



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de La Recherche Scientifique
Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et Technologies

Département d'hydraulique et génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme De MASTER

THEME :

**Etude de vulnérabilité aux inondations de la ville
de Metlili et étude d'aménagement contre les
risques des cures**

Présenté par:

Makhlouf Abdelkarim

Djekaoua Mokhtar Fethi

Directeur de Mémoire :

M.Chikh Ouled belkhir

Année Universitaire

2021-2022

Remerciements

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup d'efforts ; nos remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette étude.

Je tiens aussi à adresser mes remerciements à ma famille, et plus précisément à ma mère qui m'a toujours soutenu et pousser à continuer mes études. Ce présent travail a pu

Voir le jour grâce à son soutien.

Nos remerciements vont aussi à l'encontre de notre directeur de Mémoire Mr Cheikh Ouled Belkhir qui malgré son Temps difficile nous a aidés à travers ses remarques

pertinentes

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à : mes parents Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes frères et mes sœurs, à toute ma famille, et mes amis, à mon binôme

Mokhtar Djekaoua.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

ملخص:

تعتبر الفيضانات حاليا خطر دائم للسكان، خاصة الذين هم قاطنون على ضفاف الودية، هذه الظاهرة جد معقدة وخطيرة نظرا لوجوب دراسات معمقة للتحدي لها. بعض هذه الدراسات تتمثل في تحليل أمواج النغمات الناتجة عن الفيضان، ما يسمح بإنشاء خرائط الصدفة الخطر، التي تعبر عن نطاق امتداد الفيضانات بالمقارنة مع بعض درجات الإنذار، هذا يسمح بإعادة تهيئة مناطق الخطر وإنشاء خطط إجماع السكان. الهدف من هذه الدراسة هو استخالص خريطة الصدفة الخطر (للفيضانات لمنطقة متليلي، والعمل على تحقيق هاته الخريطة يمر بدراسة هيدرولوجية لتحديد التدفق الأعظمي لفيضان واد متليلي. العمل على برنامج الهيكراس سمح لنا بتحديد مستويات المياه بالنسبة لتواتر الفيضانات والخصائص الجيومترية والطبوغرافية للمقاطع التي يسلكها. برنامج الأركجيز كذلك سمح لنا بتحديد مستويات التواتر المترتبة على خريطة الصدفة، وكذلك تحديد المناطق المعرضة لخطر الفيضانات. الكلمات المفتاحية: فيضانات ، خريطة المناطق المعرضة للفيضان، متليلي، هكراس

Résumé :

Pendant longtemps, les gens ont investi dans des zones exposées aux inondations en raison des conditions géographiques favorables qui facilitent la croissance économique, telles que l'accessibilité aux ressources naturelles et la reproduction alimentaire. Ce fait oblige les habitants de la ville de Metlili de protéger leurs précieux biens contre les inondations et de réfléchir à une politique d'atténuation des crues connues dans cette partie du Sud algérien. Les autorités algériennes ont mis en œuvre une stratégie de gestion des inondations qui permet à la société touchée d'accroître sa résilience face à ce risque. Suite à l'augmentation de la densité de la population, souvent associée à l'amélioration du niveau de vie et par conséquent l'augmentation des biens et des infrastructures attribuées ; la résilience aux inondations prend de l'ampleur pour subir cet événement tel qu'il se présente. Les dégâts causés par les inondations ont tendance à devenir de plus en plus fréquents. Cela renvoie à la vulnérabilité croissante liée au changement de la société dans son évolution suite à l'interférence entre investissement et risque pris dans l'occupation de sols dans des zones inondables. D'après une étude menée en 2009 sur les propriétés de la vallée du Metlili et de ses habitants, l'objectif de cet article est de fournir le moyen qui pourrait aider à réduire la vulnérabilité et améliorer la résilience aux risques d'inondations par une description du fonctionnement social et économique actuel et les modes d'urbanisations de la région. L'implication des communautés locales dans la gestion des inondations est essentielle pour toute

approche préventive opérationnelle et organisationnelle, afin d'avoir une meilleure réaction en temps réel de crise et de distinguer les mesures de réhabilitation à prendre pour la protection des individus et de leurs biens.

Mots clés : Metlili ; Gestion; Inondation-éclair; Prévention; Résilience; Stratégie.

Abstract:

For a long time, people have invested in areas prone to flooding due to favorable geographical conditions that facilitate economic growth, such as accessibility to natural resources and food reproduction. This fact obliges the inhabitants of the city of Metlili to protect their precious goods against floods and to think about a policy of mitigation of the floods known in this part of southern Algeria. The Algerian authorities have implemented a flood management strategy that allows the affected society to increase its resilience to this risk. Following the increase in population density, often associated with the improvement of the standard of living and consequently the increase in the goods and infrastructures allocated;

flood resiliency is gaining momentum to endure this event as it presents itself.

Flood damage tends to become more and more frequent. This refers to the growing vulnerability linked to the change of society in its evolution following the interference between investment and risk taken in the occupation of land in flood-prone areas. Based on a study conducted in 2009 on the properties of the Metlili Valley and its inhabitants, the objective of this article is to provide the means that could help reduce vulnerability and improve resilience to flood risks. By a description of the current social and economic functioning and the modes of urbanization of the region. The involvement of local communities in flood management is essential for any operational and organizational preventive approach, in order to have a better real-time crisis reaction and to distinguish the rehabilitation measures to be taken for the protection of individuals and their goods.

Key words: Metlili; Gestion; Inondation-éclair; Prévention; Résilience; Stratégie.

Remerciements.....	01
Dédicace.....	01
Résumé.....	02
Sommaire.....	05
Liste des tableaux.....	08
Liste des Figures.....	08
Liste des abréviations.....	09
Introduction générale.....	10
Chapitre I : Vulnérabilité aux inondations.....	01
1. Les précipitations maximales journalières:.....	01
1.2 Répartition des pluies journalières et périodes de sécheresses (1970-2021).....	02
1.3 Mécanismes d'écoulement de l'eau dans une ville.....	05
1.3.1 Fonctionnement des eaux pluviales urbaines en condition climatique normal.....	05
1.3.2 Appréhensions de la structure urbaine.....	07
1.3.3 Méthodes d'obtention une description détaillée.....	08
1.4 Introduction à l'état d'art de la modélisation.....	08
1.4.1 Approches hydrologique.....	08
1.4.2 Approches hydrauliques.....	09
1.5 Inondation.....	10
Introduction.....	10
1.6 Définition des inondations.....	10
1.7 Types d'inondations.....	10
1.7.1 Inondations de plaines.....	10
1.7.2 Remontées de nappe phréatique.....	11
1.7.3 Crues torrentielles.....	12
1.7.4 Les ruptures de barrage.....	12
1.7.5 Ruissellement pluvial.....	13
1.7.6 Submersion marines:.....	14
1.8 Mesures de protection.....	14
Chapitre II : PRÉSENTATION DE LA RÉGION D'ÉTUDE.....	17
2.1 Présentation de la wilaya.....	17
2.1.1. La situation géographique de la wilaya.....	17
2.1.2. Les régions naturelles de la wilaya.....	18
2.1.3 Situation régionale de la ville de Metlili.....	19
2.1.4. Les données socio-économiques.....	21
2.1.5. Relief.....	23
2.1.6 Aspect climatologique.....	24
2.2. Présentation des sites d'intervention.....	31
2.2.1. Bassin versant de l'oued Metlili.....	31
2.3. Détermination des principaux affluents du bassin versant d'Oued Metlili.....	32
2.4. Caractéristiques géométriques des bassins.....	34
2.4.1. Caractéristiques hydrographiques.....	35
2.5. Détermination de régime pluviométrique:.....	36
2.5.1. Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa.....	37
2.5.3. Le régime pluviométrique.....	41
2.6. Reconstitution des crues sur l'oued de Metlili.....	45
2.6.1. Principaux paramètres intervenant dans la reconstitution des crues.....	45

2.6.2.Application à l'Oued de Metlili.....	49
2.6.3.Hydrogramme de crues:.....	51
CHAPITRE III : PRESENTATION DES PROGRAMME UTILISER.....	53
3.1.ARC-GIS.....	53
3.1.1.Présentation d'ArcGIS:.....	53
3.2.HEC-RAS :.....	55
3.2.1.Caractéristiques du modèle:.....	56
3.3.GLOBAL MAPPER :.....	57
3.3.1.Présentation de Global Mapper:.....	57
3.4.Modèle numérique de terrain : (MNT).....	58
3.4.1.MNT ou MNE :.....	58
3.4.2.Utilisation des MNT:.....	58
3.4.3.Types de MNT :.....	60
CHAPITRE IV :.....	61
4.1.Simulation numérique de la crue d' Oued :.....	62
4.1.1.Étapes de la modélisation:.....	63
4.1.2.Application sur la zone centre-ville (vallée du Metlili) :.....	64
4.1.2.1.Débits et conditions limites:.....	72
4.1.2.2.Simulation hydraulique :.....	72
4.1.2.3.Visualisation des résultats :.....	73
4.1.3.Finalisation de la carte :.....	74
4.1.3.1.Carte finale de vulnérabilité aux inondations	74
4.1.3.2.Interprétation du résultat des cartes	75
Conclusion générale.....	78
Références bibliographiques.....	80
Notation.....	82

Liste des tableaux:

Tab N°1: Estimation de la période de retour sur la Station de Ghardaïa 1970-2021.....	02
Tab N° 2 quelque commune avec la surface (Younes METTAS 2010).....	20
Tab N°3 Evolution de la population de 1966 à 1987 (Younes METTAS 2010).....	21
Tab N° 4 Projection démographique.....	22
Tab N° 5 Projection démographique selon "Annuaire statistique" 1994.....	22
Tab N° 6 Données climatiques à Metlili (ONM-Ghardaïa).....	25
Tab N° 7 Fréquences des vents selon leur direction (Association BG-ENHPC Juin-2000)	27
Tab N° 8 Moyenne mensuelles des vitesses maximal du vent (BENADDA Lotfi-Ghardaïa 2012).....	28
Tab N° 9 Humidité relative moyen (1990-2009) (Association BG- ENHPC Juin-2000).....	29
Tab N° 11 Evaporation moyenne mensuelle (mm) (M.BENADDA Lotfi - Ghardaïa2012).....	30
Tab N° 12 caractéristiques géomorphométriques d'Oued Metlili.....	34
Tab N° 13 Caractéristiques Hypsométriques du bassin d'Oued Metlili.....	35
Tab N° 14 caractéristiques des reliefs d'Oued Metlili.....	36
Tab N° 15 Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa (BG ROUCHE).....	37
Tab N° 16 Caractéristiques statistiques des échantillons.....	38
Tab N° 17 Les caractéristiques empiriques de la loi de Gumbel.....	39
Tab N° 18 Les caractéristiques empiriques de la loi de Galton.....	40
Tab N° 19 Pluies journalières maximales fréquentielles.....	42
Tab N° 20 Intensités maximales en mm/h de durée t (h) et de période de retour T (an).....	44
Tab N° 21 Temps de base Tb et temps de montée Tm (Oued Metlili).....	47
Tab N° 22 Coefficient de ruissellement de chaque sous bassin (Oued Metlili).....	48
Tab N° 23 Coefficient d'abattement de chaque sous bassin (Oued Metlili).....	48
Tab N° 24 Coefficient de pointe de chaque sous bassin (Oued Metlili).....	48
Tab N° 25 calcul des débits avec la formule de Rodier-Auvray (1988).....	50
Tab N° 26 Caractéristiques de l'hydrogramme de crue du pont de centre-ville Metlili.....	52

Listes des figures:

Fig. N°1 : Ajustement graphique à la loi de Gembel (Station de Ghardaïa 1970-2021).....	01
Figure N°2: Répartition des périodes pluvieuses et celle de sècheresses de la station de Ghardaïa. 1970-2021.....	03
Fig. N° 3 Ecoulement de l'eau en ville suite à une pluie intense (Iwata M. et al, 2001).....	07
Figures N°4 : Images d'inondations de plaines.....	11
Figures N°5 : Remontées de nappe phréatique à Ouargla.....	11
Figures N°6 : Images présentant les crues torrentielles.....	12
Figures N°7 : Inondation induite par une rupture de barrage.....	13
Figures N°8 : Ruissellement pluvial dans une zone urbaine.....	13
Figures N°9 : Des images impressionnantes de submersions marines.....	14
Figure N°10 : Schéma de localisation de la wilaya de Ghardaïa (Association BG-ENHPC Juin-2000).....	17
Figure N°11 Schéma structural de la wilaya (Association BG-ENHPC Juin-2000).....	18
Fig. N° 12 Localisation de la commune dans la wilaya de Ghardaïa.....	19
Fig. N° 13 Evolution de la population de la Wilaya de Ghardaïa (Younes METTAS 2010).....	22
Fig. N° 14 Projection démographique selon l'Annuaire statistique 1994.....	23
Fig. N° 15 coupe schématique représente les déférentes hypsométries (OULED BELKHEIR Cheikh 2014).....	24
Fig. N° 16 La répartition de la moyenne des températures.....	26
Fig. N°17 Direction des vents dominants (Rose des vents).....	28
Fig. N°18 humidité relative moyen en %.....	30
Fig. N°19 Evaporation moyenne mensuelle (mm).....	31
Fig. N°20 Situation d'ensemble (Oued Metlili)-(Google Earth).....	31
Fig. N°21 la délimitation des principaux affluents du BV du Metlili (Google Earth).....	33
Fig.° 22 Hydrographie du bassin versant d'oued Metlili.....	34
Fig.° 23 La courbe hypsométrique d'Oued Metlili.....	36
Fig.N°24 Ajustement graphique d'une loi de Gembel. (xlstat).....	41
Fig. N° 25 Ajustement graphique d'une loi de Galton. (xlstat)	41
Fig. N° 26 Courbe IDF de la station de Ghardaïa.....	44
Fig. N° 27 L'hydrogramme de crues de la ville de Metlili.....	52
Figure N°28 :pressante utilisation d'ArcGIS.....	53
Fig. N°29 Une fenêtre de programme utiliser globale mapper.....	57
Fig. .N°30 Quelques dégâts matériels –zone Cv-Metlili.....	61
Fig. N°31 Fenêtre principale de HEC-RAS.....	62
Fig. N°32 sections transversales présentes sur la levée topographique- zone de centre-ville Metlili(AUTOCAD).....	63
Fig. N°33 Fenêtre Base Géométrie Data - la zone Cv Metlili.....	64
Fig. N°34 Les différentes sections transversales – (vallée de Metlili).....	71

Fig. N°35 Fenetre Steady Flow Data - la zone Pont Cv Metlili.....	72
Fig. N°36 Fenêtre Steady Flow Analysis - la zone Pont Cv Metlili.....	72
Fig. N°37 Simulation de crue sur la zone Centre-ville (vallée du Metlili).....	73
Fig. N°38 Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décennale, centennale, millénaire de la région de centre-ville (Oued Metlili).....	74
Fig. N° 38 Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décennale, centennale, millénaire de la région de centre-ville (Oued Metlili).....	75

Liste des abréviations

OMM : Office Mondial de Météorologie.

CEMAGREF : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts.

HEC-RAS : « Hydrologic Engineering Centers River Analysis System ».

ONM : Office Nationale de Météorologie.

BG : Bonnard et Gardel.

ENHPC : Etude d'assainissement et de protection contre les crues.

Arc-Gis : logiciels d'information géographique.

MNT :Modèle numérique de terrain.

DAUG : Station de Ghardaïa ID codes.

COLORADO : type bac d'évaporation.

BV : Bassin Versant.

CN : Courbes des niveaux.

P : Pluie.

IC : Intervalle de confiance.

IDF : Courbe intensité durée fréquence.

ANRH : Agence National Ressources hydraulique.

Introduction générale

Introduction générale

Les inondations font partie des catastrophes naturelles les plus dangereuses dans le monde. Les pertes humaines et économiques qui sont dues aux inondations ont massivement augmenté chaque année. Selon l'OMM (Office Mondial de Météorologie), environ 1,5 milliards de personnes dans le monde ont été victimes des inondations. En Algérie, plusieurs régions du pays ont connu de douloureux événements liés aux crues qui ont ravagées les populations, c'est le cas de la crue d'octobre 2008 à Metlili.

La vulnérabilité aux inondations a d'autant plus augmenté à nos jours, du fait de l'occupation anarchique du lit mineur des Oueds par les habitants. La crue d'octobre 2008 a mis en évidence ce danger notamment aux centres villes des grandes cités Metlili. Ceci n'est pas dû forcément à une intensité plus grande des crues, mais à la croissance du facteur vulnérabilité tel que l'installation des habitants proche au lit mineurs des Oueds. (ALI Fathallah 2009).

La modélisation des inondations représente à nos jours un thème très important dans la thématique de l'eau, et à l'aménagement du territoire. Elle passe inévitablement par la résolution numérique des équations de Saint Venant issues des équations de Navier Stokes, qui régissent les écoulements. La modélisation de la crue, permet de décrire l'événement tel qu'il se présente, avec un certain degré de tolérance, ainsi elle permet de cartographier les zones à vulnérabilité importantes face à ces événements (Fathallah, 2009).

L'objectif de ce travail est d'établir des cartes de vulnérabilité aux inondations d'Oued Metlili aux endroits les plus touchés par ces dernières inondations (octobre 2008). La réalisation de cette carte passe par plusieurs phases afin de déterminer le débit maximum de différentes fréquences sur Metlili.

L'utilisation du logiciel HEC-RAS, nous a permis de déterminer les niveaux d'eau atteints en fonction de la fréquence de crue et les conditions géométriques et topographiques des sections à traversées, c'est un outil de simulation des écoulements bidimensionnel très adopté au milieu urbain.

Le logiciel Arc Gis nous a permis aussi d'interpoler et de simuler les niveaux fréquentiels sur une carte d'aléa et de déterminer les zones inondables.

En effet, notre travail s'articule sur les chapitres suivants :

Après avoir présenté dans le premier chapitre, la vulnérabilité à l'inondation de la ville de Metlili et les mécanismes d'écoulement de l'eau dans une ville en enfin des généralités sur l'inondation.

Hydrodynamiques, comme nous touchons le fonctionnement des eaux pluviales urbaines en condition climatique normale, l'écoulement dans le réseau de rues.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le milieu physique de la région d'étude (Situation géographique, les données socio-économiques, climatique, géologiques ...).

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les logiciels utilisés dans cette étude (HEC-ras, Arc GIS, Global Mapper, MNT...).

Dans le quatrième chapitre, nous ferons la cartographie de vulnérabilité et la simulation de la crue et la visualisation des résultats.

A la fin, une conclusion générale contiendra une synthèse des travaux effectués.

Avec les recommandations qui s'y rapportent.

CHAPITRE I

VULNERABILITE

AUX INONDATION

1.1. Les précipitations maximales journalières

Dans les régions arides le caractère exceptionnel de certaines pluies tombées en 24h est très important à considérer, puisqu'elles peuvent être à l'origine du ruissellement des Oueds (Michel A.R., 1996). Il s'agit des hauteurs de pluie tombées de 6 heures du matin le jour j jusqu'à 6 heures le lendemain $j + 1$, la hauteur étant reportée au jour j . Elles peuvent être assimilées à une intensité de pluie en 24h. Plusieurs méthodes d'évaluation des crues utilisent ce type de données comme une caractéristique importante.

Ces pluies sont généralement plus disponibles que les intensités par intervalles de temps plus petits. Selon Dubief, les précipitations sur le Sahara Septentrionale ont pratiquement toujours lieu sous forme des pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes. Cette insuffisance de pluies sahariennes est accompagnée d'une irrégularité très marquée du régime pluviométrique et d'une variabilité interannuelle considérable, ce qui accentue la sécheresse (Dubief, 1959).

La répartition de la série disponible des pluies journalières maximales (1970-2021) présente un coefficient de variation supérieur à 0.50, qui indique une dissymétrie nette. Celle-ci nous a permis de tester la loi de Gumbel, afin de déterminer l'ajustement adéquat à ces lois.

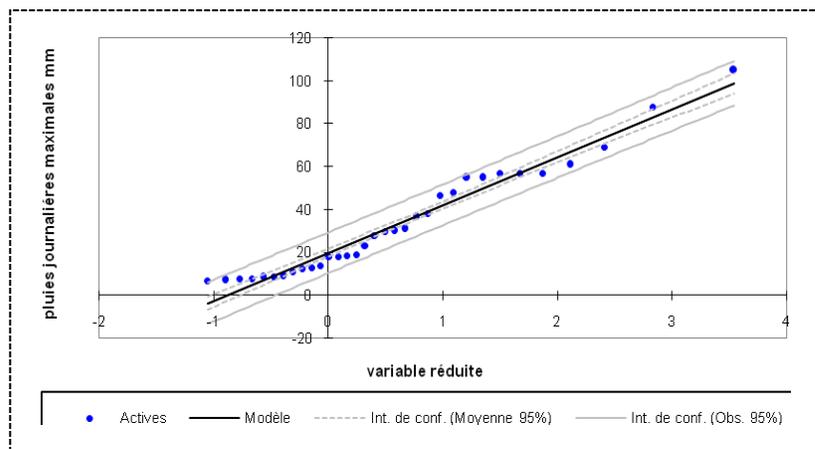


Figure N°1 : Ajustement graphique à la loi de Gumbel (Station de Ghardaïa 1970-2021)

Pour des fréquences choisies, nous avons déterminé à partir du graphique d'ajustement les valeurs des pluies journalières pour chaque pas de temps.

Sur le tableau N°01 nous avons représenté les valeurs des pluies obtenues.

Tableau N°1: Estimation de la période de retour sur la Station de Ghardaïa 1970-2021)

Temps de retour (an)	FND	P j max fréquentielle (mm)
2	0,5	18
5	0,8	30
10	0,9	40
50	0,98	49
100	0,99	73
500	0,998	96
1000	0,999	128
10000	0,9999	201

1.2. Répartition des pluies journalières et périodes de sécheresses (1970-2021)

On distingue la « sécheresse météorologique » ou la durée des périodes sans précipitations (inférieures ou égales à 5 mm) qui séparent les phases pluvieuses. D'autre part la « sécheresse efficace », c'est la durée qui séparent des pluies égales ou supérieures à 10 mm en 24 heures (Roche, 1996).

Nous avons utilisé le logiciel Serfur11 comme outil de simulation pour tracer le graphique ci-dessous (fig. 2). On reporte sur les Xs les années de 1970 à 2021, aux Ys

Les deuze (12) mois, et aux Zs les lames de pluies journalières maximales tombées durant le mois concerné.

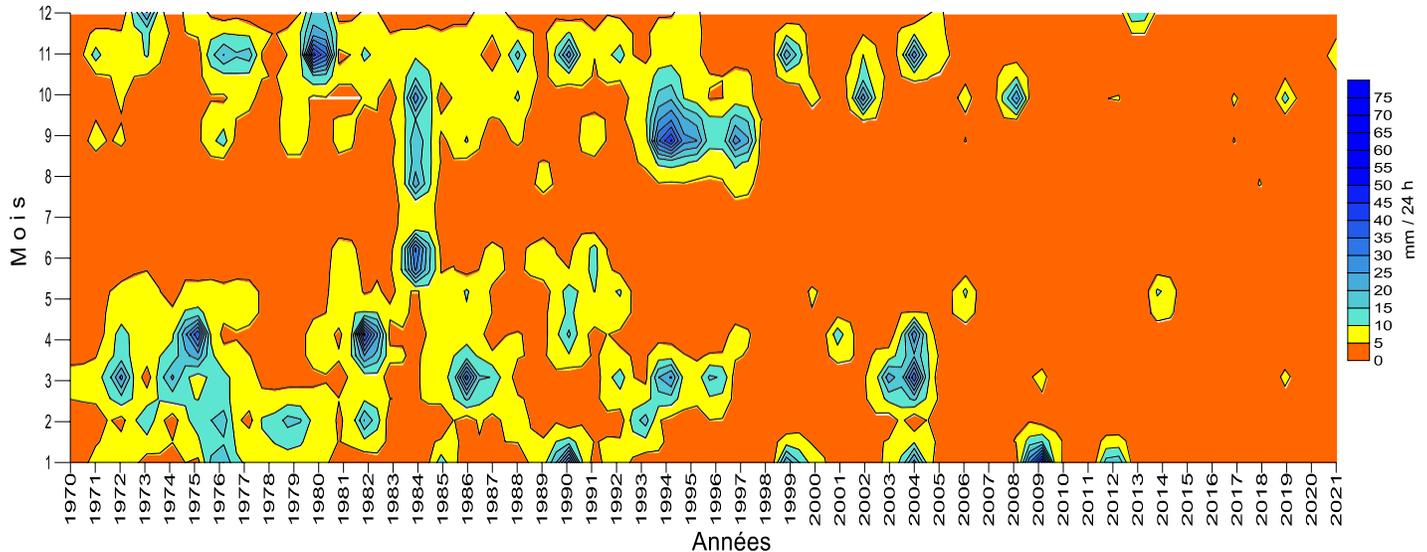


Figure N°2: Répartition des périodes pluvieuses et celle de sécheresses de la station de Ghardaïa 1970-2021

La différenciation de couleur permettra d'interpréter les phénomènes climatiques marquant la période étudiée. La coloration orange est correspond à la saison sèche à largeurs différentes, ces saisons sont séparées par intervalles de courtes durées pluvieuses et humides. D'après cette figure : les saisons sèches sont comme suite :

- 1970 à 1974 (3 ans).
- 1977-1980 (3 ans).
- 1987 à 1990 (3 ans).
- 1991 a 1994 (3ans).
- 1997 à 2004 (7 ans).
- 2004 à 2008 (4 ans).
- 2009 à 2021 (12 ans ou plus).

