



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran 2

Faculté des Sciences de la terre et l'univers

Département de Géographie et d'Aménagement du Territoire.

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master 2
Géographie et aménagement de territoire

Option : Géomatique

***Les impacts d'aménagement sur le risque d'inondation
de la wilaya de Ghardaïa (Oued Mzab)***

Présenté par :

BENAIRED SAFIA

BRAIKIA MERIEM HOUDA

Les membres du jury :

Noms et prénoms	Grade	Etablissement	Qualité
M ^r ALLAL Nadir Elhoussini	Maitre-assistant A	Université d'Oran	Président
M ^r Hadj Sahraoui Omar	Attaché de recherche	Centre de technique spatial, Arzew	Encadreur
Mme Gourine Farida	Maitre assistante A	Université d'Oran	Examinatrice

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

À l'heure où nous apporte la touche finale à ce mémoire

Nous remercions avant tout **Mon DIEU** tout puissant que nous a donné la foi, la santé, la volonté et la patience pour la réalisation de ce modeste travail durant cette période.

Nous tenons à remercier sincèrement **Mr. hadj sahraoui Omar** d'avoir bien guidé et dirigé, pour vos conseils et vos orientations qui nous ont été très utiles aussi pour l'intérêt et l'enthousiasme montrés lors de la proposition du sujet et tout au long de suivi de ce travail. Son aide et sa compréhension ont été de réels stimulants pour mener ce modeste travail à terme.

À **Mm Gourine Farida** chef du département des Sciences de la Terre et de l'Univers pour sa présence, sachant répondre à toutes nos interrogations ; sans oublier sa participation au cheminement de cette formation.

À **Mr. SOUIAH Sid-Ahmed** responsable de filière de Géomatique pour Leurs soutien moral et pour leurs précieux orientations qu'elles nous ont prodigués tout le long de master.

À **Mr Zanone pour** sa disponibilité, son soutien et sa gentillesse et la patience qu'il a manifestés à notre égard durant la période de nos études.

Et aussi à tous les membres du jury pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire.

Nous remercions tous les responsables du **CTS** pour nos donner les informations et les données.

A l'ensemble des enseignements du département géographie pour leur patience, leurs conseils et l'intérêt qu'ils ont porté à nos travaux.

Et enfin nos profonds remerciements à toutes les personnes qui ont aidés et Soutenue de près ou de loin.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail.

À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et bien être. Merci pour tout le soutien que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

A mes chers frères et mes sœurs

Mes neveux et ma nièce

A tous ma famille

Benaired et Kadour Mokhtari

A mon binôme **Braikia Meriem Houda** avec qui j'ai passée des moments agréables

A tous mes amis les plus proches surtout :

Nessrine, Rania, Wafaa, Latifa

Chahinaz, Fatima, Sara et Abir

A tous les étudiants de ma promotion.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail.

Aux deux plus chers êtres dans ma vie mes parents

Mon cher **papa**... depuis ma naissance, tu m'as guidé avec patience. Merci, papa d'avoir toujours été là pour me protéger. Tu m'as inculqué le respect d'autrui et les vraies valeurs de la vie. Personne ne pourra te remplacer, je souhaite une très longue vie en rose pleine de joie et de santé, je t'aime papa.

À ma chère **maman**... les mots peuvent à peine exprimer ce que tu es pour moi, tu es la plus merveilleuse des mamans, merci pour ton amour, ton affection et tout ce que tu as me donner ,ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études ,Merci pour ce que tu as fait pour moi au cours de ces années. Je t'aimerais toujours maman.

A mes chers frères et ma grand sœur **Khaoula**

Mon neveu **Amir**

A ma deuxième maman

Sakina

A tous ma famille paternelle et maternelle

BRAIKIA et Mellab.

A mon binôme **Safia Benaired** avec qui j'ai passée des moments agréables

A tous mes cousines amis les plus proches surtout :

Khaoula, Ferial, Zoubida, Sara et Abir

A mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour moi que dieu te garde pour moi.

A tous les étudiants de ma promotion.



Les abréviations :

AEP : alimentation en eau potable

ANRH : Agence Nationale des Ressources en Eaux

ESRI: Environmental System Research Institute

EU: European Union

FHRC: Flood Hazard Research Centre

IDD: International Disaster Database

IP : indice de pente de Roche

MNT : modèles numériques de terrain

NGA : National Geospatial-Intelligence Agency

OJEU: Official Journal of the European Union

ONM : l'Office Nationale de la Météorologie

ONU : l'Organisation des Nations Unies

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission.

SWBD: SRTM Water Body Data

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre 1 : Description du Phénomène d'Inondation et Problématique des Crues en Algérie

Chapitre 2 : Description des Eléments du Milieu Physique de la Vallée de l'Oued M'Zab

Chapitre 3 : Environnement Physiographique Du Bassin Versant De L'oued M'Zab

Conclusion générale

La bibliographie

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

L' inondation est un risque dominant et un sujet d'actualité en Algérie et dans le monde entier, notamment au regard des dernières grandes crues catastrophiques donc la gestion de ce risque devient de plus en plus une nécessité. Plusieurs régions sur le territoire algérien sont menacées par ces catastrophes hydrologiques surtout dans ses régions désertiques, particulièrement La ville de Ghardaïa « Oued M'Zab » qui porte dans son historique un nombre assez important des inondations, depuis de 1951 à 2008, ce qui la rend une zone à risque périodique.

