

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologies

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydraulique

Spécialité : Sciences de l'environnement

Par : Redouane BOUCHARÉB

Thème

**VULNERABILITE AUX INONDATIONS DANS
LES REGIONS SAHARIENNES
- CAS DU PONT ADDAOUED ET PONT CENTRE
VILLE METLILI - GHARDAIA**

Soutenu publiquement le : 31/05/2015.

Devant le jury :

M. BENADDA Lotfi	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Président
M. CHEBBIH Lakhdar	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Examinateur
M^{me} BOUAMMER Keira	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Examinatrice
M. OULED BELKHEIR Cheikh	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2014/2015



REMERCIEMENT

Tout d'abord je tiens à remercier infiniment le bon DIEU tout puissant de la bonne santé, la volonté et la patientée qu'il m'a donné tout le long de mes études.

Je présente mes sincères remerciements avec mes profondes respects à mon promoteur Pr. Mr OULEDBELKHIR Cheikh pour son suivi, sa patience, ses conseils et son aide, tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Je tiens à remercier également Mr BENADDA Lotfi pour sa collaboration et ses conseils.

Je remercie Mustapha CHOUIREB, Missuom BEN REITTAB et OULED ABDALLAH Hormma pour ses aides et tous les gens de service de l'assainissement et protection contre les inondations dans la direction des ressources en eau de Ghardaïa.

Je tiens à remercier aussi les membres de jury.

Mes remerciements vont également à toutes mes enseignaient, mes collègues et les personnes qui m'ont aidé particulièrement mes chères amis Oussama et Zakaria.

Enfin, je voudrais remercier mes familles qui n'ont jamais cessé de croire en moi et de m'encourager à continuer.



DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents qui m'ont
toujours soutenu et encouragé tout au long de ma vie.*

A mon très cher frère,

A mes très chères sœurs,

A toute la famille.

A mes camarades de classe notamment

*Oussama qui m'a toujours soutenu lors des moments les plus
difficiles*

Je vous

Souhaite que de la joie et la réussite.

*A mes amis Ayoub, Lakhdar , Oussama, Mustapha, Yacine,
Slimane, Marouane, Redouane et Messaoud, Abdou*

Et à tous ceux qui me sont chers



ملخص:

تعتبر الفيضانات حاليا خطر دائم للسكان ، خاصة الذين هم قاطنون على ضفاف الأودية، هذه الظاهرة جد معقدة وخطيرة نظرا لوجوب دراسات معمقة للتحدي لها.

بعض هذه الدراسات تتمثل في تحليل أمواج الانغمار 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 لإجلاء السكان.

المهدف من هذه الدراسة هو استخلاص خريطة الصدفة (الخطر) للفيضانات لمنطقة أداود-غارداية ومنطقة جسر متليلي -متليلي، و العمل على تحقيق هاته الخريطة يمر بدراسة هيدرولوجية لتحديد التدفق الأعظمي لفيضان واد مزاب و متليلي.

العمل على برنامج الهيكراس سمح لنا بتحديد مستويات المياه بالنسبة لتواتر الفيضانات و الخصائص 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 : فياضانات، خريطة المناطق المعرضة للفيضان، أداود، جسر متليلي، هكراس.



Résumé :

Les inondations sont considérées de nos jours, comme un danger persistant pour les populations, surtout celles qui résident aux abords des cours d'eau. Le phénomène est d'autant plus complexe, qu'il est difficile de le contrer sans études approfondies. Parmi ces études, le mode de propagation des crues qui consiste à analyser les ondes de submersion engendrées par une crue et d'établir des cartes d'aléa (ou de risque), qui illustrent l'étendue des inondations par rapport à certains niveaux d'alertes. Cela permet de réaménager les zones à risque et d'établir des plans d'évacuations des populations.

L'objectif de cette étude est d'établir une carte de vulnérabilité aux inondations de la cité urbaine d'Addaoued à Ghardaïa et la cité du Pont au centre-ville de Metlili. La réalisation de cette carte passe plusieurs phases afin de déterminer le débit maximum de différentes fréquences sur Oueds M'Zab et Metlili.

L'utilisation du logiciel HEC-RAS, nous a permis de déterminer les niveaux d'eau en fonction de la fréquence de crue et les conditions géométriques et topographiques des sections à traversées, le logiciel Arc-Gis nous a permis aussi d'interpoler les niveaux attendus fréquents sur une carte d'aléa, et de déterminer les zones inondables.

Mots clés : inondations, Carte des zones inondables, Addaoued, Pont Metlili, HEC-RAS.

Abstract:

Floods currently considered a permanent danger for the population, especially those who are live on the banks of the valleys, which in turn is considered very dangerous. This phenomenon is very complex due to the necessity of in-depth studies to challenge it.

Some of these studies is to immersion waves analysis resulting from the flood. What allows the creation chance Maps (danger), which reflects the extension of the scope of flooding compared with some degree of alarm. This allows to re-create the danger zones, and the establishment of plans for the evacuation of the population.

The aim of this study was to draw a map of chance (risk) flood zone Addaoued-Ghardaïa and –Metlili Pont. Work to achieve these circumstances for this map passes on hydrological study to determine the maximum flow of flood valley M'zab and Metlili.

Work on HEC-RAS program allowed us to identify water levels for flood frequency and geometric and topographical characteristics of the clips that are used by. Arc-GIS program also allowed us to identify the frequency levels unseasonably on the map of chance, as well as identifying areas at risk of flooding.

Key words: floods, map areas prone to flooding, Addaoued, Metlili Pont, HEC-RAS.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT ET DEDICACE

RESUME

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 01 - VULNERABILITE AUX INONDATIONS DES VILLES

1.1 Mecanismes d'ecoulement de l'eau dans une ville.....	3
1.1.1 Fonctionnement des eaux pluviales urbaines en condition climatique normale	3
1.1.2 Apprehension de la structure urbaine	6
1.1.3 Methodes pour obtention une description detaillee	7
1.2 Introduction a l'etat d'art de la modelisation hydrodynamique	8
1.2.1 Approches hydrologiques.....	9
1.2.2 Approches hydrauliques	9
1.2.3 Processus d'ecoulement et leur representation dans les modeles hydrauliques	11

CHAPITRE 02 - MODELE MATHEMATIQUE DES CRUES

2.1 Modele mathematique de saint venant	15
2.2 Determination de systeme d'equations de reynolds.....	17
2.2.1 Equation de continuite	18
2.2.2 Equation de quantite de mouvement	18
2.3 Modele mathematique de saint venant 2d	18
2.3.1 Champs d'application	19
2.3.2 Hypotheses de saint venant.....	19
2.3.3 Modelisation de la turbulence.....	21

CHAPITRE 03 - PRESENTATION DU CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

3.1 Presentation de la wilaya.....	23
3.1.1 situation geographique de la wilaya	23
3.1.2 regions naturelles de la wilaya	24
3.1.3 Situation regionale de la ville de ghardaia	25
3.1.4 Les donnees socio-economiques (evolution 1966-1977)	26
3.1.5 Relief	29
3.1.6 Aspect climatologique	29
3.1.7 Aspect geologique	35
3.1.8 Aspect geomorphologique.....	37
3.2 Presentation des sites d'intervention.....	38
3.2.1 Bassin versant de m'zab (oued m'zab)	38
3.2.2 Bassin versant de l'oued metlili	40

CHAPITRE 04 - ETUDE HYDROLOGIQUE DES BASSINS VERSANTS

4.1 Determination des principaux affluents du bassin versant d'oued m'zab	42
4.2 Determination des principaux affluents du bassin versant d'oued metlili.....	43
4.3 Caracteristiques geometriques des bassins	43
4.3.1 Caracteristiques hydrographiques	44
4.4 Determination de regime pluviometrique	47
4.4.1 Caracteristiques de la station pluviometrique de ghardaïa.....	47
4.4.2 Analyse de la precipitation	47
4.4.3 Le regime pluviometrique	51
4.4.4 Construction des courbes idf	53
4.5 Reconstitution des crues sur l'oued m'zab et metlili.....	54
4.5.1 Principaux parametres intervient dans la reconstitution des crues.....	54
4.5.2 Application au oued m'zab et oued metlili.....	59
4.5.3 Hydrogramme de crues	61

CHAPITRE 05 : SIMULATION DE LA CRUE ET VISUALISATION DES RESULTATS

5.1 Simulation numerique de la crue des oueds	66
5.1.1 Etapes de la modelisation.....	66
5.2 Application sur la zone d'addaoued (vallee du m'zab).....	67
5.3 Application sur la zone pont centre-ville (vallee du metlili).....	70
5.4 Finalisation de la carte.....	74
5.4.1 Carte finale de vulnerabilite aux inondations	75
5.4.2 Interpretation du resultat des cartes	76
Conclusion generale	64
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	79
NOTATIONS.....	81
ABREVIATIONS.....	82

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tab N° 1 quelque commune avec la surface	25
Tab N° 2 Evolution de la population de 1966 à 1987	27
Tab N° 3 Projection démographique	27
Tab N° 4 Projection démographique selon "Annuaire statistique" 1994	27
Tab N° 5 coordonnées de la station météorologique.....	29
Tab N° 6 Données de température de la région	30
Tab N° 7 Fréquences des vents selon leur direction	31
Tab N° 8 Moyenne mensuelles des vitesses maximal du vent	32
Tab N° 9 Humidité relative moyen	33
Tab N° 10 Evaporation moyenne mensuelle (mm).....	34
Tab N° 11 caractéristiques géomorphométriques d'Oued M'Zab	43
Tab N° 12 caractéristiques géomorphométriques d'Oued Metlili	44
Tab N° 13 Caractéristiques Hypsométriques du bassin de M'Zab	44
Tab N° 14 - Caractéristiques Hypsométriques du bassin de Oued Metlili.....	45
Tab N° 15 caractéristiques des reliefs d'Oued M'zab	46
Tab N° 16 caractéristiques des reliefs d'Oued Metlili	46
Tab N° 17 Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa	47
Tab N° 18 Caractéristiques statistiques des échantillons	48
Tab N° 19 Les caractéristiques empiriques de la loi de Gumbel	49
Tab N° 20 Les caractéristiques empiriques de la loi de Galton	49
Tab N° 21 Pluies journalières maximales fréquentielles	51
Tab N° 22 Intensités maximales en mm/h de durée t (h) et de période de retour T (an)	52
Tab N° 23 Temps de base Tb et temps de montée Tm (Oued M'zab)	56
Tab N° 24 Temps de base Tb et temps de montée Tm (Oued Metlili)	56
Tab N° 25 Coefficient de ruissellement de chaque sous bassin (Oued M'zab).....	57
Tab N° 26 Coefficient de ruissellement de chaque sous bassin (Oued Metlili).....	57
Tab N° 27 Coefficient d'abattement de chaque sous bassin (Oued M'zab).....	58
Tab N° 28 Coefficient d'abattement de chaque sous bassin (Oued Metlili).....	58
Tab N° 29 Coefficient de pointe de chaque sous bassin (Oued M'zab)	58
Tab N° 30 Coefficient de pointe de chaque sous bassin (Oued Metlili)	58
Tab N° 31 calcul des débits avec la formule de Rodier-Auvray (1988)	60
Tab N° 32 Caractéristiques de l'hydrogramme de crue d'Addaoued	62
Tab N° 33 Caractéristiques de l'hydrogramme de crue d'Addaoued	63

LISTE DES FIGURES

Fig. N° 1 Ecoulement de l'eau en ville suite à une pluie intense	5
Fig. N° 2 Représentation du Maillage des réseaux de rue	14
Fig. N° 3 Schéma représentant les différentes étapes poursuivies pour aboutir au modèle de Saint Venant	16
Fig. N° 4 Schéma de localisation de la wilaya de Ghardaïa	23
Fig. N° 5 Schéma structural de la wilaya	24
Fig. N° 6 Evolution de la population de la Wilaya de Ghardaïa	27
Fig. N° 7 Projection démographique selon l'Annuaire statistique 1994	28
Fig. N° 8 coupe schématique représente les différentes hypsométries	29
Fig. N° 9 La répartition de la moyenne des températures	31
Fig. N° 10 Direction des vents dominants	32
Fig. N° 11 vitesse maximale du vent	33
Fig. N° 12 humidité relative moyen en %	34
Fig. N° 13 Evaporation moyenne mensuelle (mm)	35
Fig. N° 14 Carte géologique locale	36
Fig. N° 15 Coupe géomorphologique schématique de la vallée de M'Zab	37
Fig. N° 16 Situation d'ensemble (vallée De M'zab)	38
Fig. N° 17 Situation d'ensemble (Oued Metlili)	40
Fig. N° 18 une carte représente la délimitation des principaux affluents du BV du M'Zab... ..	42
Fig. N° 19 délimitation des principaux affluents du BV du Metlili	43
Fig. N° 20 courbe hypsométrique d'Oued M'zab	45
Fig. N° 21 courbe hypsométrique d'Oued Metlili	46
Fig. N° 22 Ajustement graphique d'une loi de Gumbel	50
Fig. N° 23 Ajustement graphique d'une loi de Galton	50
Fig. N° 24 Courbe IDF de la station de Ghardaïa	53
Fig. N° 25 hydrogramme de crues d'Addaoued	62
Fig. N° 26 hydrogramme de crues du pont de centre-ville Metlili	63
Fig. N° 27 Cartographie des zones inondées	64
Fig. N° 28 Fenêtre principale de HEC-RAS	66
Fig. N° 29 sections transversales présente sur le levée topographique- zone d'Addaoued	67
Fig. N° 30 Fenêtre Base Geometry Data- la zone d'Addaoued (HEC-RAS)	67
Fig. N° 31 Les différents sections transversales - la zone d'Addaoued (HEC-RAS)	68
Fig. N° 32 Fenêtre Steady Flow Data - la zone d'Addaoued (HEC-RAS)	69

LISTE DES FIGURES

Fig. N° 33 Fenêtre Steady Flow Analysis - la zone d'Addaoued (HEC-RAS)	70
Fig. N° 34 Fenêtre Base Geometry Data - la zone Pont Cv Metlili	70
Fig. N° 35 Les différents sections transversales - la zone Pont Cv Metlili.....	71
Fig. N° 36 Fenêtre Steady Flow Data - la zone Pont Cv Metlili.....	72
Fig. N° 37 Fenêtre Steady Flow Analysis - la zone Pont Cv Metlili	72
Fig. N° 38 1.1 Simulation de crue sur la zone d'Addaoued (vallée du M'zab).....	73
Fig. N° 39 Simulation de crue sur la zone Pont Centre-ville (vallée du Metlili).....	73
Fig. N° 40 Extrait de la carte de plan du Ghardaïa avec les courbes de niveau.....	74
Fig. N° 41 Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décennale, centennale, millénaire de la région d'Addaoued (vallée du M'zab).....	75
Fig. N° 42 Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décennale, centennale, millénaire de la région de Pont de centre ville (Oued Metlili).....	75

INTRODUCTION

GENERALE

Les inondations font partie des catastrophes naturelles les plus dangereuses dans le monde. Les pertes humaines et économiques qui sont due 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 lies aux crues qui on ravagées les populations, c'est le cas de la crue d'octobre 2008 à Ghardaïa.

La vulnérabilité aux inondations a d'autant plus augmente 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 centre villes des grandes cités de chebkha du M'Zab (Ghardaïa et 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 (Fathellah,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 Stocks, qui régissent les écoulements. La modélisation de la crue, permet de décrire l'événement tel qu'il ses produits, avec un certain degré de tolérance, ainsi elle permet de cartographie les zones à vulnérabilité importantes face à ces événements (Fathellah,2009).

L'objectif de ce travail est d'établir des cartes de vulnérabilité aux inondations d'Oued M'Zab et d'Oued Metlili aux endroits les plus touchés par ces dernières inondations (octobre2008) . La réalisation de cette carte passe par plusieurs phases afin de déterminer le débit maximum de différentes fréquences sur Oueds M'Zab et Metlili. L'utilisation du logiciel HEC-RAS, nous a permet de déterminer les niveaux d'eau atteint 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 ArcGis nous a permet aussi d'interpoler et 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 modélisation hydrodynamique des écoulements à surface libre dans les villes sahariennes. Nous expliquerons les différentes approches adoptés lors des études d'inondations des villes, et nous illustrerons les modèles

hydrodynamiques, comme nous touchons la fonctionnement des eaux pluviales urbaines en condition climatique normale, Ecoulement dans le réseau de rues.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le modèle mathématique de Saint Venant. Les équations de Saint Venant régissent l'écoulement à surface libre.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le milieu physique de la wilaya de Ghardaïa et de la vallée du M'Zab et aussi la vallée de Metlili (plus les zones étudiés), contenant les aspects géographiques, géologiques et climatiques et socio-économiques.

Dans le quatrième chapitre, nous ferons une étude hydrologique sur les différents vallées (M'Zab et Metlili), contenant un étude sur le réseau hydrographique des bassins versants et leurs régime pluviométrique et notamment une étude de régime des crues particulier à ces régions.

Dans le cinquième chapitre, nous présenterons les zones inondables dans des zones précis sur les deux vallées (M'Zab et Metlili), par l'utilisation des différents logiciels (HEC-RAS - AUTOCAD -GLOBALE MAPPER -ARCGIS) .

A la fin, une conclusion générale contiendra faire une synthèse des travaux effectués. Avec les recommandations qui s'y rapportes.

*CHAPITRE 01 -
VULNERABILITE AUX
INONDATIONS DES VILLES*

1.1 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).

1.1.1 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 inclinés. 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.

1.1.1.1 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 à l'amont de la zone urbaine et l'eau entre alors dans la ville par les grandes avenues reliant le centre à 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 connaît : noyades, dégradations par remplissage (caves) ou par choc (façades), charriage de voitures et autres objets mobiles.

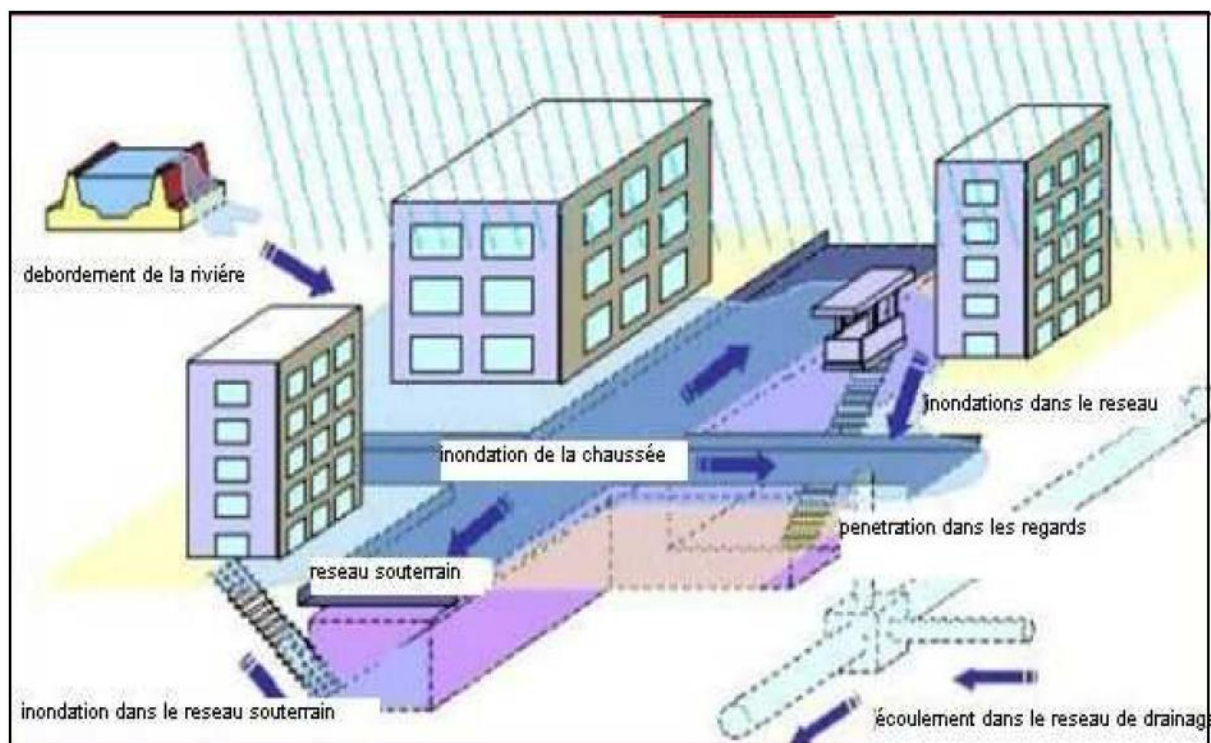


Fig. N° 1 Ecoulement de l'eau en ville suite à une pluie intense (Iwata M. et al, 2001)

Certaines actions anthropiques tendent à aggraver les conséquences en ville des fortes précipitations :

L'assèchement de marais en amont de la ville pour les transformer en terrain constructible, la suppression de bras morts ou de méandres de rivières et le nivellement de lacs diminue le volume naturel de rétention des bassins et augmente le volume d'eau ruisselant à l'amont des villes pour une pluie donnée (Fathallah,2009).

L'imperméabilisation des sols à l'amont et au sein de la ville limite fortement l'infiltration de l'eau qui avait auparavant tendance à rejoindre directement la nappe en sous-sol. Cela augmente ainsi les volumes d'eau disponibles en surface. De plus, cette imperméabilisation réduit la force du frottement du sol et conduit à une accélération des écoulements. Les hydrogrammes de crue sont alors concentrés : le débit de pointe augmente et le temps de concentration du bassin diminue.

De plus, la concentration d'hydrogramme est aggravée par le remplacement du réseau hydrographique naturel utilisant des chemins sinueux, très encombrés par un réseau d'assainissement surdimensionné et de pente confortable (Chocat,1997).

Les ouvrages d'évacuation des eaux des villes anciennes deviennent sous-dimensionnés au fur et à mesure de l'urbanisation car les volumes à transporter augmentent rapidement avec l'augmentation de population et de surface imperméabilisée (MIGNOT, Cemagref).

1.1.2 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».