Durant ces périodes nous remarquons qu'il y a un nombre important des mois secs ainsi qu'un cumul pluviométrique très faible, ce qui assure le prolongement de la saison sèche, et également le rétrécissement de la période humide. On observe sur le graphique aussi, cinq périodes à pluviométries intenses. Elles sont caractérisées par des colorations jaunes à bleu foncé (cercles en pointillés jaunes et Bleus) :

- L'hiver et le printemps de 1975.
- L'automne de 1980.
- Le Printemps et l'automne de 1984.
- L'automne de 1994.
- L'hiver et le printemps de 2004.
- L'automne de 2008.

La période d'automne 1994, et celle de 1984 sont considérées comme périodes les plus pluvieuses de toute la série du M'Zab. Elles sont caractérisées par de fortes précipitations et un taux d'humidité relativement haut. Un autre phénomène climatique est observé sur le graphique :

- Il s'agit du prolongement d'une saison par rapport à une autre, à savoir la saison sèche par rapport à la saison humide, cela est mis en évidence par la coloration orange dominant l'air des autres colorations bleutée.
- On remarque aussi que la période de sécheresse devient plus en plus longue, elle passe de 3 ans pour la période 1970-1994 aux 5 ans (ou même plus) pour la période 1997-2021.
- Une période de sécheresse générale est très nette sur le graphique sa-commence de l'année 1995 jusqu'à nos jours.

1.3. Mécanismes d'écoulement de l'eau dans une ville

Au départ, le réseau hydrographique naturel a été utilisé par l'homme pour son bien être en terme de ressources et de moyen de communication. Cependant, les rivières mettant les habitats en danger, l'homme a modifié la géométrie des cours d'eau et adapte la ville pour s'en protéger.

Selon Weng (2001), au commencement de l'urbanisation d'une zone, lors du déboisement, l'évapotranspiration diminue et la sédimentation des lits augmente. Puis l'imperméabilisation des sols dans la phase de construction diminue l'infiltration, augmentant ainsi la valeur des débits de crue et réduisant les débits de base. Enfin en phase finale d'urbanisation, l'imperméabilisation s'accélère ; le temps de concentration de l'eau sur le bassin versant diminue et le pic de crue augmente encore. De plus, la présence du réseau d'assainissement tend à accélérer les écoulements d'eau à travers la ville (Weng, 2001).

1.3.1 Fonctionnement des eaux pluviales urbaines en condition climatique normale

En cas de précipitation, la pluie tombe sur le bassin versant constitue généralement d'une zone amont rural ou semi-urbaine et d'une zone urbaine en contrebas. Sur la zone rurale, une partie de l'eau de pluie s'infiltré et peut rejoindre la nappe. L'autre partie ruisselle, pour rejoindre en surface le réseau hydrographique, lui-même relie a la nappe. D'autre part, dans la zone urbaine, lorsque la pluie tombe sur une surface imperméable (toiture, parking...), l'eau ruisselle directement vers le réseau d'assainissement ou par l'intermédiaire de canalisations en direction de la voirie pour rejoindre le réseau d'assainissement. L'eau de pluie tombant sur les surfaces perméables est soumise à l'infiltration et le surplus ruisselle en surface pour rejoindre un point bas de la parcelle ou la voirie et donc rejoindre le réseau d'assainissement. Enfin, lorsque la pluie tombe sur une rue, si le débit est assez faible, l'écoulement rejoint rapidement les caniveaux du fait de la forme bombée de la rue et des trottoirs inclinent. L'eau ruisselant dans les caniveaux est ensuite interceptée par les avaloirs qui transportent cette eau vers le réseau d'eau pluvial (si la ville a un réseau séparatif) ou vers le réseau d'assainissement unitaire.

Les réseaux d'assainissement sont gravitaires, c'est à dire qu'ils s'écoulent d'un point haut vers un point plus bas en utilisant la force de gravite. En certains points, des systèmes de pompage permettent de ramener les débits vers les zones plus hautes. Les réseaux ont naturellement tendance à suivre les talwegs mais sont parfois plus influencés par les contraintes d'urbanisation. Enfin, l'eau est dirigée vers une station d'épuration avant d'être déversée dans les cours d'eau a l'aval de la ville.

1.3.1.1. En cas de fortes précipitations

Lorsque les précipitations sont importantes, les cours d'eau peuvent déborder en ville et submerger les protections urbaines (berges). Les rivières peuvent de même déborder a l'amont de la zone urbaine et l'eau entre alors dans la ville par les grandes avenues reliant le centre a la périphérie. Une autre cause d'inondation est le fait que le volume d'eau de pluie qui tombe sur la ville peut être trop important par rapport à la capacité de collecte des avaloirs et le surplus d'eau a alors tendance à rester s'écouler dans les rues. Enfin, le réseau d'assainissement peut aussi déborder au sein de la ville du fait d'un dépassement local de sa capacité et l'eau est ainsi renvoyée du réseau vers la voirie à travers les regards ou les avaloirs.

En terme d'impact sur l'écoulement, les rues peuvent jouer le rôle d'obstacles à l'écoulement (type digues) si elles sont orientées perpendiculairement à la pente, obligeant ainsi l'écoulement à contourner les bâtiments qui la bordent et donc regroupant ces écoulements dans les rues qui leur sont perpendiculaires (suivant la pente). Par ailleurs, les rues qui suivent la pente principale peuvent constituer de véritables canaux à faible rugosité, provoquant des vitesses d'écoulement très importantes. Lors des inondations, l'eau a alors tendance à remplir les places et jardins, entrer dans les bâtiments, s'accélérer dans les rues en pente et créer toutes les catastrophes que l'on connait : noyades, dégradations par remplissage (caves) ou par choc (façades), charriage de voitures et autres objets mobiles.

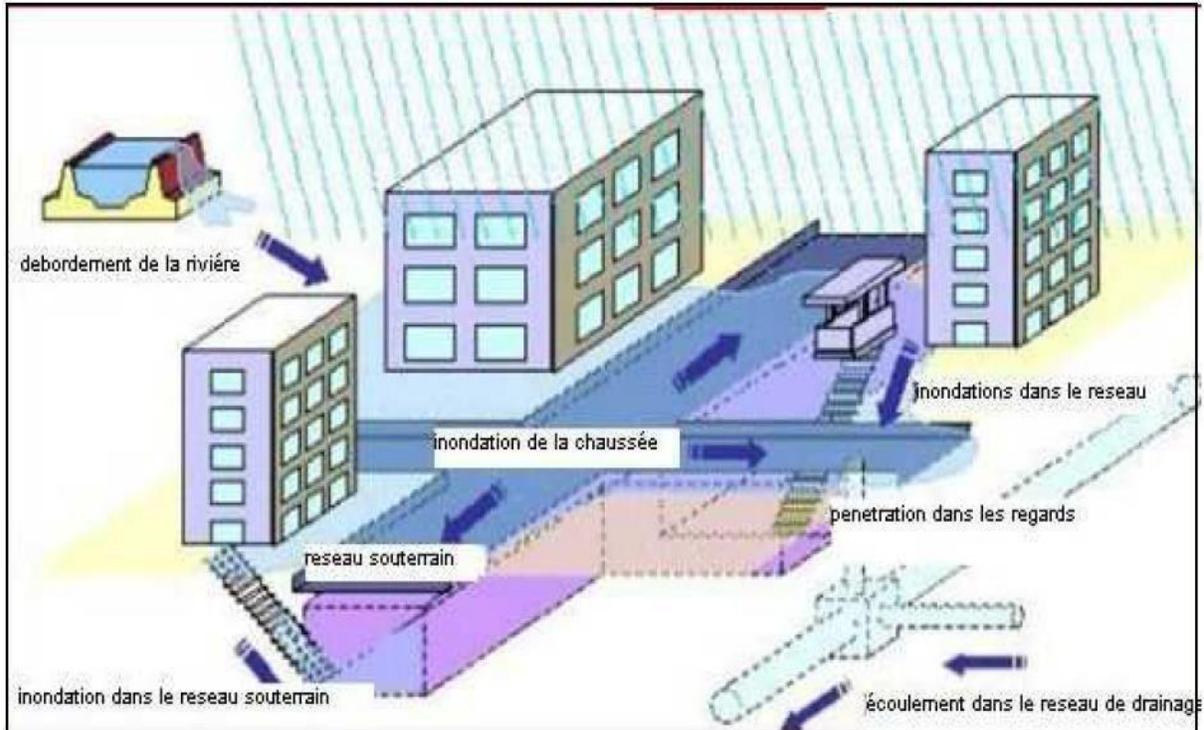


Fig. N° 3 Ecoulement de l'eau en ville suite à une pluie intense (Iwata M. et al, 2001)

1.3.2. Appréhension de la structure urbaine:

Vis à vis d'un plan de gestion du risque d'inondation, quatre échelles peuvent être considérées :

- Le plan général d'organisation de la ville ou de la communauté urbaine ;
- Le bassin versant ;
- Le plan de quartier où va apparaître l'hétérogénéité de la vulnérabilité à côté de l'hétérogénéité de l'aléa ;
- Le bâtiment.

A l'échelle du plan général, les principaux traits de l'organisation spatiale de la ville et des caractéristiques proprement hydrologiques doivent être définis. On distinguera, en particulier, l'organisation des « infrastructures », regroupant principalement les réseaux d'assainissement (enterres ou à l'air libre) et voies de communication (routes, voies ferrées, rivières) et des « superstructures ».

1.3.3. Méthodes d'obtention une description détaillée

Dans le cas où la modélisation hydrodynamique est supposée suffisamment précise pour donner une estimation des caractéristiques de l'écoulement au niveau de chaque îlot voire de chaque bâtiment, il est important d'examiner les effets locaux liés à différents obstacles.

La base du MNT (modèle numérique de terrain) se doit alors de considérer une représentation aussi fidèle que possible du sol, en particulier, en prenant en considération les caniveaux qui

Véhiculeront une partie du débit non négligeable par rapport au réseau d'assainissement. La

Définition du réseau de rues s'appuie alors sur une relève détaillée des sections en travers des rues.

1.4. Introduction à l'état d'art de la modélisation hydrodynamique

Un certain nombre d'études proposant des méthodes de simulation des inondations en milieu urbain peuvent être identifiées dans la littérature. L'objectif recherché par les auteurs peut varier de la détermination simple du risque en fonction des statistiques de pluie locales à l'effet de l'urbanisation sur la vulnérabilité face aux inondations, en passant par l'établissement de cartes d'alerte ou d'évacuation, l'aménagement urbain destiné à réduire les risques... En fonction des objectifs des auteurs et des types d'inondation à représenter, les méthodes utilisées sont très variables et deux approches semblent se détacher :

- Une approche dite "hydrologique" destinée à prédire l'évolution des débits s'écoulant dans le réseau d'assainissement;
- Une approche dite "hydraulique" destinée à prédire les écoulements ayant lieu dans la ville lors de la crue, à la fois au sein du réseau d'assainissement, dans les rivières urbaines, dans les rues et carrefours, au sein des îlots, dans le sous-sol...

1.4.1. Approches hydrologiques

Une "étude hydrologique" a pour objectif de calculer un hydrogramme (évolution du débit d'eau en fonction du temps) en un point particulier d'un cours d'eau appelé

Exutoire suite à un événement de pluie donne sur le bassin versant correspondant. En zone urbanisée, l'exutoire est généralement situé au sein du réseau d'assainissement et l'obtention de l'hydrogramme en ce point permet de vérifier si le dépassement de la capacité du réseau et donc le débordement ont lieu pour une pluie considérée. Ces études utilisent deux types de données d'entrée : d'une part, les caractéristiques du bassin versant urbain tels les limites des parcelles, la part de surface imperméable (coefficient d'imperméabilisation), les coefficients d'infiltration, les pentes des rues, la localisation des avaloirs, les coefficients de frottement des rues et du réseau... et d'autre part, les caractéristiques des pluies susceptibles de se produire sur le bassin. Les processus représentés sont généralement une transformation pluie/débit sur les parcelles et les rues, l'infiltration de l'eau dans les zones perméables, le ruissellement depuis la parcelle vers la rue, puis au sein des rues vers les avaloirs et enfin au sein du réseau jusqu'à l'exutoire.

1.4.2. Approches hydrauliques

L'objectif d'une "étude hydraulique" est de déterminer les caractéristiques des écoulements à tout instant et en tout point d'un domaine étudié en fonction des apports d'eau. En milieu urbain, les objectifs des études dépendent fortement des événements à représenter.

Pour des événements de pluie faible ou moyenne, l'objectif est généralement de simuler les écoulements de l'eau au sein du réseau d'assainissement afin d'y calculer les débits, vitesses et hauteurs d'eau et dans le cas échéant de déterminer le lieu et l'ampleur du débordement. A l'opposé, en cas de fortes pluies ou des inondations apparaissent et où une partie de l'eau s'écoule dans les rues, les études hydrauliques cherchent à caractériser le risque associé à ce ruissellement de surface, et ne peuvent se limiter à considérer un écoulement exclusivement souterrain.

1.4.2.1. Modèles conceptuels ou partiellement conceptuels

Les modèles conceptuels d'inondation urbaine disponibles dans la littérature sont des modèles utilisant certaines équations de la mécanique des fluides plus ou moins simplifiées mais soit en représentant le domaine d'étude de façon simplifiée et en ne respectant pas les relèvements géométriques du terrain, soit en simplifiant une partie des processus ayant lieu lors de l'événement.

Deux types de modèles ont ainsi été identifiés :

- Les modèles qui considèrent la ville comme un réseau de réservoirs (représentant les carrefours principaux) reliés par des canaux rectilignes (représentant les grands axes de circulation : boulevards, avenues).

1.4.2.2. Modèles mécanistes:

Les modèles mécanistes se basent sur un maillage représentatif du terrain afin de décrire le domaine d'étude. Chaque nœud du maillage est renseigné suivant les trois (03) coordonnées du repère utilisé, généralement orthogonal : x , y , z . Ces modèles utilisent alors les équations classiques de la mécanique des fluides pour déterminer l'évolution des caractéristiques des écoulements à partir de ses conditions initiales (état de l'écoulement au début de l'événement), des conditions limites amont (apports d'eau) et des conditions limites aval (état de l'écoulement à l'aval de la zone considérée).

1.5. Inondation :

Introduction:

Les phénomènes et les catastrophes naturelles sont divers et se produisent dans de nombreuses parties du monde et pouvant engendrer des conséquences catastrophiques en termes de perte de vies humaines et économiques.

1.5.1. Définition des inondations:

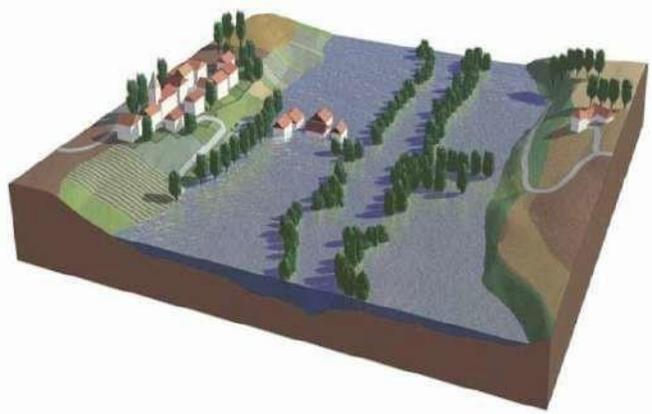
L'inondation est une submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal, quelle qu'en soit l'origine. C'est la catastrophe la plus fréquente, la moitié des catastrophes naturelles mondiales sont des inondations.

1.6. Types d'inondations:

1.6.1. Inondations de plaines:

Les inondations de plaine se produisent à la suite d'événements pluvieux océaniques prolongés mais d'intensité modérée, tombant sur des bassins versants moyens à grands (supérieur à 500 km²) où le ruissellement est long à déclencher.

Le cours d'eau sort lentement de son lit mineur pour occuper le lit majeur et inonder la plaine. Ce type d'inondation peut durer plusieurs semaines.



Figures N°4 :Images d'inondations de plaines

1.6.2. Remontées de nappe phréatique:

Ce phénomène se manifeste à la suite de l'affleurement sur surface d'une nappe phréatique et/ou par l'intrusion dans les différents réseaux d'assainissement. Phénomène qui est difficile à prévoir,

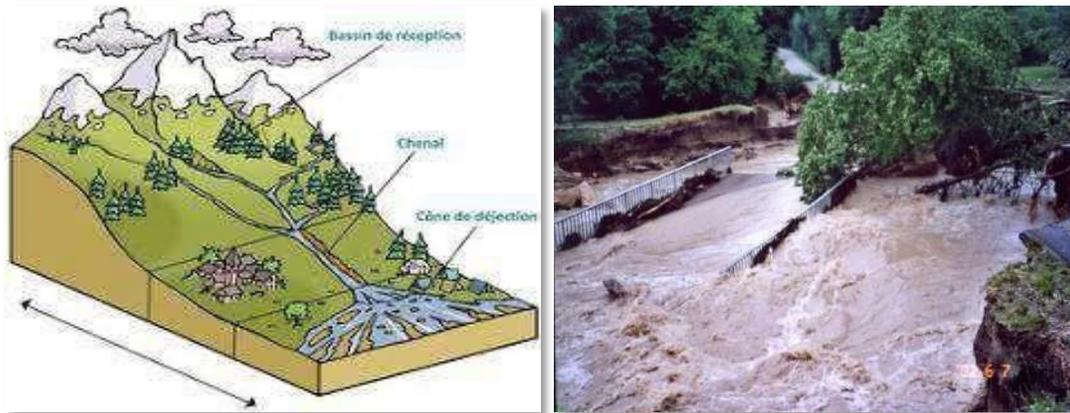
Peut provoquer des remontées sous bâtisses, l'engorgement des ouvrages souterrains, la déstabilisation tassements de remblai, des glissements de terrain... etc.



Figures N°5 :Remontées de nappe phréatique à Ouargla.

1.6.3. Crues torrentielles

Les crues torrentielles sont des phénomènes soudains et violents causés par des pluies intenses et tombantes sur des bassins versants à forte pente. Ce type d'inondation est caractérisé par une montée rapide des eaux donc des débits et des vitesses importants, une durée de submersion courte, et le potentiel de causer des dommages majeurs dus à la violence du courant couplée avec les éléments solides transportés par les eaux.



Figures N°6 :Images présentant les crues torrentielles

1.6.4. Rupture de barrage

La rupture de barrage correspond à une destruction partielle ou totale de l'ouvrage, elle entraîne la formation d'une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau à l'aval, voire un gigantesque torrent. L'eau envahit rapidement le val protégé, détruisant les constructions et creusant le sol derrière la brèche (Conditions d'écoulement à l'aval d'un barrage en cas de rupture de la digue-Application aux cas Algériens).



Figures N°7 :Inondation induite par une rupture de barrage

1.6.5. Ruissellement pluvial

Le ruissellement urbain se manifeste lorsque le réseau d'évacuation pluvial est saturé et que l'eau reflue dans les rues. Le courant emporte des véhicules et divers objets qui forment des embâcles.

Les points bas sont submergés, l'eau boueuse envahit le rez-de-chaussée des bâtiments où elle provoque des dégâts et parfois des victimes.



Figures N°8 :Ruissellement pluvial dans une zone urbaine

1.6.6. Submersion marines

Une submersion marine est une inondation temporaire et éventuellement épisodique de zone côtière, générée par la marines, avec de l'eau salée ou saumâtre, lors d'évènements météorologiques(tempête, cyclone, forte dépression)Ou océanographiques (houle, marée, tsunami) d'ampleur très inhabituelle.



Figures N°9 :Des images impressionnantes de submersions marines

1.7. Mesures de protection

L'espace réservé au cours peut être agrandi, dans un objectif d'augmentation de la capacité hydraulique, bien sûr en tenant en compte les autres utilisations du sol.

Parmi les solutions alternatives à un élargissement, le rehaussement des murs de rives ou l'approfondissement du lit du cours d'eau ne permettent souvent pas d'augmenter suffisamment la capacité hydraulique. Cela ne peut se faire que dans une proportion limitée, principalement pour des questions d'intégration paysagère.

Les solutions de rétention des eaux ou de dérivation à l'amont de l'agglomération. Ces interventions ont l'inconvénient d'être très chères.

CHAPITRE II :

**PRESENTATION DE
LA REGION D'ETUDE**

Classiquement, dans toute étude hydrologique, une description du milieu est incontournable. En fonction du but recherché, l'étude est de plus en plus affinée de façon à faire ressortir les différents éléments explicatifs de la thématique traitée. Il faut donc, dès l'abord, développer quelques considérations générales sur la région de Ghardaïa, de manière à mieux faire comprendre sa situation et ses caractéristiques hydro climatologiques et géomorphologiques qui peuvent avoir une influence directe ou indirecte sur la modalité de l'écoulement. La combinaison des paramètres climatiques (pluviométrie, température, vent, etc...) et le contexte géologique (lithologie et tectonique) et orographiques (relief) du bassin versant permettent d'apprécier le caractère torrentiel des cours d'eau lorsqu'ils débouchent dans la basse des vallées étudiés.

2.1 Présentation de la wilaya

2.1.1. La situation géographique de la wilaya

GHARDAIA, l'une des oasis en Algérie, située dans le nord du Sahara, à 600 km au sud d'Alger. Se situe entre $32^{\circ} 30'$ et $33^{\circ} 2'$ de latitude nord et $2^{\circ} 3'$ à $3^{\circ} 45'$ de longitude.