L'objectif de cette étude est la cartographie de l'aléa d'inondation puis la vérification de l'impact des aménagements proposés, permettant l'atténuation ou l'amortissement du risque. Le bassin versant de l'Oued M'Zab région en pleine expansion, a fait l'objet d'étude, vu sa vulnérabilité aux inondations. Pour la réalisation de ce dernier en se basant Sur des images satellitaires de très haute résolution spatiale avec l'intégration d'un MNT.

Mots clés : Inondation, risque, cartographie, Oued M'Zab, vulnérabilité, MNT.

ملخص

تعتبر الفيضانات من المخاطر السائدة ومسألة الساعة في الجزائر وحول العالم، لا سيما في ضوء آخر فيضانات كارثية كبرى، لذا أصبح تسيير هذا الخطر ضرورة أكثر فأكثر. تهدد هذه الكوارث الهيدرولوجية عدة مناطق على الأراضي الجزائرية خاصة الصحراوية، ولا سيما مدينة غرداية "واد مزاب" التي شهدت في تاريخها عددًا كبيرًا نسبيًا من الفيضانات، منذ 1951 إلى 2008، والتي يجعل المنطقة في خطر دوري. الهدف من هذه الدراسة هو رسم خريطة لخطر الفيضان ومن ثم التحقق من تأثير التطورات المقترحة، مما يتيح التخفيف من المخاطر أو إزالتها. تمت دراسة الحوض السفحي في منطقة واد مزاب الآخذة في التوسع السريع، نظرًا لتعرضها للفيضانات. لتحقيق هذا الأخير استنادًا إلى صور الأقمار الصناعية ذات الدقة المكانية العالية جدًا مع دمج MNT.

الكلمات المفتاحية: الفيضانات، خطر، واد مزاب، الضعف، MNT

Les cours d'eau représentent, pour les riverains, à la fois une richesse et une menace [Bravard et Petit, 1997]. Cette dualité a longtemps été considérée comme globalement bénéfique, mais aujourd'hui il semble que cet équilibre soit rompu.

D'après les informations de l'"International Disaster Database (IDD)" du Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres (CRED), les inondations et les tempêtes sont au cours des deux dernières décennies au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde. Elles représentent 60% des catastrophes enregistrées à l'échelle mondiale entre 1990 et 2007 pour plus d'information voir [www.cred.be].

Quant à savoir si ces événements ont un caractère exceptionnel ou s'ils sont les signes précurseurs d'un changement climatique dû au réchauffement global, nul ne peut encore le confirmer. Ce qui est certain, c'est que bien souvent les inondations provoquent d'importants dégâts parce que l'homme s'est installé dans des zones sensibles qui ont été urbanisées sans planification prévue sous la pression démographique.

En Algérie, les inondations sont devenues de plus en plus complexes à gérer. En effet, la construction de quelques ouvrages, aménagements et des résidences permanentes sur les rives des cours d'eau, ont eu pour conséquence d'amplifier le risque face aux crues exceptionnelles. Cependant, plusieurs régions du pays sont menacées par ces catastrophes hydrologiques.

La ville de Ghardaïa, avec ses splendeurs architecturales, classée comme patrimoine national en 1971 et patrimoine de l'humanité par l'"United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation (UNESCO)" depuis 1982, et une population d'environ 156 000 habitants et un lieu qui s'élève sur les rives de l'Oued M'Zab. Cette ville est confrontée continuellement aux inondations générées par les crues de ce dernier qui draine une superficie de 3018 km² sur une longueur de 115.28 km. De ce fait, l'établissement d'une politique efficace de gestion de ce risque naturel a constitué l'une des principales préoccupations des décideurs et responsables de la wilaya de Ghardaïa. Plusieurs études et projets de préventions ont été réalisés dans ce contexte sur la vallée du M'Zab notamment le projet « Etude d'assainissement et de protection contre les crues de l'Oued M'Zab » réalisé par le bureau d'étude suisse BG en 2000, ainsi que le projet « Identification et cartographie des zones à risques d'inondation à l'aide des outils spatiaux : Cas de la vallée du M'Zab » réalisé par l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) en 2012.

Le risque d'inondation est le résultat du croisement de deux principaux facteurs :

- L'aléa, représenté par la probabilité d'occurrence du phénomène crue et son intensité.
- La vulnérabilité, définie par les conséquences prévisibles de la crue sur les personnes et leurs biens.

Le but de cette étude est la cartographie de l'aléa d'inondation puis la vérification de l'impact des aménagements proposés, permettant l'atténuation ou l'amortissement du risque. L'objectif principal est de cartographier l'aléa d'inondation par approche de modélisation hydraulique en se basant sur des images satellitaires de très haute résolution spatiale (0.5 m) avec l'intégration d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une précision centimétrique en altimétrie, puis exposer les capacités des outils informatiques dans la cartographie des résultats présentant ainsi un outil très ambitieux à la portée des décideurs pour définir les niveaux de protection à prendre.

