198,660
1998	15/03/1999	0,605
1999	28/10/1999	470,000
2000	19/04/2001	0,240
2001	02/04/2002	2,844
2002	18/12/2002	14,310
2003	07/04/2004	4,650
2004	18/08/2005	0,543
2005	24/04/2006	19,627
2006	17/04/2007	97,849
2007	22/07/2008	123,223
2008	30/10/2008	240,209
2009	10/09/2009	111,145
2010	04/04/2011	41,167
2011	02/04/2012	91,175
2012	04/03/2013	94,785
2013	29/01/2014	38,600
2014	28/11/2014	271,716
2015	28/03/2016	1,914
2016	25/10/2016	49,509
2017	15/01/2018	5,219
2018	28/11/2018	61,835

Tableau H : Valeurs du coefficient n de Manning. (ELHADDAJI 2019)

B) Cours d'eau naturels	
1) Propres, rives en ligne droite	0.025
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0.030
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0.035
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0.040
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0.033
6) Idem 4, avec pierres	0.045
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0.050
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0.075