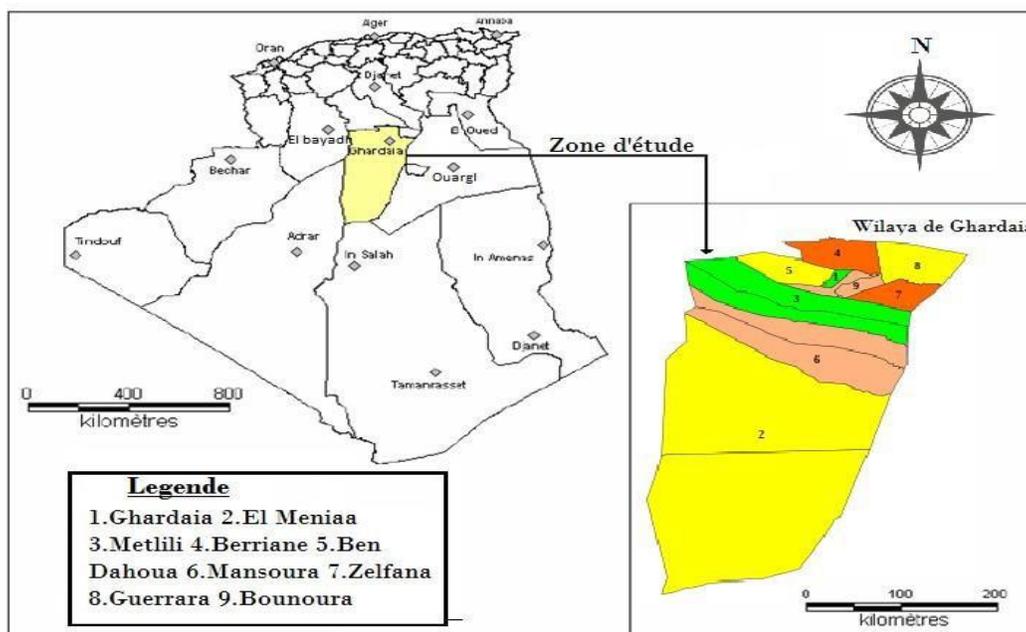


Fig. N° 10 Schéma de localisation de la wilaya de Ghardaïa (Association BG-ENHPC

Juin-2000)

2.1.2 Les régions naturelles de la wilaya

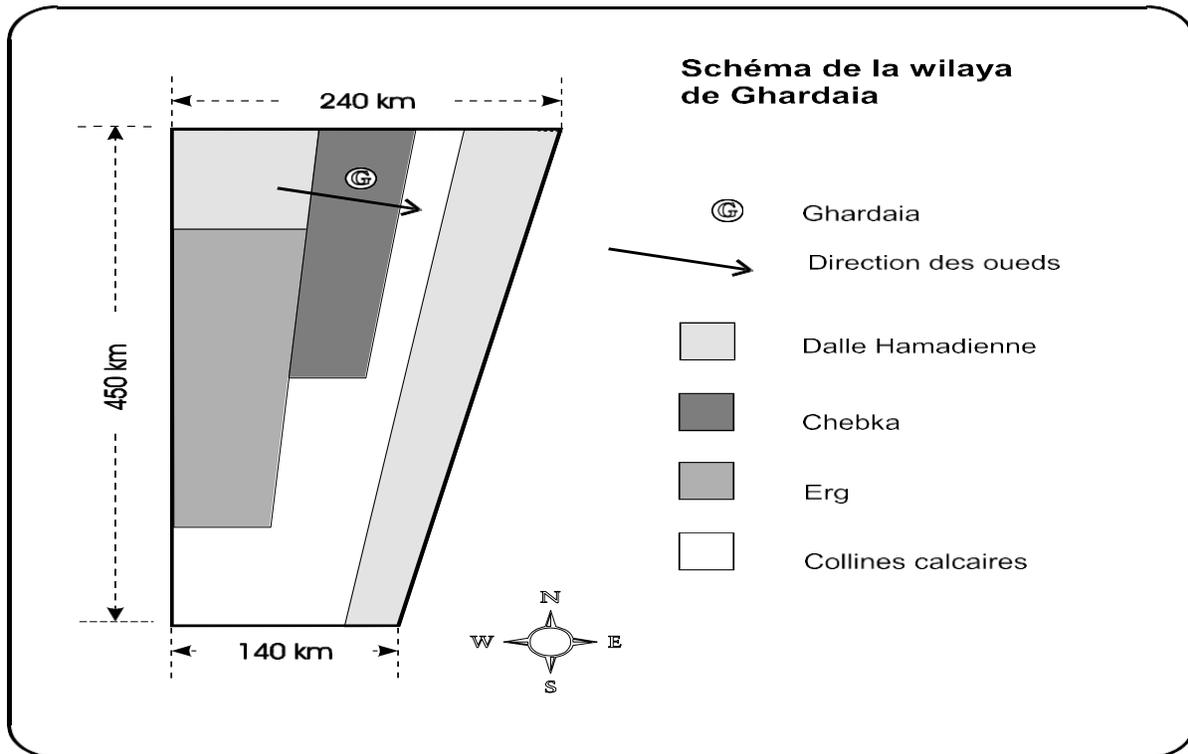


Fig. N° 11 Schéma structural de la wilaya (Association BG-ENHPC Juin-2000)

Comme le montre la figure ci-dessus, on peut représenter schématiquement la wilaya par un trapèze avec

- à l'Ouest, un côté de direction Nord - Sud de 450 km.
- au Nord, un côté de direction Est - Ouest de 240 km.
- au Sud, un côté de direction Est - Ouest de 140 km.
- Les régions naturelles, représentées sur le schéma, sont :
- les plaines de la dalle amadienne, cuirasse calcaire avec, en surface un cailloutis anguleux.
- les régions ensablées, partie du grand Erg occidental avec des cordons dunaires particulièrement denses et élevés, cette zone Est consacrée exclusivement au pastoralisme saharien.
- la chebka, dorsale centrale à dominance calcaire en corniches continues de direction Nord - Sud. (Association BG-ENHPC Juin-2000)

2.1.3 Situation régionale de la ville de Metlili

Metlili ou Metlili Châamba est une commune de la wilaya de Ghardaïa en Algérie située à 40 km au sud de Ghardaïa.

Metlili, est située dans le centre de la wilaya de Ghardaïa, à 42 km au sud-ouest de Ghardaïa. La superficie de la commune est de 7 300 km². Sa palmeraie s'allonge sur 12 km².

En 1984, la commune de Metlili est constituée à partir des localités suivantes⁴ :

- Centre de Metlili
- Noumerat
- Guemgouma
- El Hadika
- Souani
- Chabet Sidi Cheikh
- Souareg
- Chouiket est

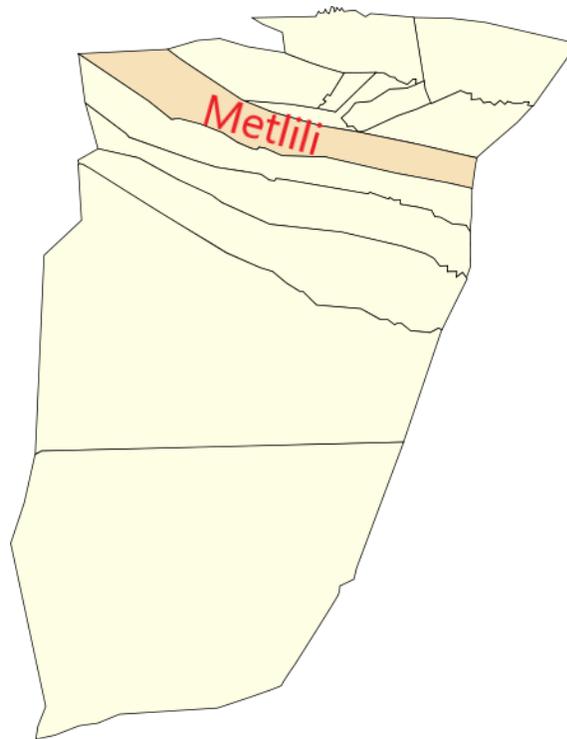


Fig.N°12 :Localisation de la commune dans la wilaya de Ghardaïa.

2.1.3.1 Superficie

Tab N° 2 quelque commune avec la surface (Younes METTAS 2010)

Communes	Superficies (Km ²)
Ghardaïa	300
El-Menia	27.000
Daya	2.175
Berriane	2.250
Metlili	7.300
Guerrara	2.900
El-Atteuf	750
Zelfana	2.220
Bounoura	810
Total	86.560

2.1.3.2 Réseau de transport

Les routes :

Le réseau routier de la ville est très dense et se compose de :

- Route nationale n° 01 : 440 km
- Chemins de Wilaya : 16 km
- Réseau communal : 137.5 km.

La RN 1 principal axe routier (longeant l'étendue de la Wilaya) joue un rôle important de liaison entre le Nord et le Sud du pays. (Younes METTAS 2010)

2.1.4. Les données socio-économiques

La wilaya de Ghardaïa a été créée en 1984 lors du redécoupage administratif ; avant cette date, l'ensemble de son territoire dépendait de la wilaya de Laghouat. A cette occasion, huit nouvelles communes ont été créées.

Il a donc fallu estimer les populations de l'actuelle wilaya en 1966 sur la base des données par districts. Les conclusions générales pour la période 1966-1977 sont les suivantes :

- Rythme de croissance de la population de la wilaya supérieur à celui de l'Algérie.
- Population fortement agglomérée (97 %).
- Déséquilibre dans la répartition spatiale : 3 communes concentrent le 80 % de la population.

Ces remarques restent d'actualité pour 1977 - 1987.

Tab N°3 Evolution de la population de la ville de Metlili (Younes METTAS 2010)

Les années	La population
1977	14474
1998	33759
2008	40576

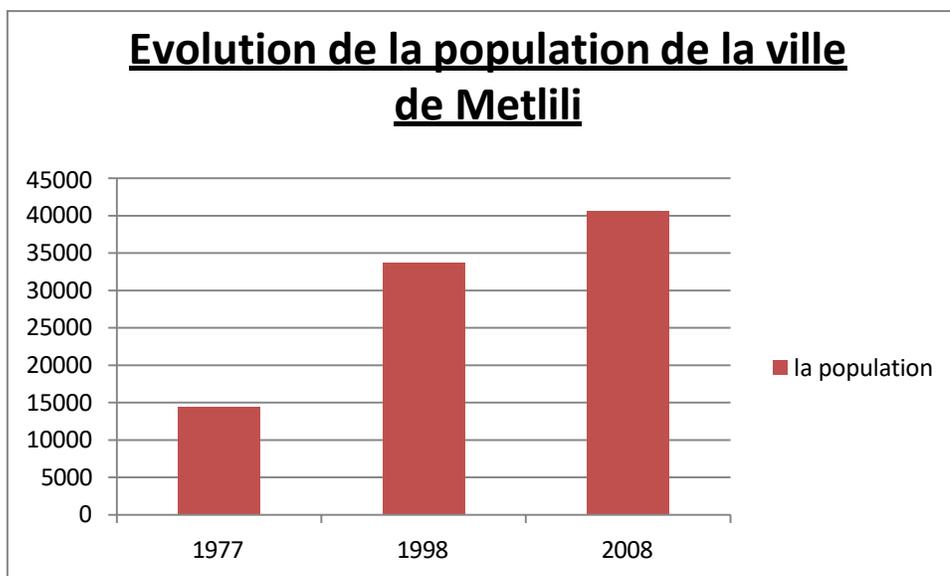


Fig. N° 13 Evolution de la population de la Wilaya de Ghardaïa (Younes METTAS 2010)

Tab N° 4 Projection démographique

Années	1987	1989	1994	1999	2004
Population	215 950	232 170	278 571	331 141	389 357

Tab N° 5 Projection démographique selon "Annuaire statistique" 1994

Année	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Pop.	270 318	279 508	289 012	298 838	309 000	319 55	330 368	341 600	353 215
Année	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Pop.	365 225	377 640	390 480	403 760	417 485	431 680	446 360	461 530	477 250

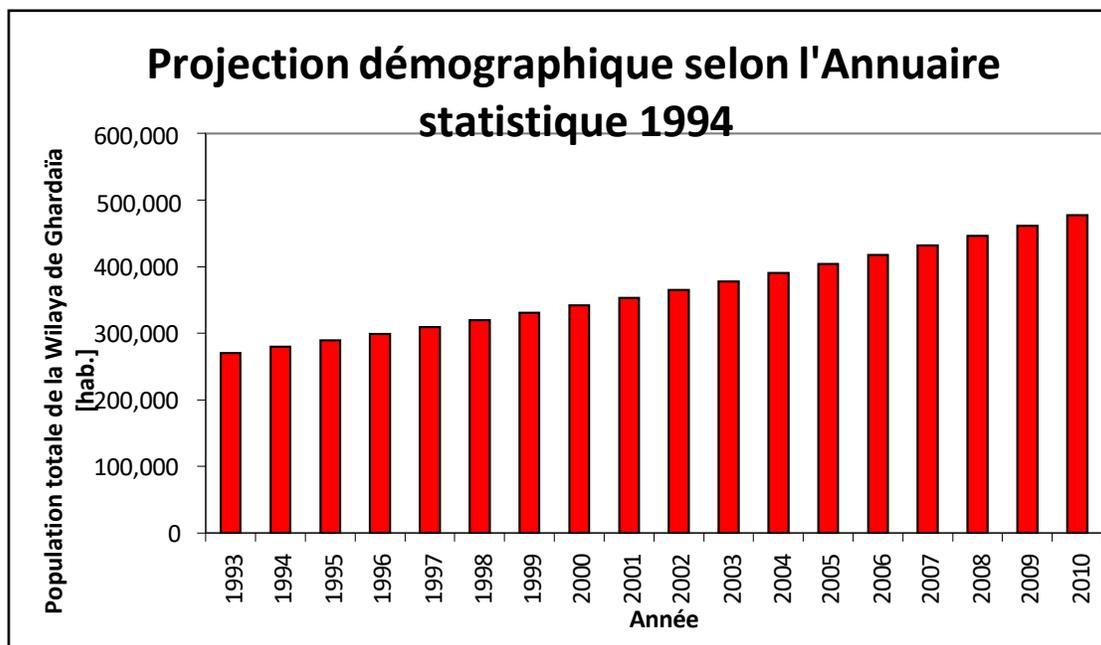


Fig. N° 14 Projection démographique selon l'Annuaire statistique 1994

2.1.5. Relief

La superstructure du sol est essentiellement formé de couches assez plates de formations calcaires turonienne généralement légèrement surélevées en dorsales d'orientation Nord –Sud affectant une forme générale en pupitre d'inclinaison très douce du Nord –Ouest vers l'Est et plus abrupte vers l'Ouest, cette dorsale sépare le Sahara oriental au Sahara occidental.

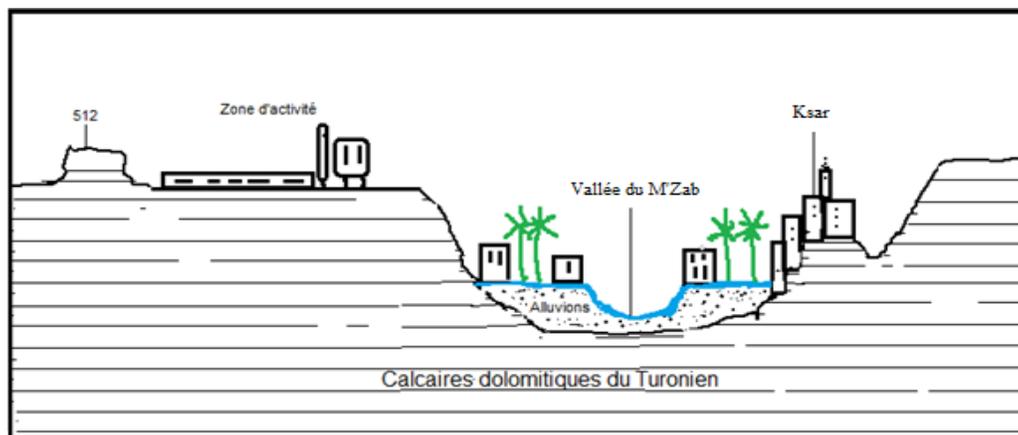


Fig. N° 15 coupe schématique représente les différentes hypsométries (OULEDBELKHEIR Cheikh 2014)

2.1.6 Aspect climatologique

2.1.6.1.1 Présentation de la station climatique

Metlili a un climat désertique chaud, avec des étés très chauds et des hivers doux, et très peu de précipitation.

Tab N° 6 Données climatiques à Metlili (ONM-Ghardaïa)

Mois	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	jui.	août	sep.	oct.	nov.	déc.	année
Température minimale moyenne (C)	4	5,7	8,8	12,4	16,9	22	25	24,5	21,1	14,4	8,5	4,6	14
Température moyenne (°C)	10,1	12,3	15,7	20,2	24,9	30,2	33,8	33	28,2	21,2	14,6	10,7	21,2
Température maximale moyenne (°C)	16,3	19	22,6	28,1	32,9	38,5	42,6	41,6	35,3	28	20,8	16,9	28,6
Précipitations (mm)	7	4	10	6	4	2	1	2	5	6	7	7	61

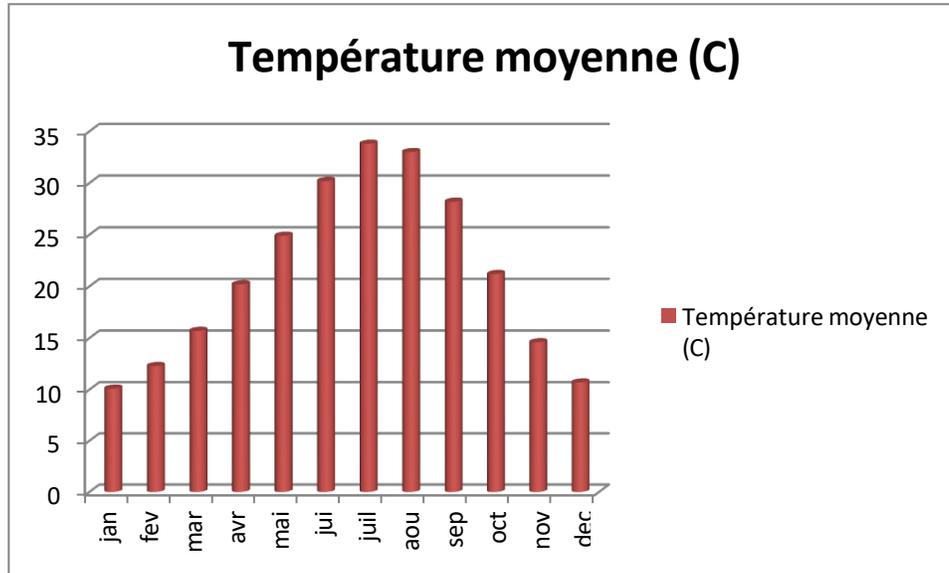


Fig. N° 16 La répartition de la moyenne des températures

2.1.6.1.2 Vents

Il n'y a pas de désert sans vents. Le vent est le facteur principal de la topographie désertique. Pendant certaines périodes de l'année, en général en Mars et Avril, on assiste au Sahara à de véritables tempêtes de sable.

La figure 11 présente la rose de vent observé entre 2004-2014.

Les vents d'hiver sont froids, secs et humides de direction préférentielle NW et WNW, les vents d'été sont secs et chauds de direction préférentielle NE, les siroccos soufflent en moyenne 11 jours par an pendant la période qui va du mois de mai au mois septembre. Avec un pourcentage de vents calmes de 25,25 %

Tab N° 7 Fréquences des vents selon leur direction (Association BG-ENHPC Juin-2000)

Mois	Temps	Fréquences en % des vents en direction du :							
	calme %	Sud - Est %	SUD %	Sud - Ouest %	OUEST %	Nord - Ouest %	NORD %	Nord - Est %	EST %
Janvier	34				15	17	18		
Février	29				14	18	17		
Mars	21				11	15	25		
Avril	17				10	10	25	15	
Mai	15					10	22	14	
Juin	20		11				18	20	12
Juillet	23		15				11	17	14
Août	23		15				12	17	11
Septembre	24						17	20	13
Octobre	30						22	15	
Novembre	34				12	14	17		
Décembre	33				17	18	14		

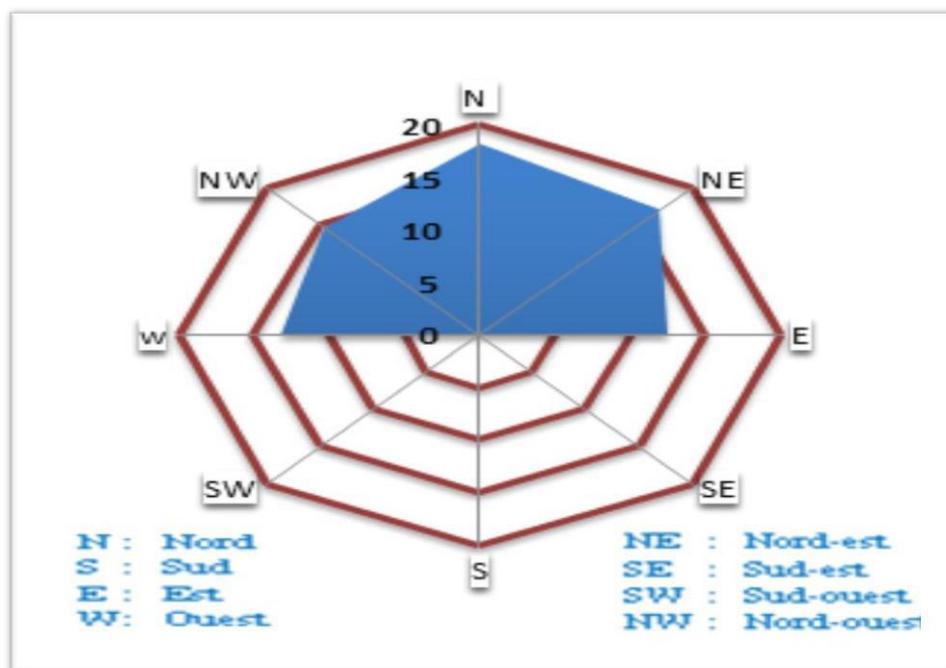


Fig. N° 17 Direction des vents dominants (Rose des vents)

Nous résumons dans le tableau 05 suivant les vitesses des vents observés entre 1988-2007 de la station de Noumérat :

Tab N° 8 Moyenne mensuelles des vitesses maximal du vent (BENADDA Lotfi-Ghardaïa 2012)

Mois	Janv.	Févr.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Vent Max en (km/h)	28,76	31,34	24,36	22,96	25,05	21,03	17,05	16,71	16,98	20,33	20,24	21,11

2.1.6.1.3 Humidité relative

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

Humidité : pour une journée moyenne d'un mois donné.

Tab N° 9 Humidité relative moyen (1990-2009) (Association BG-ENHPC Juin-2000)

Mois	Humidité en %	
	minimum	maximum
Janvier	40	70
Février	36	66
Mars	28	48
Avril	26	52
Mai	23	50
Juin	20	40
Juillet	16	35
Août	19	40
septembre	26	52
Octobre	33	60
Novembre	38	70
Décembre	38	70

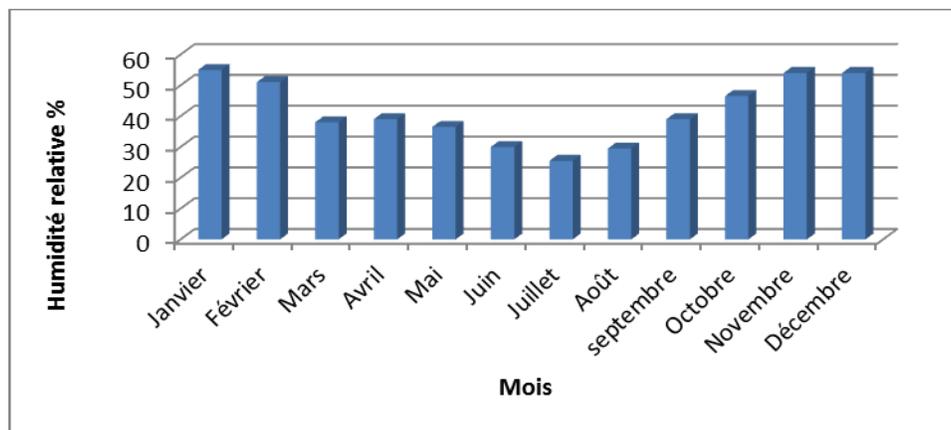


Fig. N° 18 humidité relative moyen en %

2.1.6.1.4 Evaporation

L'évaporation est mesurée journalièrement sur le bac type COLORADO de la station de Ghardaïa (1988,2005). (M.BENADDA Lotfi - Ghardaïa 2012)

Cette évaporation journalière est définie par la relation :

$$E = P \pm H$$

E : Evaporation journalière du bac en mm,

P : Précipitation en mm,

H : Hauteur d'eau ajoutée ou enlevée dans le bac (mm).