La mission à réaliser pour cette étude, est de trouver les techniques et les moyens, afin d'amortir le risque dans les sites les plus sensibles, pour cela, on a étudié les causes principales qui déclenchaient la crue du 01 Octobre 2008 et qui a touché la ville de Ghardaïa.

La réalisation de cette mission permette de présenter de nouvelles solutions techniques aux décideurs. Le but ce n'est pas de réaliser des avant-projets, mais d'orienter les décideurs vers une gestion intégrée des cours d'eau. Les perspectives sont basées sur des approches très simples de manière à faciliter l'appropriation des résultats par les acteurs de terrain.

Pour aboutir aux objectifs visés, la démarche suivante est adoptée, elle est structurée en trois chapitres, dont l'agencement reflète la démarche utilisée et les étapes d'analyse :

Le premier chapitre intitulé "**Description du Phénomène d'Inondation et Problématique des Crues en Algérie**" traite deux volets, le premier repose sur une présentation générale des différentes composantes des risques d'inondation, il donne une idée générale sur la façon d'évaluation du risque d'inondation (aléa et vulnérabilité), expose les diverses stratégies de gestion de ce risque afin de préciser les différentes approches utilisées pour cartographier le risque d'inondation et énumérer ses bienfaits et ses limites. Le deuxième est consacré à une étude beaucoup plus étendue sur les causes et les problématiques liées aux inondations en Algérie en général et prendre le cas de la vallée du M'Zab en particulier, du moment que c'est notre cas d'étude.

Le deuxième chapitre, "**Description des Eléments du Milieu Physique de la Vallée du M'Zab**" est consacré à la description des éléments du milieu physique en resituant l'aire d'étude dans les cadres géographique, hydro climatologique et géologique de la région, nous permettant de dégager les grands traits caractérisant les éléments du milieu physique du grand bassin versant de l'Oued M'Zab.

En accord avec les objectifs de l'étude, le troisième chapitre "**Environnement Physiographique du Bassin Versant de l'Oued M'Zab**" est consacré à traiter les paramètres et les indices les plus significatifs du bassin versant dans la genèse des crues et qui sont déterminés et analysés à partir d'un MNT SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) avec une résolution planimétrique de 30X30 mètre et une précision altimétrique de 15 mètre à défaut d'un MNT précis couvrant tout le bassin versant.

Introduction générale

Enfin, une " *conclusion générale* " synthétise les résultats de ce travail et propose quelques perspectives de recherche complémentaires dans l'objectif d'affiner les connaissances initiales et celles nouvellement produites, poursuivre la réflexion sur l'élaboration d'un Plan de Prévention du Risque d'Inondation pour la ville de Ghardaïa et sa périphérie dans le contexte global du développement durable.

I.1 Introduction

Ce premier chapitre à deux objectifs principaux, le premier est de replacer les attentes en terme de caractérisation de l'inondation d'une vallée (phénomène physique naturel appelé aléa) dans le contexte plus général de la gestion du risque d'inondation, et aussi de présenter les approches d'analyse de l'aléa qui sont fiables et robustes afin d'en faire émerger : « les intérêts et les limites ». Le second est la présentation d'un inventaire des crues et quelques recensements des inondations en Algérie et en particulier la vallée de l'Oued M'Zab.

I.2 Définition et genèse du phénomène d'inondation

Phénomène d'origine naturelle, l'inondation est définie comme suit :

« Submersion temporaire par l'eau de terres qui ne sont pas submergées en temps normal. Cette notion recouvre les inondations dues aux crues des rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer dans les zones côtières et elle peut exclure les inondations dues aux réseaux d'égouts » [Official Journal of the European Union, 2007].

On peut ajouter à cette liste de situations, la rupture de digue qui occasionne également une submersion temporaire de zones non submergées en temps normal.

La crue correspond à une augmentation du débit d'un cours d'eau qui l'amène à sortir de son lit mineur, limité par les berges, pour recouvrir le lit majeur, situé de part et d'autre. Des précipitations importantes sur tout ou partie du bassin versant sont la cause la plus fréquente de l'augmentation du débit. Suivant les circonstances et la topographie, on distingue différents types d'évènements.

I.3 La vallée fluviale

Le terme « vallée fluviale » désigne usuellement les zones de dépression géographique où une gorge de forme allongée et plus ou moins large qui a été creusée dans le relief par un cours d'eau ou par un glacier. Elle peut se situer entre deux montagnes ou plus.

Une vallée est constituée d'un talweg, qui est une ligne joignant les points les plus bas d'une vallée, soit le creux de la vallée. Comme est montré dans la figure I-1, la vallée fluviale est caractérisée par ses versants qui représentent chacune des pentes d'une montagne, et comprend : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur.