A cette échelle, les différents bassins versants doivent être décrits. Une classification élémentaire des cours d'eau apparaît à ce stade :

- Les cours d'eau qui traversent la ville mais dont la gestion est effectuée à l'échelle régionale compte tenu de leur importance.
- Les cours d'eau dont une part significative du bassin versant appartient à la zone urbaine et dont les règles générales de gestion feront partie du plan général urbain.

A l'échelle du bassin versant, l'étude d'un cours d'eau traversant la ville pourra être limitée à la gestion du lit majeur en fonction de paramètres définis à l'échelle régionale alors que l'étude d'un bassin versant plus limité devra comporter l'organisation du système d'assainissement (règles de calcul), la répartition des différents types de "superstructures", incluant une estimation de leur vulnérabilité, en particulier, à partir des règles de construction.

A l'échelle du plan de quartier, l'estimation conjointe de l'aléa et de la vulnérabilité doit permettre d'envisager des scénarios de base reliés évidemment aux considérations hydrologiques générales mais aussi à des hypothèses de fonctionnement des infrastructures (encombrement des rues par exemple). Le plan d'urgence doit être élaboré à cette échelle, une cohérence étant assurée ensuite à l'échelle du bassin versant.

L'échelle du bâtiment fait appel aux initiatives individuelles : respect des règles, en particulier, au niveau des normes de construction mais aussi mesures pour limiter les dommages aux biens. Dans les travaux effectués dans ce mémoire, nous avons principalement considéré des quartiers traditionnellement touchés par des inondations avec des événements climatiques extrêmes ou les infrastructures qui jouent un rôle sont celles en surface (cours d'eau et voies de communication).

L'organisation spatiale des îlots bâtis est alors primordiale. Il semble que la représentation individuelle et précise de chaque rue est intéressante dès lors que l'urbanisation est dense, c'est à dire que la grande partie de l'écoulement se trouve au sein des rues. Ainsi, un maillage exclusif des rues et des jonctions en considérant les parcs ou places comme des zones d'élargissement de la rue (en modifiant si besoin est le coefficient de frottement) paraît adéquate. Par contre dans des zones où les bâtiments sont très écartés les uns des autres, tel dans les zones d'activité, certaines zones universitaires ou industrielles, il semble plus judicieux de se baser sur une description du terrain naturel et de représenter les bâtiments comme des obstacles conditionnant le cheminement de l'écoulement. (Programme Risques d'Inondation, CEMAGREF, 2004) Nous avons adopté deux démarches dans cette étude, on travaillera sur les zones d'habitat dense qui fait apparaître la rue comme vecteur principal des écoulements. Aussi nous s'intéresseront à une partie du domaine d'étude, qui est la palmeraie, où les habitations sont plus ou moins écartées dans certaines parties, et urbanisées anarchiquement dans d'autres (CEMAGREF, 2004).

1.1.3 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 un relèvement détaillé des sections en travers des rues.

Si la base de données est insuffisante, on s'appuiera sur des séries de profils en travers types des rues qui seront levés spécifiquement, ces profils en travers permettant en même temps de définir l'extension spatiale de la rue. Il sera dans ce cas aisé de définir le profil d'une rue entière en interpolant linéairement le profil entre deux sections levées. Le problème principal se situe alors au niveau des pentes qui pourront être faussées si le profil longitudinal de la rue est en réalité courbe (creux ou bosses) et si le MNT (modèle numérique des terrains) ne permet pas d'effectuer la correction nécessaire. Pour ce qui est des carrefours simples (intersection de deux rues), un traitement visant à conserver la présence des trottoirs au sein de la jonction et permettant un lissage entre les quatre sections de rues aux bords de la jonction a été créé car le MNT ne permettait pas de retrouver cette microtopographie de manière homogène sur l'ensemble de la zone étudiée. Enfin, les espaces complémentaires (carrefours complexes, places, etc.) devront être définis de manière complémentaire à partir de levés spécifiques ou de la base de données. Le coût d'une telle méthode tant en termes de topographie que de recoupement avec les informations complémentaires ne permet pas sa généralisation au-delà d'une zone très limitée (CEMAGREF, 2004).

1.2 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...

1.2.1 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.

Les approches peuvent être relativement conceptuelles, en considérant des sous bassins versants homogènes pour lesquels, on cherche à caler des paramètres (longueur moyenne d'écoulement, coefficient de rugosité...) ou plus mécanistes en calculant l'hydrogramme à l'exutoire résultant de la contribution de chaque parcelle indépendamment. La principale limite de ces modèles est qu'ils ne permettent pas de prédire les caractéristiques de l'écoulement (hauteur d'eau, vitesse) dans les différentes zones de la zone urbaine et qu'ils ne peuvent s'appliquer en cas de fort ruissellement de surface ou de débordement de réseau d'assainissement (Fathallah 2009).

1.2.2 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.

Dans ces configurations, la modélisation a en général pour but de représenter la dynamique de l'événement, c'est à dire de calculer les niveaux et vitesses de l'eau à tout instant, de suivre l'avancée du front et la dimension de la zone inondée et parfois de déterminer les hauteurs et vitesses maximales au cours d'un événement. Bien que les modèles hydrauliques soient largement employés pour simuler les écoulements dans des zones naturelles (rivières, plaines d'inondations...), leur application dans les zones urbaines n'est pas encore très répandue. En effet, les principales difficultés pour mettre en œuvre de tels modèles en milieu urbain sont:

1) La complexité de la zone urbaine à représenter topographiquement, du fait du grand nombre de structures complexes (caves, bâtis, jardins, murets...), d'obstacles, de gradients de cote du fond importants.

2) Les mécanismes d'écoulement complexes qui ont lieu (débordements de réseaux et introduction de l'eau dans les avaloirs, intrusion dans les bâtiments, charriage de véhicules)...

Pour ce qui est des modèles eux-mêmes, deux types principaux se dégagent : des modèles mécaniste (à base physique) et ceux conceptuels (ou partiellement conceptuels).

1.2.2.1 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).

- Les modèles qui conceptualisent les processus d'écoulement au sein de la zone. Contrairement aux modèles mécanistes, l'objectif des calculs utilisant ces méthodes n'est généralement pas de prédire l'évolution précise de l'inondation mais plutôt d'étudier la dynamique générale de l'événement. Ces modèles présentent par ailleurs généralement l'avantage d'une mise en œuvre simplifiée.

1.2.2.2 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).

Les équations traditionnellement utilisées en ruissellement urbain sont les équations de Saint Venant qui sont des simplifications des équations de Navier-Stokes destinées au calcul des écoulements dont la composante verticale est suffisamment faible par rapport aux composantes horizontales (vitesses dans le plan de la surface libre).

Les écoulements à simuler peuvent être majoritairement monodimensionnels, auquel cas le vecteur vitesse dans le plan sont relativement parallèles (par exemple l'eau s'écoulé suivant l'axe d'une conduite rectiligne d'un réseaux) ou bidimensionnels, lorsque les vitesses ne sont pas orientées parallèlement sur une section (par exemple en cas de changement de section de la rue). Une analyse préalable de l'événement à modéliser permet généralement de choisir entre un modèle mono ou bidimensionnel.

1.2.3 processus d'écoulement et leur représentation dans les modèles hydrauliques

Nous nous limiterons dans ce paragraphe à l'analyse des modèles mécanistes. Les méthodes numériques mécanistes de simulation des inondations urbaines ont des approches très diverses. Elles peuvent être classifiées de la façon suivante en fonction du type d'événement :

1. La grande majorité des études répertoriées modélisent l'effet du débordement de réseaux sur l'inondation de surface. La prise en compte du volume débordant du réseaux et atteignant les rues est plus ou moins détaillée mais la dynamique d'écoulement de surface n'est jamais bien reproduite.

2. Les modèles qui simulent l'inondation de surface seule, sans prendre en compte l'effet du réseaux d'assainissement. Ces méthodes considèrent que dès le début de l'inondation, le réseaux est saturé du fait des forts volumes d'eau de pluie tombant sur la zone urbaine. L'eau de surface peut alors provenir soit du débordement d'une rivière soit d'un écoulement provenant du bassin versant amont et calcule à partir d'un modèle hydrologique couplé ou découplé.

Certaines études ne représentent explicitement que le réseau de rues en surface ou a lieu l'inondation mais introduisent de même les avaloirs dans le modèle afin de prendre en compte les pertes de volume de la surface vers le réseau. Dans ce cas, les écoulements du réseau ne peuvent déborder vers la surface.

3. Les études les plus complètes proposent un couplage complet entre les deux niveaux d'écoulement : les écoulements dans le réseau d'assainissement et les écoulements a la surface de la ville. Les interactions entre les deux modèles sont alors plus ou moins détaillées et complexes.

La partie suivante analyse la prise en compte des différents processus dans le calcul de l'inondation.

1.2.3.1 Les apports d'eau

Les origines des inondations urbaines étudiées sont :

- Le débordement du réseau d'assainissement provenant soit du dépassement de sa capacité à proximité d'un regard et donc entraînant un débordement au sein de la ville, soit de l'incapacité d'un avaloir à collecter la totalité du volume d'eau présent dans une rue.

- Le débordement d'une rivière traversant la zone urbaine du fait d'un dépassement local de son débit de plein bord. Plusieurs méthodes de calcul de l'hydrogramme de débordement peuvent être considérées : soit la rivière est représentée au sein du domaine, les conditions limites du modèle sont alors simplement l'hydrogramme a l'amont de la rivière et le débordement est calculé directement par le code de calcul. Par exemple, une brèche dans une des berges peut-être simulée en abaissant soudainement ou progressivement la cote de la berge. L'autre méthode est de ne pas reproduire l'écoulement dans la rivière et d'imposer l'hydrogramme de débordement directement dans les rues avoisinant la brèche a représenter.

L'introduction dans le domaine étudié d'un hydrogramme de crue prenant naissance hors du domaine, a l'amont du bassin versant. L'origine de cet hydrogramme est généralement une forte pluie, auquel cas un calcul hydrologique permet de déterminer les débits d'entrée d'eau dans le réseau et / ou dans les rues en surface. Cependant d'autres processus peuvent être à l'origine de l'hydrogramme de crue entrant dans la zone urbaine, tels les typhons, les fortes marées ou fortes vagues.

De plus, dans la majorité des cas, la pluie tombe durant tout l'évènement sur la zone urbaine étudiée et s'il est pris en compte, le volume d'eau additionnel peut rejoindre directement le réseau et/ou tomber sur les mailles des rues en surface. Dans le cas où la pluie rejoint les rues en surface, la difficulté réside dans la modélisation du parcours de l'eau tombant sur les îlots ou les bâtiments. Ce volume d'eau peut en effet être redistribuée entièrement dans les rues présentes autour de l'îlot ou il peut se partager entre une partie qui rejoint le réseau à travers les gouttières et une partie qui se déverse dans les rues voisines.

1.2.3.2 Ecoulement dans le réseau de rues

Parmi les études répertoriées dans la littérature, trois approches permettant de représenter la surface de la zone urbaine peuvent être différenciées :

La première approche consiste à ne pas représenter le réseau de rues et les îlots en surface mais à utiliser un coefficient de porosité pour simuler l'effet du bâti sur l'écoulement. Le maillage du domaine se base alors sur le terrain naturel et au sein de chaque maille, un coefficient de porosité est ajouté pour représenter l'effet de la réduction de surface disponible pour l'écoulement dans la maille. Dans ce cas, aucune direction d'écoulement n'est prédéfinie et l'inondation est obligatoirement calculée à l'aide d'un modèle bidimensionnel.

La deuxième approche consiste à représenter la zone urbaine avoisinant un lieu de débordement de réseaux par un réservoir de forme plus ou moins détaillée.

La troisième approche consiste à représenter explicitement les rues et / ou îlots afin de calculer l'écoulement qui s'y développe à tout instant (Figure ci-dessous). Le réseau de rues peut être alors plus ou moins fin en fonction des études. Certains auteurs considèrent en effet les rues comme des canaux à section rectangulaire, en n'utilisant alors qu'une maille sur la section de rue. A l'opposé,

certain auteurs considèrent qu'il est indispensable de représenter les détails topographiques des rues tels les trottoirs et les caniveaux (ce qui augmente nettement la quantité de travail de prétraitement à réaliser). De plus certains auteurs ne représentent que les rues principales en groupant les rues secondaires avec les îlots alentours pour représenter des grands îlots (voir Figure ci-dessous à droite) (CEMAGREF,2004).

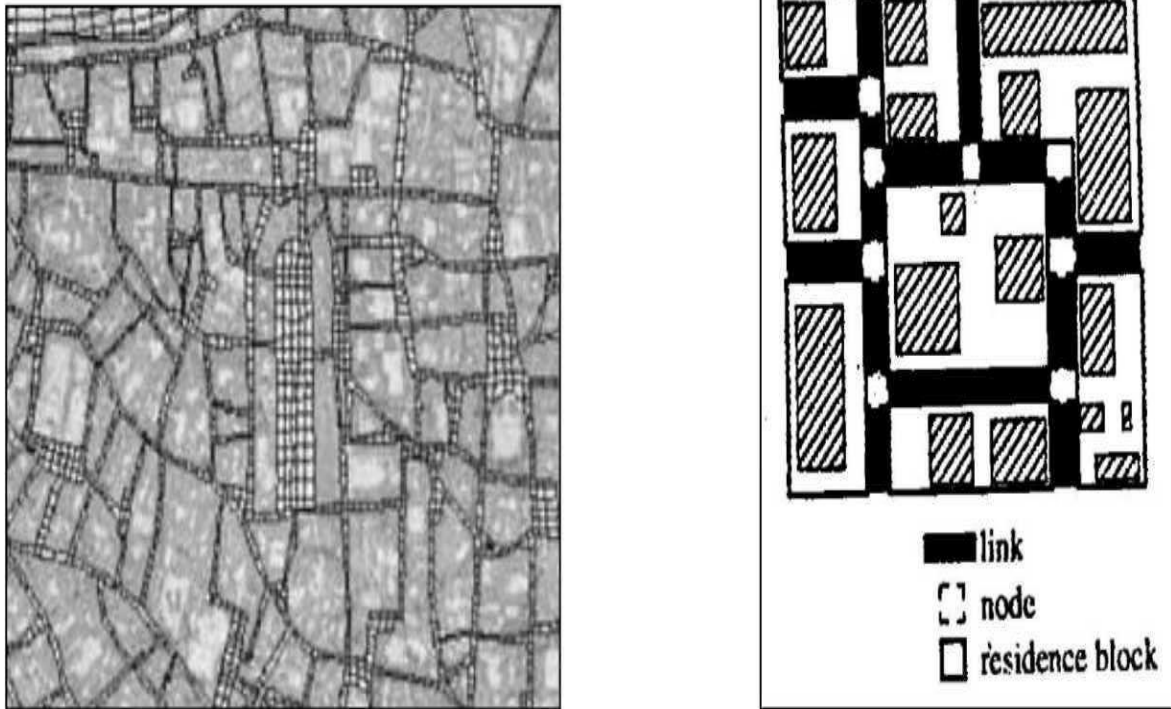


Fig. N° 2 Représentation du Maillage des réseaux de rue

Les modèles utilisés pour calculer les écoulements sont soit des modèles bidimensionnels, soit des modèles monodimensionnels avec des relations simples permettant le calcul de la répartition des débits aux jonctions.

En ce qui concerne la taille des mailles utilisées pour mailler le domaine, comme le rappellent Gourbesville et Savioli (2002), un compromis doit être fait entre des mailles très grandes qui tendent à simplifier fortement l'écoulement calculé et des mailles fines augmentant fortement le temps d'acquisitions des données et le temps de calcul. Djordjevic et al (1999) conseillent d'utiliser une taille de maille caractéristique de 1 à 2 mètres pour ne pas perdre les caractéristiques importantes de la surface. Schmitt et al (2004) utilisent environ 8 mailles par section de rue et la taille longitudinale de maille est systématiquement inférieure à la largeur de rue. Calenda et al, (2003) utilisent une maille par section de rue ayant pour longueur environ trois largeurs de rue.

Enfin, pour ce qui est du coefficient de résistance à l'écoulement qui modélise l'effet du frottement au fond et sur les façades ainsi que l'effet des obstacles et irrégularités des sections de rues non représentées topographiquement, les valeurs de coefficient de Manning utilisées par les différents auteurs dans les rues varient fortement.

CHAPITRE 02 - MODELE
MATHEMATIQUE DES
CRUES

2.1 Modèle mathématique de saint venant

Les équations fondamentales qui décrivent les écoulements de fluides sont dans leur formulation générale très complexe et non linéaire, malgré la restriction à l'étude des seuls écoulements de type newtonien. Un certain nombre d'approximations a été mis et s'avère aujourd'hui valable pour des écoulements gouvernés par les équations de Navier - Stokes.

Le niveau d'approximation le plus élevé est bien sûr représenté par les équations de Navier - Stokes elles-mêmes sans aucune modification (Ider, 2004).

Ce niveau est cependant encore parfois aujourd'hui hors d'atteinte pour les configurations réalistes et d'intérêt pratique que sont les écoulements à haut nombre de Reynolds, à cause de la taille limitée en mémoire et des vitesses de calcul des ordinateurs actuels. Les écoulements turbulents contiennent un vaste domaine d'échelles en espace et en temps dont la résolution détaillée nécessite un très grand nombre d'opérations.

Les équations de Saint Venant 2D (1871) sont destinées à prédire l'évolution temporelle et spatiale d'un écoulement majoritairement bidimensionnel, c'est à dire dont les vitesses verticales sont faibles par rapport aux vitesses dans le plan horizontal. La principale simplification apportée dans les équations de Saint Venant par rapport aux équations de Navier Stokes provient en effet de l'hypothèse d'une répartition hydrostatique des pressions dans l'écoulement. Cette hypothèse simplificatrice est valable pour des écoulements horizontaux sous certaines conditions que l'on supposera vérifiées dans l'ensemble des écoulements étudiés. Ces conditions sont des accélérations verticales faibles devant la pesanteur, des hauteurs d'eau grandes par rapport aux irrégularités du fond, des rayons de courbures des lignes de courant dans un plan horizontal importants, des faibles pentes de la surface libre. Les équations de Saint Venant sont alors obtenues en intégrant sur la verticale les équations de Navier Stokes écrites sous les hypothèses précédentes, suivant l'axe vertical.

Les équations régissant l'écoulement a surface libre sont exprimées par le système suivant:

Equation de continuité :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Equations de quantité de mouvement :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f_x + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (2) \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + f_y + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \quad (3) \\ \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + f_z + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) \quad (4) \end{array} \right.$$

Nous allons formuler le système d'équations de Saint Venant en partant des équations générales de Navier Stokes. Les différentes étapes sont résumées sur la figure suivante :

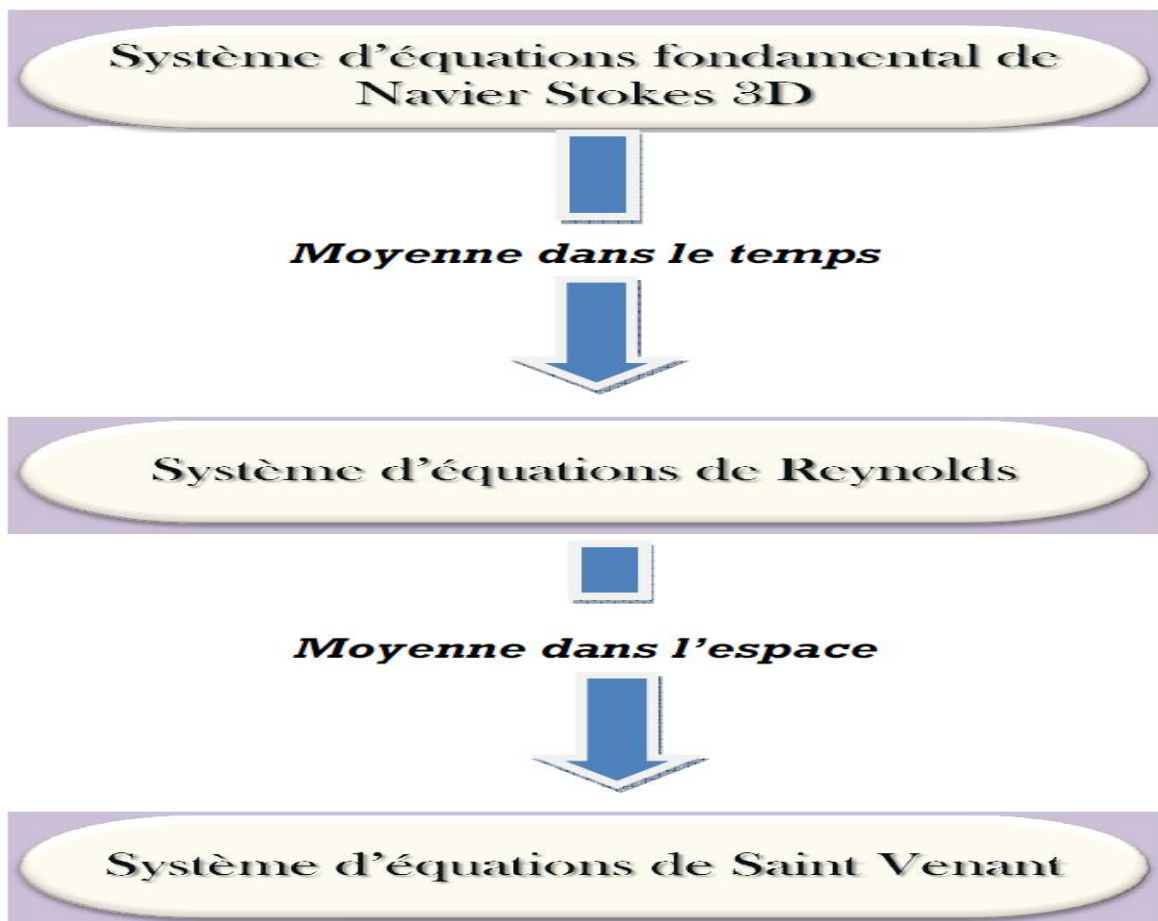


Fig. N° 3 Schéma représentant les différentes étapes poursuivies pour aboutir au modèle de Saint Venant

2.2 Détermination de système d'équations de Reynolds

L'idée de Boussinesq et Reynolds était d'oublier le mouvement instantané du fluide, trop complexe, et chercher des équations prédisant simplement le mouvement moyen. Ce tout facile, même si l'on connaît l'équation de Navier Stokes car le problème n'est pas fermé au sens où l'on ne connaît pas a priori la relation liant les contraintes de Reynolds aux quantités moyennes (problème de passage du particulier aux régissant les éléments d'un système, on ne peut déduire simplement les lois gouvernant l'ensemble du système) (Lesieur, 1994; Candel, 2001).