Pour notre zone d'étude, les valeurs observées de l'évaporation du plan d'eau libre sont résumées dans le tableau suivant :

Tab N° 11 Evaporation moyenne mensuelle (mm) (M.BENADDA Lotfi - Ghardaïa 2012)

Mois	Janv.	Févr.	Mars.	Avril	Mai.	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Evaporation (mm)	81,8	110,6	181,3	246,8	329,7	378,4	439,9	382	286,4	179,3	108	77,8

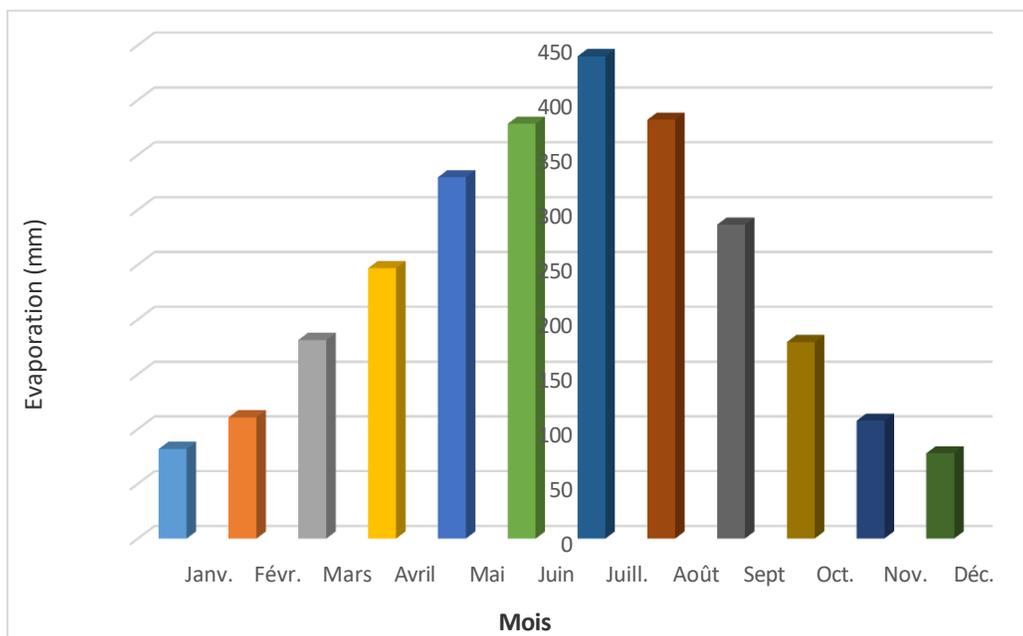


Fig. N° 19 Evaporation moyenne mensuelle (mm)

2.2. Présentation des sites d'intervention

2.2.1. Bassin versant de l'oued Metlili

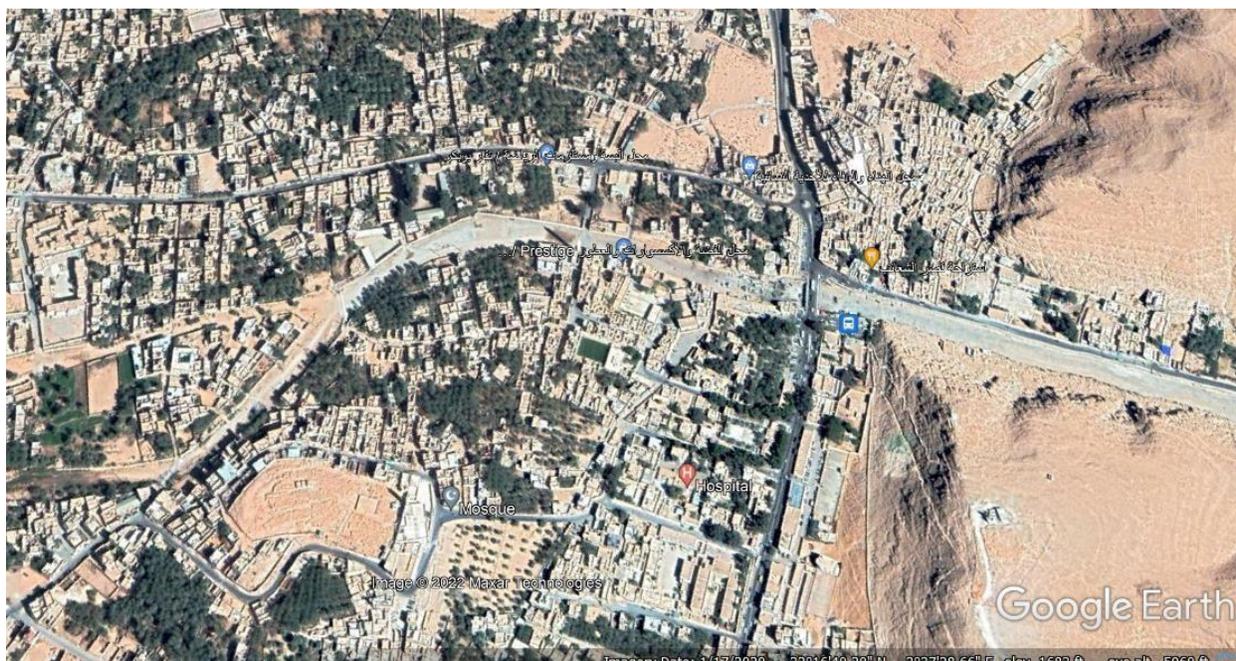


Fig. N° 20 Situation d'ensemble (Oued Metlili)-(Google Earth)

Le bassin versant du Metlili couvre une superficie supérieure à 400km². L'oued a pour origine la confluence de deux principaux oueds ; Labioudh et Zakour a méridien 03° 25' Est et le parallèle 32° 23' Nord à une altitude de 650 m, il parcourt environ 270 km de l'Ouest vers l'Est pour atteindre la dépression de sabkhet safioune à une altitude de 180 m.

Comme tous les oueds de la dorsale l'écoulement est sporadique, se manifestant à la suite des grandes averses orageuses. Pour une fréquence cinquentennale le débit peut atteindre 400 m³/s.

Les berges sont bien marquées; de pentes abruptes à semi abruptes, entaillées dans les calcaires du Turonien.

Plusieurs affluents rejoignent l'oued dont les principaux ; de l'amont vers l'aval :

- au méridien 03° 31' Est et le parallèle 32° 19' Nord à une altitude de 565 m, l'oued est joint par deux affluents chaabat ez zebat sur la rive droite et chaab el

beida sur la rive gauche. Chaabet ladjaja conflue avec l'oued sur la rive droite au niveau d'El Hadika.

- plus vers l'Est l'oued reçoit deux grands affluents ; chaabet el hadika sur la rive droite, et de souani sur la rive gauche.

- il reçoit l'affluent de chaabet smail sur la rive gauche.

- plus en aval l'oued conflue avec deux affluents sur la rive droite, chaabat timoukert et chaabat sid cheikh.(HIMEX-Metlili).

2.3. Détermination des principaux affluents du bassin versant d'Oued Metlili

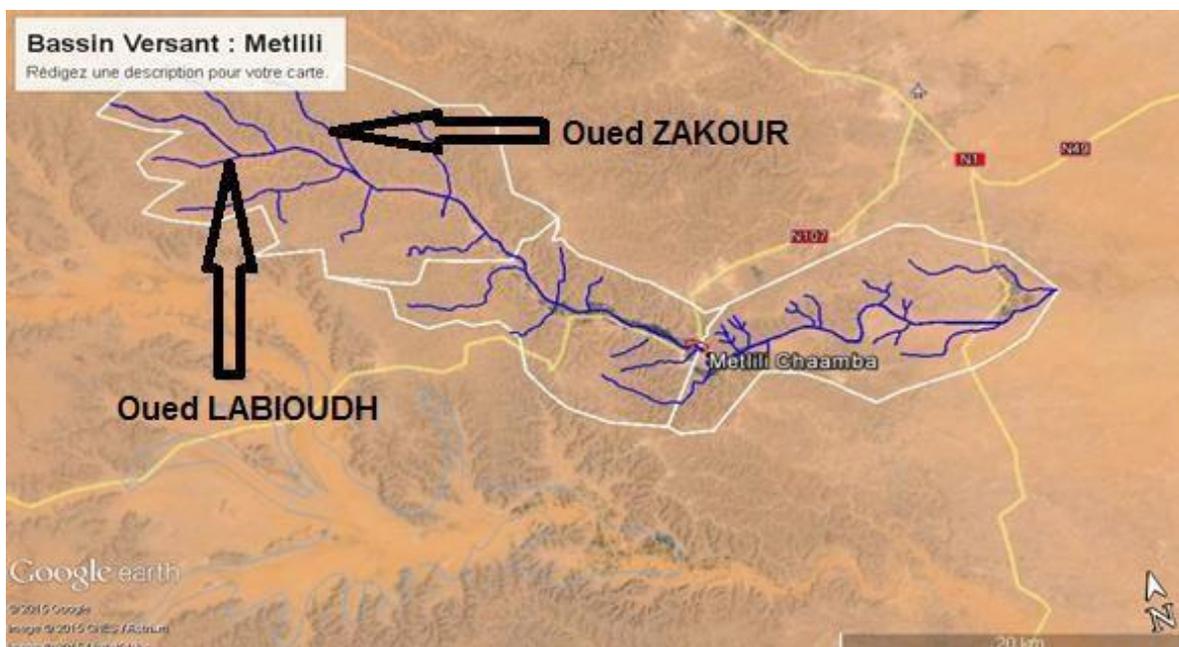


Fig. N° 23 la délimitation des principaux affluents du BV du Metlili (Google Earth)

L'oued a pour origine la confluence de deux principaux oueds ; LABILOUDH et ZAKOUR.

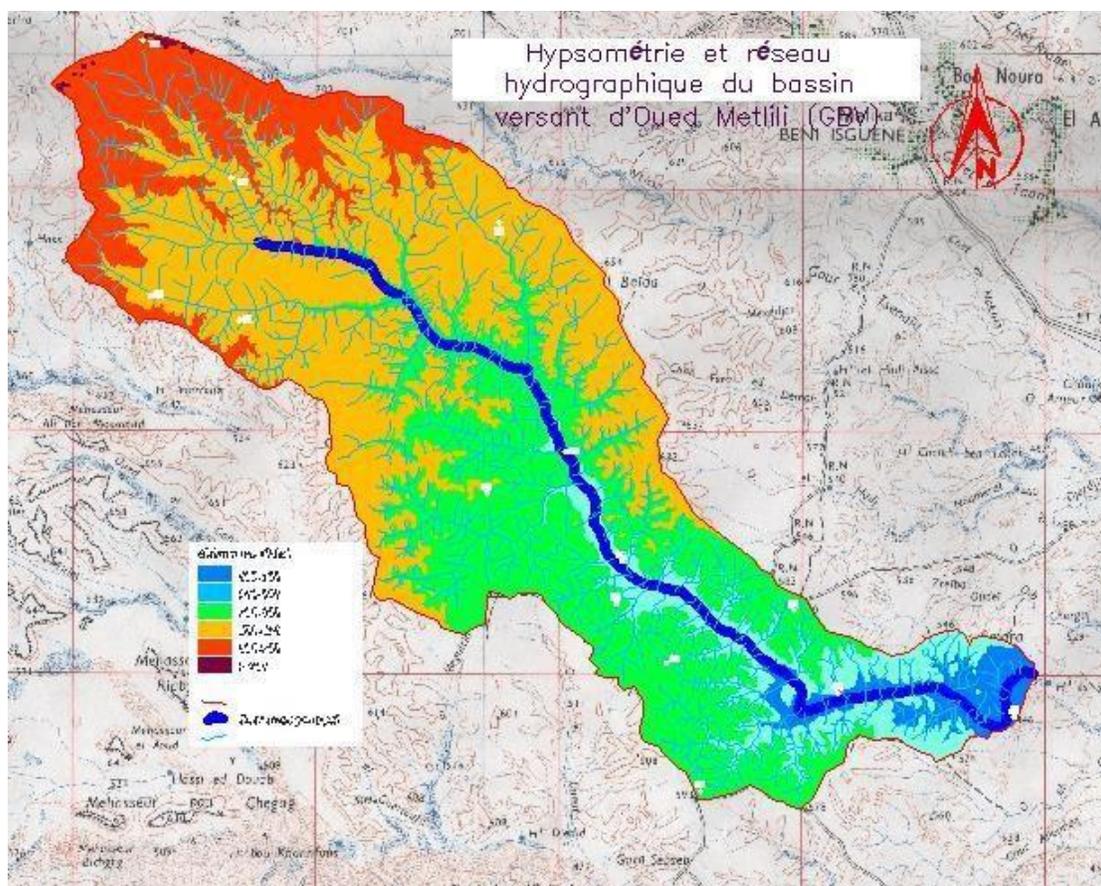


fig N°22 Hydrographie du bassin versant d'oued Metlili

2.4. Caractéristiques géométriques des bassins

Tab N° 12 caractéristiques géomorphométriques d'Oued Metlili

Désignation BV	Metlili		
	Geumgouma	Centre-ville	Périmètre Metlili
Superficie km ²	213	326	473
Périmètre km	74.3	133.9	190
Longueur principal km	26.2	38.9	63.9
Indice de capacité kC	1.43	2.08	2.45
Largeur équivalente km	8.1	8.4	7.4

2.4.1. Caractéristiques hydrographiques

2.4.1.1. La courbe hypsométrique

Elle fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin en fonction de l'altitude. Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage (Jean-Paul L , 2000).

Les données morphologiques du bassin versant de l'oued Metlili et de ceux de ses principaux affluents ont permis la réalisation de La courbe hypsométrique suivante :

Tab N° 13 Caractéristiques Hypsométriques du bassin d'Oued Metlili

Altitude (CN)	Altitude moy (m)	Surface cumulé (km ²)	Surface %
600-650	675	14	3
650-600	625	178	38
600-550	575	334	71
550-500	525	361	77
500-450	475	432	92
450-400	425	470	100

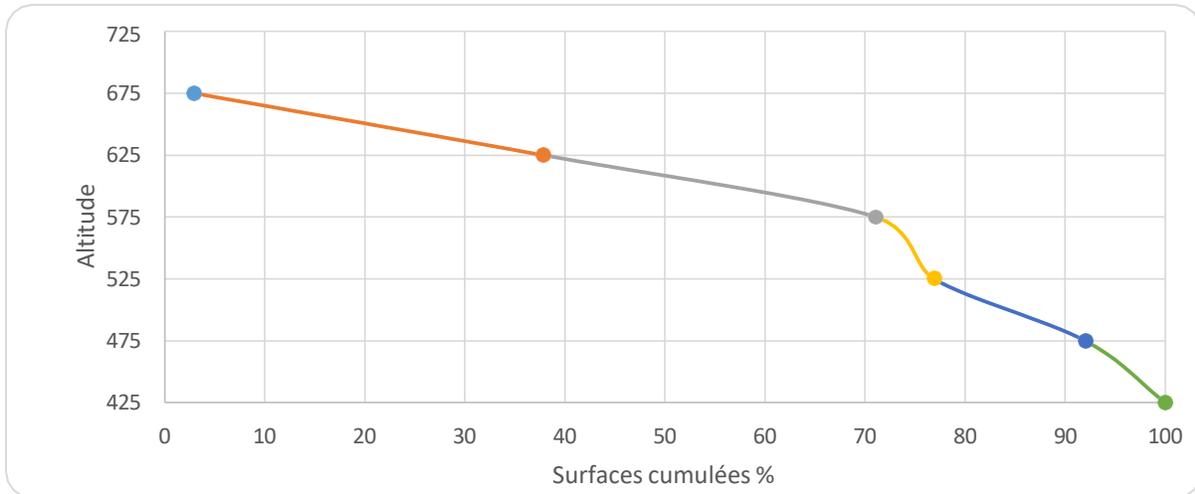


Fig. N° 23 La courbe hypsométrique d'Oued Metlili

2.4.1.2. Les caractéristiques du relief

Les principales caractéristiques des reliefs d'Oued Metlili selon les différents exutoires sont présentées sur le tableau suivant :

Tab N° 14 caractéristiques des reliefs d'Oued Metlili

Désignation Bv	Metlili		
	Geumgouma	Centre-ville	Périmètre Metlili
Dénivelée Spécifique Ds (m)	120	173	250
Indice de pente global Ig (m/km)	1.8	2.2	1.3
Indice de pente moyenne Im (%)	0.015	0.025	0.017
Temps de concentration (Heure)	14	16	20
Vitesse de ruissellement (m/s)	1.9	2.4	3.2

2.5. Détermination de régime pluviométrique:

Pour l'étude statistique des précipitations en hydrologie, on dispose d'une série pluviométrique qui comporte les précipitations maximales journalières pour la période la plus longue possible.

Nous prenons comme base de calcul la série pluviométrique de la station expérimentale de Ghardaïa. La série a une période de fonctionnement de 1920 à

2012 qui a été fournie par l'Office Nationale de la Météorologie (ONM). L'analyse statistique des données pluviométriques consiste à déterminer les caractéristiques empiriques d'un échantillon d'une série d'observations de précipitations maximales journalières.

2.5.1. Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa

Tab N° 15 Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa (Metlili) (BG ROUCHE)

Nom	Ghardaïa
Organisme (source)	Office Nationale de la Météorologie (ONM)
Latitude	32°24 N
Longitude	03°48 E
Altitude (m)	468
Période d'observation	1978/2012
Nombre d'années observées	90
Observation	Station en fonctionnement

2.5.2. Analyse de la précipitation

Selon Dubief (1953), les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme des pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes.

Cette insuffisance de pluies sahariennes est accompagnée d'une irrégularité très marquée du régime pluviométrique et d'une variabilité interannuelle considérable, ce qui accentue la sécheresse. C'est le cas de Ghardaïa.

Le tableau N° 18 résume les caractéristiques des précipitations journalières maximales (sur la série de 1920 – 2012) :

Tab N° 16 Caractéristiques statistiques des échantillons

Caractéristiques	Station de Ghardaïa
Taille d'échantillon	90
P Max (mm)	126
P Min (mm)	1.8
P Médiane (mm)	17
P Moyenne (mm)	20.34
Ecart type (mm)	16.26
Coefficient de variation	0.83
Asymétrie	3.5
Aplatissement	22.31

2.5.2.1. Analyse des données statistiques

2.5.2.1.1. Choix de la loi d'ajustement

Nous voyons que les régimes pluviométriques sont très irréguliers, les deux lois généralement utilisées sont :

- La loi de GUMBEL
- La loi de GALTON

La série est homogène et indépendante.

Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Gumbel

Toutes les caractéristiques empiriques de notre série à la loi de Gumbel est données par le tableau dans la page suivante :

I.C. à (en%) = 95

$U_{\text{Gauss}} = 1,960$

Tab N°17 Les caractéristiques empiriques de la loi de Gumbel

caractéristique de l'échantillon	série	
	x	u
Moyenne	20.50	0,53
Ecart type	13.90	1.08
Coefficient de variation	0.61	1.92
Coefficient de corrélation	0.98	
Pente de droite de Gumbel	10.84	
Ordonnée à l'origine	14.25	
Droite de régression	$P_{\text{max}, j}, P\% = X = 10.84 u_j + 14.25$	
P max, 10%	38.64	

Ajustement de la série pluviométrique à la loi de Galton (Log Normal) :

Toutes les caractéristiques empiriques de notre série à la loi Galton (log normale) est données par le tableau suivant :

Avec, $u(p\%)=1.28$

Tab N°18 Les caractéristiques empiriques de la loi de Galton

La moyenne de la série	$\text{Log } x_i=1.30\text{mm}$
La variance	$\sigma \log x_i= 0.32\text{mm}$
L'équation de la droite de Galton	$P_j \max (p\%)= 10^{1.30+0.32(u(p\%)})$
Pluie journalière maximale fréquentielle	$P_{\max, j} (10\%)=37.54\text{mm}$

A partir du graphe, nous tirons la précipitation maximale journalière pour une fréquence au non-dépassement de 90%. Le tracé de la droite est représenté sur le graphe dans la page suivante :

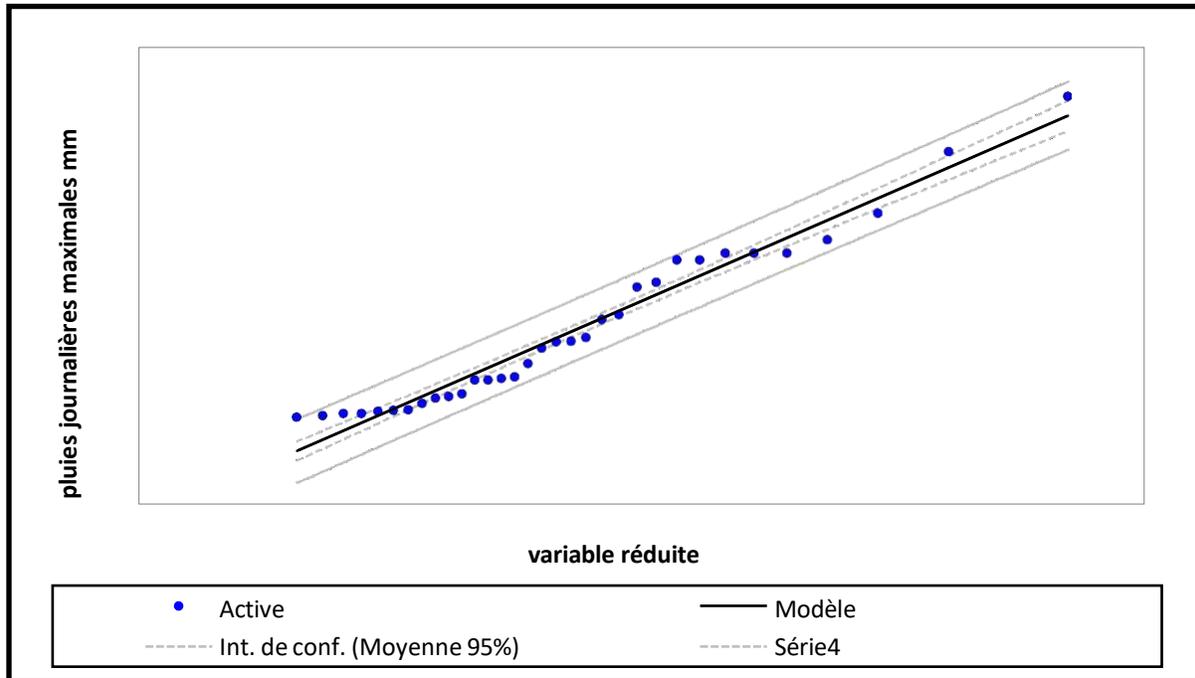


Fig. N° 24 Ajustement graphique d'une loi de Gumbel. (xlstat)

Le graphe ci-dessous représente l'ajustement de la droite de Galton :

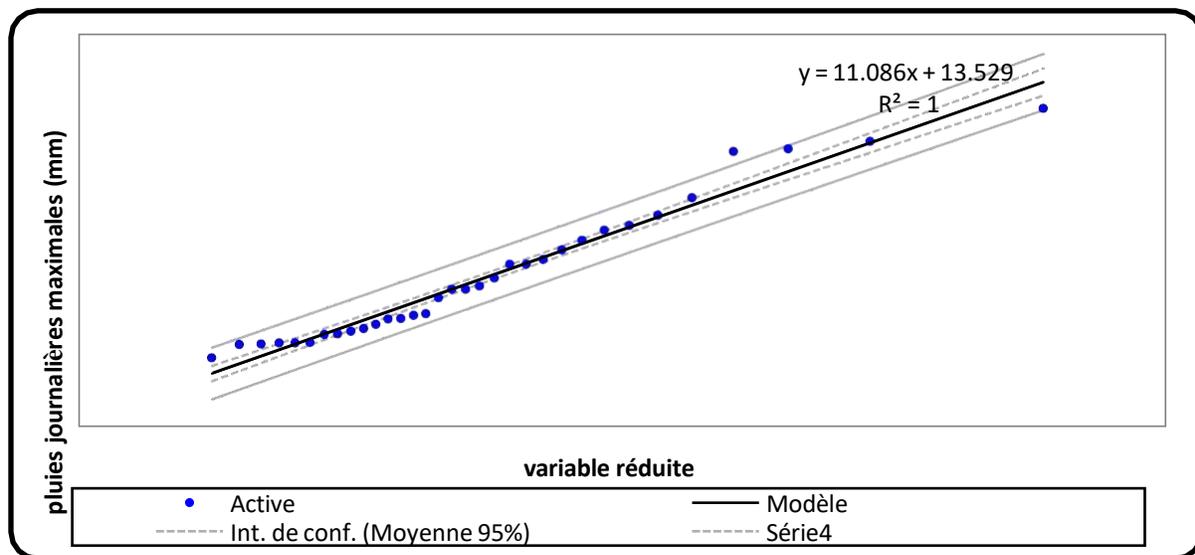


Fig. N° 25 Ajustement graphique d'une loi de Galton. (xlstat)

2.5.3. Le régime pluviométrique

2.5.3.1. Calcul des précipitations en fonctions de fréquences

Les résultats sont représenté dans le tableau suivant :

Tab N° 19 Pluies journalières maximales fréquentielles

Fréquences	P (%)	Période de retour (an)	Valeur retenue en mm/j
F = 1 - P			
0.75	0.25	2	18
0.8	0.2	5	30
0.9	0.1	10	38
0.95	0.05	20	49
0.98	0.02	50	65
0.99	0.01	100	78
0.998	0.002	500	96
0.999	0.001	1000	131
0.9999	0.0001	10000	201

2.5.3.2. Intensité maximale:

Selon la relation de l'ANRH, la pluie de durée t(h) et de fréquence donnée (f) et s'écrit :

$$P_t = P_{jf} \left(\frac{t}{24} \right)^b \quad (1)$$

- P_{jf} : pluie journalière maximale annuelle de fréquence f (en mm),
- P_t : pluie maximale annuelle de durée (t) et de fréquence (f) (en mm),
- t : durée de pluie (en heure),
- b : exposant climatique de la station pluviométrique : b = 0,45, (Roche, 1996 ; Jean-PaulL2000).

Les intensités moyennes annuelles de durée t (h) et de période de retour T (an) sont calculées par la relation suivante (Sari, 2002) :

$$I = \frac{Pt}{t} \quad (2)$$

Les intensités moyennes annuelles de durée t (h) et de période de retour T (an) sont calculées par la relation suivante (Sari, 2002) :

$$I_{\max} = \frac{H_{\max}}{t} \quad (3)$$

max : est l'intensité maximale de la pluie (mm/h).