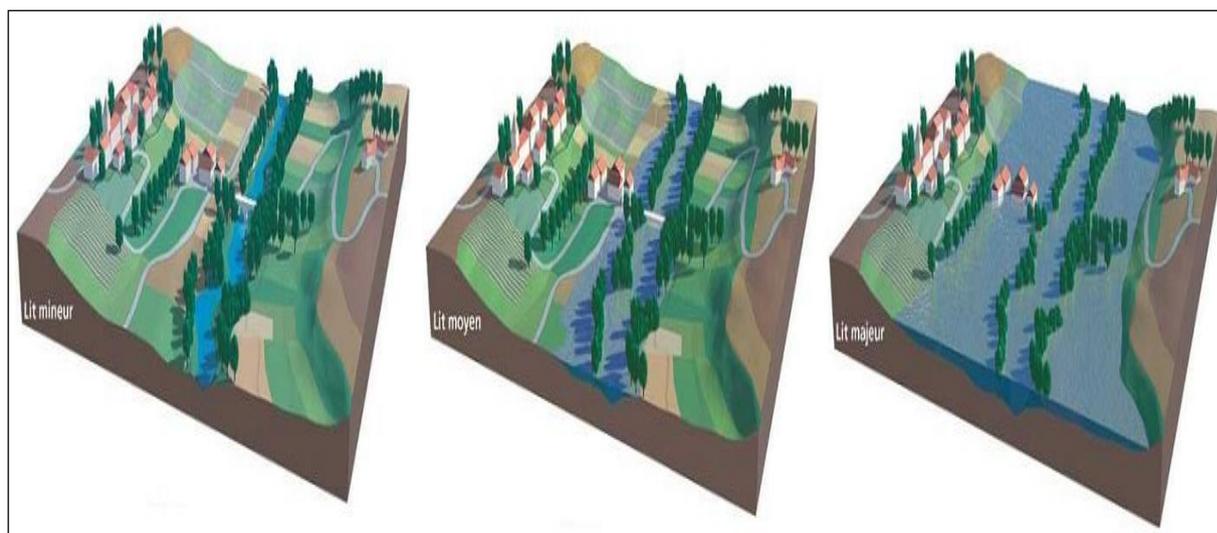


Figure I- 1 : Les composants de la vallée fluviale

I.3.1 Le lit mineur

C'est la partie du lit du cours d'eau comprise soit entre des berges franches, soit des barges marquées, dans laquelle l'intégralité de l'écoulement s'effectue la plupart du temps en dehors des périodes de très hautes eaux et de crues débordantes.

I.3.2 Le lit majeur

C'est le lit maximum qu'occupe un cours d'eau dans lequel l'écoulement ne s'effectue que temporairement lors du débordement des eaux hors du lit mineur en période de très hautes eaux, en particulier lors de la plus grande crue historique.

I.3.3 Le lit moyen

C'est l'intermédiaire entre le lit mineur et le lit majeur, qui est l'espace occupé par le cours d'eau lors de crues courantes, telles que les crues saisonnières.

I.4 L'aléa et la vulnérabilité des risques des inondations

La notion de risque est communément définie comme la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité.

Les spécialistes définissent, le risque comme étant la résultante du croisement entre l'aléa et la vulnérabilité (voir Figure I-2).

Pour le risque d'inondation l'aléa représente le phénomène naturel aléatoire traduit par le débordement du cours d'eau et l'extension de l'eau dans le champ d'inondation. La vulnérabilité transcrit quant à elle la sensibilité de l'occupation du sol et de la société au

phénomène d'inondation, elle comprend intrinsèquement une notion d'acceptabilité, ainsi sur le plan socio-économique, nous parlerons des dommages potentiels encourus [Gendreau et al. 1998].

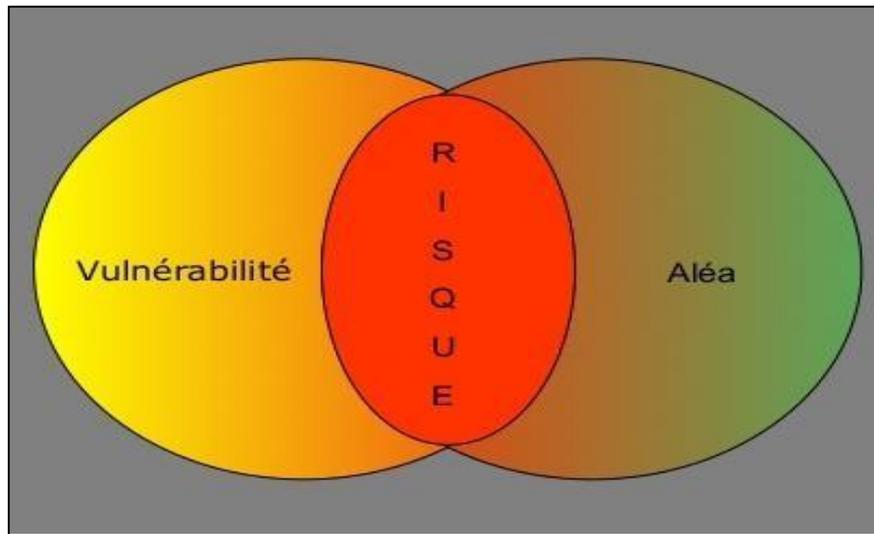


Figure I- 2 : Décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité

Il n'est pas envisageable, pour une société, de se protéger pour tous les niveaux de risque. Elle doit donc définir un niveau de risque acceptable où les événements naturels extrêmes et leurs conséquences devront être tolérés [Gilard, 1995] : le "risque zéro n'existe pas". Cette notion de risque dit "naturel" est quelque peu trompeuse puisqu'elle englobe une importante composante humaine.