Les équations du mouvement moyen s'obtiennent en introduisant la décomposition de Reynolds dans les équations instantanées puis en moyennant dans le temps.

La quantité $g(x, y, z, t)$ peut être décomposée en deux parties distinctes de la manière suivante : $G(x, y, z, t) = \bar{G}(x, y, z, t) + g(x, y, z, t)$

Tel que : $\bar{G}(x, y, z, t)$ est la partie moyenne

$g(x, y, z, t)$ est la partie fluctuante.

La Vitesse et la pression sont traitées comme des fonctions aléatoires de l'espace et du temps, dont nous décomposons les valeurs instantanées en :

$$\begin{cases} U_i = \bar{U}_i + u_i & (5) \\ P = \bar{P} + p & (6) \end{cases}$$

En moyennant les termes des vitesses dans le temps, on a :

$$\bar{U}_i = \frac{1}{T} \int_0^T U_i dt \quad (7)$$

$$u_i = \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt \quad (8)$$

Par définition, les fluctuations sont centrées, de sorte que l'on a identiquement :

$$\bar{u}_i(x_i, t) = 0 \quad (9)$$

$$\bar{p}(x, t) = 0 \quad (10)$$

Où \bar{U}_i, \bar{P} : Vitesse et pression moyennes indépendantes du temps.

U_i, P : Partie fluctuante de la vitesse et de la pression.

2.2.1 Equation de continuité

Après décomposition des vitesses, on a :

$$\frac{\partial(\bar{U} + u)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{V} + v)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{W} + w)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

L'opérateur de moyenne d'ensemble applique à cette équation fournit la relation suivante :

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

2.2.2 Equation de quantité de mouvement

En moyennant les termes des équations, le système d'équations devient :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = 0 \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \bar{f}_x + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \bar{f}_y + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} \right) \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \bar{W}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{W}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \bar{f}_z + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \bar{w}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z} \right) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Donc le tenseur de Reynolds sera :

$$\tau = \rho \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} & \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} & \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \\ \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} & \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} & \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} \\ \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial x} & \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial y} & \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z} \end{bmatrix}$$

2.3 Modèle mathématique de Saint Venant 2d

Un autre type de loi de conservation est celui de Saint Venant. Ce système, régissant l'écoulement à surface libre, dérive des lois de la mécanique des fluides. Il est obtenu en intégrant les équations de Navier Stokes sur la verticale, moyennant les hypothèses formulées par Barre de Saint venant en 1871 dont celle de la pression.

Le modèle de saint venant est appelé également : modèle des eaux peu profondes ou équations des ondes longues.

Pour établir le modèle de Saint Venant ,il y a lieu de moyenner les équations de Reynolds

sur la verticale, par intégration depuis le fond jusqu'à la surface libre.

2.3.1 Champs d'application

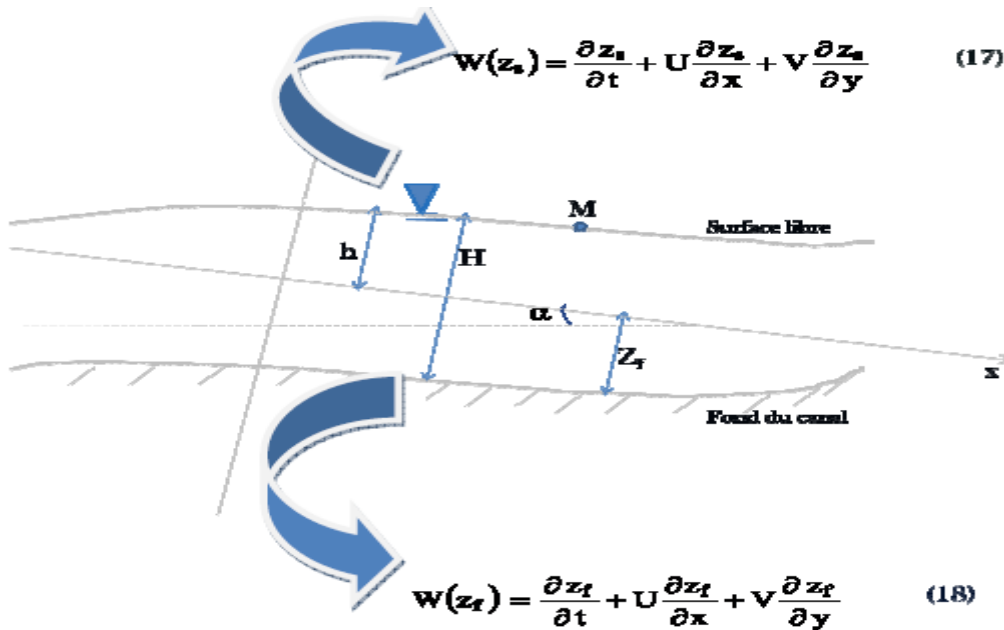
Le modèle de Saint Venant 2D est souvent appliqué dans

- L'étude des écoulements dans les plaines.
- L'étude des écoulements dans rivières peu profonde.
- L'étude des estuaires ou les cotes marines.

2.3.2 Hypothèses de Saint Venant

- La profondeur de l'écoulement est faible devant la largeur de canal.
- La pression est hydrostatique.
- La variation de la masse volumique de l'eau est négligeable.
- La composante verticale de la vitesse W ainsi que ces variations (spatiales et temporelles) sont faibles.
- Les variations verticales des deux composantes horizontales U et V sont faibles.
- Faible pente du fond du canal.
- Concernant les forces de volumes, nous considérons que les forces rotationnelles de Coriolis et centrifuge négligeables devant la force de gravité.

2.3.2.1 Les conditions cinématiques



2.3.2.2 Règle d'intégration de Leibnitz

Pour intégrer ces équations aux dérivées partielles, on utilise la règle de Leibnitz

$$\begin{aligned} H \int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial f}{\partial t} dz &= H \frac{\partial \bar{f}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_f}^{z_s} f dz + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial t} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial t} \\ &= \frac{\partial H \bar{f}}{\partial t} + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial t} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial t} \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H \int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial f}{\partial x} dz &= H \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_f}^{z_s} f dz + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial x} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial x} \\ &= \frac{\partial H \bar{f}}{\partial x} + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial x} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial x} \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H \int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial f}{\partial y} dz &= H \frac{\partial \bar{f}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} f dz + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial y} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial y} \\ &= \frac{\partial H \bar{f}}{\partial y} + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial y} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial y} \quad (21) \end{aligned}$$

$$H \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} = f(x, y, z_s) - f(x, y, z_f) \quad (22)$$

Le développement de l'équation de continuité en utilisant la règle de Leibnitz donne :

$$\begin{aligned} &\int_{z_f}^{z_s} \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial z} \right) dz \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_f}^{z_s} \bar{U} dz + \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_f}^{z_s} \bar{V} dz + \left[\bar{U}(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial t} + \bar{V}(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial y} - \bar{W}(x, y, z_f) \right] \\ &\quad - \left[\bar{U}(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial x} + \bar{V}(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial y} - \bar{W}(x, y, z_s) \right] \quad (23) \end{aligned}$$

Où,

$$\bar{U} = \frac{1}{H} \int_{z_f}^{z_s} \bar{U} dz \quad (24)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{H} \int_{z_f}^{z_s} \bar{V} dz \quad (25)$$

Donc l'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H\bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{V}}{\partial y} = 0 \quad (26)$$

Pour les équations de conservation de la masse, on aura :

$$\begin{cases} \frac{\partial H\bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial H\bar{U}^2}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{U}\bar{V}}{\partial y} = g \sin \alpha (z_s - z_f) - Hg \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial H\bar{\tau}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{\tau}_{xy}}{\partial y} + \tau_x^f - \tau_x^s \right) \\ \frac{\partial H\bar{V}}{\partial t} + \frac{\partial H\bar{U}\bar{V}}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{V}^2}{\partial y} = -Hg \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial H\bar{\tau}_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{\tau}_{yy}}{\partial y} + \tau_y^f - \tau_y^s \right) \end{cases} \quad (27)$$

Où,

$$\tau_x^f = \bar{\tau}_{xx}(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial x} + \bar{\tau}_{xy}(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial y} - \bar{\tau}_{xz}(x, y, z_f)$$

sont les contraintes de fond et ;

$$\tau_x^s = \bar{\tau}_{xx}(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial x} + \bar{\tau}_{xy}(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial y} - \bar{\tau}_{xz}(x, y, z_s)$$

Sont les contraintes de vent.

Les contraintes tangentielles sont exprimées ci-dessous :

$$\begin{cases} \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} - \rho \bar{u}^2 = \bar{\tau}_{xx} \\ \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} - \rho \bar{u}\bar{v} = \bar{\tau}_{xy} \\ \mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} - \rho \bar{v}^2 = \bar{\tau}_{yy} \end{cases}$$

2.3.3 Modélisation de turbulence

En 1973, **J. KUIPERD** et **C. BVREUGDENHIL**, ont proposé l'hypothèse selon laquelle, dans un régime d'écoulements turbulent, pour une profondeur d'eau constante les contraintes effectives des équations (27) et (28), sont données par les relations suivantes :

$$\frac{1}{\rho H} \left(\frac{\partial H\bar{\tau}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{\tau}_{xy}}{\partial y} \right) = \nu_T \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right) \quad (29)$$

$$\frac{1}{\rho H} \left(\frac{\partial H\bar{\tau}_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial H\bar{\tau}_{yy}}{\partial y} \right) = \nu_T \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) \quad (30)$$

Où,

$$v_T = v_0 + v_t \quad (31)$$

Avec V_0 : viscosité cinématique de l'eau et V_t : viscosité turbulente donnée par l'expression :

$$v_t = C_\mu H u^* \quad 0,2 < C_\mu < 0,4$$

Et u^* : vitesse de frottement, C_μ : coefficient semi empirique :

Et aussi :

$$\begin{cases} \tau_x^f = \frac{\rho g}{C^2} \bar{U} (\bar{U}^2 + \bar{V}^2)^{\frac{1}{2}} & (32) \\ \tau_y^f = \frac{\rho g}{C^2} \bar{V} (\bar{U}^2 + \bar{V}^2)^{\frac{1}{2}} & (33) \end{cases}$$

Les équations de saint venant bidimensionnelles seront comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{U}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{V}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial H \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{U}^2}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{U} \bar{V}}{\partial y} = g \sin \alpha (z_s - z_f) - H g \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{g}{C^2} \bar{U} (\bar{U}^2 + \bar{V}^2)^{\frac{1}{2}} + v_T H \left(\frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial H \bar{V}}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{U} \bar{V}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{V}^2}{\partial y} = -H g \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{g}{C^2} \bar{V} (\bar{U}^2 + \bar{V}^2)^{\frac{1}{2}} + v_T H \left(\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial y^2} \right) \end{cases}$$

***CHAPITRE 03 -
PRESENTATION DU
CADRE GENERAL DE LA
ZONE 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 hydroclimatologiques et géomorphologiques qui peuvent avoir une influence directe ou indirecte sur les modalités 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 étudiées.

3.1 Présentation de la wilaya

3.1.1 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° 30' et 33°2' de latitude nord et à 2°3' à 3°45' de longitude.

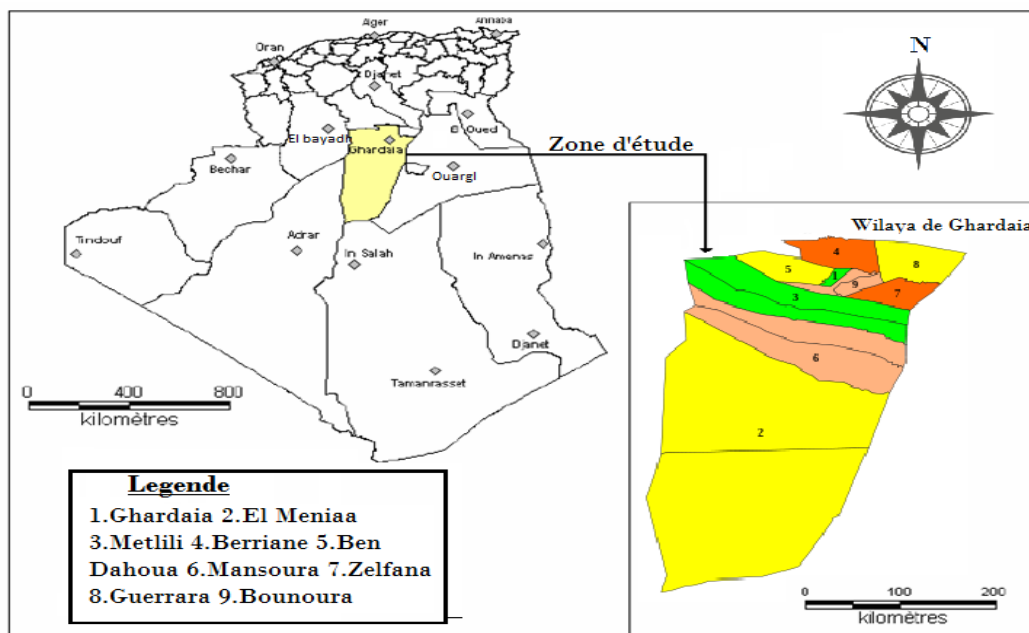


Fig. N° 4 Schéma de localisation de la wilaya de Ghardaïa (BG-ENHPC Juin, 2000)

3.1.2 Les régions naturelles de la wilaya

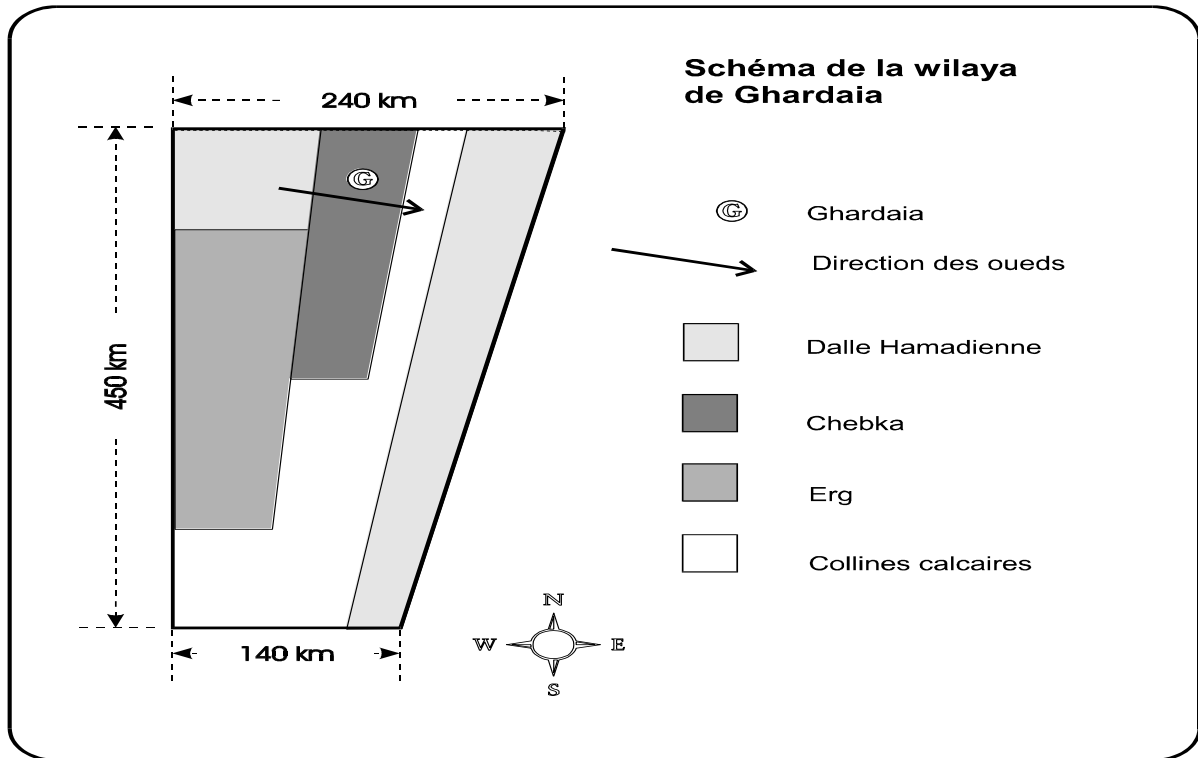


Fig. N° 5 Schéma structural de la wilaya (BG-ENHPC Juin,2000)

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 hamadienne, 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 (BG-ENHPC Juin,2000).

3.1.3 Situation régionale de la ville de GHARDAIA

La ville de GHARDAIA est limitée par :

3.1.3.1 Les limites (daïras)

- A l'Est par le territoire de ZELFANA et GUERRARA.
- Au Sud par le territoire de METLILI.
- Au Nord par le territoire de BERRIANE.
- A l'Ouest par le territoire de la wilaya de LAGHOUAT

3.1.3.2 Les limites (wilayas)

La wilaya de Ghardaïa est limitée de :

- Au nord par la wilaya de Laghouat.....200 km.
- Au nord-est par la wilaya de Djelfa300 km.
- À l'est par la wilaya d'Ouargla200 km.
- Au sud par la wilaya de Tamanrasset.....1470 km.
- Au sud-ouest par la wilaya d'Adrar400 km.
- À l'ouest par la wilaya d'El-Bayad350 km.

3.1.3.3 Superficie

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

Tab N° 1 quelque commune avec la surface (METTAS,2010)

3.1.3.4 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 (METTAS,2010).

3.1.3.5 Aéroport

La Wilaya dispose de deux aérodromes Ghardaïa – Noumérat et El Ménéa, dont le premier est situé dans la vallée. Leurs infrastructures se composent de :

Aérodrome de Ghardaïa : Piste principale 3.100 X 60 m, piste secondaire 2.400 x 45, aérogare (capacité) : 244 passages/jours (METTAS,2010).

3.1.4 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.

Population	totale	agglomérée	éparse	solde migratoire	Taux de croissance
1966	93 122	89 547	3 575		
1977	146 735	142 670	4 065	+744	4,27 %
1987	215 950	208 125	7 825		3,89 %

Tab N° 2 Evolution de la population de 1966 à 1987 (METTAS,2010)

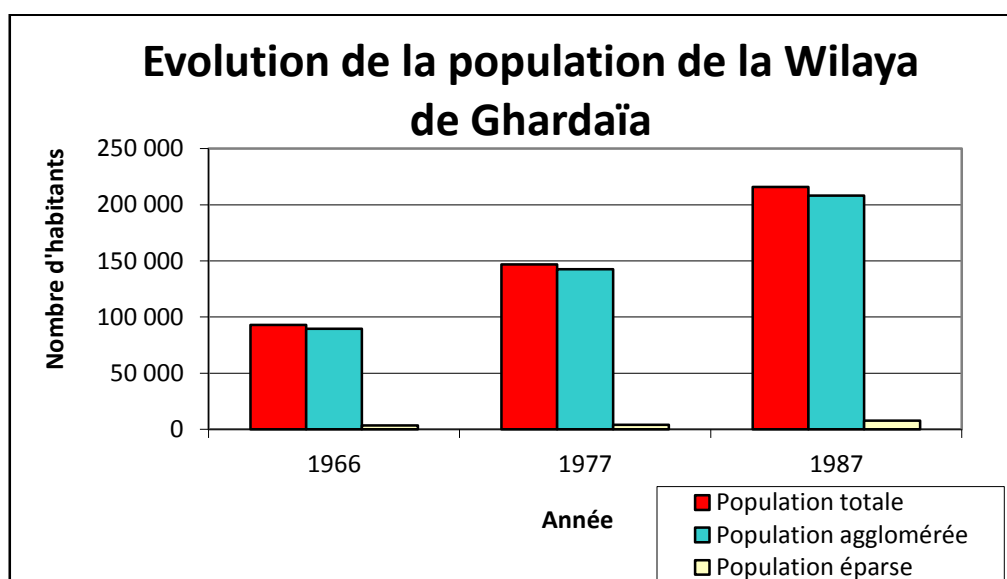


Fig. N° 6 Evolution de la population de la Wilaya de Ghardaïa (METTAS,2010)

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

Tab N° 3 Projection démographique

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

Tab N° 4 Projection démographique selon "Annuaire statistique" 1994

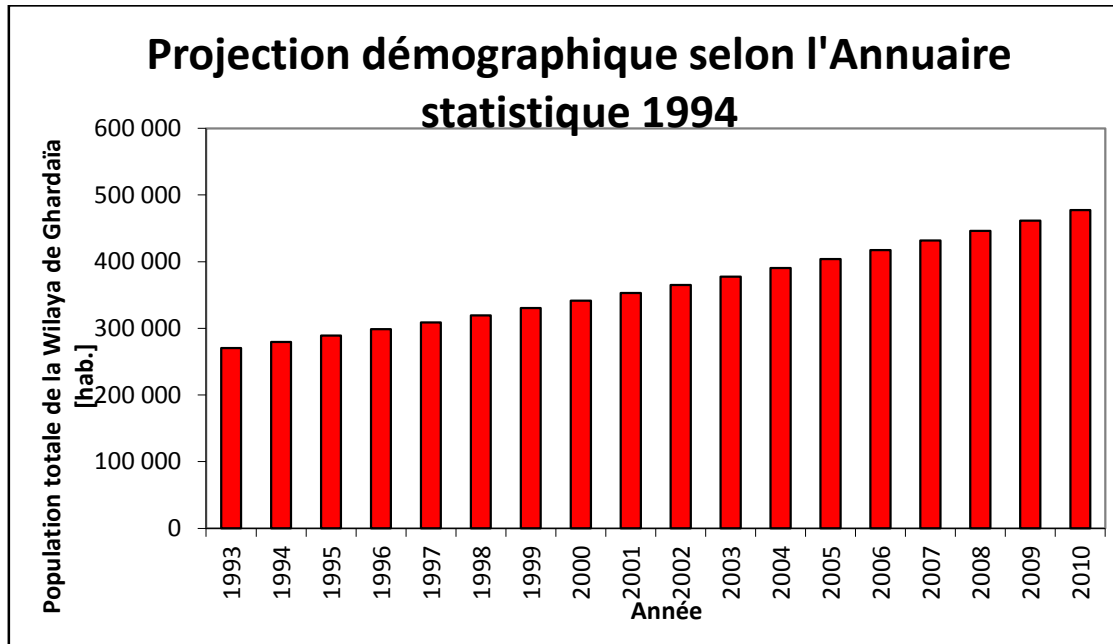


Fig. N° 7 Projection démographique selon l'Annuaire statistique 1994

3.1.5 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.