- H_{\max} : lame d'eau (mm)

Les calculs ont donné les résultats présentés ci-après pour les périodes de retour (2 ans, 5ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans,1000 ans) et pour des durées d'averse de 15 min jusqu'à 1 jour)

Tab N° 20 Intensités maximales en mm/h de durée t (h) et de période de retour T (an)

Durée de l'averse (h)	Période de retour (an)						
	2	5	10	20	50	100	1000
0,25	9,23	15,39	19,49	25,13	33,34	40,01	67,19
0,5	6,31	10,51	13,31	17,17	22,77	27,33	45,89
0,78	4,85	8,09	10,24	13,21	17,52	21,02	35,31
1	4,31	7,18	9,09	11,72	15,55	18,66	31,35
2	2,94	4,9	6,21	8,01	10,62	12,75	21,41
4	2,01	3,35	4,24	5,47	7,26	8,71	14,62
6	1,61	2,68	3,39	4,38	5,81	6,97	11,7
12	1,1	1,83	2,32	2,99	3,97	4,76	7,99
24	0,75	1,25	1,58	2,04	2,71	3,25	5,46

Construction des courbes IDF:

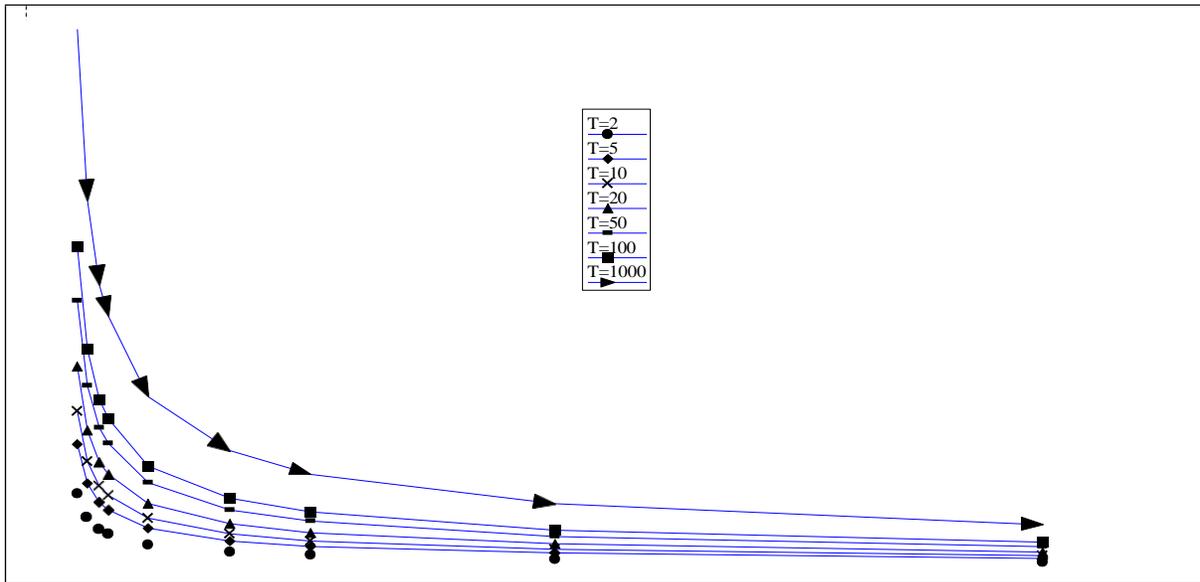


Fig. N° 26 Courbe IDF de la station de Ghardaïa

2.6. Reconstitution des crues sur l'oued de Metlili

Introduction

Les crues sont des écoulements variables dans lesquelles les débits atteignent des valeurs importantes. Mais leur étude en Algérie reste un domaine inconnu pour les régions arides et sahariennes, seules quelques indications très ponctuelles sont données dans les annuaires hydrologiques algériens. Les crues représentent un des traits fondamentaux du régime d'un cours d'eau, malheureusement nous ne possédons pas de séries de crues pour pouvoir tirer des conclusions globales.

La crue dépend essentiellement de l'abondance et de l'intensité de la pluie : son évolution obéit principalement à la puissance et l'intensité de l'averse. Sa vitesse est largement influencée par le couvert végétal, la lithologie,.

De plus les diverses branches du chevelu hydrographique interviennent bien qu'à un degré moindre dans l'évolution ou la perturbation d'une crue. Dans la plus part des cas, ce sont les averses généralisées qui provoquent la plus grande crue.

Les paramètres définissant une crue sont :

- 1- Le débit maximum de la crue (débit de pointe).
- 2- Le volume de la crue.

- 3- Le temps de concentration.
- 4- Le temps de base.
- 5- La forme de la crue (Hydrogramme de crues).

2.6.1. Principaux paramètres intervient dans la reconstitution des crues

2.6.1.1. Temps concentration Tc

C'est le temps qui met une particule d'eau provenant de la partie la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. La formule de Giandootti est généralement utilisée pour l'évaluation de Tc en heure . (M.OULEDBELKHIR Cheikh-Septembre 2002).

$$\frac{L}{V} \quad (5)$$

Ou A , en km^2 : est la superficie du bassin versant

L , en km : est la longueur du thalweg principal.

H_{moy} , en m : est l'altitude moyenne du bassin versant.

H_{min} , en m : est l'altitude minimale du bassin

L'application numérique de cette formule sur Oued Metlili, donne les résultats suivants :

Guemgouma	19
Pont Centre-ville Metlili	23.4
Périmètre Metlili	53

2.6.1.2. Temps de base T_b et temps de montée T_m :

Le temps de base est la durée pendant laquelle la partie ruisselée de l'averse s'écoule à travers l'exutoire. Tandis que, Le temps de montée est la durée entre le début de l'écoulement et le maximum de hauteur de la crue.

Rodier et Auvray (1965, in M Roche 1996) ont établi des abattes donnant le temps de base T_b et le temps de montée T_m crue type d'une averse décennale en fonction de la superficie A pour des bassins représentatives sahéliens et subdésertiques au Sahara. (**M.OULEDBELKHIR Cheikh - Septembre 2002**).

$$T_b = 2.146 A^{0.368} \quad (5)$$

$$T_m = 0.395 A^{0.409} \quad (6)$$

Sur le Nordeste (Brésil), Cadier (1993, M Roche 1996) évalue le T_b et le T_m par les formules suivantes :

$$T_b = 4.602 A^{0.270} \quad (7)$$

$$T_m = 0.25. T_b \quad (8)$$

L'application numérique de ces formules sur l'Oued M'Zab, donne les résultats dans la page suivante :

Tab N°21 Temps de base Tb et temps de montée Tm (Oued Metlili)

Bassin Versant caractéristiques	METLILI		
	Guemgouma	Cv metlili	Périmetre Oued Metlili
A (km2)	213	326	473
Tb (Rodier) H	15.43	18.05	20.7
Tb (Cadierr) H	19.57	21.95	24.27
Tb moyen H	17.5	20	22.49
Tm (Rodier) H	3.54	4.21	4.9
Tm (cadier) H	4.38	5	5.62
Tm moyen H	3.96	4.61	5.26

2.6.1.3. Coefficient de ruissellement

C'est le rapport entre la lame d'eau moyenne coulé sur la surface du bassin et la lame d'eau moyenne apportée par la pluie. Au Sahara, il est extrêmement rare que la hauteur de pluie soit homogène de même que le ruissellement, mais les hydrologues procèdent en général à une estimation globale de ce coefficient par rapport à l'ensemble du bassin

Pour les bassins subdésertiques au sud Sahara, Rodier et Ribstein (1988, in M Roche 1996) ont établi des relations entre le Kr et la superficie A, en tenant compte des indices de relief et de la perméabilité, pour de fortes pluies journalières comprises entre 60 mm et 110 mm:

$$Kr = 110.A^{-0.186} \quad (Kr \text{ en } \%) \quad (10)$$

L'application numérique de ces formules sur l'oued de Metlili, donne les résultats suivants : (M.OULEDBELKHIR Cheikh - Septembre 2002).

Tab N° 22 Coefficient de ruissellement de chaque sous bassin (Oued Metlili)

Bassin Versant	Metlili		
caractéristiques	Guemgouma	Pont Cv metlili	Périmètre Oued Metlili
A (km ²)	213	326	473
Kr en %	40.58	37.49	34.98

2.6.1.4. Evaluation du volume de la crue à partir Kr, Pj et A :

Le calcul du volume de ruissellement généré prend en compte un coefficient d'abattement Ka, qui traduit la diminution spatiale moyenne de la pluie par rapport à la pluie ponctuelle à la station de référence. Le Ka est variable en fonction de la surface du bassin versant (M.OULEDBELKHIR Cheikh - Septembre 2002) :

$$7a = 1.1943 - 0.0604 \cdot \ln(A) \quad (11)$$

L'application pour le bassin du Metlili donne :

Tab N° 23 Coefficient d'abattement de chaque sous bassin (Oued Metlili)

Bassin Versant	Metlili		
caractéristiques	Guemgouma	Pont Cv metlili	Périmètre Oued Metlili
A (km ²)	213	326	473
ka	0.87	0.84	0.82

2.6.1.5. Coefficient de pointe α

réparti sur tout le temps de base Tb. Pour les bassins de l'oued metlili on adopte la relation en fonction de la superficie (au-delà 100 km²)

$$\alpha = 0.24 \ln(A) + 2 \quad (12)$$

Tab N° 24 Coefficient de pointe de chaque sous bassin (Oued Metlili)

Bv	Metlili		
caractéristiques	Guemgouma	Pont Cv metlili	Périmètre Oued Metlili
A (km ²)	213	326	473
α	3.29	3.39	3.48

2.6.2. Application à l'Oued de Metlili

Les différentes méthodes présentent un écart de 45%. Les méthodes Rodier-Auvray, Sokolovsky et Turraza ont l'avantage d'être reliées aux autres caractéristiques de la crue évaluée, et qui peuvent être estimées le débit de n'importe quelle fréquence. Il semble que les coefficients de ruissellement utilisés par la méthode Sokolovsky et Turraza sont trop exagérés, par contre ceux utilisés par la méthode Rodier-Auvray sont plus réalistes. Toutefois, lorsque l'on tend vers des pluies journalières de moindre importance, avec un caractère d'hétérogénéité spéciale assez important, le coefficient de ruissellement peut diminuer rapidement.

$$Q_{\max} = P_j \cdot K_a \cdot K_r \cdot A \cdot a \cdot T_b^{-1} \quad (13) \quad \text{Avec} \quad Q_{100} = 32,6 \cdot A^{0,42} \quad (14)$$

L'application de la méthode Rodier-Auvray pour le bassin de Metlili dans la page suivante donne

Tab N° 25 calcul des débits avec la formule de Rodier-Auvray (1988)

Bassin Versant	METLIL		
	Guemgoma	metlili	Périmètre Oued Metlili
Q max 2 (m ³ /s)	71	88	105
Q max5 (m ³ /s)	118	146	175
Q max 10 (m ³ /s)	149	185	222
Q max 20 (m ³ /s)	192	238	287
Q max 50 (m ³ /s)	255	316	380
Q max 100 (m ³ /s)	306	379	456
Q max 1000 (m ³ /s)	514	637	766
Q moy 2 (m ³ /s)	22	26	30
Q moy 5 (m ³ /s)	36	43	50
Q moy 10 (m ³ /s)	45	55	64
Q moy 20 (m ³ /s)	59	70	82
Q moy 50 (m ³ /s)	78	93	109
Q moy 100 (m ³ /s)	93	112	131
Q moy 1000 (m ³ /s)	156	188	220
V2 (m ³)	1	2	2
V5 (m ³)	2	3	4
V10 (m ³)	3	4	5
V20 (m ³)	4	5	7
V50 (m ³)	5	7	9
V100 (m ³)	6	8	11
V1000 (m ³)	10	14	18

2.6.3. Hydrogramme de crues

L'Hydrogramme de crue est une identité de la crue, il nous donne les caractéristiques principales de la crues tel que:

- La forme de la crue.
- Le volume de la crue.
- La durée de la crue.
- Le débit maximum de la crue (débit de pointe).

Pour le tracé de l'Hydrogramme de crue on doit suivre la méthode de SOKOLOVSKI qui divise l'Hydrogramme en deux branches de courbe non symétriques, une pour le temps de montée et l'autre pour la décrue. (SAOUCHA Lamia Ghardaïa (ENP) - Octobre 2009).

Pour le temps de montée: $Q_{\text{montée}} = Q_{\text{max}} \left(\frac{t}{T_m} \right)^2$ (15)

Ou, T_m : Temps de montée qui est égale au temps de concentration

Pour la décrue:

: $Q_{\text{décrue}} = Q_{\text{max}} \left(\frac{t - T_m}{T_d} \right)^3$ (16) Avec: $T_d = \delta T_m$ (Sokolovski)

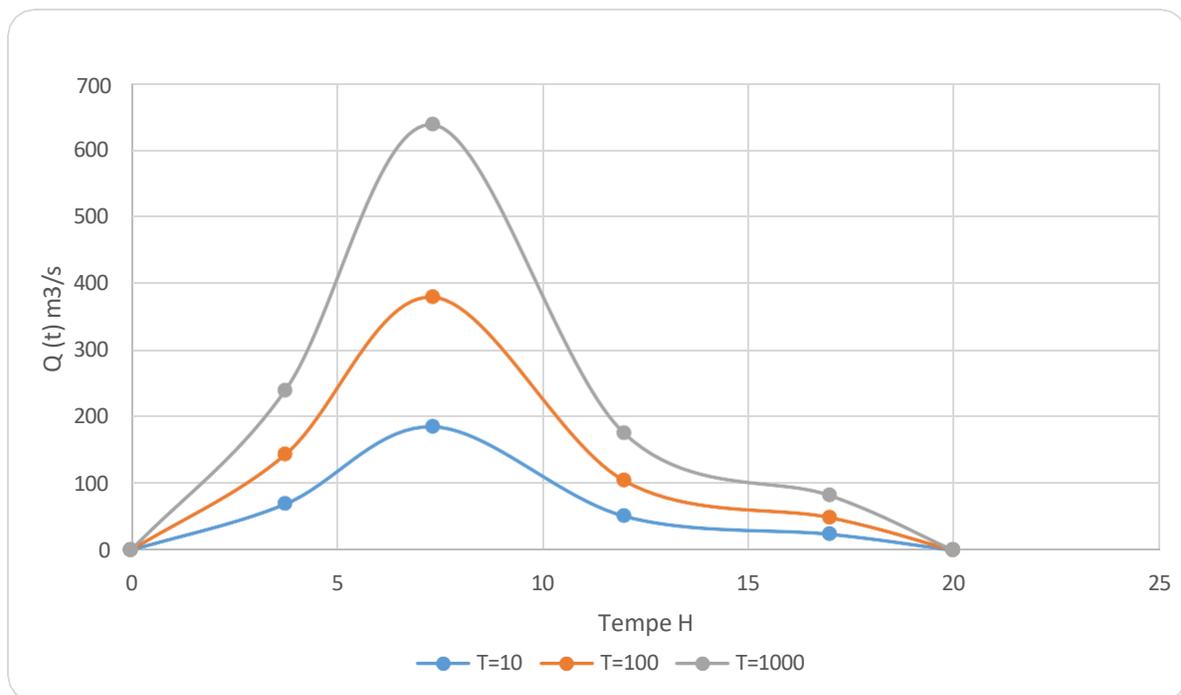
δ : Coefficient dépendant des caractéristiques du bassin versant, il est pris en général compris entre (2 — 4) , en fonction de la forme du bassin versant, du régime hydraulique du cours d'eau , de la perméabilité globale du relief , du boisement ou de la végétation du bassin ainsi que de la pente global de ce dernier.

En fonctionnement du régime hydraulique et des caractéristiques du bassin versant, ce coefficient est pris égal à 2.

Nous choisissons deux exutoires pour le bassin versant (Oued Metlili), car : les colossaux dégâts Il a eu lieu sur leur niveau :

Tab N° 10 Caractéristiques de l'hydro gramme de crue Metlili

Pr	2	5	10	20	50	100	1000
Q max	88	146	185	238	316	379	637
0	0	0	0	0	0	0	0
3.75	33	55	69	90	119	143	239
7.35	88	146	185	238	316	379	637
12	24	40	51	66	87	104	175
17	11	19	24	31	41	49	82
20	0	0	0	0	0	0	0

**Fig. N° 27 L'hydrogramme de crues de la ville de Metlili**

CHAPITRE III III

PRESENTATION DES

PROGRAMMES UTILISEES

3.1. ARC-GIS

3.1.1. Présentation d'ArcGIS

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias. ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des Smartphones et d'ordinateurs de bureau.



Figure N°28 : pressante utilisation d'ArcGIS.

Si vous êtes un utilisateur de longue date d'ArcGIS, vous pouvez le considérer comme une série de programmes et d'outils logiciels que vous utilisez pour réaliser un travail SIG professionnel. A mesure que la technologie progresse, nous vous

Invitons à envisager une vision élargie de la façon dont le monde utilise les informations géographiques, basées autour d'ArcGIS comme système. Le système ArcGIS permet aux informations géographiques officielles créées par la communauté SIG d'être facilement et librement exploitées par tous ceux qui veulent les utiliser (et avec lesquels ils choisissent de les partager). Ce système comprend un logiciel, une infrastructure en ligne basée sur le cloud, des outils professionnels, des ressources configurables telles que des modèles d'application, des fonds de cartes prêts à l'emploi et du contenu officiel partagé par la communauté des utilisateurs. Le prise en charge des serveurs et des plates-formes cloud permet la collaboration et le partage, ce qui garantit que les informations essentielles à la planification et la prise de décision sont immédiatement accessibles à tous.

Vous pouvez considérer le système ArcGIS comme une infrastructure rendant les cartes et les informations géographiques disponibles dans une division, dans toute l'entreprise, entre les plusieurs organisations et communautés d'utilisateurs et sur le web pour que tout le monde y accède. Par exemple, les travailleurs utilisant des dispositifs portables peuvent mettre à jour des mesures en temps réel sur le terrain tandis que des spécialistes analysent ces informations au même moment sur des ordinateurs de bureau, et les planificateurs font des études d'impact sur les résultats de cette analyse au moyen des applications Web. Enfin, les cartes et les données résultant du projet peuvent être publiées sur le Web afin que tout le monde puisse y accéder via les navigateurs Web et les applications sur les smart phones et les tablettes. Cela permet aux gens de non seulement voir les résultats du projet, mais également de combiner ces données à d'autres données disponibles pour créer des cartes supplémentaires qui permettent d'utiliser vos informations géographiques de nouvelles façons.

Les professionnels dans de nombreux secteurs utilisent ArcGIS dans un large éventail d'applications, incluant la planification et l'analyse, la gestion d'actifs, la sensibilisation opérationnelle, les opérations sur le terrain telles que l'inspection mobile et le déploiement d'urgence, les études de marché, la gestion des ressources, la logistique, l'éducation et la sensibilisation. En général, ces professionnels utilisent ArcGIS, car il les aide à :

- Résoudre des problèmes

- Prendre de meilleures décisions
- Planifier avec succès
- Faire un meilleur usage des ressources
- Anticiper et gérer le changement
- Gérer et exécuter des opérations plus efficacement
- Promouvoir la collaboration entre les équipes, les disciplines et les institutions
- Accroître la compréhension et la connaissance
- Communiquer plus efficacement
- Éduquer et motiver les autres

3.2. HEC-RAS

EC-RAS, Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique) est un logiciel de modélisation hydraulique destiné à simuler l'écoulement dans les cours d'eau et les canaux. Le modèle utilisé jusqu'à la version 5.0 était unidimensionnel, ce qui signifie qu'il n'existait pas de modélisation directe des variations hydrauliques dues aux changements de forme de la section transversale, à la présence de coudes ou autres aspects d'un écoulement 2D ou 3D. Depuis la version 5.0, il est possible de réaliser des modélisations 1D ou 2D de la rivière et des plaines d'inondation².

Le programme a été élaboré par le ministère américain de la Défense (corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis) dans le but de gérer les rivières, les ports et autres travaux publics relevant de leur compétence, il a été largement diffusé de par le monde depuis sa publication en 1995. Développé par l'Hydrologic Engineering Center (HEC) en Californie, ce système permet aux ingénieurs en hydraulique d'analyser les débits dans le lit des rivières et de déterminer les zones inondables. Il intègre de nombreux moyens de saisie de données, de composants d'analyse hydraulique, de stockage de données, d'édition de rapports sous forme de tables et de graphiques.

3.2.1. Caractéristiques du modèle

La procédure de base de calcul du logiciel HEC-RAS pour les écoulements permanents est basée sur la solution de l'équation de conservation de l'énergie à une dimension. Les pertes d'énergie sont évaluées par les frottements et les effets de contraction / expansion. L'équation de quantité de mouvement est également utilisée dans les situations d'écoulement rapidement varié, par exemple au niveau de ressauts hydrauliques, de ponts et de confluences.

Pour les écoulements non permanents, le logiciel résout l'ensemble dynamique des équations de Saint-Venant par la méthode des différences finies. Ce module de résolution est adapté des travaux du Dr., Robert L. Barkau³

HEC-RAS est capable de modéliser un réseau de chenaux, un système hydrographique dendritique ou une simple partie d'un cours d'eau. Certaines simplifications doivent être réalisées pour modéliser les situations d'écoulements complexes avec HEC-RAS. Il est capable de simuler divers régimes d'écoulement (subcritique, de transition, supercritique) en prenant en compte les effets de ponts et seuils. HEC-RAS permet également de simuler l'évolution de la qualité de l'eau, le transport sédimentaire les plaines d'inondation ou encore les ruptures de digue. Les calculs peuvent se réaliser pour des écoulements stationnaires (débits constant) ou suivant des hydrogrammes par exemple. Il est possible de simuler des canalisations en charge bien que ces capacités soient relativement limitées.

3.2.1.1. Avantage

HEC-RAS bénéficie, grâce au soutien de l'US Army Corps of Engineers, d'améliorations continues et est reconnu par de nombreux organismes gouvernementaux et entreprises privées. HEC-RAS est un logiciel libre qui est dans le domaine public et est disponible en téléchargement gratuit sur le site de Hydrologic Engineering Center. Diverses entreprises privées sont associées en tant que « fournisseurs » officiels et offrent des prestations de conseil et des add-ons. Certains distribuent également le logiciel dans les pays où l'accès aux sites internet de l'armée américaine est restreint. Le téléchargement direct de HEC-RAS comprend une documentation complète permettant aux scientifiques et ingénieurs d'avoir peu de difficulté pour utiliser le logiciel.

3.2.1.2. Inconvénients

Les défauts et les imperfections du programme HEC-RAS sont nombreux [précision nécessaire]. Il s'applique uniquement dans le cas des cours d'eau à faible pente. Pour les débits instationnaires une pente supérieure à 10 % peut en effet causer des instabilités. Enfin, d'autres limitations sont constatées comme pour un écoulement sous vanne de profondeur et quelques types d'écoulements non permanents.

3.3. GLOBAL MAPPER

3.3.1. Présentation de Global Mapper

Global Mapper Pro est une amélioration en option du logiciel qui fournit de nombreux outils de traitement LiDAR avancés : notamment la classification automatique des nuages de points, l'extraction automatique des bâtiments, des arbres et des lignes électriques, la visualisation transversale et l'édition d'entités de points, de lignes et de surfaces, la création plus rapide de surface, LiDAR QC, et bien plus encore.

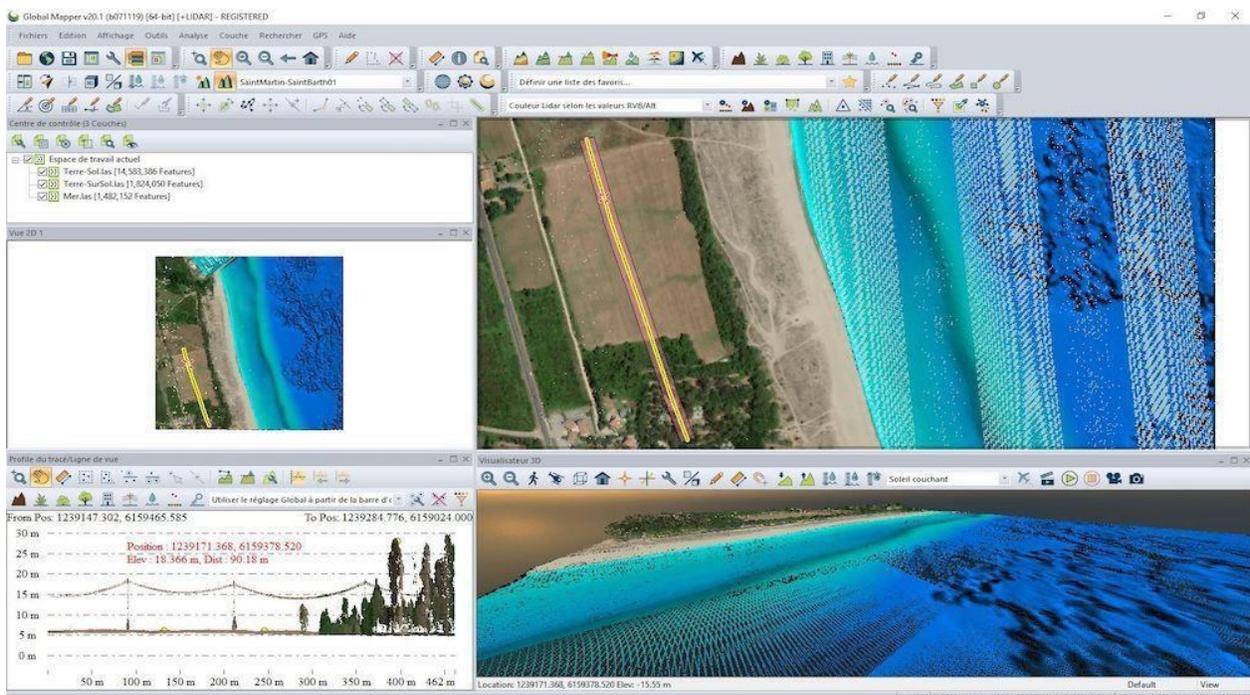


Figure N°29 : Une fenêtre de programme utiliser globale mapper .