I.5 Typologie des risques d'inondation

A l'exception de phénomènes rares tels une rupture d'une digue ou d'un barrage, l'inondation est toujours le résultat de précipitations intenses (et/ou de fonte de neige). Selon la nature du processus aboutissant à l'inondation (origine, dynamique temporelle et spatiale), il est classique de distinguer trois grands types de risques d'inondation qui, dans la réalité, se retrouvent souvent combinés.

I.5.1 Le risque d'origine pluvial

Représente le résultat d'un processus de ruissellement suite à des précipitations violentes sur des surfaces assez exigües. Il est généré par des phénomènes localisés dans l'espace (de quelques km² à quelques dizaines de km² au maximum) et le temps (quelques heures). Si les zones exposées sont de faible extension, elles peuvent être malheureusement très peuplées, de plus, le temps de réaction à l'événement est faible. L'exemple type est l'inondation produite

par dépassement de capacité des réseaux d'assainissement pluvial en milieu urbain.

I.5.2 Le risque fluvial

C'est le résultat d'un débordement exceptionnel de cours d'eau en plaine, généralement caractérisé par des montées lentes des eaux et des vitesses d'écoulement modérées sur des surfaces de faibles pentes. Les zones exposées constituent généralement des secteurs de forte extension sur lesquels l'homme s'est implanté depuis longtemps.

I.5.3 Le risque torrentiel

Représente le résultat de débordement exceptionnel de cours d'eau des montagnes, généralement caractérisé par des montées rapides des eaux et des vitesses d'écoulement élevées sur des surfaces de fortes pentes. Les zones exposées sont souvent limitées mais la violence et la rapidité du phénomène le rend particulièrement dangereux.

I.6 Évaluation du risque d'inondation

L'évaluation du risque d'inondation passe par la caractérisation séparée de l'aléa et de la vulnérabilité puis les croisées. L'aléa hydraulique est souvent défini à l'aide de la seule variable de hauteur de submersion, les autres variables étant considérées comme ayant des effets négligeables sur le milieu ou strictement liées à la hauteur maximale [Torterotot, 1993].

L'évaluation de la vulnérabilité est très délicate car une partie des dommages d'une inondation n'est pas quantifiable (perte en vies humaines, angoisse face à l'événement, stress, inquiétude, ...) : ce sont les dommages intangibles, qui sont opposés aux dommages tangibles. D'après le Flood Hazard Research Center, la contribution des dommages intangibles, si l'on se réfère à la perception des pertes par les sinistres, est d'une valeur au moins égale à celles des dommages tangibles directs, à savoir les dommages matériels [Torterotot, 1993].

Pour croiser les deux résultats précédents, deux approches ont été proposées. La plus fréquente est une approche socio-économique des crues par l'établissement (éventuellement à la parcelle) de courbes coût des dommages / fréquence de l'aléa.

L'analyse fréquentielle de l'aléa repose souvent sur la seule hauteur de submersion considérée, d'après [Hubert et Ledoux, 1999], comme "le paramètre le plus significatif pour expliquer le montant des dommages".

A l'inverse, la méthode "Inondabilité" propose de transcrire la vulnérabilité à travers des variables de caractérisation de l'aléa (hauteur, durée et fréquence). Plus précisément, la comparaison est effectuée sur une période de retour à l'occurrence la première crue débordante et celle liée à l'objectif de protection d'une parcelle [Gilard, 1998].

I.7 Mesures de gestion du risque d'inondation

L'ampleur du risque d'inondation en Algérie et dans le monde nous éclaire sur les fortes motivations de tous les acteurs impliqués dans la mise au point de mesures de réduction de ce risque. Cependant n'oublions pas que le cours d'eau est le lieu de nombreux usages socio-économiques qu'il faut satisfaire. Ainsi, les mesures de gestion devront également prendre en compte les contraintes imposées par le maintien d'une richesse écologique et d'une ressource en eau suffisante.

Une première typologie possible des modes de gestion du risque d'inondation découle directement de la dichotomie du risque en aléa et vulnérabilité. Elle conduit à différencier :

- ✚ Les mesures structurelles visant à modifier l'aléa par des mesures techniques (construction d'un barrage, la rectification de la section d'un cours d'eau, édification de digues ...);
- ✚ Les mesures non structurelles qui agissent sur la vulnérabilité en cherchant à réduire les dommages potentiels soit de façon pérenne hors contexte de crise (contrôle de l'occupation du sol et de son usage), soit en réaction directe à l'événement (prévision, annonce de crue, organisation des secours...).

Une deuxième typologie, qui semble plus intéressante, redistribue les précédentes mesures selon trois champs d'intervention : culture du risque (volet communication), prédétermination et prévention du risque (volet aménagement et réglementation), prévision et alerte (volet gestion de crise) [Gilard, 1998].

Une politique efficace de gestion du risque d'inondation utilise une combinaison, très tributaire du contexte local, de mesures appartenant à ces trois domaines d'intervention, la figure I-3 présente ces trois modes.