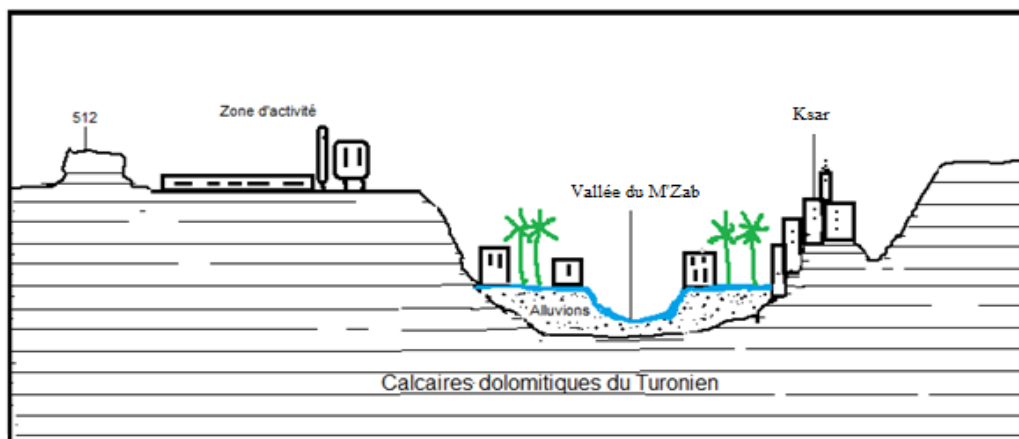


Fig. N° 8 coupe schématique représente les différentes hypsométries (OULED BELKHEIR,2014)

3.1.6 Aspect climatologique

3.1.6.1 Présentation de la station climatologique

Cette synthèse climatique, s'appuie sur les données climatiques de la station de Noumerat (ONM-Ghardaïa), située au voisinage de la zone d'étude, sur une série allant du 1978-2012.

wilaya	Ghardaïa
station météorologique	605660 (DAUG)
Latitude	32,4 N
Longitude	3,81 E
Altitude	468 m

Tab N° 5 coordonnées de la station météorologique (ONM-Ghardaïa)

3.1.6.2 Analyse de la température

Elle est marquée par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver.

La période chaude commence au mois de Mai et dure jusqu'au mois de Septembre.

La température moyenne enregistrée au mois de Juillet est de 33,3 °C, le maximal absolu de cette période a atteint 40.1 °C.

Pour la période hivernale, la température moyenne enregistrée au mois de Janvier ne dépasse pas 12.4 °C, le minimal absolu de cette période a atteint 6.6 °C.

Mois	T.max	T.min	T.moy
Janvier	18.1	6.6	12.4
Fév	15.3	9.7	12.5
Mars	21.7	10.1	15.9
Avril	25.7	13.6	19.7
Mai	32.6	19.3	26.0
Juin	39.5	24.7	32.1
Juillet	40.1	26.5	33.3
Aout	40,1	27.0	33.6
Septembre	36.6	23.8	30.2
Octobre	29.7	18.6	24.2
Novembre	22.0	9.7	15.9
Décembre	16.4	6.0	11.2
M, annuelle	28,15	16,3	22,25

Tab N° 6 Données de température de la région (1990-2009) (BG-ENHPC Juin,2000)

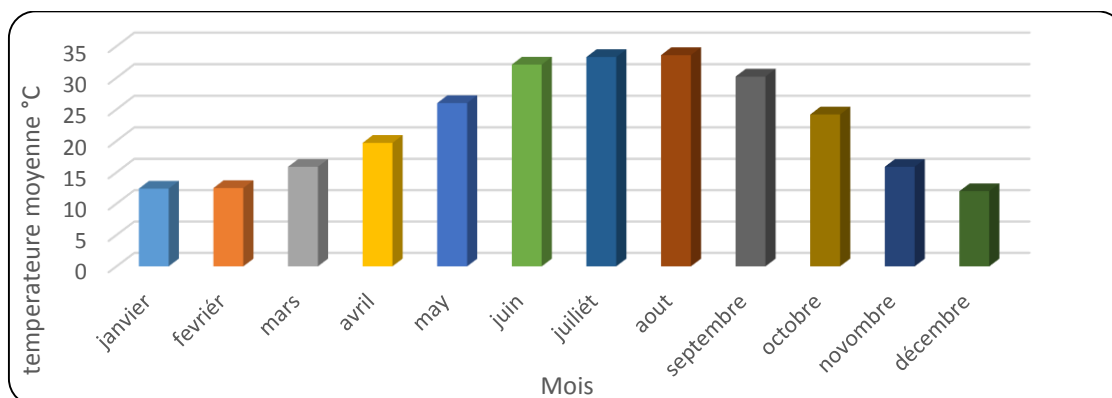


Fig. N° 9 La répartition de la moyenne des températures

3.1.6.3 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 observés entre 2004-2014.

Les vents d'hiver sont froids, secs, 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 %.

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		

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

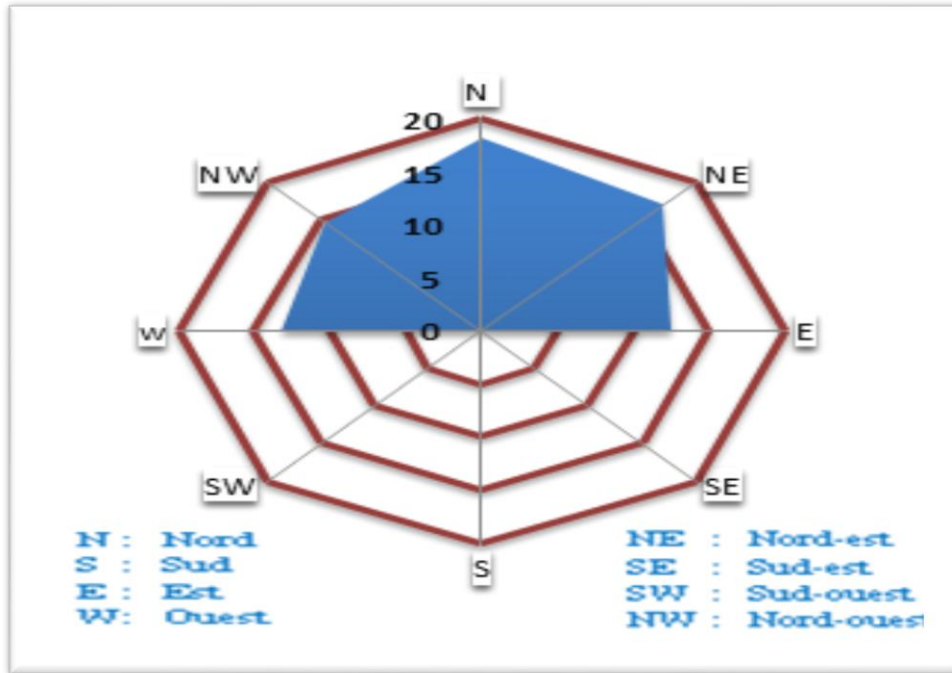


Fig. N° 10 Direction des vents dominants (Rose des vents)

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

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

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

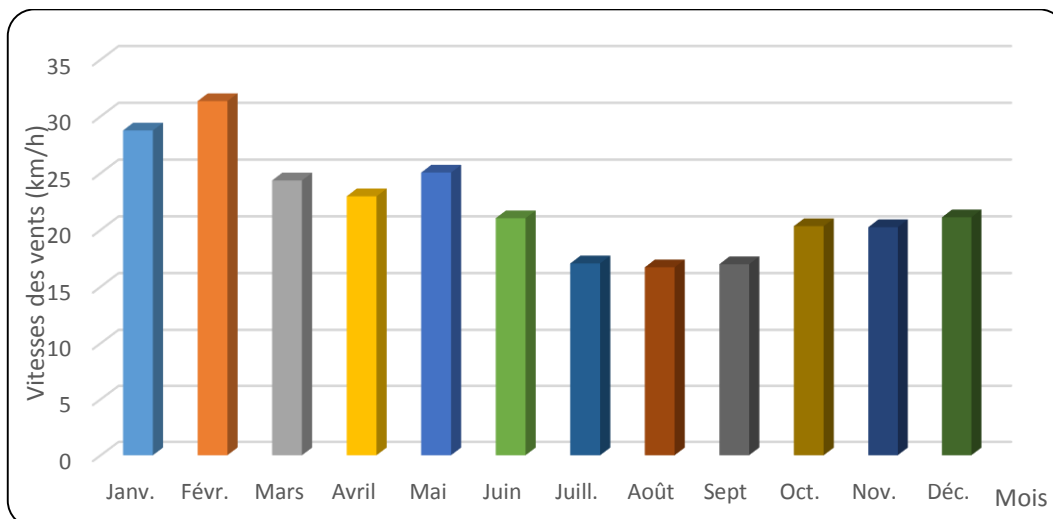


Fig. N° 11 vitesse maximale du vent

3.1.6.4 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.

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

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

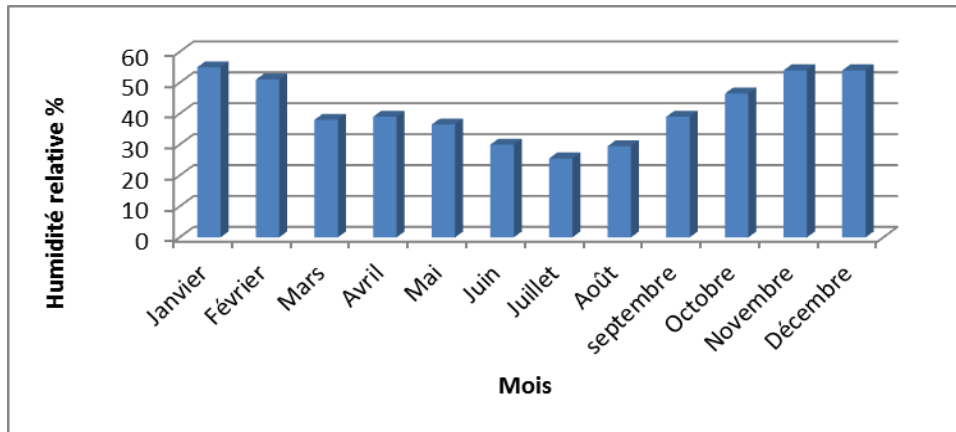


Fig. N° 12 humidité relative moyen en %

3.1.6.5 Evaporation

L'évaporation est mesurée journalièrement sur le bac type COLORADO de la station de Ghardaïa (1988,2005) (BENADDAGhardaïa,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 :

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

Tab N° 10 Evaporation moyenne mensuelle (mm) (BENADDA Ghardaïa,2012)

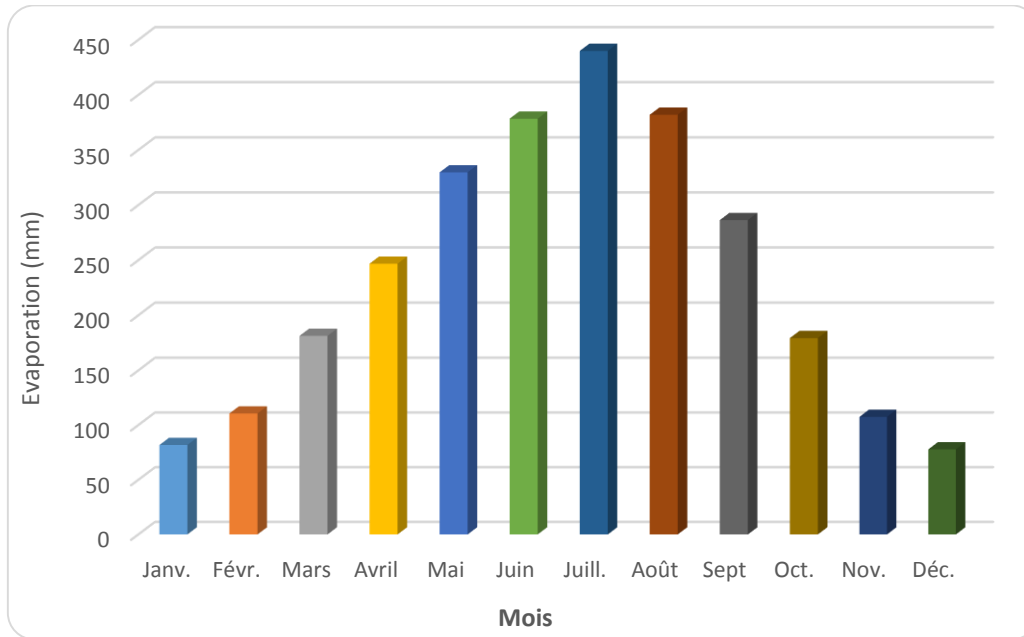


Fig. N° 13 Evaporation moyenne mensuelle (mm)

3.1.7 Aspect Géologique

L'ensemble géomorphologique dans lequel s'inscrit cette région est un plateau rocheux dont l'altitude varie entre 300 et 800 mètres. Il s'agit d'un plateau crétacé (cm-4) formé par les calcaires durs du Turonien (T-6). Le paysage est donc caractérisé par une vaste étendue pierreuse ou affleure une roche nue de couleur brune et noirâtre. Ce plateau a été marqué par la forte érosion fluviale du début du Quaternaire qui a découpé dans sa partie sud des buttes à sommet plat et a façonné des vallées. Cet ensemble se nomme AL-SHABKA, "filet", à cause de l'enchevêtrement de ses vallées.

L'oued M'Zab traverse ce filet de 38000 km² du nord-ouest vers le sud-est. Le lit des oueds, qui coulent que très rarement, est constitué de sables alluviaux et éoliens. La vallée du M'Zab atteint, à hauteur de Ghardaïa, une altitude de 500 mètres.

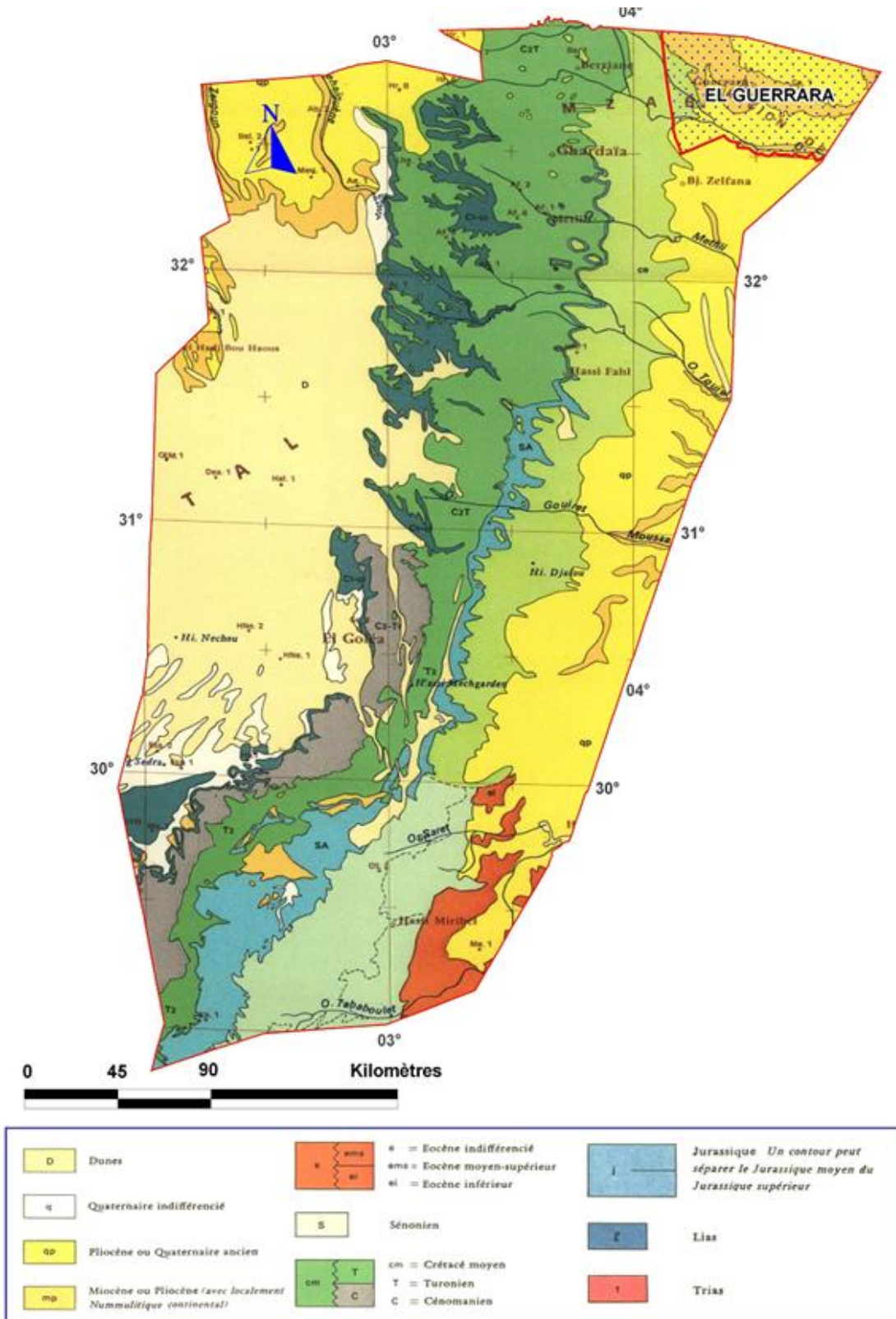


Fig. N° 14 Carte géologique locale (ANRH.2010)

- Les périodes intermédiaires (flux ou reflux de la mer) ont donné des dépôts lagunaires : argiles à gypse.
- Un réseau des vallées conforme à la topographie générale s'ordonne autour d'axes Nord - Ouest Sud - Est, grossièrement orthogonal aux lignes de relief qu'il traverse. Ces vallées se sont creusées à des époques où le réseau hydrographique était beaucoup plus actif qu'il ne l'est aujourd'hui.
- Du fait de la structure des terrains (alternance de zones dures et de zones plus tendres), on a des vallées à versants raides taillées dans les calcaires et des fonds de vallée plats. Cette disposition a permis le développement d'un réseau hydrographique très ramifié constituant un dédale de vallées très rapprochées ou dayates qui est la caractéristique de la chebka (BG-ENHPC Juin,2000).

3.1.8 Aspect Géomorphologique

Le relief de la wilaya est assez peu mouvementé. La bordure Est ne dépasse pas la cote 200. Dans le quart Nord - Ouest qui comprend la chebka, les altitudes s'étagent entre 200 et 600 mètres. L'altitude moyenne de la wilaya est de 468 mètres (BG-ENHPC Juin,2000).

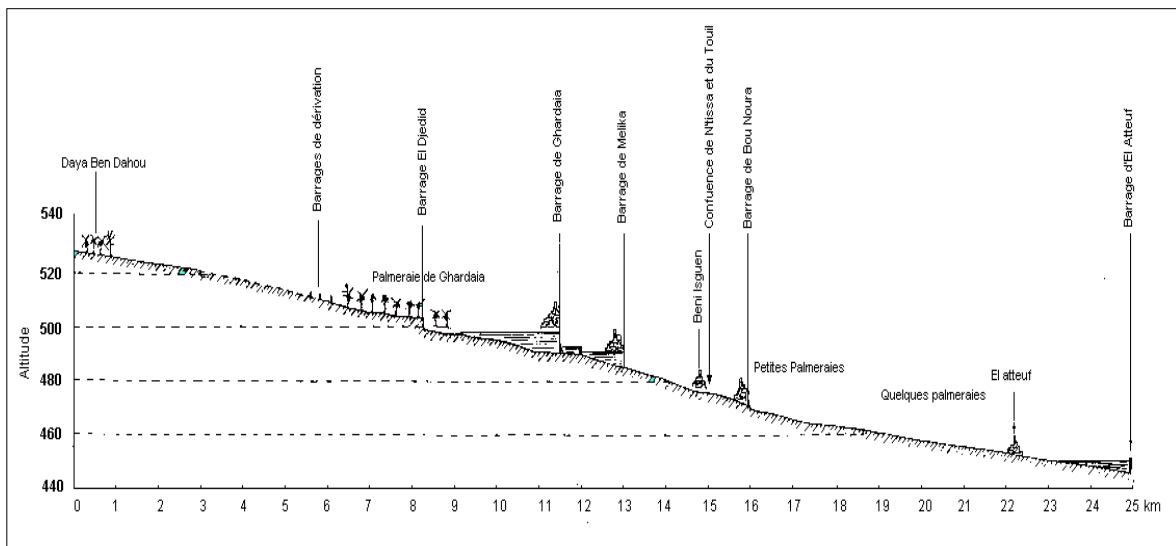


Fig. N° 15 Coupe géomorphologique schématique de la vallée de M'Zab (OULED BELKHEIR,2014)

3.2 Présentation des sites d'intervention

3.2.1 Bassin versant de M'ZAB (Oued M'zab)

La vallée du M'Zab à laquelle se rattache notre étude, est la plus importante des zones habitées de la wilaya, elle est située à l'enceinte du bassin versant.