Les fonctionnalités supplémentaires qu'offre le module LiDAR sont les suivantes :

Un outil Pixels-to-Points pour créer un nuage de points à haute densité à partir d'un ensemble d'images

Une barre d'outils LiDAR fonctionnelle permettant d'accéder facilement aux principales fonctions d'édition et d'analyse

Des options de maillage multiples pour une création plus rapide de MNT ou DMS

Un accès aux fichiers de nuages composés de plus d'un milliard de points

Des outils de classification automatique des points distinguant automatiquement, dans les couches non classifiées, les bâtiments, le sol, la végétation ainsi que les câbles électriques et les câble de service au-dessus du sol

Une fonctionnalité d'extraction d'entités pour créer automatiquement des empreintes 3D de bâtiments, des arbres et des lignes électriques

Un rendu en coupe à l'aide de l'outil Profil de tracé de Global Mapper pour visualiser et modifier le nuage de points dans une perspective verticale

La numérisation 3D ou l'extraction d'une entité personnalisée à l'aide de la fonction de Profil perpendiculaire

Des options de filtres avancées pour supprimer efficacement les points erronés ou inutiles

La détection et la reclassification personnalisables des points de bruit.

Des commandes de script LiDAR pour rationaliser le flux de travail.

La colorisation ponctuelle à partir d'images sous-jacentes ou d'une couche maillée

Un outil LiDAR QC pour corriger les altitudes des nuages de points à l'aide de points de contrôle au sol.

Des options de visualisation de nuages de points multiples, notamment par la classification, l'intensité, l'altitude, le RVB et la densité de points.

La prise en charge des statistiques LiDAR.

La prise en charge de l'importation et de l'exportation des formats LiDAR les plus courants.

La prise en charge des données NIR (proche infrarouge).

3.4. Modèle numérique de terrain : (MNT)

3.4.1. MNT ou MNE

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation en 2,5D de la surface d'un terrain ou d'une planète, créée à partir des données d'altitude du terrain. Le MNT ne prend pas en compte les objets présents à la surface du terrain tels que les plantes et les bâtiments. Un modèle numérique d'élévation (MNE) est une représentation des élévations sur un terrain comprenant les plantes et les bâtiments.

3.4.2. Utilisation des MNT

Extraction des paramètres du terrain

Tracés des profils **topographiques**

Modélisation de l'écoulement de l'eau ou de la masse du mouvement (par exemple pour les avalanches et glissements de terrain)

Création de cartes en relief

Rendu de visualisation en 3D.

Planification du vol 3D

Création de modèles physiques (y compris soulevé des cartes-relief)

Rectification géométrique de photographie aérienne ou d'imagerie satellitaire.

Réduction (correction du terrain) des mesures de la gravité (gravimétrie, géodésie physique).

Les analyses de terrain en géomorphologie et géographie physique

Systèmes d'information géographique (SIG)

Ingénierie et conception des infrastructures

Systèmes de positionnement global (GPS)

Ligne de mire d'analyse

Cartographie de base

Simulation de vol

Précision agricoles et forestières

Analyse de surface

Systèmes de transport intelligents

Sécurité Automobile et systèmes avancés d'assistance du conducteur

3.4.3. Types de MNT

En cartographie, les altitudes sont habituellement représentées par des courbes de niveaux et des points cotés. Suivant la taille de la zone couverte, la plupart des MNT utilisent pour les petites zones, un maillage régulier carré ou pour les grandes zones, un maillage pseudo carré dont les côtés sont des méridiens et des parallèles.

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

- maillage carré/rectangulaire ;
- maillage hexagonal ;
- maillage triangulaire régulier ;
- maillage triangulaire quelconque.

En fonction du type de maillage, la représentation informatique du MNT varie. Dans le cas de maillages rectangulaires, on peut utiliser des tableaux, mais dans les autres cas, les structures de données sont plus complexes.

**Chapitre IV : La cartographie
de vulnérabilité et simulation
de la crues et visualisation des
résulta**

L'inondation d'octobre 2008, a causé des dégâts colossaux, sur le double plan humain et matériel. La crue a atteint de grandes hauteurs dans le lit mineur, et a envahi une très grande partie du lit majeur dans la commune de Metlili avec des hauteurs d'eau importantes dans certains quartiers. La photo satellite suivante montre l'étendu de la crue d'octobre 2008 dans la région du oued Metlili, Pour cela, nous prenons les propriétés de cette inondation notamment les sommets qui atteint les eaux sur le bord des zones que nous voulons étudier .

L'étude de l'inondabilité de la commune de Metlili se fait à l'aide de simulations des crues. De ce fait, la première tâche consiste à reproduire l'inondation d'octobre 2008.

Et voici quelques photos représentent les dégâts colossaux sur les deux sites d'études :



Figure N° 30 Quelques dégâts matériels –zone Cv-Metlili

4.1. Simulation numérique de la crue d' Oued

Dans le cadre du cours Ressources hydriques, le laminage hydrologique a précédemment été utilisé pour étudier la propagation du débit dans un cours d'eau. Toutefois, les niveaux d'eau sont parfois un élément primordial pour la prévision des inondations, la gestion des cours d'eau et des plaines inondables, ainsi que pour la conception de certains ouvrages en milieu hydrique.

L'approche hydraulique, dont la théorie est présentée au ce chapitre des notes de cours, devient alors nécessaire afin de calculer la hauteur d'eau atteinte par l'écoulement dans des conditions spécifiques. (Guide de laboratoire pour HEC-RAS)

Après avoir tracé les zones et les sections d'études sur Google Earth, nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS pour faire la simulation numérique de la crue de ces Oueds. Le logiciel HEC-RAS est un logiciel de simulation de l'hydraulique dans les rivières et canaux. Il permet d'évaluer les débits et hauteurs d'eau sur l'ensemble des sections d'une rivière (Modéliser une rivière avec HEC-RAS.). Ce logiciel a été utilisé dans l'étude des zones arides et sahariennes, par exemple : la région Gorgol en Mauritanie (CHANG H. et al. 2012), Protection contre les inondations de la ville de Beja, Tunisie (SOCIETE AFRICAINE D'INGENIERIE).

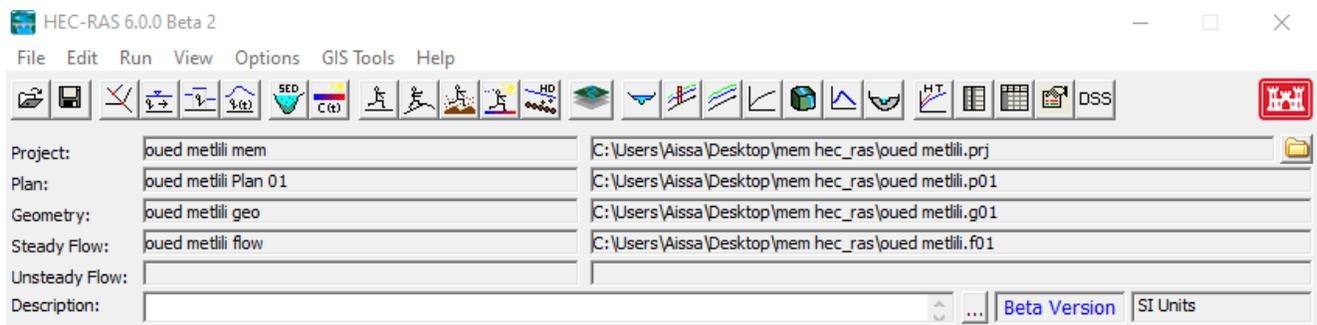


Fig. N° 31 Fenêtre principale de HEC-RAS

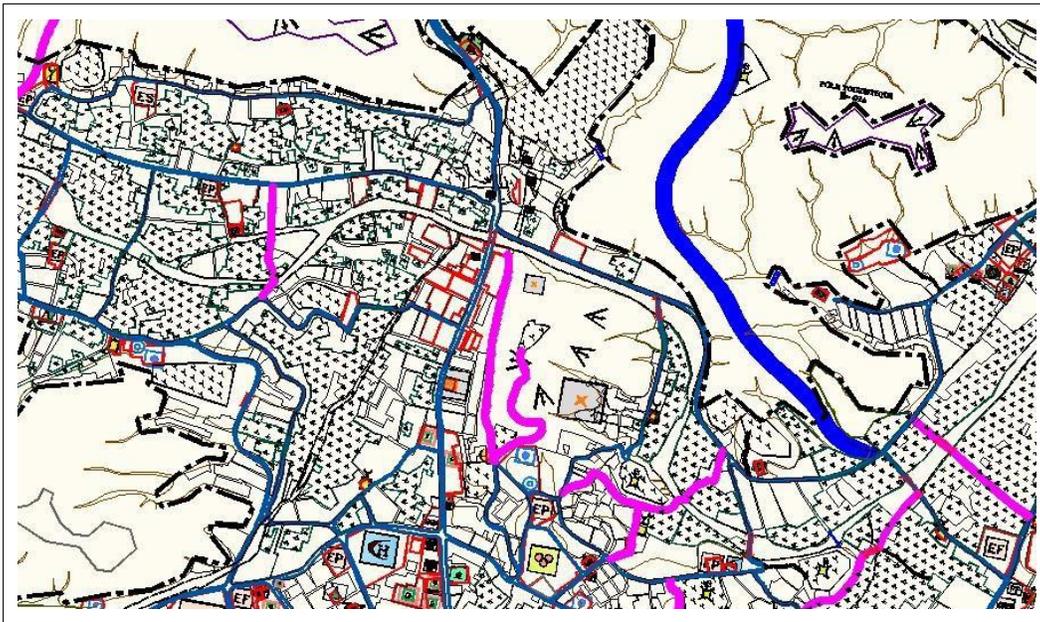
4.1.1. Étapes de la modélisation

Après la création du projet et Avant d'entrer les informations reliées à la géométrie et aux débits, il faut spécifier le système d'unités utilisé Dans le menu Options, allez à Unit System et choisissez System International (Metric System).

4.1.1.1. Géométrie des sections

Après avoir défini les principaux paramètres du projet, la deuxième étape est de définir les caractéristiques géométriques du système modélisé. En Sélectionnons Edit / Geometric Data... et la fenêtre Base Geometry Data apparaît.

Les autres caractéristiques géométriques nécessaires à cette étape sont les sections transversales à différents endroits de la rivière. Les sections transversales sont représentées au moyen de points représentant des coordonnées X-Y, où X est la distance par rapport à un point de référence arbitraire placé sur la rive et Y est l'élévation du fond de la rivière.



**Fig. N° 32 sections transversales présentes sur la levée topographique- zone de centre-ville
Mettili (AUTOCAD)**

4.1.2. Application sur la zone centre-ville (vallée du Metlili)

Comme vous voyez dans la figure suivante le trajectoire de l’oued de Metlili et emplacement des différentes sections.

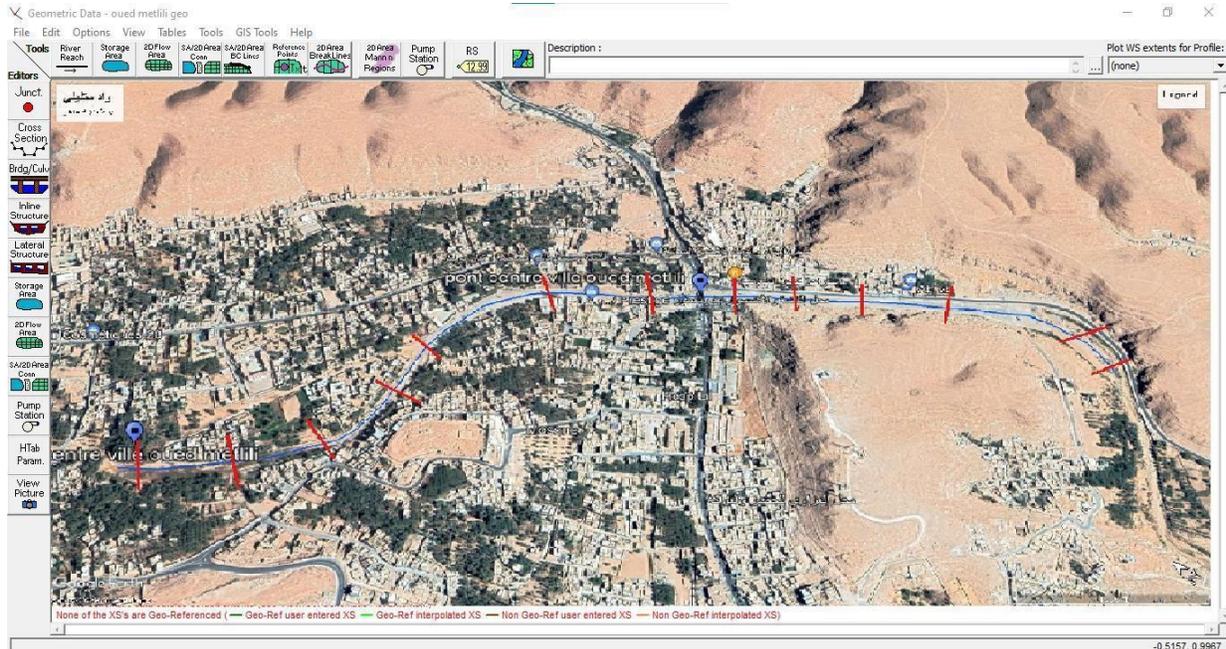
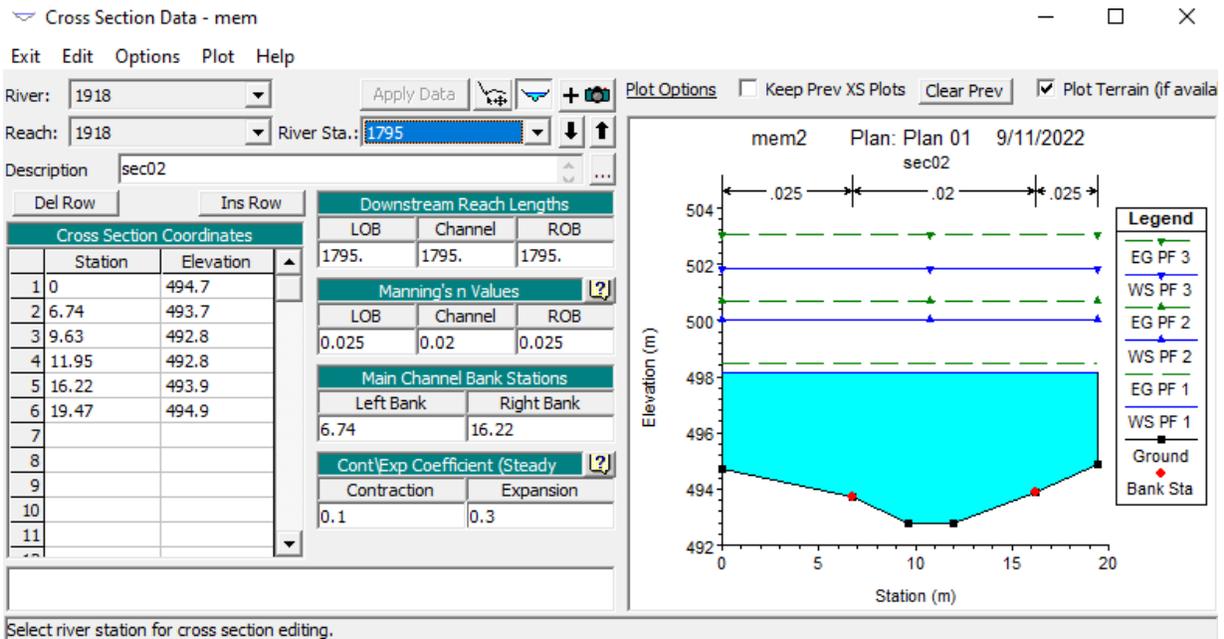
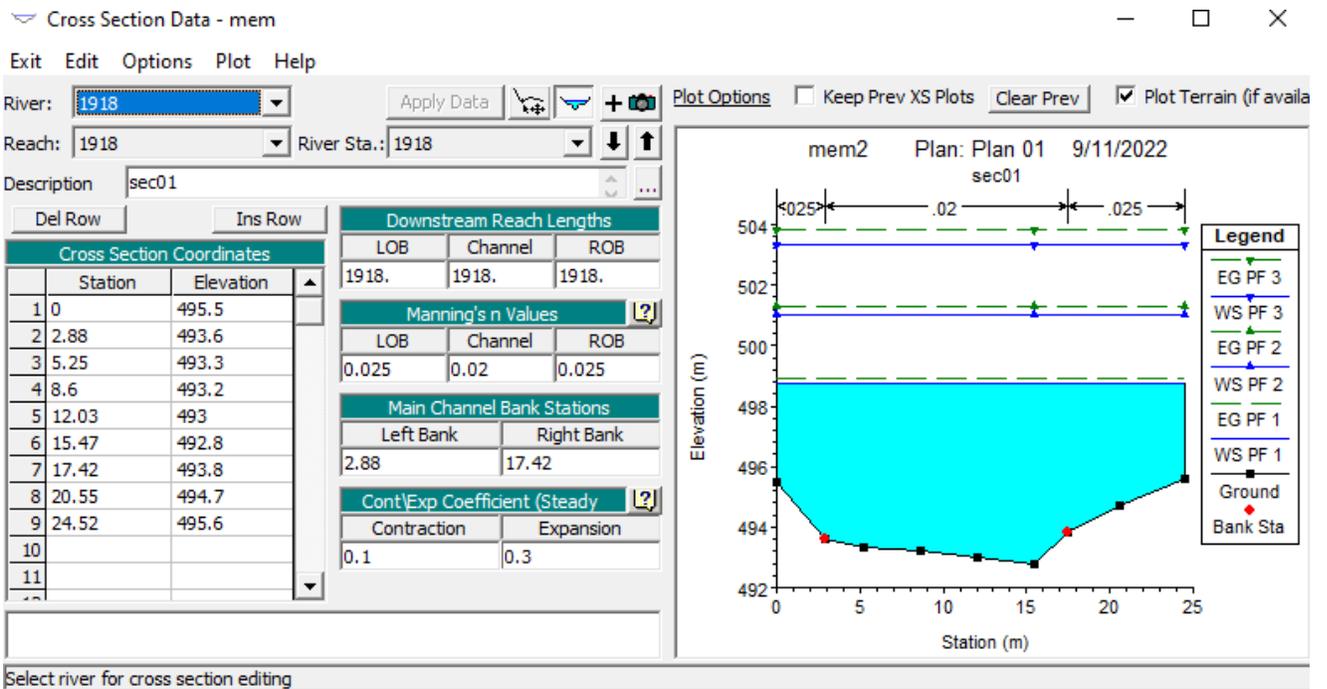
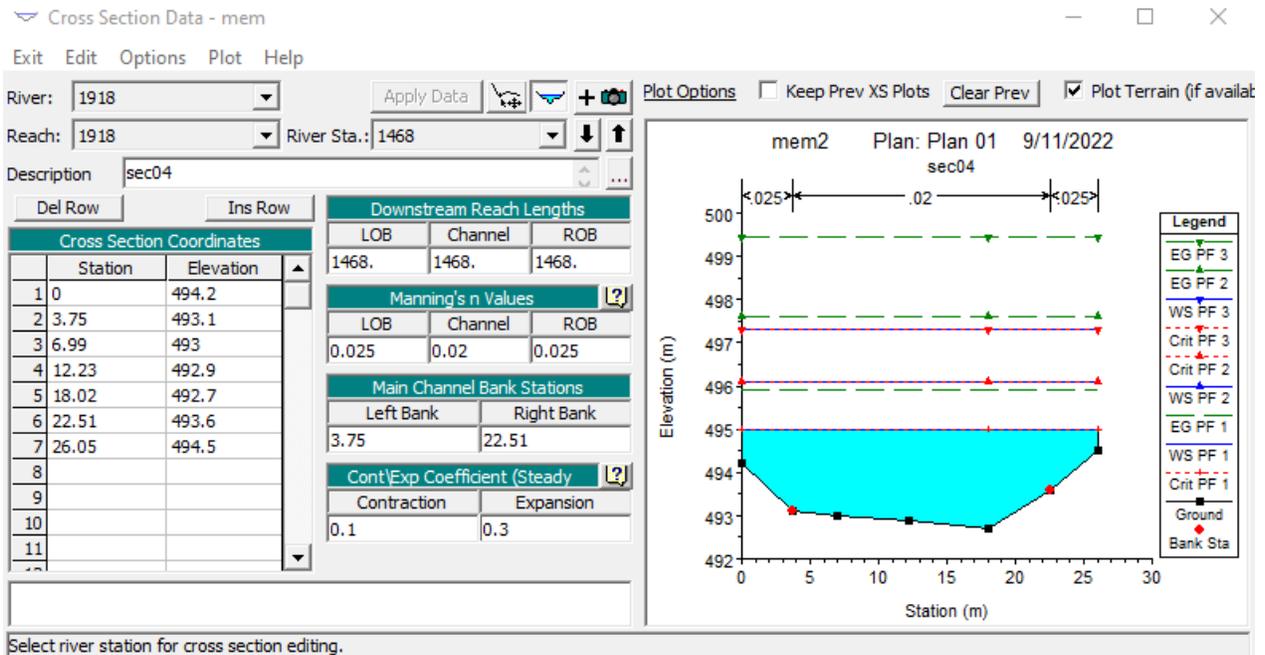
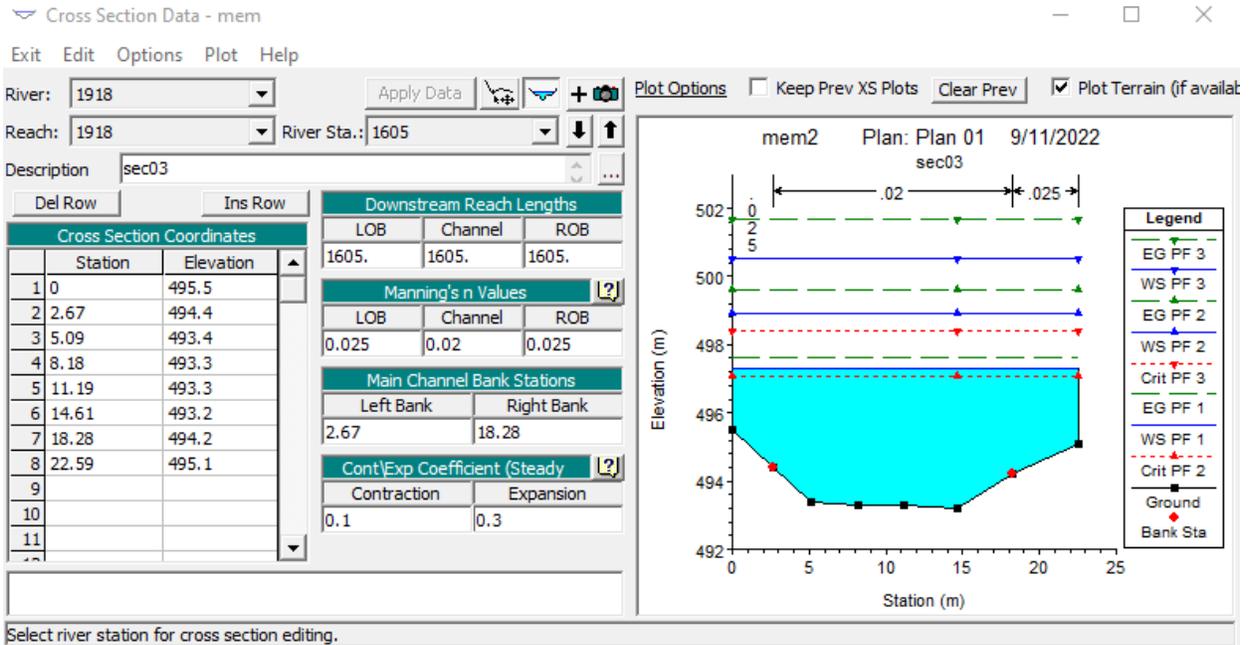
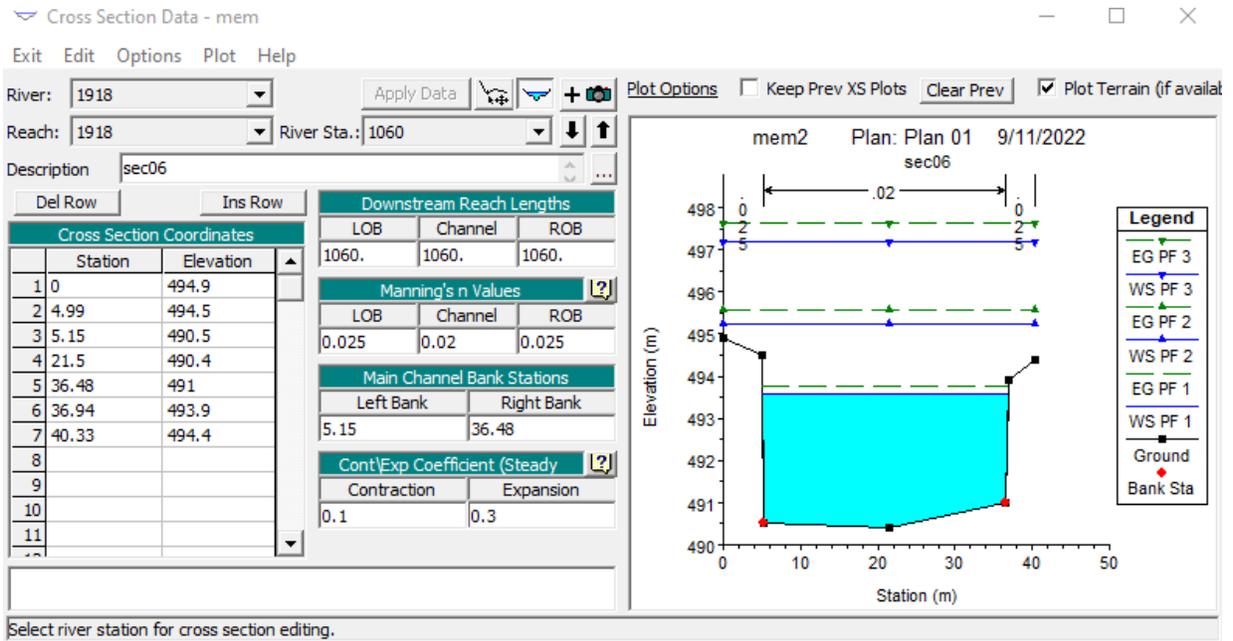
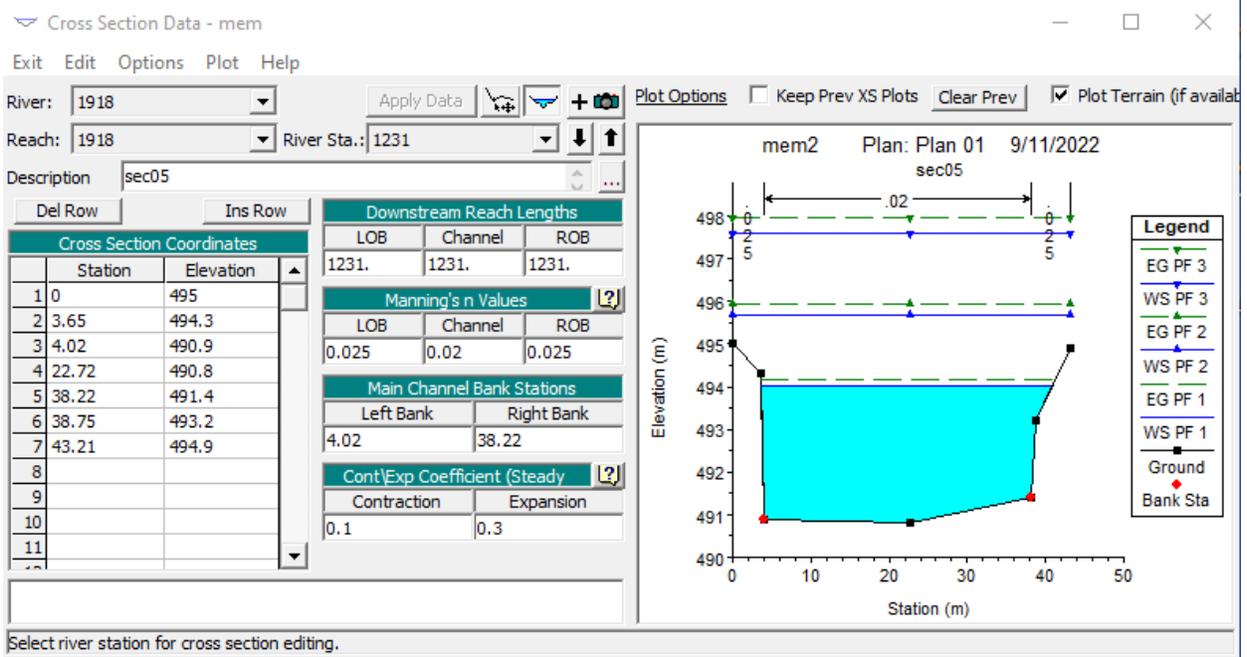