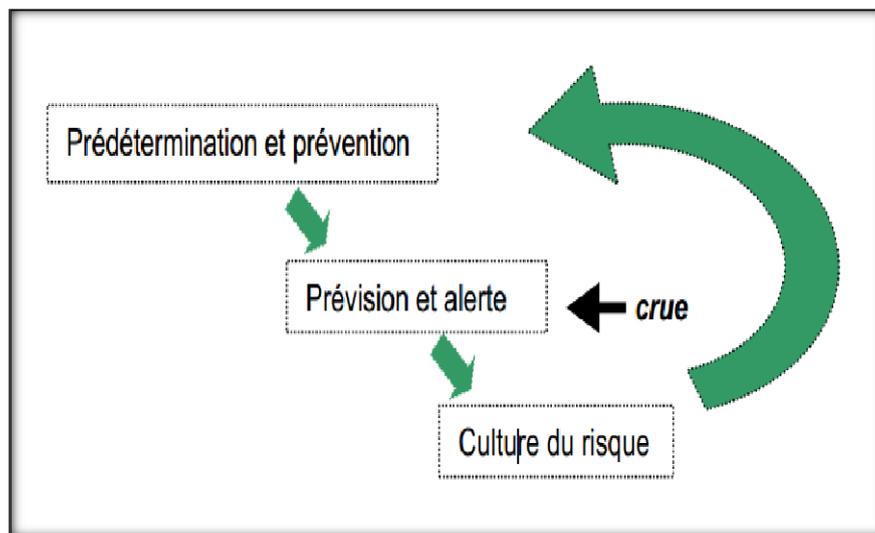


Figure I- 3 : Les trois modes de gestion du risque d'inondation [Gilard, 1998]

I.8 Caractérisation de risque d'inondation

Le choix d'une stratégie d'étude de risque d'inondation dépend directement des moyens (temps, données, capacité de calcul, budget ...) à disposition mais aussi et surtout de l'objectif recherché. Au sein même de la gestion du risque d'inondation, ces objectifs sont très variés (cartographies informatives pour développer la culture du risque, cartographie réglementaire, prévision des zones submergées, choix de scénarios d'aménagement...). Ils conditionnent les variables d'inondation recherchées (hauteur, durée, vitesse, fréquences...).

Dans ce contexte, il n'est pas étonnant d'être confronté à une multitude d'approches d'étude de risque. Leur présentation s'appuie sur le découpage suivant :

- ✚ Approche historique (analyse d'observations d'événements passés) ;
- ✚ Approche hydrogéomorphologique ;
- ✚ Approche modélisation hydraulique (et hydrologique).

I.8.1 L'approche historique

Le terme "approche historique" est employé pour désigner toute valorisation d'observations de crues récentes ou anciennes. Cette approche nous permettra la reconstitution d'une chronologie des crues sur un secteur géographique.

Si l'on exclut les données issues de télédétection spatiale, les observations mobilisables proviennent soit de limnigrammes, soit des repères de crues où des témoignages.

I.8.1.1 Les limnigrammes

C'est l'information la plus fréquente car elle est le produit du seul dispositif pérenne d'observations du cours d'eau : les stations limnimétriques qui mesurent, de manière ponctuelle mais continue (stations automatisées), la hauteur d'eau en fonction du temps. Une loi de tarage, qui définit la relation entre le débit et la hauteur d'eau mesurée au niveau de la station, permet d'accéder au débit en fonction du temps.

Placés uniquement dans le lit mineur du cours d'eau, le coût et l'entretien de tels dispositifs limitent leur emplacement. Ainsi la distance qui les sépare est rarement inférieure à une dizaine de kilomètres. En dehors des quelques défaillances, survenant malheureusement souvent pendant les événements extrêmes qui nous intéressent, la précision de la mesure est de 1 à 10 cm pour la hauteur et de 10 à 20 % pour le débit [Cetmef et Cete, 2001]. Le principal intérêt de cette mesure, ponctuelle et en faible nombre, réside donc dans sa continuité temporelle et non dans sa distribution spatiale.

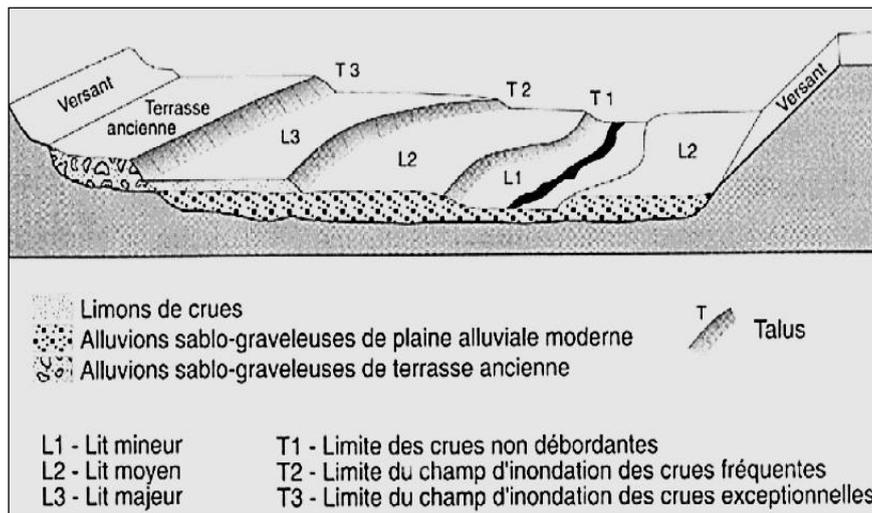


Figure I- 4 : Unités hydrogéomorphologiques et niveaux d'exposition à l'aléa associés
[METL/MATE, 1996]

I.8.1.2 Les "laisses" de crues

Sous ce vocable sont regroupées toutes les indications de hauteurs maximales atteintes par une crue, observées à des endroits quelconques de la plaine d'inondation. Elles proviennent de traces (herbes, branches, boues, humidité) laissées par les eaux et sont souvent référencées dans le temps de manière imprécise (rarement en deçà de la journée). Pour être exploitables, ces traces doivent être nivelées, transformées en un triplet (X, Y, Z) et archivées, pour les phénomènes extrêmes, elles sont parfois matérialisées (marque de peinture, plaque, ...) mais leur fiabilité est très variable.