L'oued M'Zab prend naissance à 7 km au Nord-Ouest de Ghardaïa, au point où se rejoignent trois oueds en provenance du secteur Ouest / Nord-Ouest; les oueds El Abiod et Lahdhira sont les plus importants (longueurs de 50 à 60 km), l'oued Argdeine est plus local. (voir Figure 13)



Fig. N° 76 Situation d'ensemble (vallée De M'zab) (Google Earth)

A partir de Ghardaïa, l'oued M'Zab prend la direction générale Ouest - Est sur 160 km et va se perdre dans la Sebket Safioun, à la cote 110, à 30 km au Nord de Ouargla.

La zone de l'étude s'étend sur 30 km environ le long de l'oued, 10 km à l'amont et 20 km à l'aval du point origine. Elle occupe une bande variant en largeur de 2 à 5 km représentant en tout une surface maximale de l'ordre de 70 à 80 km².

Tout à l'amont, les importants oueds Lahdhira et El Abiod n'en forment plus qu'un qui est rejoint, moins de deux kilomètres plus bas, en rive droite, par l'oued Argdeine plus modeste et par le chaabet Inireze en rive gauche. C'est ce point que l'on a pris comme origine de l'oued M'Zab. Deux kilomètres en aval, l'oued Touzouz, long de 6 km environ, rejoint l'oued principal en rive droite (ROCHE.1996).

Dans toute cette région, les lits des oueds sont relativement larges, de l'ordre du kilomètre. Dans cette quasi - plaine, entre les oueds Lahdhira et Argdeine, l'agglomération de Dhayet Ben Dhahoua et sa palmeraie ont été érigées à partir du 19ème siècle par des nomades se sédentarisant et constituent ainsi la seule implantation non mozabite de la région. La ville s'est récemment notablement développée dans le cadre des activités liées aux champs pétrolifères et de la zone de Hassi Messaoud en particulier (ROCHE.1996).

Le confluent des oueds M'Zab et Touzouz marque le début de la palmeraie de Ghardaia, plaine semi -naturelle où subsistent les vestiges des digues historiques qui alimentent encore partiellement un réseau d'irrigation ingénieux dont il sera à nouveau question plus loin. La palmeraie abrite les maisons d'été des gens de Ghardaia entre lesquelles s'est glissée une urbanisation éparse qui la ronge.

La semi-plaine qui suit la palmeraie est, elle totalement urbanisée de façon dense sur une largeur de l'ordre du kilomètre. Vient alors, en rive droite, Ghardaia ksar, la vieille ville sur sa colline.

La vallée se resserre ensuite avec, la digue de Melika qui barre l'oued, Melika ksar en rive gauche et Béni Isguen précédée de ses quartiers urbains neufs en rive droite. La palmeraie de Béni Isguen se situe sur l'oued N'Tissa, affluent de rive droite de l'oued M'Zab et barré de deux digues traditionnelles.

Presque en face du confluent, on trouve Bounoura ksar avec ses quartiers neufs en contrebas et sa modeste palmeraie.

Les dix kilomètres qui suivent sont occupés par la palmeraie de El Atteuf tout en longueur, parsemée d'habitations sur les deux rives. El Atteuf ksar se présente à mi-parcours de sa palmeraie.

Tout à l'aval, la digue historique d'El Atteuf est suivie d'une vaste zone humide où stagnent les eaux de l'oued qui, en période sèche, sont constituées avant tout par les rejets de l'amont.

La zone habitée le long de l'oued affecte ainsi l'aspect d'une longue bande orientée Nord-Ouest Sud - Est. Elle est traversée en son centre par la route nationale N°1 qui vient du Nord, traverse l'oued au pont de Bounoura et se poursuit en s'infléchissant vers le Sud-Est. A environ 20 km, au Sud, un embranchement sur la RN 1 conduit à l'aérodrome tout proche de Ghardaïa-Noumerat. C'est le long des dix premiers kilomètres de ce tronçon de la route que se situe la zone industrielle principale de Ghardaïa.

Comme le montre la figure 17, la zone de l'étude se trouve au cœur de la chebka, région à dominance calcaire qui est décrite en 17 plus en détail sous ses aspects physiques et géologiques généraux (ROCHE.1996).

D'une extrémité de la zone d'étude à l'autre, les côtes du lit passent de l'amont à l'aval de 530 à 440 environ; la pente moyenne est ainsi quelque peu supérieure à 3 ‰. La vallée, large en amont se resserre en aval et, comme toutes les vallées adjacentes, elle est découpée dans un "plateau" supérieur à la cote maximale de 600 environ à l'amont et 550 à l'aval. Ses flancs sont partout relativement escarpés (30 à 50 %) sur une hauteur variant de 50 à 70 m à l'amont à 100 à 110 à l'aval.

Dans toute la zone décrite ci-dessus, la végétation spontanée est très rare et ne se rencontre qu'en bordure des oueds. Les espèces qui reverdissent après chaque pluie sont des herbacées et des arbustes appartenant à la flore saharienne (ROCHE.1996).

3.2.2 Bassin versant de l'oued Metlili



Fig. N° 87 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 chabat ez zebar sur la rive droite et chaab el beida sur la rive gauche. Chaabet ladjdaja 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,2014).

***CHAPITRE 04 - ETUDE
HYDROLOGIQUE DES
BASSINS VERSANTS***

4.1 Détermination des principaux affluents du bassin versant d'oued M'zab

Cette détermination se base sur la topographie, pour faire ça nous avons utilisé la carte topographique précédente parce qu'elle indique tous les oueds de la région avec leurs nominations.

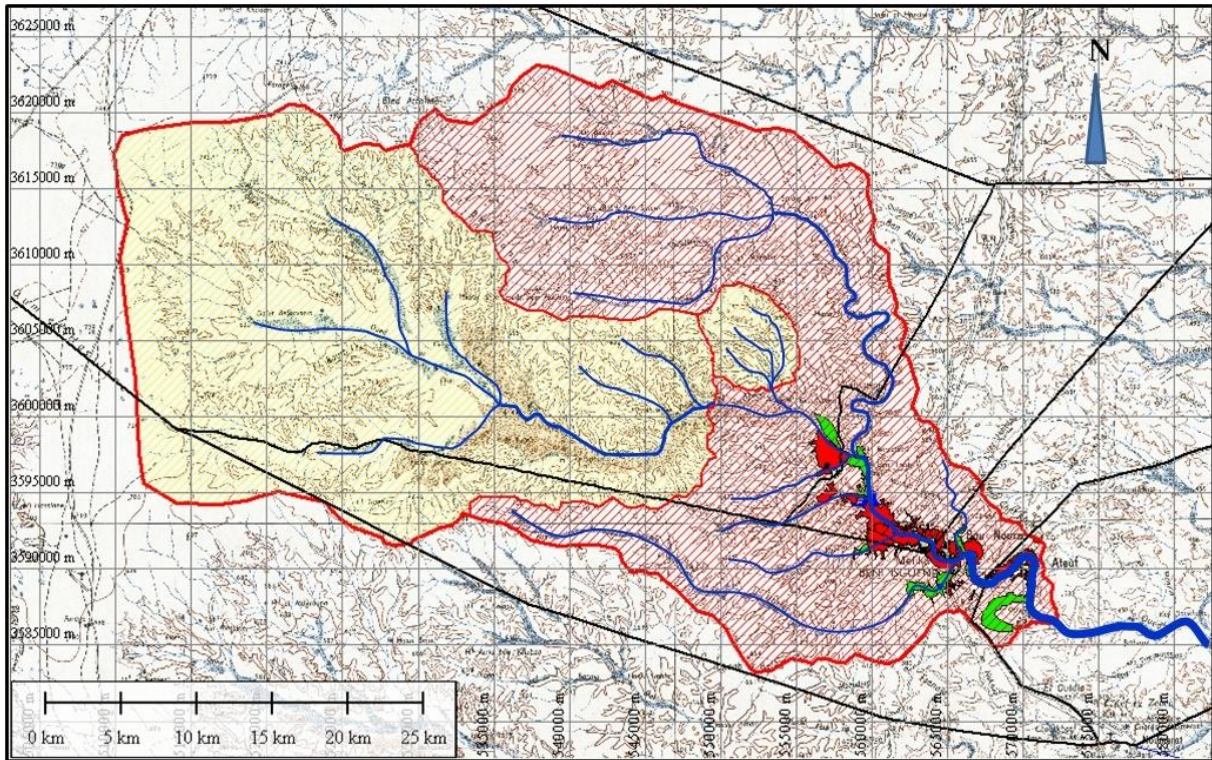


Fig. N° 18 une carte représente la délimitation des principaux affluents du BV du M'Zab (METTAS,2010)

4.2 Détermination des principaux affluents du bassin versant d'Oued Metlili

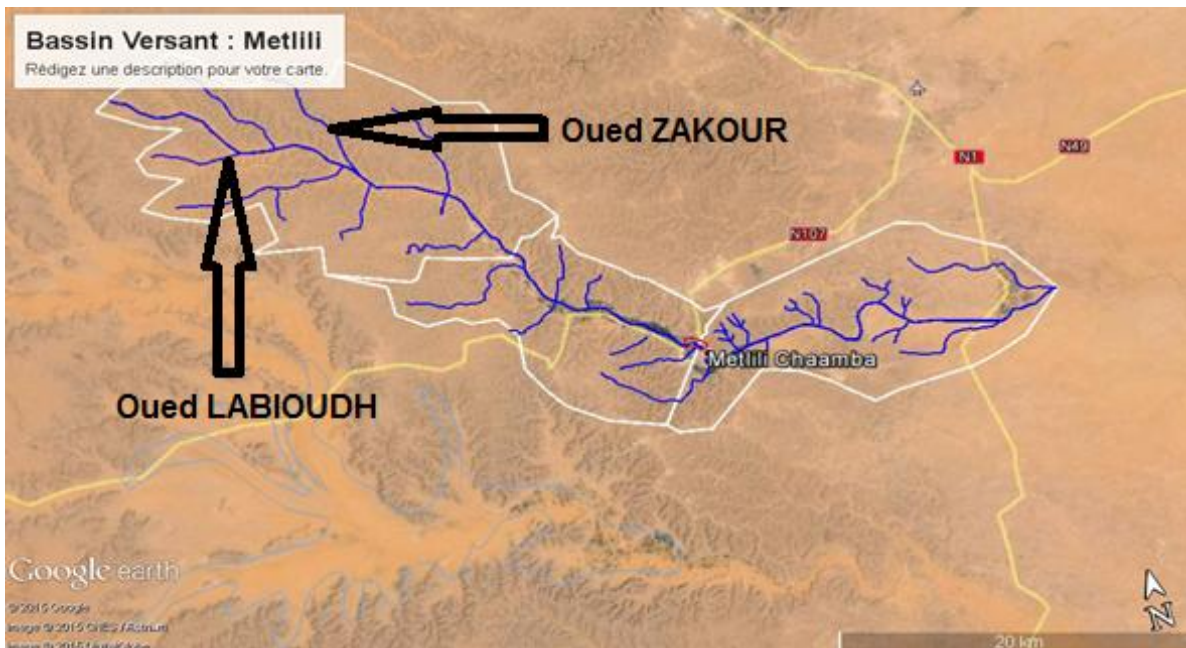


Fig. N° 99 la délimitation des principaux affluents du BV du Metlili (Google Earth)

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

4.3 Caractéristiques géométriques des bassins

Les principales caractéristiques géomorphométriques d'Oued M'Zab et Oued Metlili selon les différents exutoires sont ainsi présentés sur le tableau suivant :

Désignation BV	M'ZAB		
	Daya B D	Addoued	Zelfana, Lahsay
Exutoires			
Superficie km ²	1289	1350	2800
Périmètre km	157	160	265
Longueur principal km	41	55.8	131
Indice de capacité kc	1.23	1.22	1.41
Largeur équivalente km	31.4	24.2	21.4

Tab N° 11 caractéristiques géomorphométriques d'Oued M'Zab

Remarque : les superficies sont cumulées.

Désignation BV	Metlili		
Exutoires	Geumgouma	Pont 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

Tab N° 12 caractéristiques géomorphométriques d'Oued Metlili

4.3.1 Caractéristiques hydrographiques

4.3.1.1 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,2000).

Les données morphologiques du bassin versant de l'oued M'Zab et de ceux de ses principaux affluents (partie amont) ont permis la réalisation de La courbe hypsométrique suivante :

Altitude (CN)	Altitude moy (m)	Surface cumulé (km ²)	Surface %
700-650	675	348	22
650-600	625	848	54
600-550	575	1266	80
550-500	525	1475	94
500-450	475	1547	98
450-400	425	1573	100

Tab N° 13 Caractéristiques Hypsométriques du bassin de M'Zab

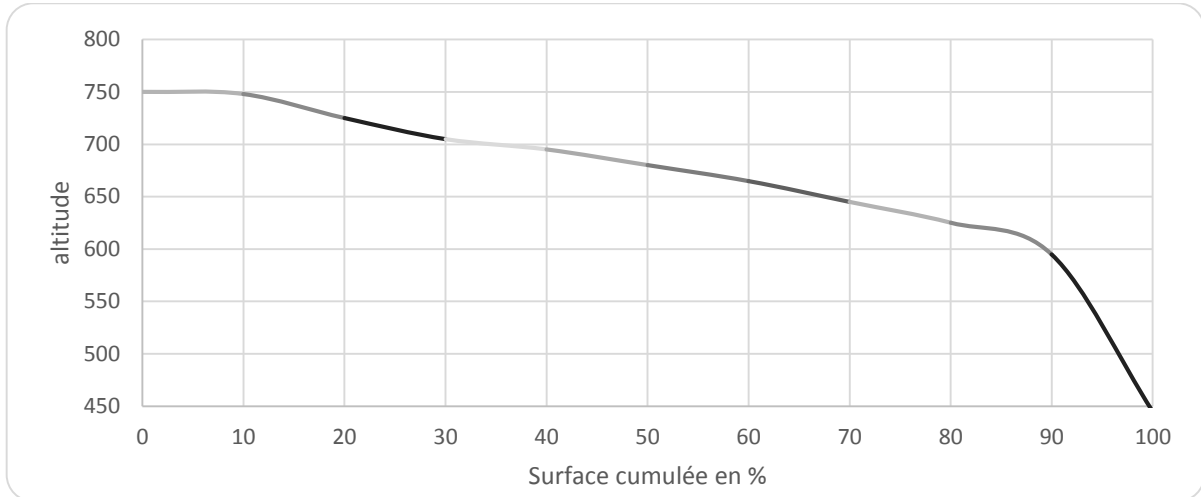


Fig. N° 20 La courbe hypsométrique d'Oued M'zab

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 :

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

Tab N° 14 - Caractéristiques Hypsométriques du bassin de Oued Metlili

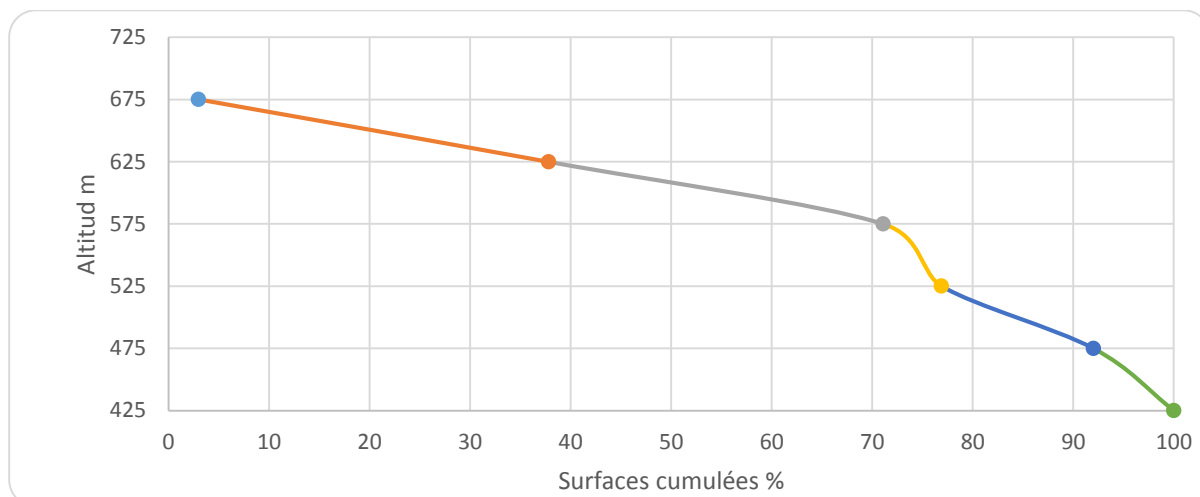


Fig. N° 21 La courbe hypsométrique d'Oued Metlili

4.3.1.2 Les caractéristiques du relief

Les principales caractéristiques des reliefs d'Oued M'Zab et Oued Metlili selon les différents exutoires sont présentées successivement sur les deux tableaux suivants :

Désignation Bv	M'ZAB		
Exutoires	Daya B D	Addoued	Zelfana, Lahsay
Dénivelée Spécifique Ds (m)	167	183	328
Indice de pente global Ig (m/km)	3.1	3.3	3.1
Indice de pente moyenne Im (%)	0.23	0.24	0.25
Temps de concentration (Heure)	19	23.4	53
Vitesse de ruissellement (m/s)	3.5	1.66	2

Tab N° 15 caractéristiques des reliefs d'Oued M'zab

Désignation Bv	Metlili		
Exutoires	Geumgouma	Pont 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

Tab N° 16 caractéristiques des reliefs d'Oued Metlili

4.4 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.

4.4.1 Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa

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

Tab N° 17 Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa (ROUCHE)

4.4.2 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) :

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

Tab N° 18 Caractéristiques statistiques des échantillons

4.4.2.1 Analyse des données statistiques

4.4.2.1.1 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.

4.4.2.2 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

$U_{Gauss} = 1,960$

caractéristique de l'échantillon	série	
	x	u
Variable		
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	$P_{max, j}, P\% = X = 10.84 u_i + 14.25$	
P max, 10%	38.64	

Tab N° 19 Les caractéristiques empiriques de la loi de Gumbel

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

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

Tab N° 20 Les caractéristiques empiriques de la loi de Galton

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 :

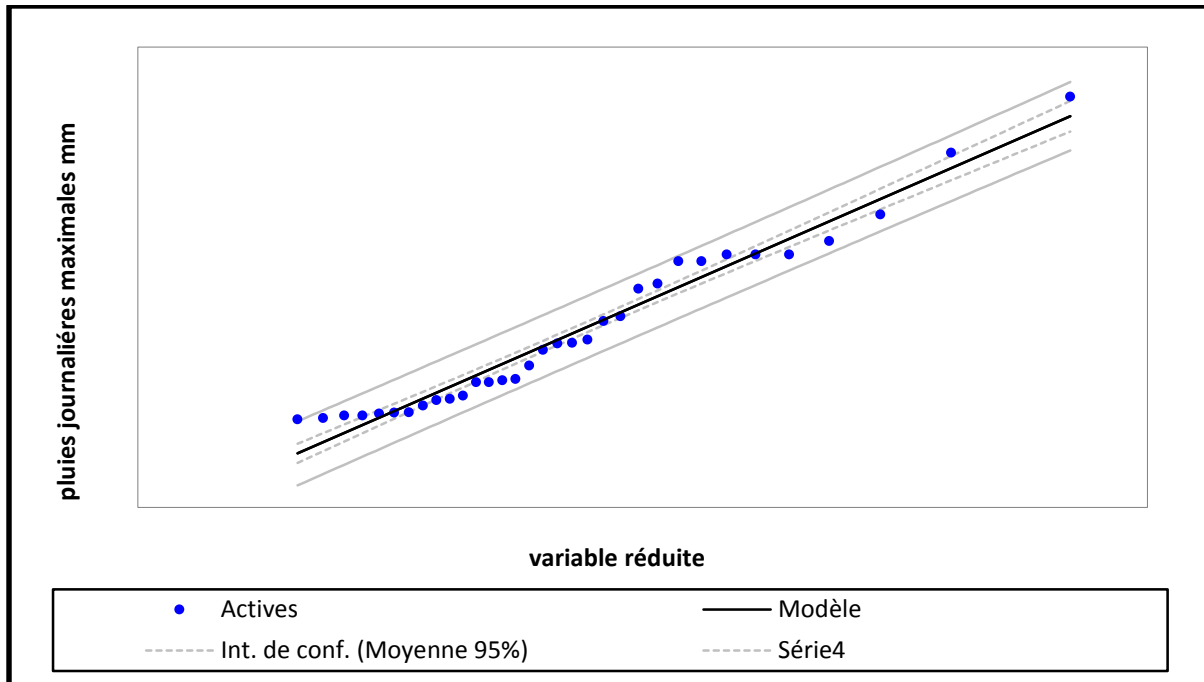


Fig. N° 22 Ajustement graphique d'une loi de Gumbel. (xlstat)

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

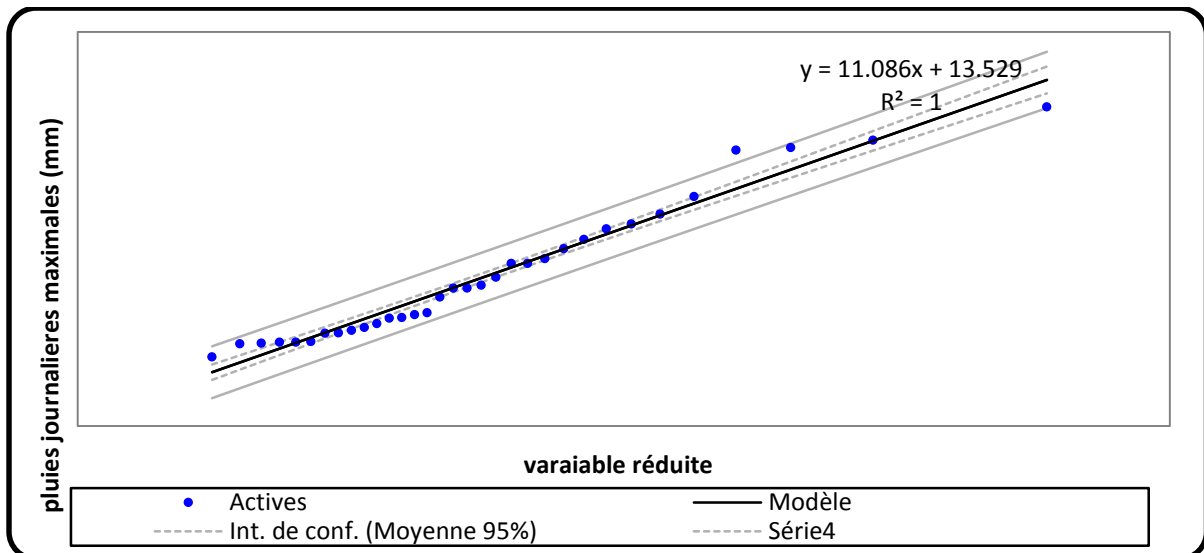


Fig. N° 23 Ajustement graphique d'une loi de Galton. (xlstat)

Interprétation des graphes

La projection des données expérimentales sur les figures N° 23 et N°24 a permis de voir que les lois du Galton et Gumbel sont meilleurs du moment que, la donnée expérimentale est proche de la droite théorique.