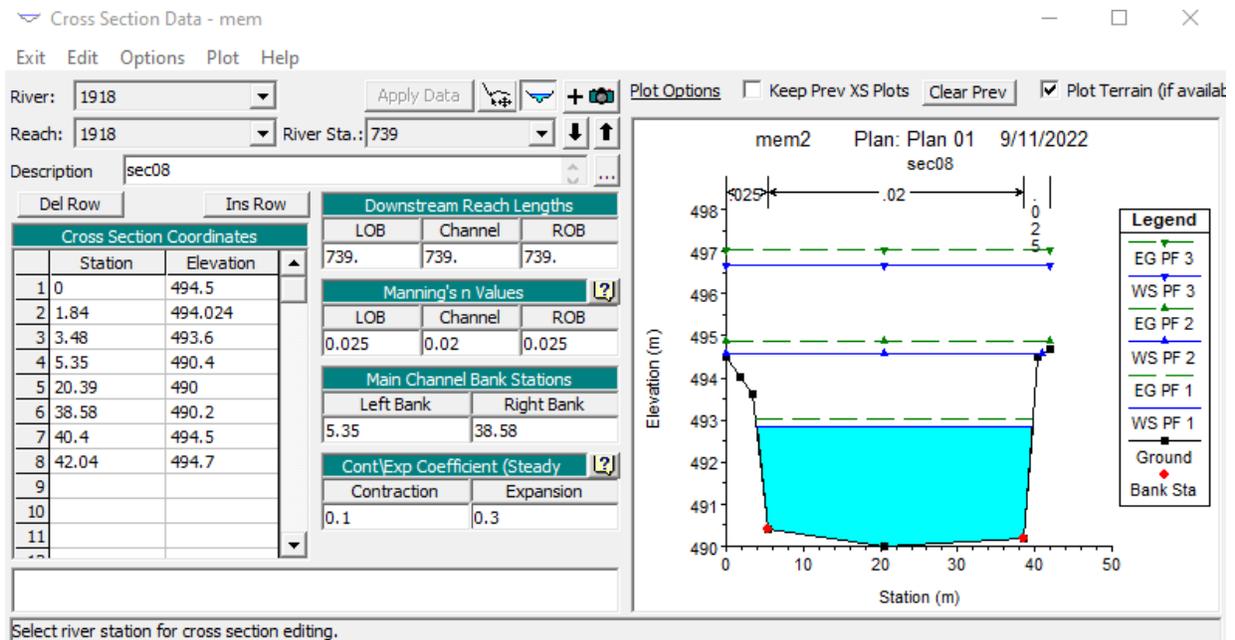
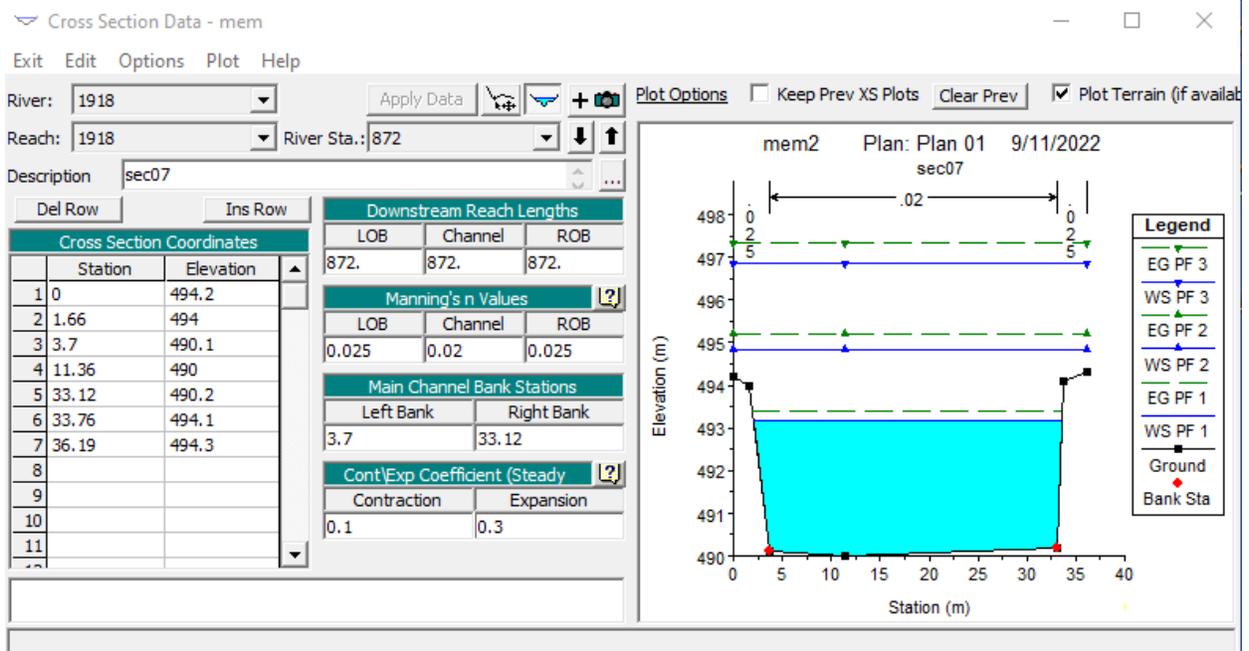
Fig. N° 34 Fenêtre Base Geometry Data - la zone Cv Metlili

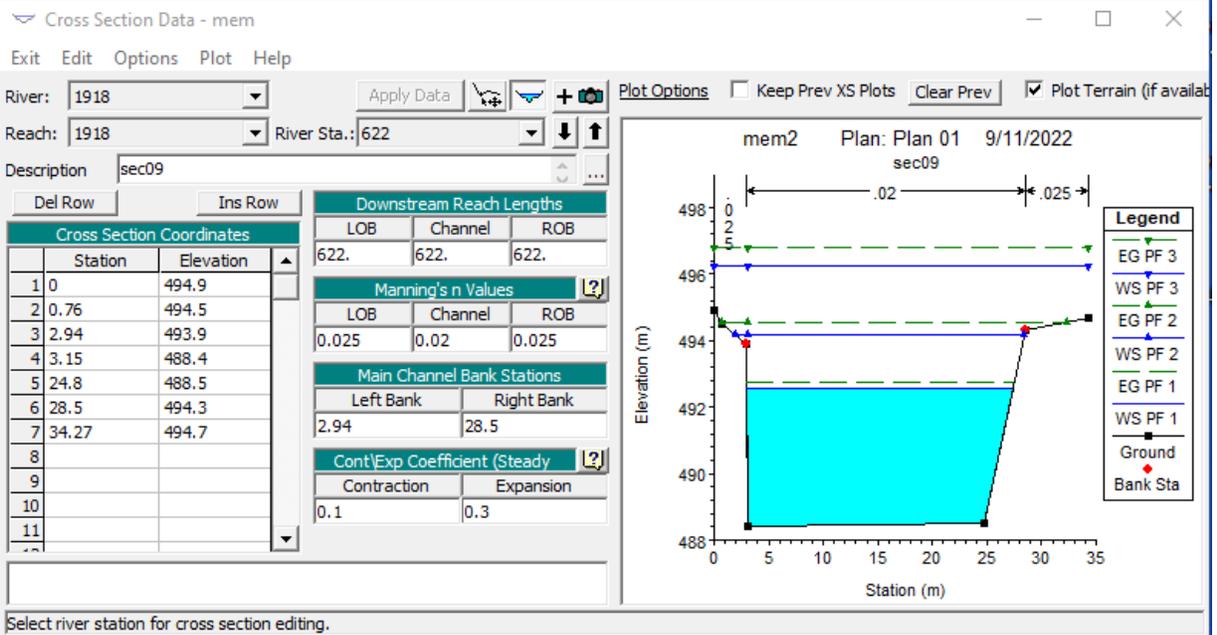
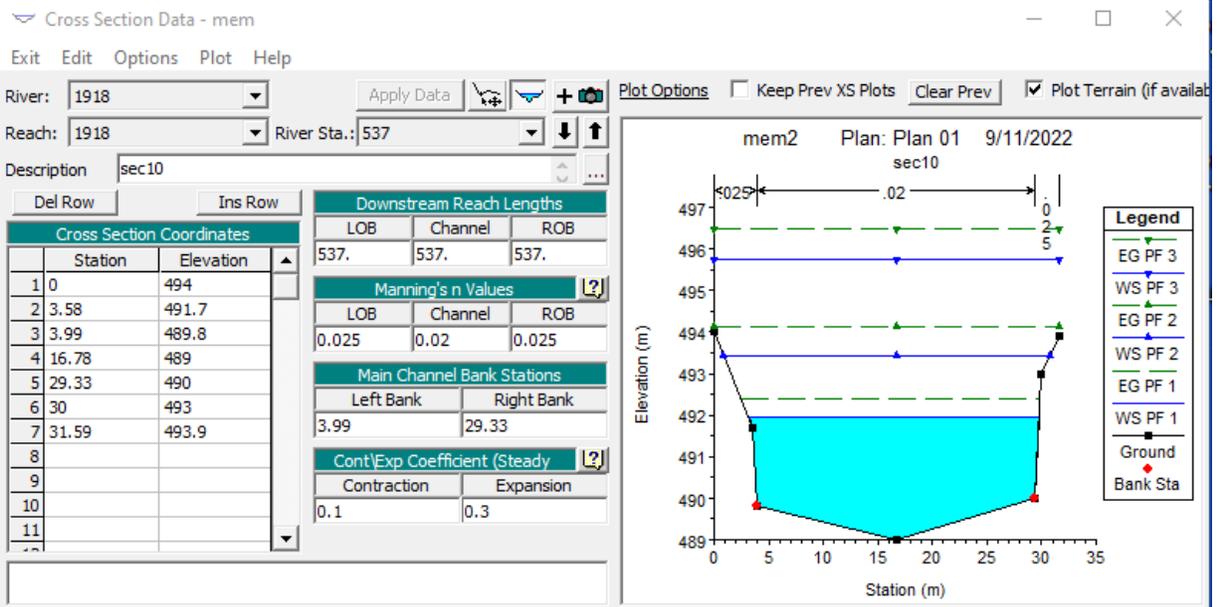
Les sections transversales sont représentées dans la figure suivante :

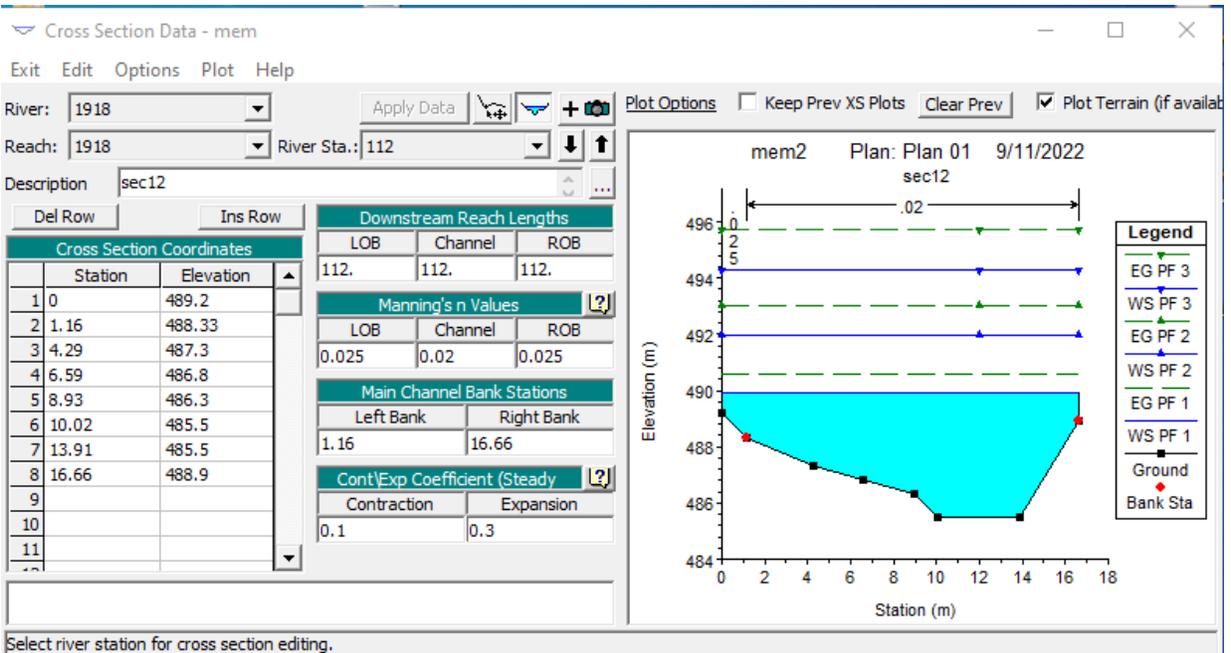
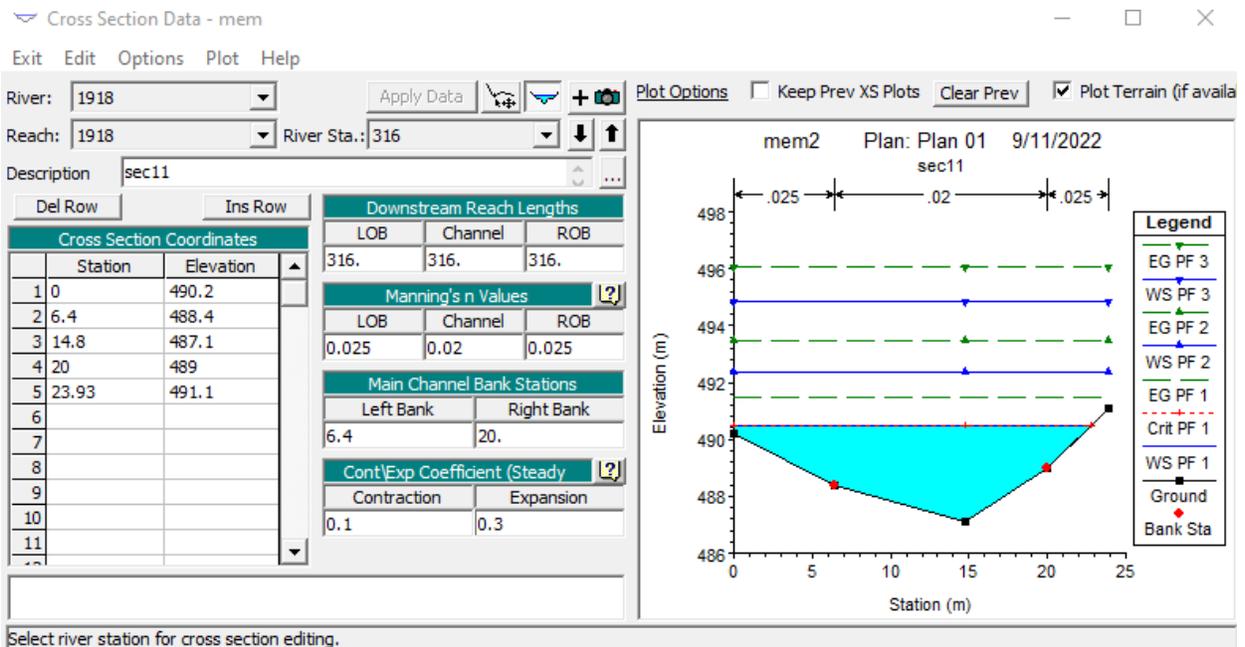












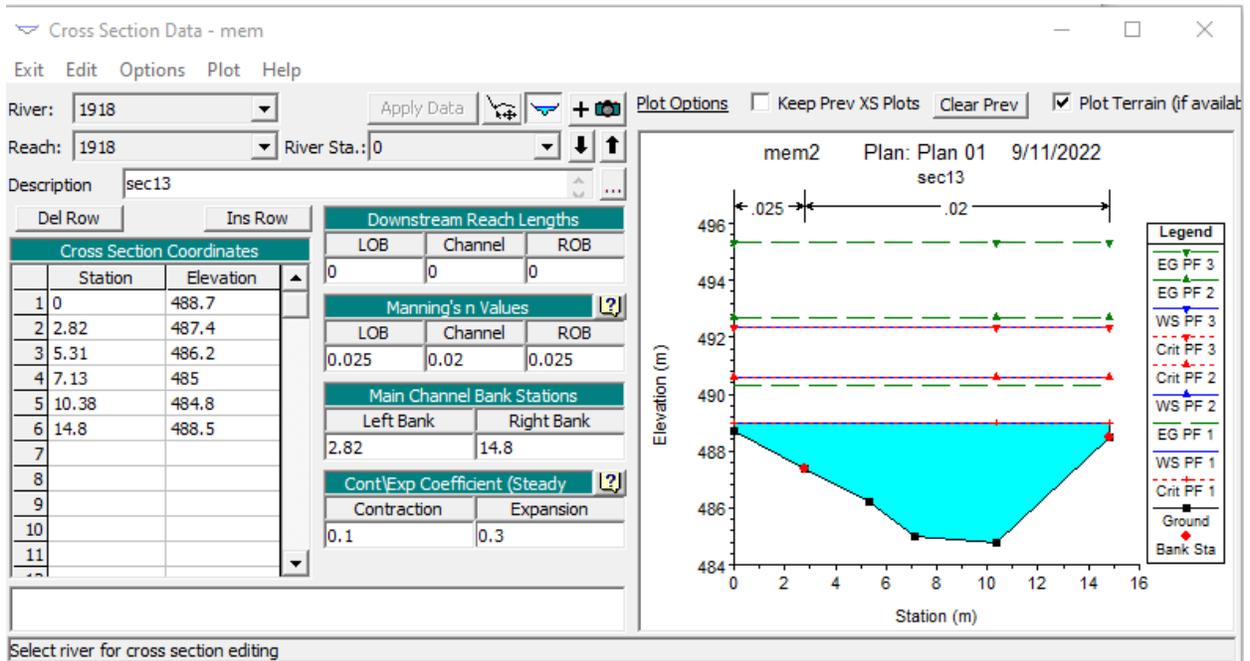


Fig. N° 34 Les différents sections transversales (sec de 1 à 13) – (vallée de Metlili)

4.1.2.1. Débits et conditions limites

Ici, nous avons entré les valeurs de débit pré-calculées.