I.8.1.3 Les témoignages

Les témoignages de personnes présentes sur le site au moment de l'inondation (habitants, secouristes, ...) peuvent fournir des témoignages très intéressants sur le fonctionnement de la crue, permettant ainsi d'accéder à des variables qualitatives ou quantitatives. Le problème de ces données se pose en termes de recueil (enquête de terrain lente) et surtout de fiabilité. Ainsi est-il important de recouper les divers témoignages, mais aussi de récupérer, stocker et archiver tout document susceptible de les conforter (photographies ou vidéographies). Malheureusement, le travail de recueil pour ce type de données n'est pas systématique et celui d'archivage et de mise en cohérence le plus souvent inexistant.

I.8.2 L'approche hydrogéomorphologique

I.8.2.1 Philosophie

L'approche hydrogéomorphologique correspond à "une première phase d'analyse des

milieux naturels et anthropisés des vallées, elle est basée sur une approche naturaliste, qui vise à mettre en évidence les différents lits des cours d'eau, les diverses implantations susceptibles de perturber les écoulements en les accélérant ou en les ralentissant, et à en déduire les zones inondables ainsi que des valeurs approchées des paramètres physiques de l'inondation" [METL/MATE, 1996].

L'identification des différents lits des cours d'eau repose sur une approche purement géographique, mêlant morphologie, sédimentologie et occupation traditionnelle du sol afin de délimiter, au sein des plaines alluviales, les unités hydrogéomorphologiques ; C'est-à-dire les zones qui sont exposées à des crues fréquentes, rares, ou exceptionnelles et celles qui ne sont jamais submergées comme les terrasses anciennes (voir Figure I-4).

Le but de cette philosophie, est d'accéder à une représentation conceptuelle du fonctionnement de la plaine en inondation pour en déduire un zonage du risque d'inondation par un schéma non quantitatif, rapide et peu cher (valorisant les données existantes).

I.8.2.2 Informations requises

Les informations requises par cette approche sont principalement la morphologie, l'occupation/utilisation du sol et des informations de sédimentologie. Puisque la philosophie de l'approche est de privilégier les données existantes, les niveaux de précision utilisés sont très variables.

Pour accéder à ces informations, plusieurs données spatialisées sont consultées :

- ✚ Les cartes topographiques, géomorphologiques, pédologiques, géologiques, d'occupation du sol et autres, utilisées pour leur référentiel géométrique et leur contenu thématique ;
- ✚ Les données topographiques issues des levés de terrain ou de photo-restitution, utilisées pour compléter les informations altimétriques trop imprécises des cartes topographiques ;
- ✚ Les images de télédétection : images satellitaires et surtout photographies aériennes (hors inondation), utilisées pour leur contenu sémantique et morphologique extrait le plus souvent par photo-interprétation et stéréo-interprétation ;
- ✚ Des compléments par observations sur le terrain sur des secteurs complexes.

Cette démarche est souvent réalisée à la fois sur des données récentes pour caractériser le milieu actuel et des données anciennes pour analyser les évolutions et effectuer des analyses diachroniques.

I.8.2.3 Résultats

Appliquée au niveau du bassin versant mais aussi de la plaine alluviale. La figure I-5

présente un exemple des résultats de la caractérisation hydrogéomorphologique qui sont :

- Une description du milieu "naturel" : unités hydrogéomorphologiques (lit mineur, moyen et majeur), limites séparant ces unités (talus, avec leur hauteurs et déclivités) et manifestations de l'hydrodynamique (zone d'érosion, de sédimentation, affleurement rocheux, axes d'écoulements préférentiels...).
- Une description des modifications apportées par l'homme : occupation des sols et ouvrages (remblais, digues, seuils...) modifiant les écoulements.