4.4.3 Le régime pluviométrique

4.4.3.1 Calcul des précipitations en fonctions de fréquences

Les résultats sont représenté dans le tableau suivant :

Fréquences F = 1 - P	P (%)	Période de retour (an)	Valeur retenue en mm/j
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

Tab N° 21 Pluies journalières maximales fréquentielles

4.4.3.2 Intensité maximale

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

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

- 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-Paul,2000).

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

$$I = \frac{Pt}{t}$$

Au cours d'une même averse, l'intensité des précipitations varie à chaque instant suivant les caractéristiques météorologiques de celle-ci. Plutôt que de considérer l'averse entière et son intensité moyenne, on peut s'intéresser aux intensités observées sur des intervalles de temps au cours desquels on aura enregistré la plus grande hauteur de Pluie. On parle alors d'intensité maximale (Sari,2002).

$$I_{\max} = \frac{H_{\max}}{t}$$

- I_{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.

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

Tab N° 22 Intensités maximales en mm/h de durée t (h) et de période de retour T (an)

4.4.4 Construction des courbes IDF

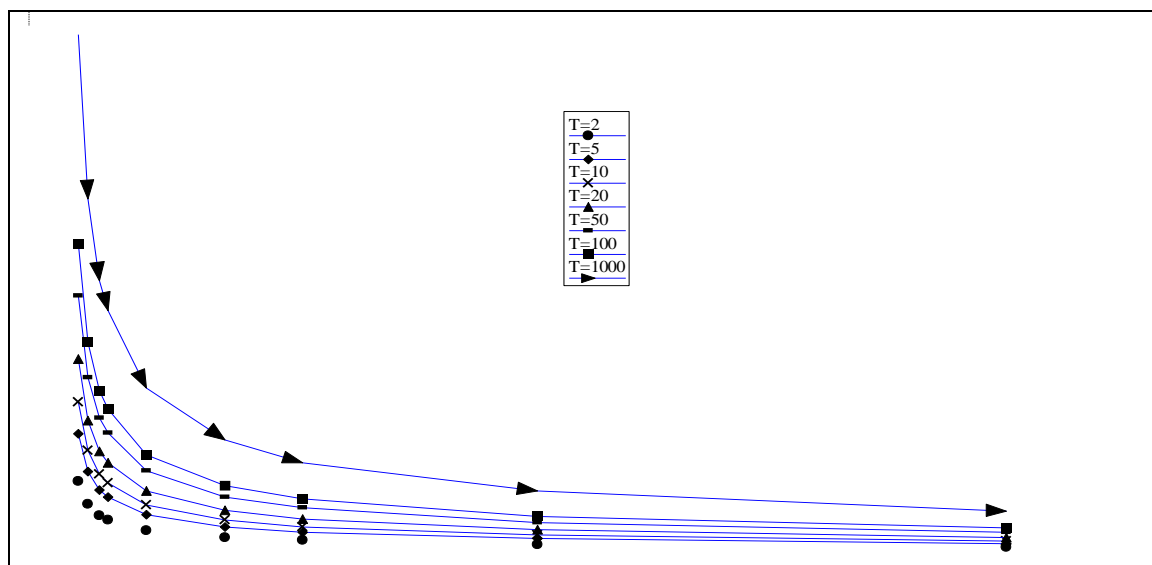


Fig. N° 24 Courbe IDF de la station de Ghardaïa

4.5 Reconstitution des crues sur l'oued M'zab et metlili

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).

4.5.1 Principaux paramètres intervient dans la reconstitution des crues

4.5.1.1 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 (OULEDBELKHIR,Septembre2002) .

$$T_c = \frac{(4 \times A^{0.6} + 1.5 \times L)}{[0.8(H_{\text{moy}} - H^{\text{min}})]^{0.5}}$$

Ou A, en km² : 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 M'Zab, donne les résultats suivants :

Sous bassin selon l'exutoire	Temps de concentration (heure)
D B Dahoua	19.7
Addaoued	21.19
Hssei ,Zelfana	61.8

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

Guemgouma	19
Pont Centre-ville Metlili	23.4
Périmètre Metlili	53

4.5.1.2 Temps de base Tb et temps de montée Tm

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 Tb et le temps de montée Tm crue type d'une averse décennale en fonction de la superficie A pour des bassins représentatives sahéliens et subdésertiques au Sahara.

$$Tb = 2.146 A^{0.368}$$

$$Tm = 0.395 A^{0.409}$$

Sur le Nordeste (Brésil), Cadier (1993, M Roche 1996) évalue le Tb et le Tm par les formules suivantes (OULEDBELKHIR,Septembre2002):

$$Tb = 4.602 A^{0.270}$$

$$Tm = 0.25. Tb$$

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

Bassin Versant	M'ZAB		
caractéristiques	D b dahua	Addaoued	Hssei ,Zelfana
A (km ²)	1289	1350	2800
Tb (Rodier) H	29.9	30.45	39.2
Tb (Cadierr) H	31.8	32.22	40
Tb moyen H	30	31.34	39.6
Tm (rodier) H	7.3	7.53	9.8
Tm (cadier) H	7.5	7.83	10.15
Tm moyen H	7.3	7.68	9.97

Tab N° 23 Temps de base Tb et temps de montée Tm (Oued M'zab)

L'application numérique de ces formules sur l'Oued Metlili, donne les résultats :

Bassin Versant	METLILI		
caractéristiques	Guemgouma	Pont Cv metlili	Périmetre Oued Metlili
A (km ²)	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

Tab N° 24 Temps de base Tb et temps de montée Tm (Oued Metlili)

4.5.1.3 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:

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

L'application numérique de ces formules sur l'Oued M'Zab, donne les résultats suivants (OULEDBELKHIR, Septembre 2002) .:

Bassin Versant	M'ZAB		
caractéristiques	D b dahua	Addaoued	Hssei ,zelfana
A (km ²)	1289	1350	2800
Kr en %	29	28.78	25.13

Tab N° 25 Coefficient de ruissellement de chaque sous bassin (Oued M'zab)

L'application numérique de ces formules sur l'Oued Metlili, donne les résultats suivants :

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

Tab N° 26 Coefficient de ruissellement de chaque sous bassin (Oued Metlili)

4.5.1.4 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 (OULEDBELKHIR, Septembre 2002) :

$$K_a = 1.1943 - 0.0604 \cdot \ln(A)$$

L'application pour le bassin du M'Zab donne :

Bassin Versant	M'ZAB		
caractéristiques	D b dahua	Adaoued	Hssei ,zelfana
A (km ²)	1289	1350	2800
ka	0.76	0.76	0.71

Tab N° 27 Coefficient d'abattement de chaque sous bassin (Oued M'zab)

L'application pour le bassin du Metlili donne :

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

Tab N° 28 Coefficient d'abattement de chaque sous bassin (Oued Metlili)

4.5.1.5 Coefficient de pointe α

Le coefficient de pointe α est égal au Q_{max}/Q_{moy} . La crue est supposée uniformément réparti sur tout le temps de base T_b . Pour les bassins du M'Zab on adopte la relation en fonction de la superficie (au-delà 100 km²)

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

Bv	M'ZAB		
caractéristiques	D b dahua	Addaoued	Hssei ,zelfana
A (km ²)	1289	1350	2800
α	3.7	3.73	3.9

Tab N° 29 Coefficient de pointe de chaque sous bassin (Oued M'zab)

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

Tab N° 30 Coefficient de pointe de chaque sous bassin (Oued Metlili)

4.5.2 Application au Oued M'Zab et Oued 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.

$$Q_{\max} = P_j \cdot K_a \cdot K_r \cdot A \cdot \alpha \cdot T_b^{-1} - \text{Avec}$$

$$Q_{100} = 32,6 \cdot A^{0.42}$$

L'application de la méthode Rodier-Auvray pour le bassin du M'Zab et Metlili dans la page suivante donne :

Bassin Versant	M'ZAB			METLIL		
	D b dahua	Addaoued	Hssei ,zelfana	Guemgoma	Pont Cv metlili	Périmetre Oued Metlili
Q max 2 (m ³ /s)	175	176	248	71	88	105
Q max5 (m ³ /s)	292	293	413	118	146	175
Q max 10 (m ³ /s)	370	371	524	149	185	222
Q max 20 (m ³ /s)	477	478	675	192	238	287
Q max 50 (m ³ /s)	633	634	896	255	316	380
Q max 100 (m ³ /s)	759	761	1075	306	379	456
Q max 1000 (m ³ /s)	1275	1277	1805	514	637	766
Q moy 2 (m ³ /s)	47	47	64	22	26	30
Q moy 5 (m ³ /s)	79	78	106	36	43	50
Q moy 10 (m ³ /s)	100	99	134	45	55	64
Q moy 20 (m ³ /s)	129	128	173	59	70	82
Q moy 50 (m ³ /s)	171	170	229	78	93	109
Q moy 100 (m ³ /s)	205	204	275	93	112	131
Q moy 1000 (m ³ /s)	345	343	462	156	188	220
V2 (m ³)	5	5	9	1	2	2
V5 (m ³)	9	9	15	2	3	4
V10 (m ³)	11	11	19	3	4	5
V20 (m ³)	14	14	25	4	5	7
V50 (m ³)	18	19	33	5	7	9
V100 (m ³)	22	23	39	6	8	11
V1000 (m ³)	37	39	66	10	14	18

Tab N° 31 calcul des débits avec la formule de Rodier-Auvray (1988)

4.5.3 Hydrogramme de crues

L'Hydrogramme de crue est une identité de la crue, il nous donne les caractéristiques principales de la crue 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, Octobre 2009).

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

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

Pour la décrue: $Q_{\text{décrue}} = Q_{\text{max}} \left(\frac{T_d - T}{T_d} \right)^3$ 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 les deux bassins versant (M'zab et Metlili), car : les colossaux dégâts Il a eu lieu sur leurs niveaux

Pr	2	5	10	20	50	100	1000
Q max	176	293	371	478	634	761	1277
0	0	0	0	0	0	0	0
3.75	66	110	140	180	238	286	480
7.35	176	293	371	478	634	761	1277
12	48	81	102	132	175	210	352
17	23	38	48	61	81	98	164
31	0	0	0	0	0	0	0

Tab N° 32 Caractéristiques de l'hydrogramme de crue d'Addaoued

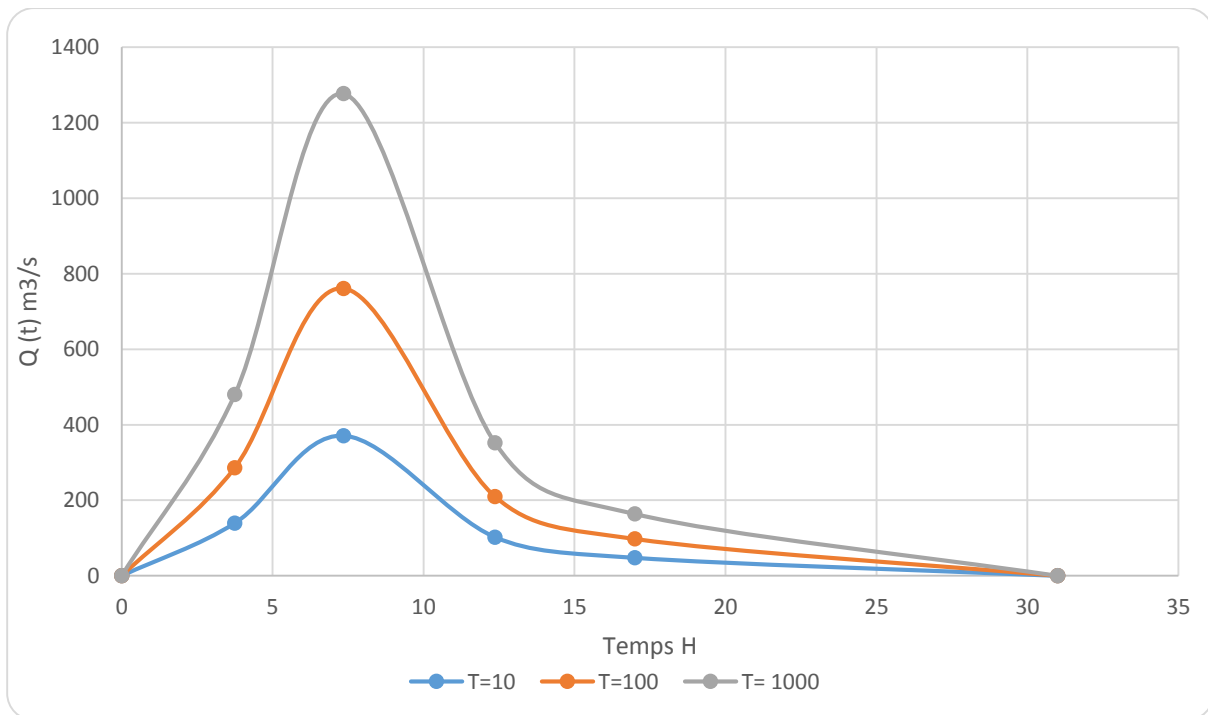


Fig. N° 25 L'hydrogramme de crues d'Addaoued

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

Tab N° 33 Caractéristiques de l'hydrogramme de crue du pont de centre-ville Metlili

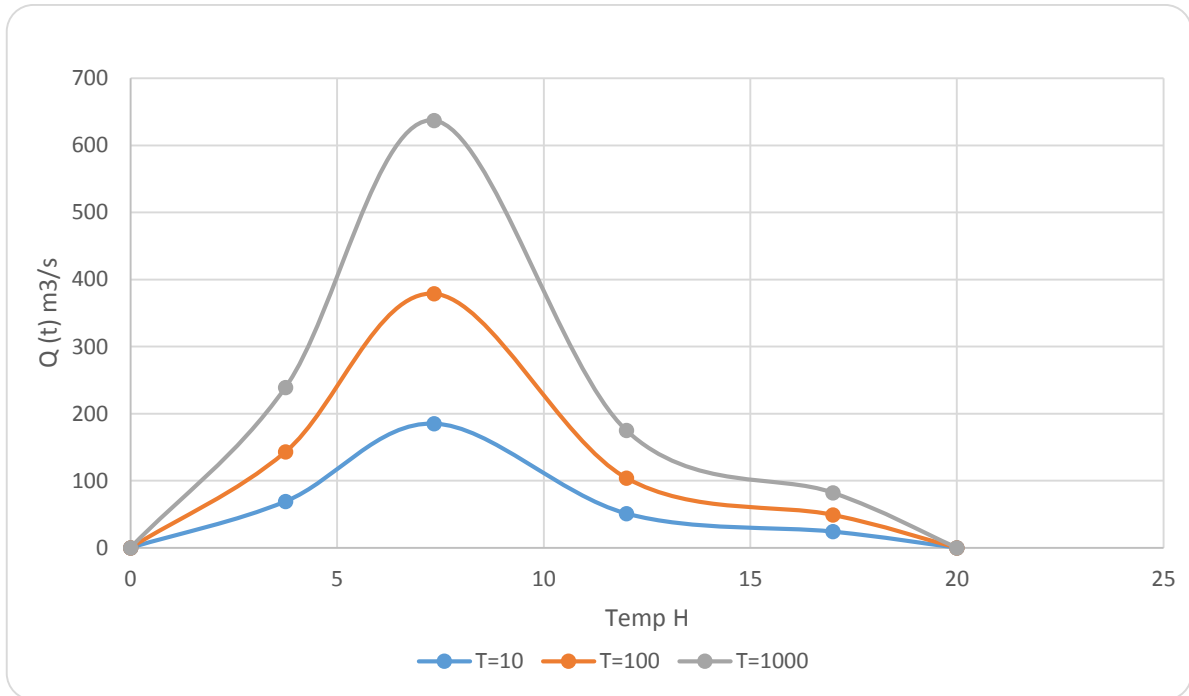


Fig. N° 26 L'hydrogramme de crues du pont de centre-ville Metlili

***CHAPITRE 05 -
SIMULATION DE LA CRUE
ET VISUALISATION DES
RESULTATS***

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 Ghardaïa et 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 M'Zab et aussi Metlili, Pour cela, nous prenons les propriétés de cette inondation notamment les sommets qui atteignent les eaux sur le bord des zones que nous voulons étudier .

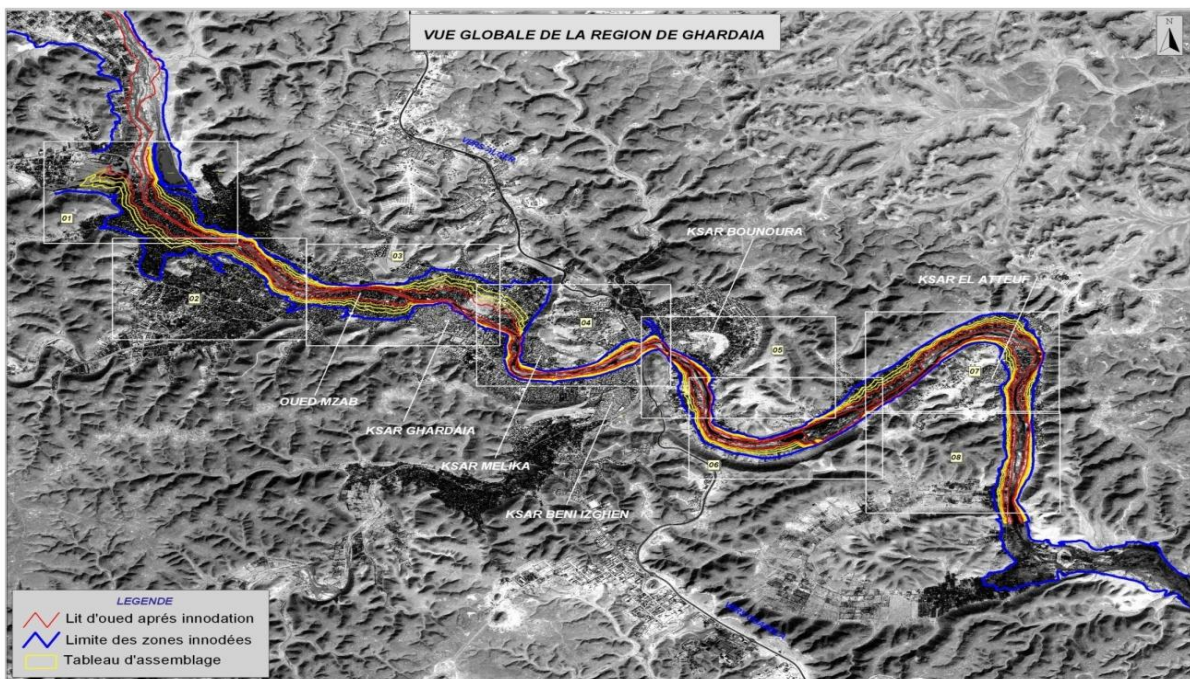


Fig. N° 27 Cartographie des zones inondées des 09

Communes touchées par les inondations du 1^{er} octobre 2008, (des images Satellitaires à haute résolution et de MNT améliorés par des données GPS)

L'étude de l'inondabilité de la commune de Ghardaïa et 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 représentant les dégâts colossaux sur les deux sites d'études :



Photo N° 1 Quelques dégâts matériels –zone d'Addaoued -Ghardaïa



Photo N° 2 Quelques dégâts matériels –zone Pont Cv-Metlili

5.1 Simulation numérique de la crue des Oueds

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).

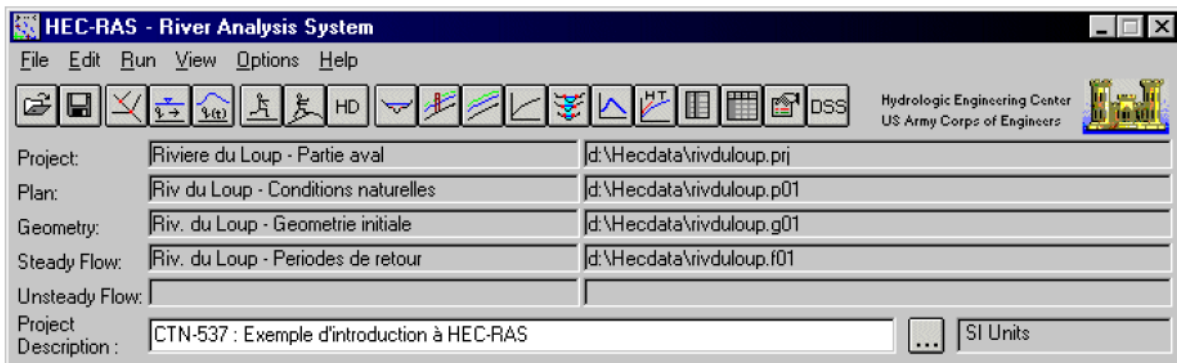


Fig. N° 28 Fenêtre principale de HEC-RAS

5.1.1 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 **Units System** et choisissez **System International (Metric System)**.

5.1.1.1 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.