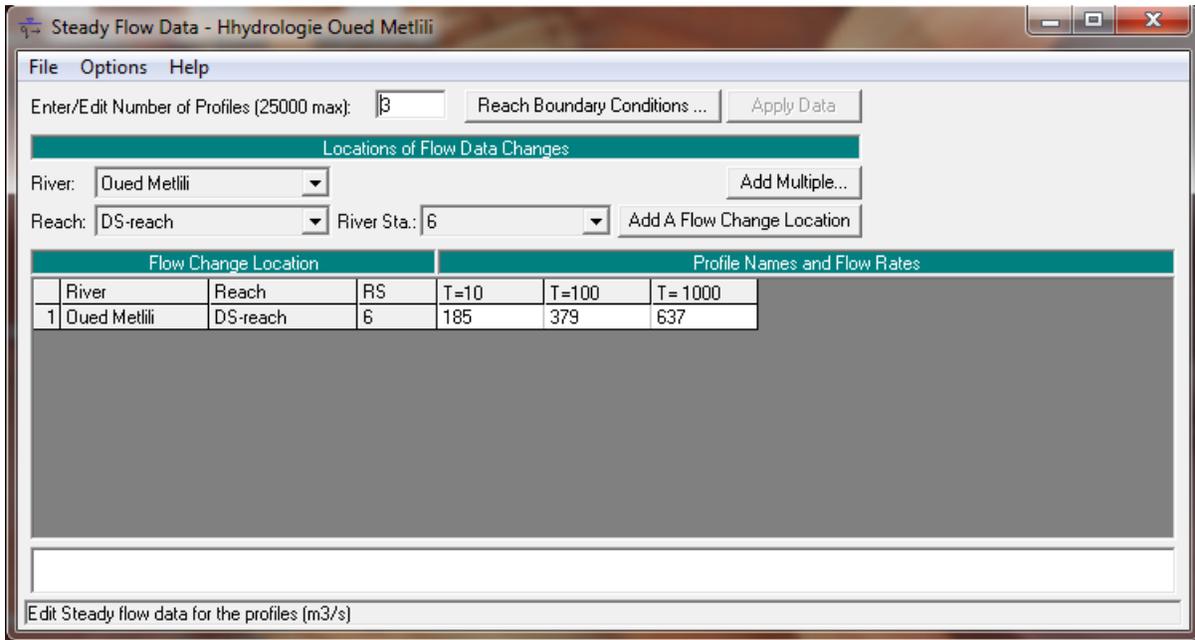


Fig. N° 35 Fenêtre Steady Flow Data - la zone Cv Metlili

4.1.2.2. Simulation hydraulique

Voilà la simulation hydraulique le cas de l'oued de Metlili (analyse en flux constant).

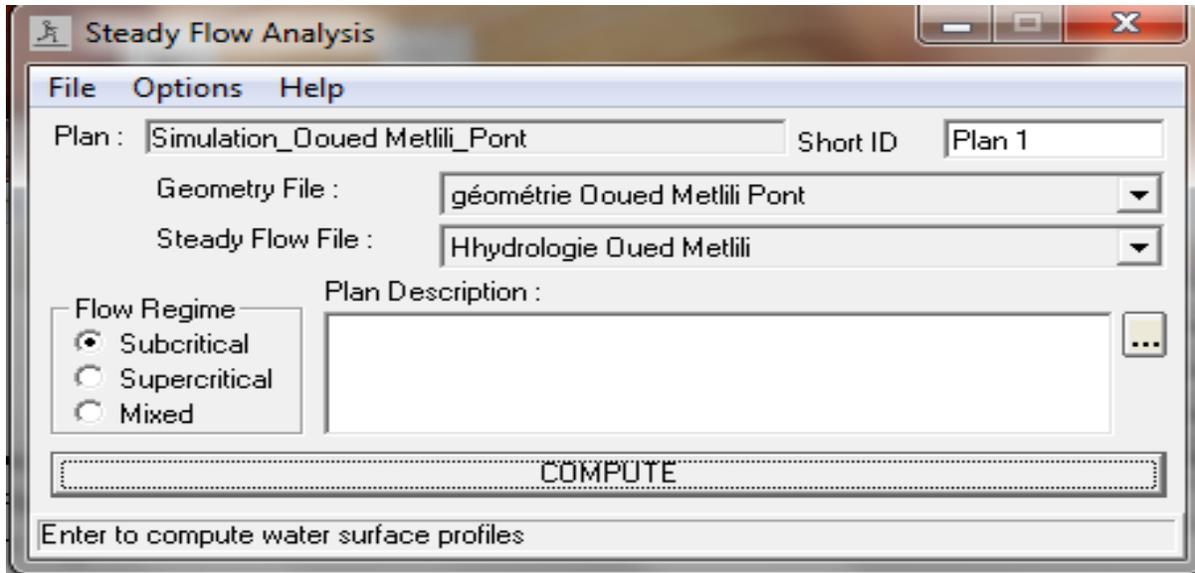


Fig. N° 36 Fenêtre Steady Flow Analysis - la zone Cv Metlili

4.1.2.3. Visualisation des résultats

via le bouton View 3D multiple cross section plot. Les sections transversales de début et de fin peuvent être modifiées pour n'afficher qu'une partie du tronçon à l'étude. Rotation et Azimuth permettent quant à eux de modifier l'angle de vue. Pour ne voir qu'une seule section, il est préférable d'utiliser le bouton View Cross Sections qui a été utilisé précédemment. Vous retrouvez à nouveau le menu Options dans la fenêtre Cross Sections, même s'il diffère légèrement du précédent.

Les résultats de simulation sont illustrés dans la figure suivante :

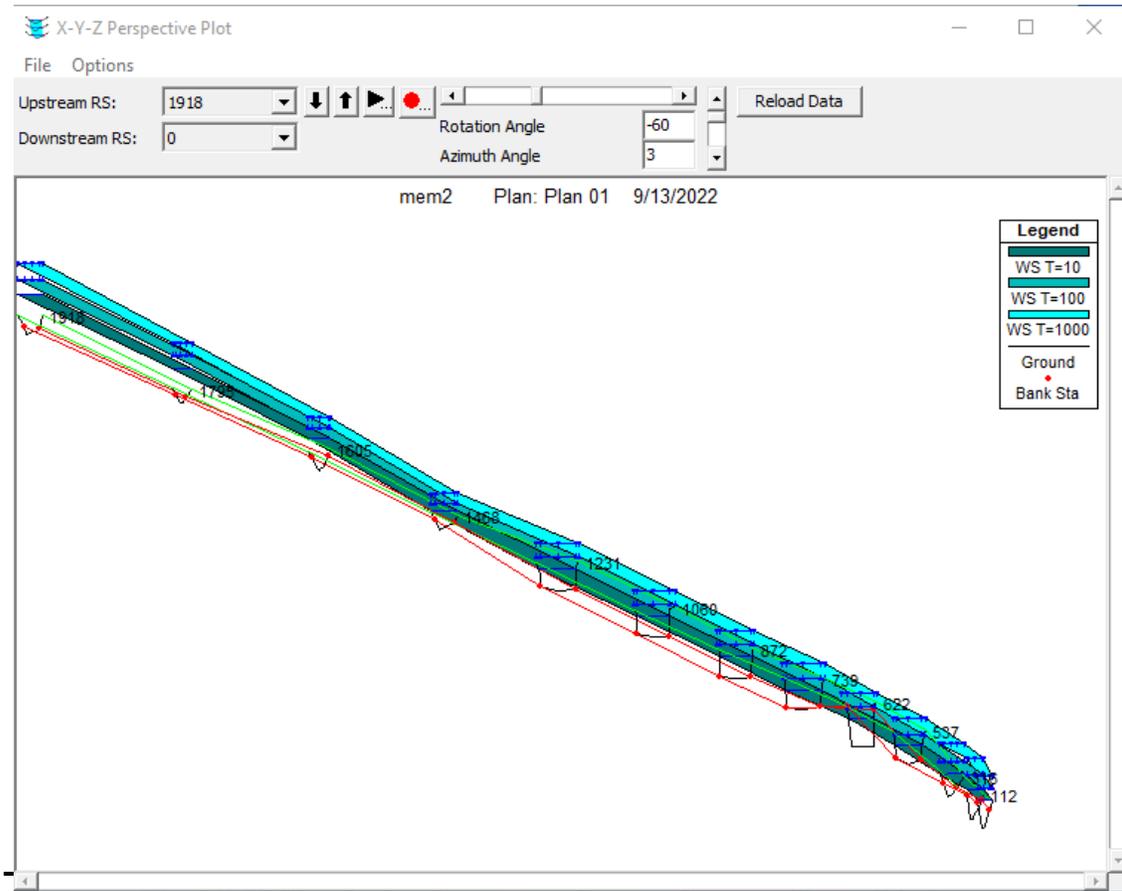


Fig. N° 37 Simulation de crue sur la zone Centre-ville (vallée du Metili)

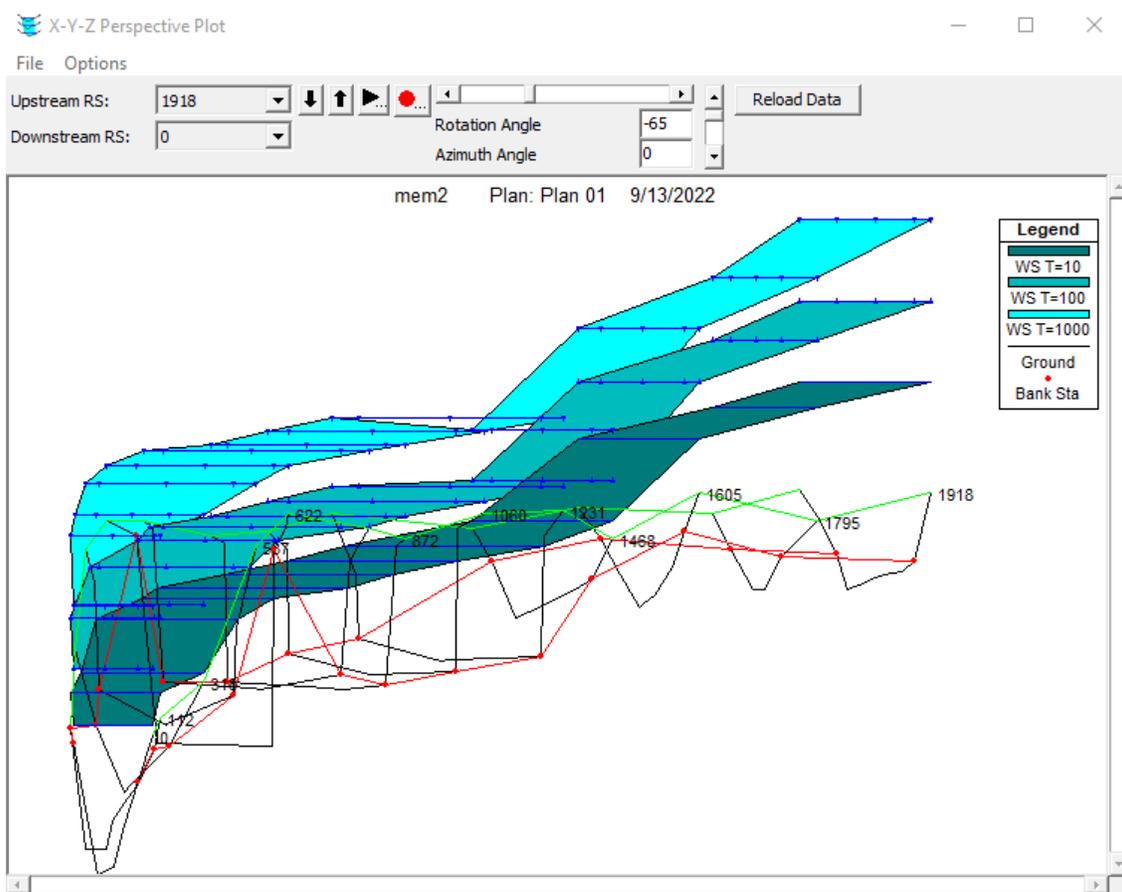


Fig. N° 37 Simulation de crue sur la zone Centre-ville (vallée du Metlili)

4.1.3. Finalisation de la carte

La dernière étape de la réalisation de la carte de vulnérabilité aux inondations passe par l'utilisation d'un logiciel dessinateur.

Pour avoir la carte finale, nous avons utilisé la carte de Plan de ville du Ghardaïa 1/5000 et le Plan de plateau du Metlili (AUTOCAD), puis en callant les levées topographiques sur les plans, au celle déjà obtenue .

4.1.3.1. Carte finale de vulnérabilité aux inondations

La carte réalisée représente les zones inondables de la région de Metlili véhiculée par l'Oued Metlili, dans le cas des crues décanale, centennale et millénaire.

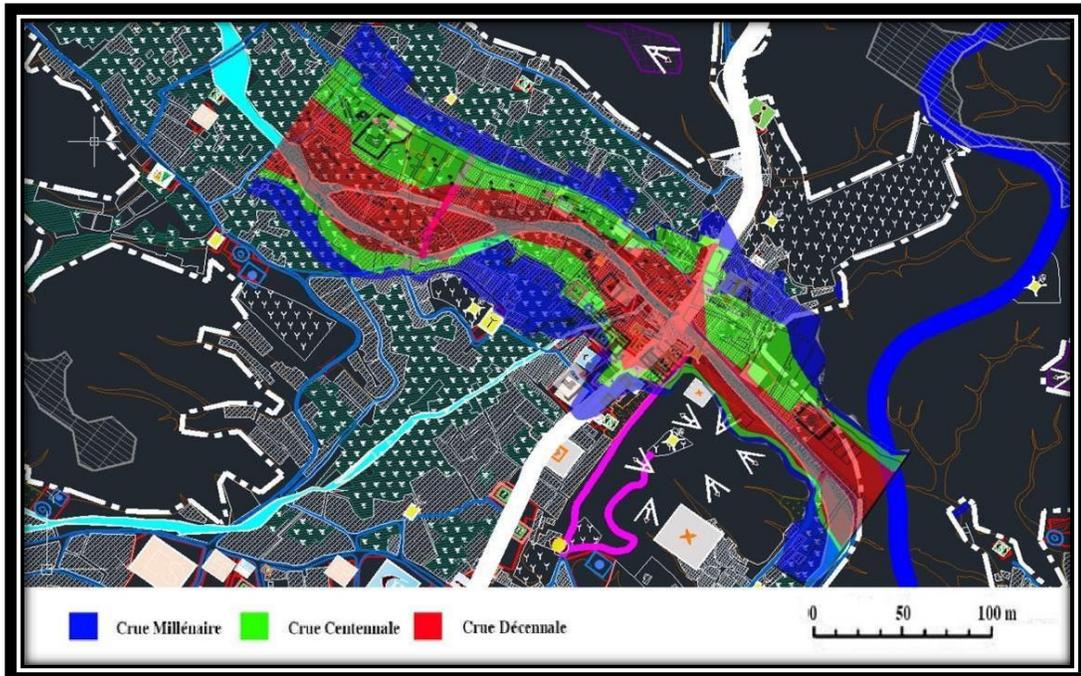


Fig. N° 38 Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décennale, centennale, millénaire de la région de centre-ville (Oued Metlili)

4.1.3.2. Interprétation du résultat des cartes

Les sites qui nous avons étudié (Oued Metlili) présentent une très forte vulnérabilité face aux risques météo hydrologiques. C'est la conséquence de l'intense urbanisation anarchique et l'occupation proche de lit mineur des cours d'eau. Le rôle de l'aléa météo hydrologique dans la genèse de ces inondations a été amplifié par l'activité humaine.

Cela a été mis en évidence lors des inondations d'octobre 2008, qui par leurs dégâts, s'inscrivent parmi les plus graves événements hydrologiques extrêmes ayant affecté ces régions.

Dans la vallée de Metlili, la palmeraie agricole a été enfoncée par l'urbanisation, dont la topographie est relativement basse par rapport au lit mineur. De plus la simulation de la crue à bien montre que c'est une zone potentiellement inondable, qui doit être inhabitée en période de crues. De plus, les constructions ralentissent la crue, ce qui a pour conséquence de priver certaines parties de la palmeraie d'être inondées. Tout cela, nous amène à recommander une évacuation totale des

habitants de la palmeraie. La révision du plan d'occupation du sol est une nécessité. L'occupation des abords de l'oued de Metlili, est un réel danger pour les habitants, une crue plus intense à celle d'octobre 2008 peut avoir des conséquences encore plus néfastes sur toute la population. Des lors, des simulations doivent être faites en modifiant la largeur du lit mineur, plus un recalibrage de l'oued, jusqu'à ce qu'il y est non débordement de l'oued sur les habitations.

Pour ces résultats on propose Un certain nombre de recommandations peuvent être émises, pour réduire le risque des dégâts lors d'évènements violents :

- La révision du plan d'occupation du sol est une nécessité. L'occupation des abords de l'oued de metlili est un réel danger pour les habitants, une crue plus intense à celle d'octobre 2008 peut avoir des conséquences encore plus néfastes sur toute la population. Des lors, des simulations doivent être faites en modifiant la largeur du lit mineur, plus un recalibrage de l'oued, jusqu'à ce qu'il y est non débordement de l'oued sur les habitations.
- Aussi, de réduire l'aléa de l'inondation en changeant la topographie du terrain. Ou d'atténuer la vulnérabilité en déplaçant les maisons et les infrastructures. Les deux solutions sont coûteuses et la deuxième engendrera probablement des problèmes politiques ou sociaux importants.
- L'installation des stations météorologiques et hydrométriques le long de la vallée (de Guemgouma à Soureg) afin d'avoir des longues séries chronologiques des éléments du bilan, et qui vont renseigner sur les changements que les divers facteurs mentionnés ci-dessus auraient pu faire subir un bilan hydrologique.
- Approfondir l'étude d'impact des barrages futurs d'amont et divers aménagements sur le système hydrologique de la vallée.
- Elargir l'étude de vulnérabilité aux crues vers les autres quartiers notamment à l'amont de la ville.
- Installation d'un système d'alarme des crues à l'amont de la vallée du Metlili.

- Approfondir et actualiser des levées topographiques notamment aux zones inondables (centre-ville) afin d'avoir une meilleurs simulation du phénomène d'inondation.
- Révision des ouvrages installées après la crues catastrophique de 2008 et études la faisabilité d'installer d'autre ouvrage de protection à l'amont et l'aval de la ville de Metlli.

Conclusion générale

Conclusion générale

La modélisation hydrodynamique des inondations, est un outil indispensable pour la compréhension du phénomène. L'objectif de cette thématique est d'établir des cartes d'alea des zones vulnérables aux inondations, ce qui induit à asseoir à une politique rationnelle dans la gestion des risques et d'aménagement et des systèmes d'alertes adéquates.

Les débits calculés des crues décennale, centennale et millénaire sont respectivement de l'ordre de $185.1 \text{ m}^3/\text{s}$; $379 \text{ m}^3/\text{s}$; $637.6 \text{ m}^3/\text{s}$ pour l'Oued Metlili.

les équations de Saint Venant d'écoulement modélisées par le logiciel HEC-RAS, ont été utiliser afin de déterminer les niveaux d'eau atteints dans les sections concernées. Cette simulation nécessite l'acquisition de beaucoup de données notamment celles de la topographie et du régime hydrographique des systèmes d'écoulement. Le HEC-RAS, a prouvé sa capacité de simuler des événements complexes, que ce soit en zone rurale ou en zone urbaine. Il traite, en particulier, la propagation d'un front sur une zone initialement sèche. Cela représente exactement le mécanisme des crues sahariennes, qui sont soudaines et instantanées.

Pour les données hydrologiques, et en absence des mesures de débits sur site, les méthodes analogiques permet d'évaluer des grandeurs assez acceptable et reflètent la réalité, parmi-elles on cite la méthode de Rodier-Auvray (1988), qui a l'avantage d'intervenir les caractéristiques morphologiques et pluviométriques du bassin versant, et d'avoir d'estimer ces grandeurs sur plusieurs fréquences.

Nos objectifs étaient de simuler des crues d'un certain niveau d'alerte, après avoir calé notre modèle par rapport à la crue d'octobre 2008. L'inexistence de plans topographiques, nécessaire pour la construction de modèles en milieu urbain, nous

a obligés d'utiliser le Google Earth professionnel, et autres logiciels (AUTOCAD, GLOBALE MAPPER...).

Beaucoup de problèmes ont été rencontrés dans ce travail. La pénurie de données topographiques et hydrologiques, ont ralenti considérablement le travail.

La carte de vulnérabilité aux inondations réalisée aux niveaux de la zone Metlili peut être adoptée comme référence pour la protection contre risques d'inondations par les services techniques et les autorités locales.

Toutefois, nous espérons que cette présente étude fruit de toute une formation soit un travail de base qui est sujet à réflexion et amélioration afin qu'il soit bénéfique.

Références bibliographiques:

1. Bonnard et Gardel (BG), (1996). «Étude hydrologique de l'oued de Metlili».37 pages.
2. Chocat 1997 : B. CHOCAT, «Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation : l'exemple de l'Yzeron (Lyon) », Revue de géographie de Lyon, n° 4, 1997, p. 273-280.
3. Cemagref, Unité de Recherches Hydrologie – Hydraulique, Lyon. (2008). « Notice D'emploi du logiciel RUBAR20 ». Cemadoc, 64 pages.
4. Ider K., (2004). «Modélisation hydrodynamique d'un cours d'eau». Mémoire de magister de l'Ecole Nationale Polytechnique, Alger. 120 pages
5. S. Candel. «Mécanique des fluides cours». Édition Dunod, Paris, 2001.
6. M. Lesieur. «Turbulence in fluids. Dordrecht: Kluwer academic publishers».1990.
7. Laborde J.P., (2000). «Eléments d'hydrologie de surface». U.M.R. 5651 "Espace" du C.N.R.S., 191 pages.
8. Mignot E., (2003) «Illustration des capacités et limites d'un code 2D à simuler les Inondations urbaines», Cemadoc. 34 pages
9. Paquier A. & Mignot E., (2003) «Potentialités et limites de la modélisation Hydrodynamique bidimensionnelle pour la détermination des zones inondables». Cemadoc, 36pages.
10. Rapport de Cemagref, (mars 2004). «Estimation des écoulements de surface pour

- une crue extrême en milieu urbanisé». Cemadoc, 71 pages.
11. Younes METTAS. «Application des technique de la géomatique à la gestion des risques naturels-Cas d'inondation de la ville de Ghardaïa». Université ZIANE Achour-Djelfa-Faculté science de la nature et de vie.2010.
 12. Lotfi BENADDA. «les conditions climatiques» .Ghardaïa 2012.
 13. SARI A. «Initiation à l'hydrologie de surface. Polycop de cours». Edition HOUMA, 222p. (2002)
 14. Lamia SAOUCHA. «Etude de faisabilité d'une digue sur oued Laadhira». Ghardaïa (ENP) - Octobre 2009.42pages.
 15. Cheikh OULEDBELKHIR. «contribution à l'étude et l'établissement du bilan hydrologique de la cuvette d'Ouargla». Septembre 2002.
 16. CTN-762 Ressources hydriques. «Guide de laboratoire pour HEC-RAS». Université du Québec .École de technologie supérieure Département de Génie de la construction.
 17. HIMEX. Note de synthèse. «Etude de protection contre les crues des différents quartiers de Metlili»
 18. M.OULED BELKHEIR Cheikh. Article «RECONSTITUTION DU RÉGIME DES CRUES SUR OUED M'ZAB(SAHARA SEPTENTRIONALE)»2014.
 19. JEAN-PAUL LABORDE. «Eléments d'hydrologie de surface». Université de Nice - Sophia Antipolis & CNRS. U.F.R. Espaces et Cultures .(2000) . Nice,192p
- Mr. ALI AZOUAOU Fathellah. «simulation de la crue d'octobre la communede ghardaia calcul rubar20».2009

NOTATIONS

C ($m^{1/2}.s^{-1}$) : Coefficient de Chézy

C_f : Coefficient de frottement adimensionnel

D (m) : Dénivelée

g (m/s^2) : Accélération de la pesanteur

I_G : Coefficient de compacité (indice de Gravelius)

I_g (%) : Indice de pente

H (m) : Hauteur d'eau

K_s ($m^{1/3}.s^{-1}$) : Coefficient de Strickler (expression du frottement pour un écoulement à surface libre)

L (m) : Longueur

n : Coefficient de Manning

P (N/m^2) : Pression

A (Km^2) : Aire du bassin versant

Q (m^3/s) : Débit

R_h (m) : Rayon hydraulique

R_{ij} (N/m^2) : Tenseur de Reynolds

S (Km^2) : Superficie du bassin versant

t (s) : La variable de temps

u, v, w (m/s) : Composantes de la vitesse dans les équations de Navier Stokes selon x, y , et z respectivement.

u, v, w (m/s) : Vitesses moyennes en temps

u', v', w' (m/s) : Les fluctuations de vitesses en temps

NOTATIONS

* u (m/s) : Vitesse de frottement sur le fond

U, V (m/s) : Composantes de la vitesse moyennée selon la profondeur selon x et y (équations de Barré Saint Venant)

x, y, z (m) : variables d'espace

Z_f (m) : Cote du fond pour l'écoulement à surface libre.

Z_s (m) : Cote de la surface libre

Δt (s) : Pas de temps

Δx (m) : Pas d'espace

ν (m².s⁻¹) : Coefficient de viscosité moléculaire (viscosité cinématique)

ρ (Kg/m³) : Masse volumique de l'eau

τ_{ij} (N/m²) : Tenseur de contraintes visqueuses

τ_p (N/m²) : Contrainte de cisaillement sur le fond

τ_x^f [τ] τ_y^f : (N/m²) Contraintes de frottement au fond