Les altitudes par rapport les distances cumulées des sections réalisées sur les deux zones d'études sont obtenu par les levées topographiques de ces deux zones .Dans la figure suivantes (page suivante), on donne l'exemple de la zone d'Addaoued :

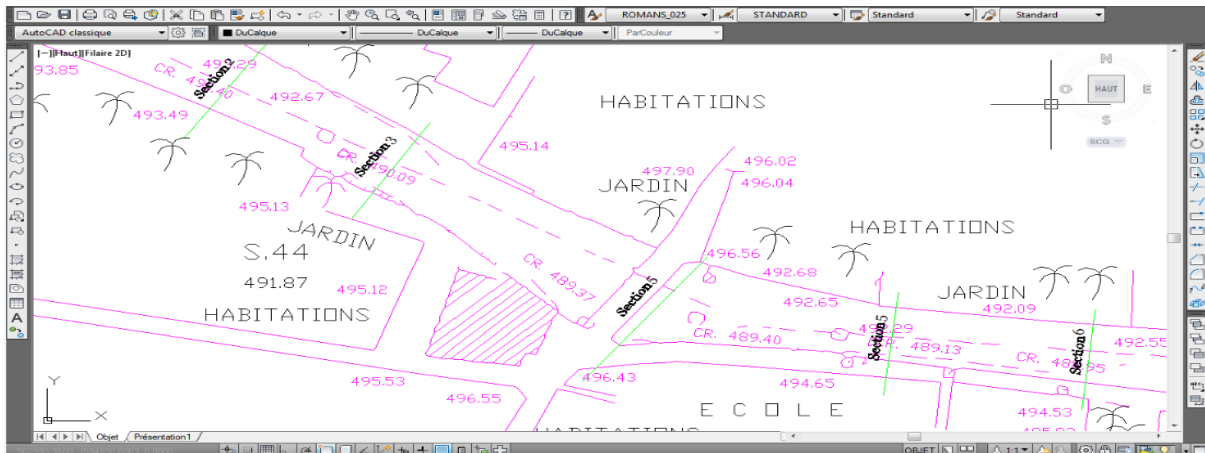


Fig. N° 29 sections transversales présente sur le levée topographique- zone d'Addaoued (AUTOCAD)

5.2 Application sur la zone d'Addaoued (vallée du M'zab)

Pour définir les caractéristiques géométriques du système modélisé. Sélectionnez **Edit / Geometric Data...** et la fenêtre Base Geometry Data apparaît. Augmentez cette fenêtre à sa taille maximale. Pour vous aider à tracer le tronçon de rivière à l'étude, vous pouvez ajouter une image de fond à cette fenêtre :

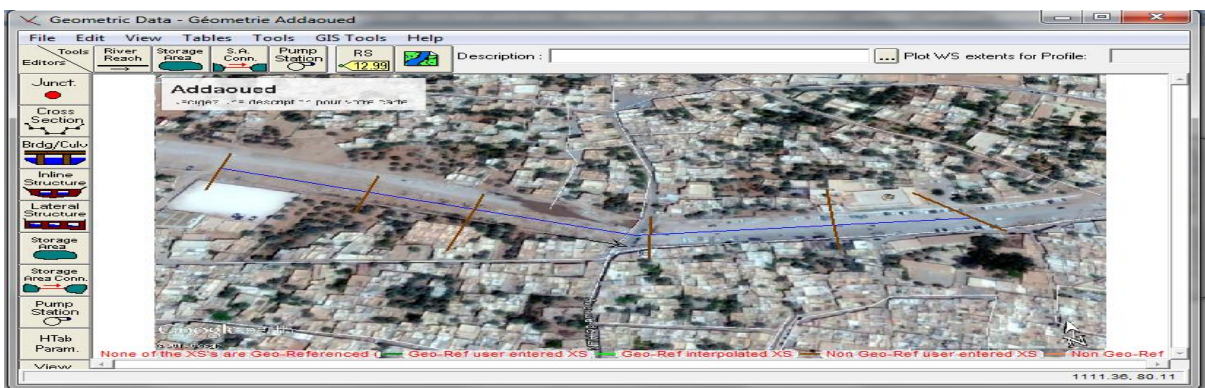


Fig. N° 30 Fenêtre Base Geometry Data- la zone d'Addaoued (HEC-RAS)

Les sections transversales sont représentées dans la figure suivante :

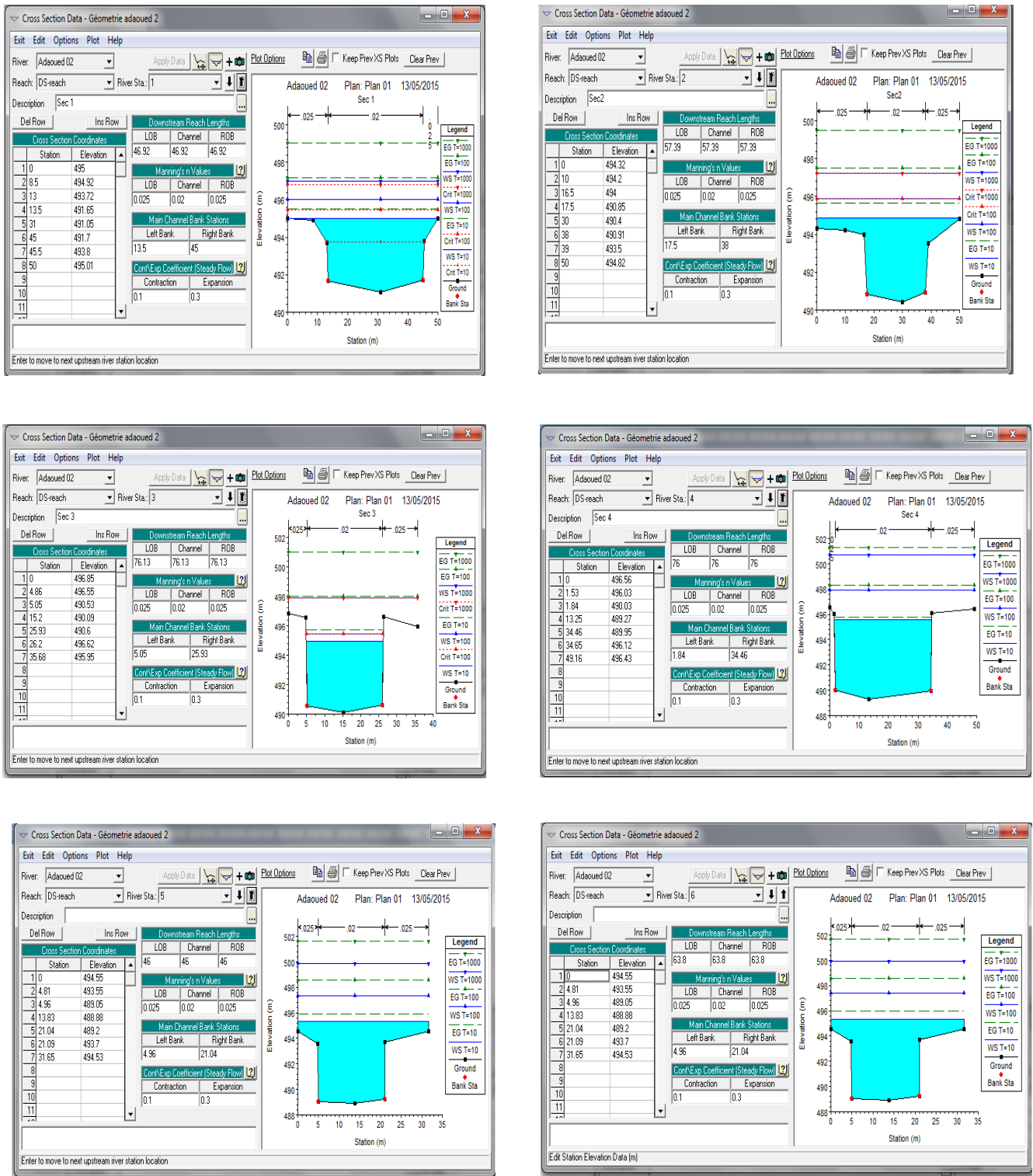


Fig. N° 31 Les différents sections transversales - la zone d'Adaaoued (HEC-RAS)

5.2.1.1 Débits et conditions limites

L'étape suivante de la modélisation hydraulique avec HEC-RAS est de spécifier les débits utilisés (Chapitre précédente) pour calculer les profils d'écoulement. Dans la fenêtre principale, sur le bouton **Steady Flow Data**. Les résultats d'une analyse de fréquence des débits maximums sont utilisés ici pour calculer les profils d'écoulement correspondants. Les valeurs obtenues sont tabulées à la figure suivante. Pour entrer ces valeurs de débits, indiquant d'abord **Number of Profiles**: 3. Par la suite, dans le menu **Options**, allant à **Edit Profile Names...** et en indiquant les noms de profils appropriés. Les valeurs de débit qui sont entrées aux cases correspondantes sont représentatives de la section amont (River Station 6.0) et sont considérées valides sur tout le tronçon de rivière, c'est-à-dire que le débit ne change pas dans le tronçon. HEC-RAS permet toutefois de représenter des changements de débits aux sections transversales, lorsqu'un affluent important entraîne un changement de débit dans le tronçon.

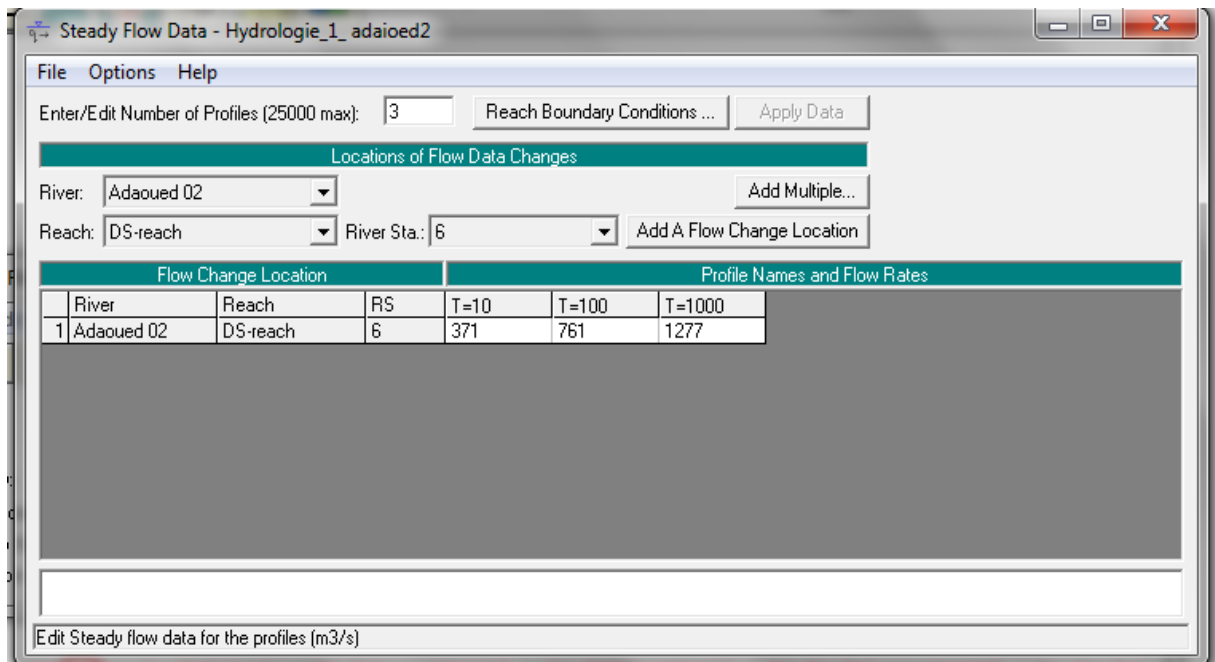


Fig. N° 32 Fenêtre Steady Flow Data - la zone d'Addaaoued (HEC-RAS)

5.2.1.2 Simulation hydraulique

La dernière étape nécessaire à la modélisation avec HEC-RAS est de définir le Plan utilisé. Cliquant sur le bouton Perform a Steady Flow Simulation pour obtenir la fenêtre présentée plus bas. Le Geometry File et Steady Flow File que nous avons créés y sont indiqués. Dans le menu File, en choisissons New Plan. Lorsque requis, en entrons le titre et l'identificateur indiqué sur la figure ci-dessous. Ce premier Plan sera sauvegardé dans le fichier rivduloup.p01,

Choisissez le régime d'écoulement infracritique (Subcritical) et appuyez sur **Compute**

Pour débiter la simulation. Une fenêtre montrant la progression de la simulation s'ouvrira et les calculs s'effectueront. Lorsque le programme a terminé, nous pouvons fermer la fenêtre **Hydraulic Computation**, ainsi que la fenêtre **Steady Flow Analysis**. Nous sommes maintenant de retour à la fenêtre principale de HEC-RAS. Pour visualiser les résultats obtenus.

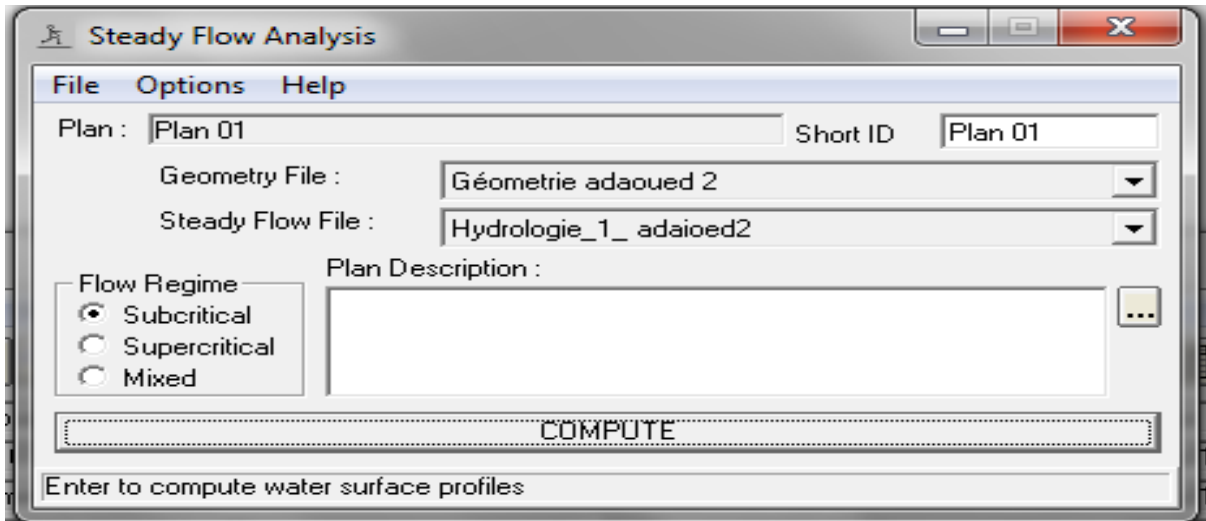


Fig. N° 33 Fenêtre Steady Flow Analysis - la zone d'Addaoued (HEC-RAS)

5.3 Application sur la zone pont centre-ville (vallée du Metlili)

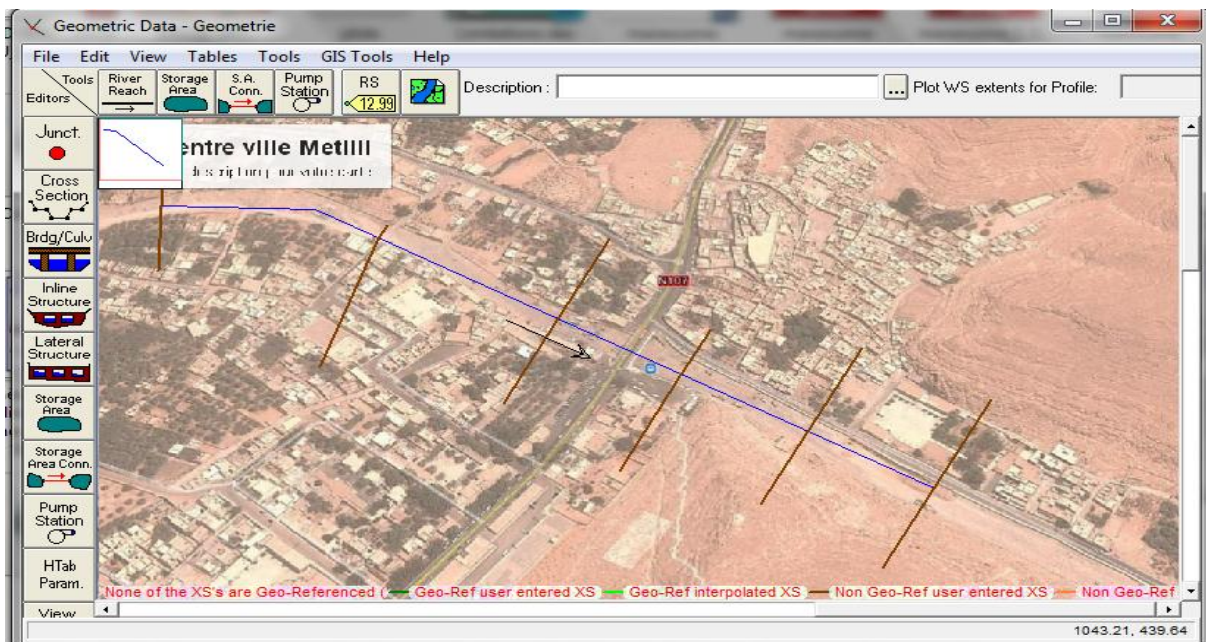


Fig. N° 34 Fenêtre Base Geometry Data - la zone Pont Cv Metlili

Les sections transversales sont représentées dans la figure suivante :

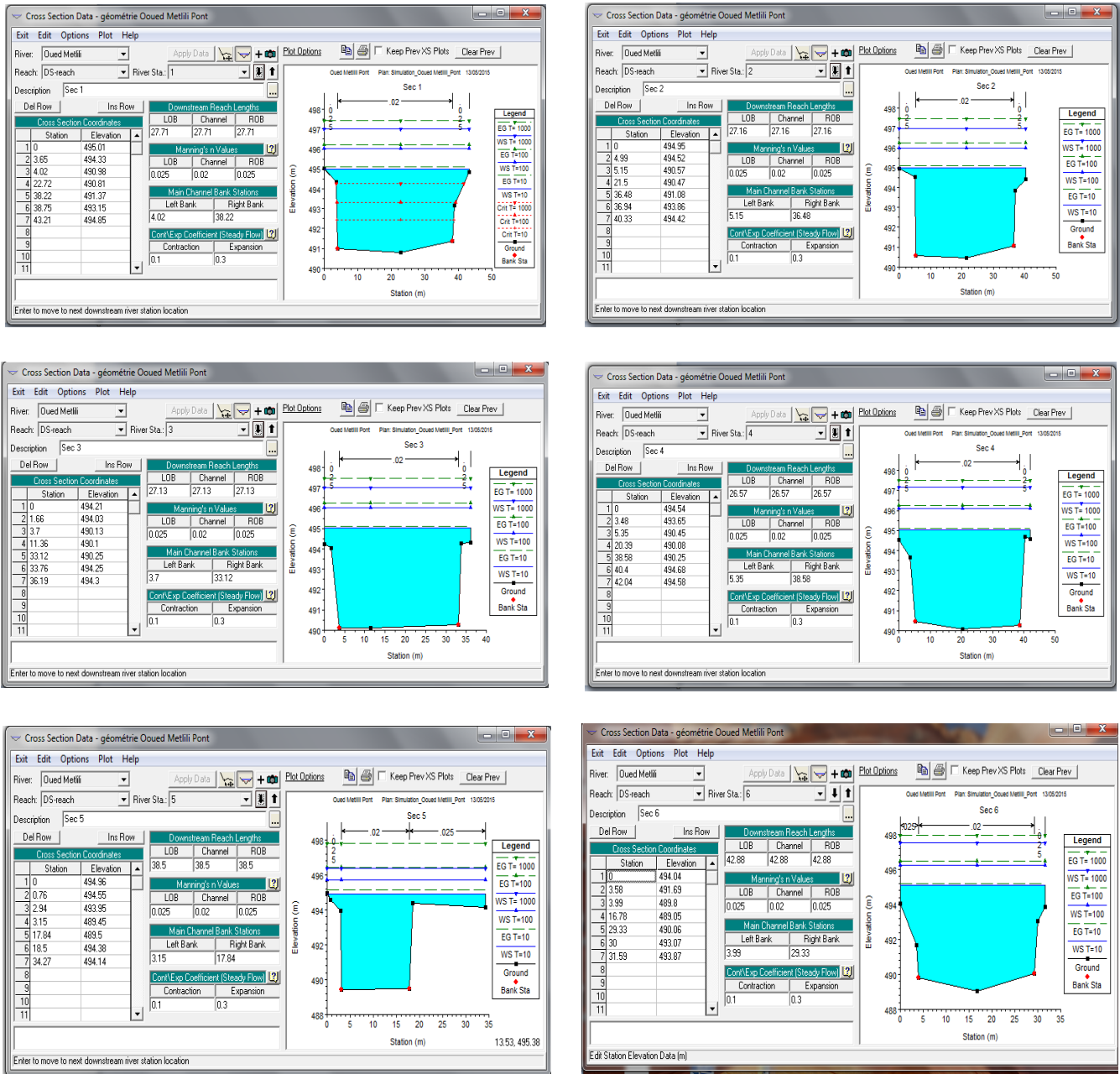


Fig. N° 35 Les différents sections transversales - la zone Pont Cv Metlili

5.3.1.1 Débits et conditions limites

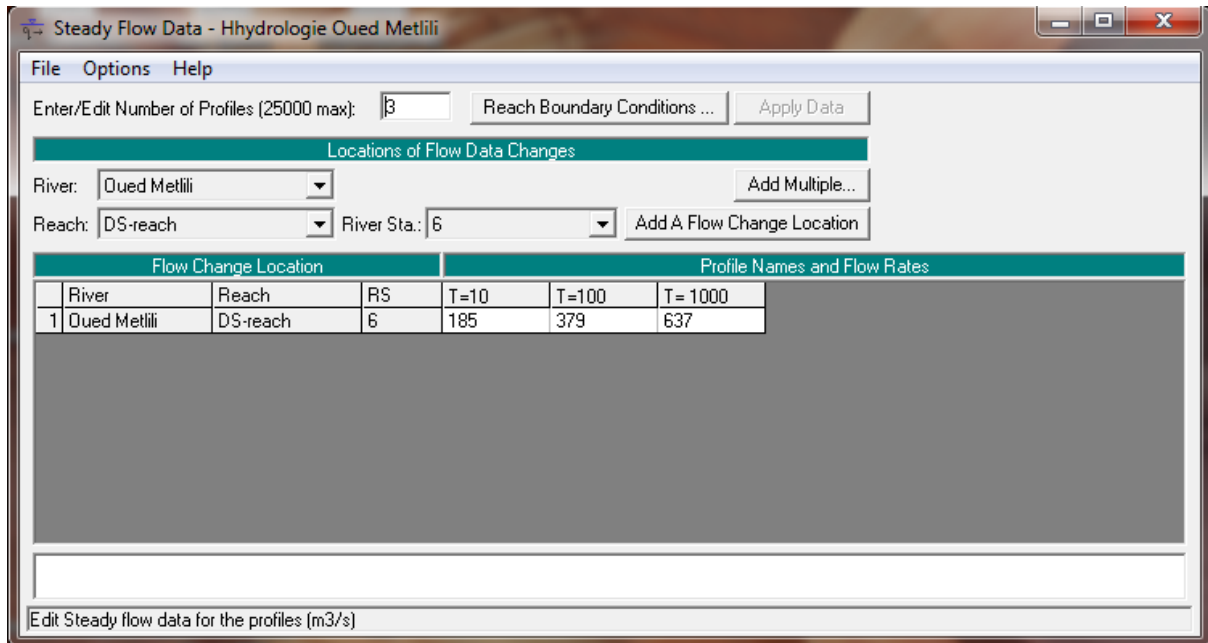


Fig. N° 36 Fenêtre Steady Flow Data - la zone Pont Cv Metlili

5.3.1.2 Simulation hydraulique

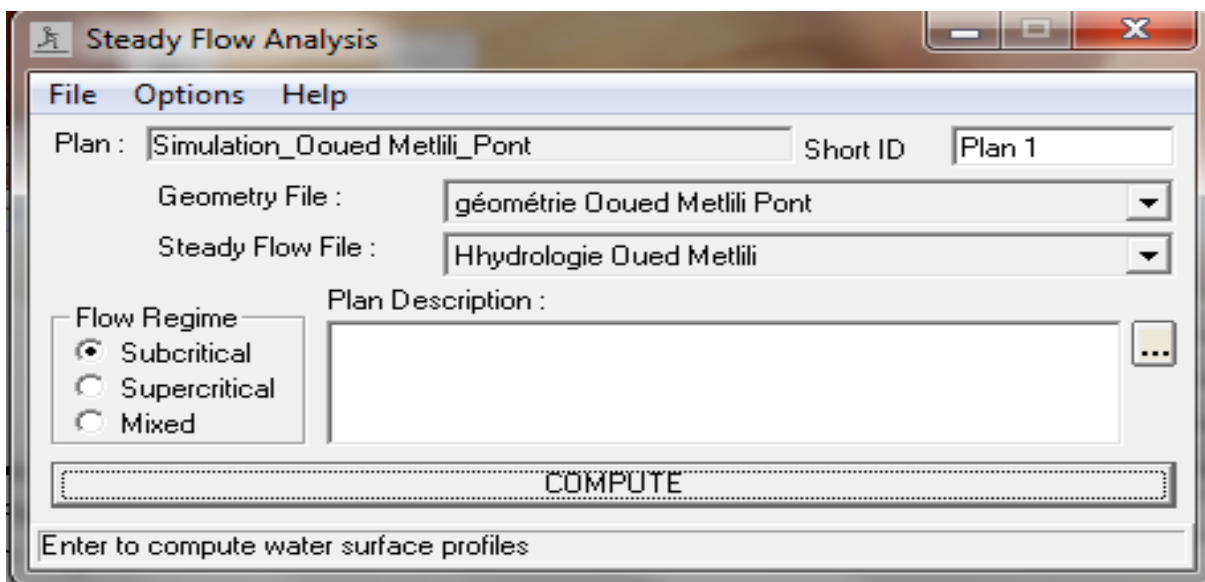


Fig. N° 37 Fenêtre Steady Flow Analysis - la zone Pont Cv Metlili

5.3.1.3 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 illustré dans la figure suivante :

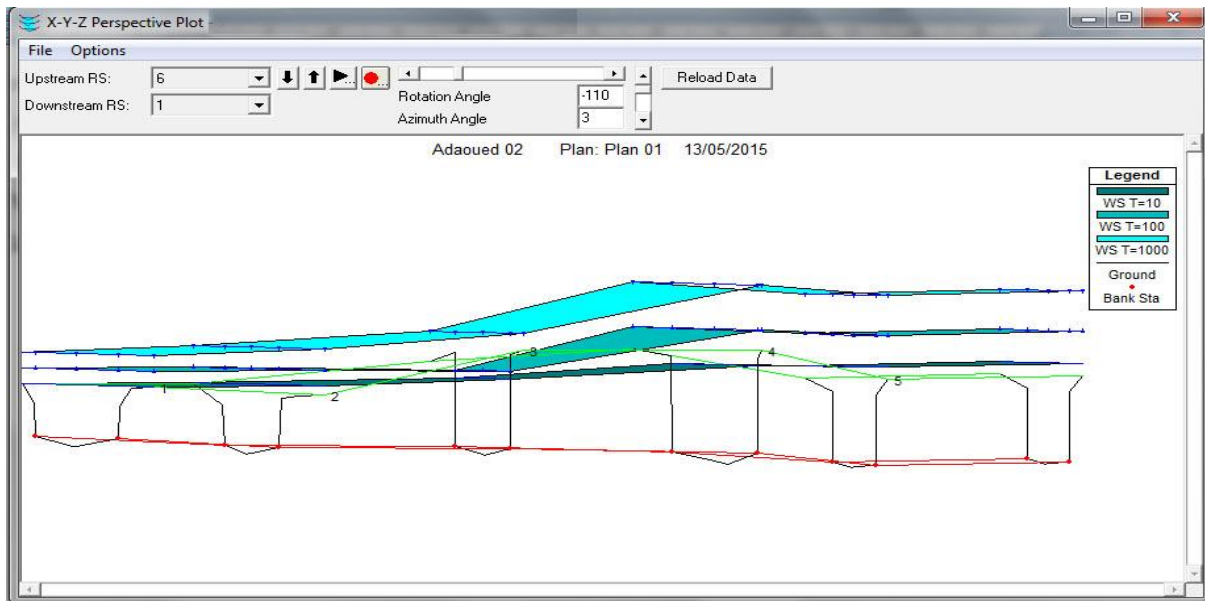


Fig. N° 38 Simulation de crue sur la zone d'Adaaoued (vallée du M'zab)

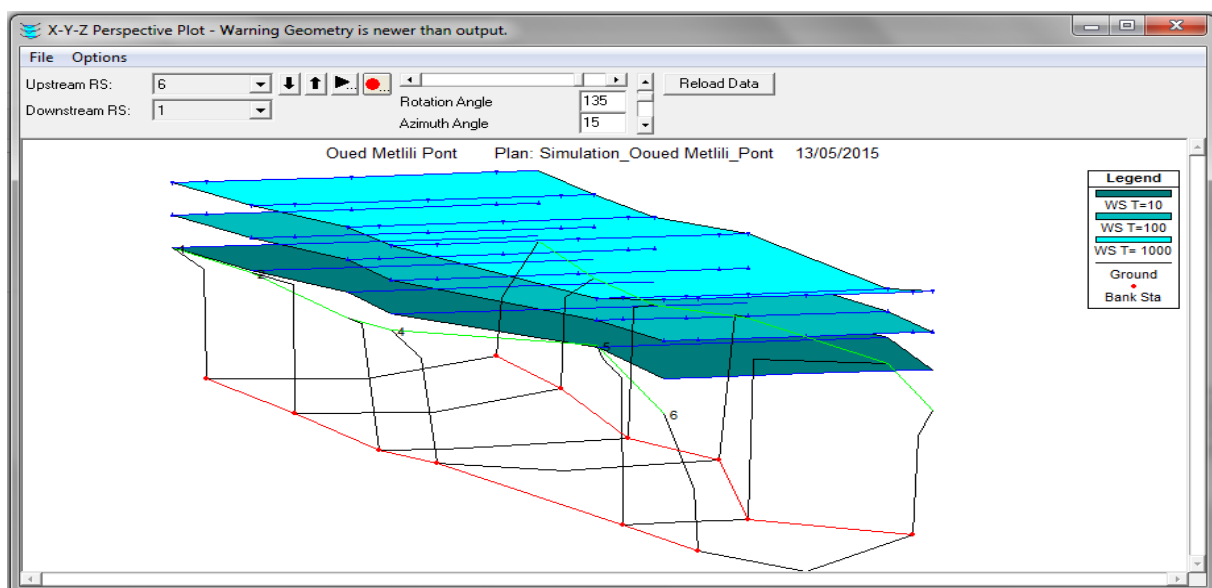


Fig. N° 39 Simulation de crue sur la zone Pont Centre-ville (vallée du Metlili)

5.4 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 (Fig40).

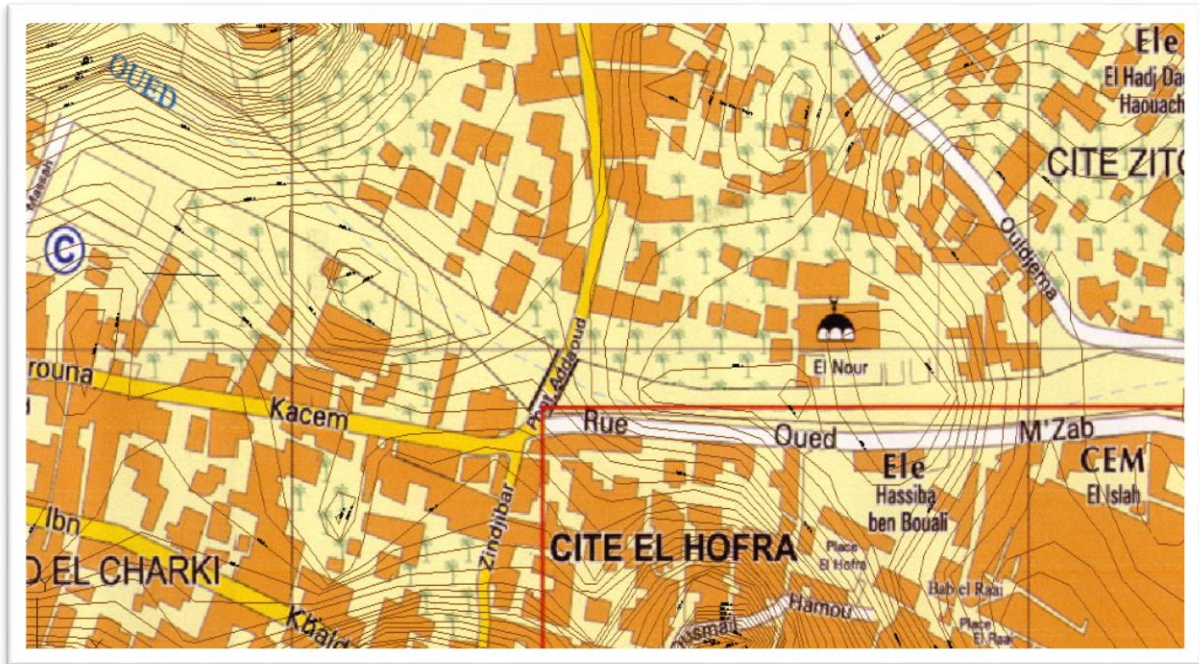


Fig. N° 40 Extrait de la carte de plan du Ghardaïa avec les courbes de niveau (GLOBALE MAPPER)

5.4.1 Carte finale de vulnérabilité aux inondations

La carte réalisée représente les zones inondables de la région d'Addaoued véhiculée par l'Oued M'zab, et pont de centre-ville Metlili véhiculée par l'Oued Metlili successivement, dans le cas des crues décanale, centennale et millénaire.

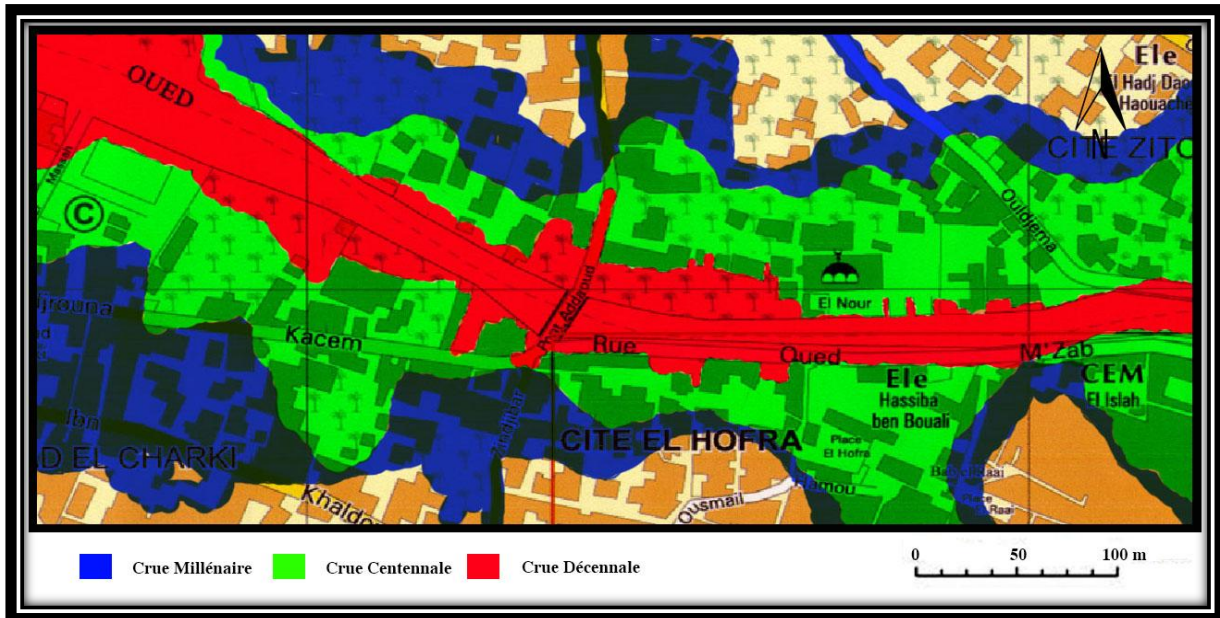


Fig. N° 41 Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décanale, centennale, millénaire de la région d'Addaoued (vallée du M'zab)

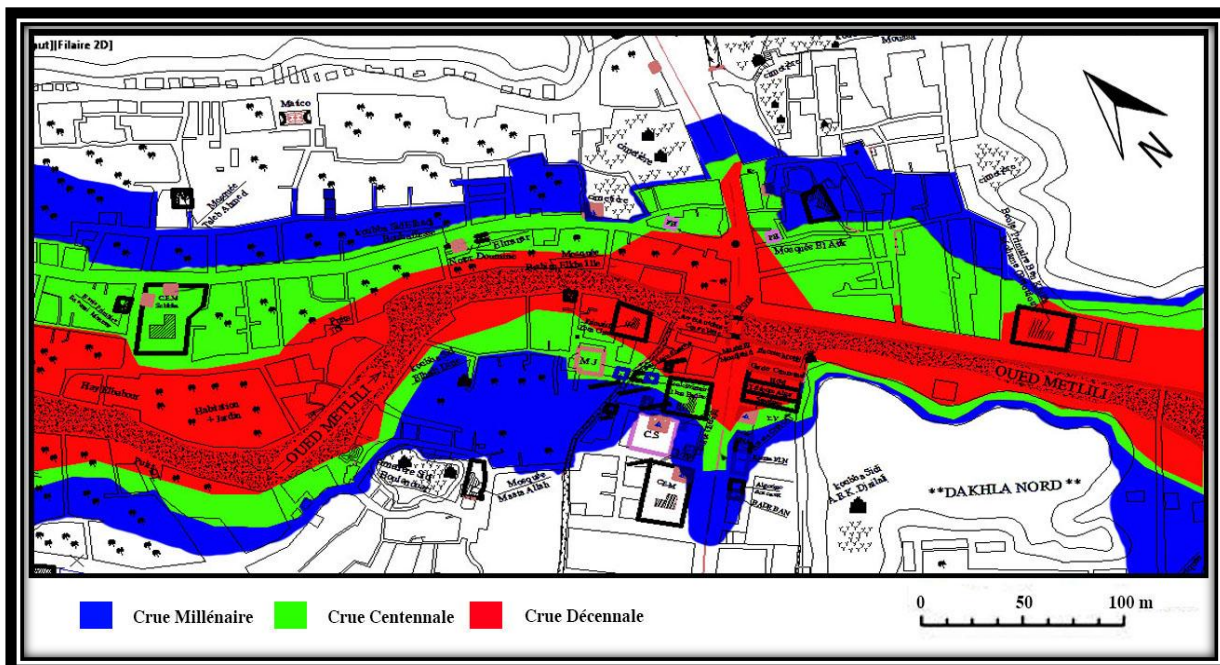


Fig. N° 42 Carte de vulnérabilité aux inondations pour les crues décanale, centennale, millénaire de la région de Pont de centre ville (Oued Metlili)

5.4.2 Interprétation du résultat des cartes

Les sites qui nous avons étudié (Pont Addaoued et Pont 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 les vallée du chebka, 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 M'Zab et Metlili, est un réel danger pour les habitants, une crue plus intense à celle d'octobre 2008 peut avoir des conséquences encore plus néfaste 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 :

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

- La réalisation d'une plans d'urgences numériques basé sur un levé topographique détaillé ayons la capacité de la mise à jours périodique, afin d'avoir une simulation cartographiques très précises des aléas.
- L'occupation des abords de l'oued M'Zab est un réel danger pour les habitants. Alors il st nécessaires de réviser le plan d'occupation du sol dans les régions les plus vulnérables notamment pour les événements centennale et milléniale.
- Réduire l'aléa de l'inondation en action sur la partie amont du système hydrographique, soit par la correction torrentielle des cours d'eau, soit par l'approche rétention en amont (cas d'oued Metlili qui dépourvue d'une digue de protection en amont). Les deux solutions sont coûteuses et engendrera probablement des problèmes sociaux importants.

CONCLUSION GENERALE

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.

L'étude hydrologique a permis de calculer le débit de crue des Oueds M'Zab et Metlili, Il a été adopté dans la détermination de l'étendue des zones inondables.

Les débits calculés des crues décennale, centennale et millénaire sont respectivement de l'ordre de 371,3 m³/s ; 761,4 m³/s ; 1277,2 m³/s pour l'Oued M'Zab (exutoire d'Addaoued), et 185.1 m³/s ; 379 m³/s ; 637.6 m³/s pour l'Oued Metlili (exutoire de pont centre-ville de 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 réalisé aux niveau de la zone d'Addaoued et Pont de centre-ville Metlili peut être adoptée comme référence pour la protection contre les 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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Bonnard et Gardel (BG), 1996. Étude hydrologique de l'oued M'Zab,37 pages.
2. CHOCAT,1997. 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, p 273-280.
3. Cemagref, Unité de Recherches Hydrologie – Hydraulique, Lyon,2008. Notice d'emploi du logiciel RUBAR20, 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,2001. Mécanique des fluides cours. Édition Dunod-Paris.
6. M. Lesieur,1990. Turbulence in fluids. Dordrecht: Kluwer academic publishers.
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 inondable. Cemadoc, 36 pages.
10. Rapport de Cemagref,(mars 2004). Estimation des écoulements de surface pour une crue extrême en milieu urbanisé. Cemadoc, 71 pages.
11. Association BG-ENHPC, juin 2000. Etude d'assainissement et de protection contre les crues d'oued M'Zab - Etude d'impact.
12. Younes METTAS,2010. 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.
13. Lotfi BENADDA,Ghardaïa 2012. les conditions climatiques .
14. SARI A,(2002). Initiation à l'hydrologie de surface. Polycop de cours. Edition HOUMA, 222p.
15. Lamia SAOUCHA,Octobre 2009. Etude de faisabilité d'une digue sur oued Laadhira-Ghardaïa (ENP).42pages.
16. Cheikh OULEDBELKHIR,Septembre 2002. Contribution à l'étude et l'établissement du bilan hydrologique de la cuvette d'Ouargla.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

17. CTN-762 Ressources hydriques. Guide de laboratoire pour HEC-RAS. Université du Québec .École de technologie supérieure Département de Génie de la construction.
18. HIMEX,2014. Note de synthèse. Etude de protection contre les crues des différents quartiers de Metlili.
19. M.OULED BELKHEIR Cheikh, 2014. Article RECONSTITUTION DU RÉGIME DES CRUES SUR OUED M'ZAB(SAHARA SEPTENTRIONALE) .
20. JEAN-PAUL LABORDE,2000. Eléments d'hydrologie de surface». Université de Nice - Sophia Antipolis & CNRS. U.F.R. Espaces et Cultures. Nice,192p.
21. Mr. ALI AZOUAOU Fathellah,2009. Simulation de la crue d'octobre la commune de Ghardaïa calcul rubar20.

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.
 $\overline{u, v, w}$ (m/s) : Vitesses moyennes en temps
 u', v', w' (m/s) : Les fluctuations de vitesses en temps
 $* u$ (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 ($m^2.s^{-1}$) : Coefficient de viscosité moléculaire (viscosité cinématique)
 ρ (Kg/m^3) : Masse volumique de l'eau
 τ_{ij} (N/m^2) : Tenseur de contraintes visqueuses
 τ_p (N/m^2) : Contrainte de cisaillement sur le fond
 τ_x^f, τ_y^f (N/m^2) : Contraintes de frottement au fond

ABREVIATIONS

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.

I C : Intervalle de confiance.

IDF : Courbe intensité durée fréquence.

ANRH : Agence National Ressources hydraulique.