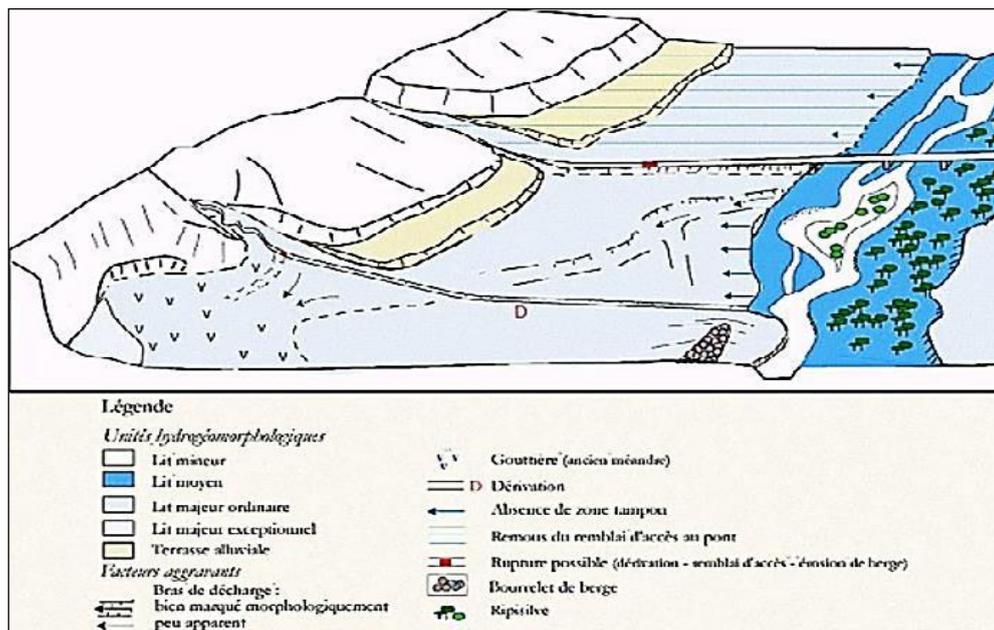


Figure I- 5 : Exemple de caractérisation hydrogéomorphologique
 (<http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-Roussillon/risques/zi/aude/methodologie.htm>)

I.8.3 L'approche par modélisation hydraulique

Un modèle n'est qu'une représentation schématique, et donc simplifiée, du système "réel" afin de répondre aux objectifs du modélisateur. Sa raison d'être n'est rien d'autre que de répondre aux problèmes posés [Bachelard, 1979], qui vont de la prédiction/prévision de grandeurs intéressant l'ingénieur, jusqu'à l'analyse, la compréhension et l'explication du fonctionnement de systèmes complexes par le chercheur [Ambroise, 1999].

La première phase effective de la mise en œuvre d'un modèle consiste à rassembler les processus considérés comme essentiels, et dont il est démontré que la combinaison est la cause des phénomènes observés. Cette phase nécessite de choisir le niveau d'analyse pertinent au

problème posé en identifiant les variables significatives pour décrire le système physique, son environnement, le problème et l'ensemble des interactions entre elles [Kauark Leite, 1990].

Dès lors il est possible de définir :

- ❖ Des modèles distribués, si les variables et les paramètres sont variables dans l'espace, sinon ils sont dits globaux ;
- ❖ Des modèles permanents (ou stationnaires) dans le cas particulier où toutes les variables sont constantes au cours du temps ;
- ❖ Des modèles empiriques (boîte noire) qui ne font aucune référence, sinon sémantique, aux processus internes du système étudié mais se contentent d'établir des relations directes entre les variables d'entrée et de sortie ;
- ❖ Des modèles déterministes ou stochastiques.

I.8.3.1 Performance d'un modèle hydraulique

La performance d'un modèle hydraulique, c'est-à-dire la qualité de la réponse apportée par le modèle aux questions posées (prévision/prédiction et/ou analyse du fonctionnement), est directement liée d'une part aux hypothèses simplificatrices de représentation du processus (exprimées à travers des équations et de la discrétisation spatio-temporelle) : à la disponibilité et à la qualité des données d'entrée (conditions aux limites, conditions initiales et topographie de la plaine alluviale). Et d'autre part aux approximations induites par la méthode de résolution des équations et à la précision du calage (pour le paramètre de rugosité et les lois d'ouvrages).

I.8.3.2 Typologie des modèles utilisés en hydraulique fluviale

En hydraulique fluviale, trois grandes classes de modèles existent : les modèles bidimensionnels, les modèles unidimensionnels, et des modèles hybrides.

✓ Les modèles bidimensionnels

□ Hypothèses

Les hypothèses essentielles des modèles bidimensionnels sont [EDF, 1993] :

- ✚ L'homogénéité des vitesses sur la verticale ;
- ✚ La répartition hydrostatique de la pression, qui découle de la faiblesse de l'accélération verticale vis a-vis de la gravité (faible courbure des lignes de courant, écoulement dit graduellement varié) ;
- ✚ La faiblesse de la pente moyenne de l'écoulement.

□ Discrétisation spatiale et schémas de résolution

Les premiers modèles développés, et donc les plus fréquents, s'appuient sur un maillage

régulier du domaine et un schéma de résolution basé sur la méthode des différences finies. Plus récents et plus efficaces en termes de précision de calcul, mais plus compliqués à implémenter, des modèles basés sur des schémas aux éléments finis sont développés [Hervouet et Van Haren, 1996]. Ils permettent de découper avec beaucoup plus de souplesse le domaine en un maillage irrégulier formé le plus souvent de triangles (issus d'une triangulation de Delaunay [Hervouet et Van Haren, 1996] illustrée à la figure I-6.1), d'un mélange de triangles et de quadrilatères (méthode développée dans [Farissier, 1992] et illustrée dans la figure I-6.2) ; et plus rarement de polygones d'ordre supérieur (tessellation de Dirichlet [Todini, 1994] illustrée à la figure I-6.3).

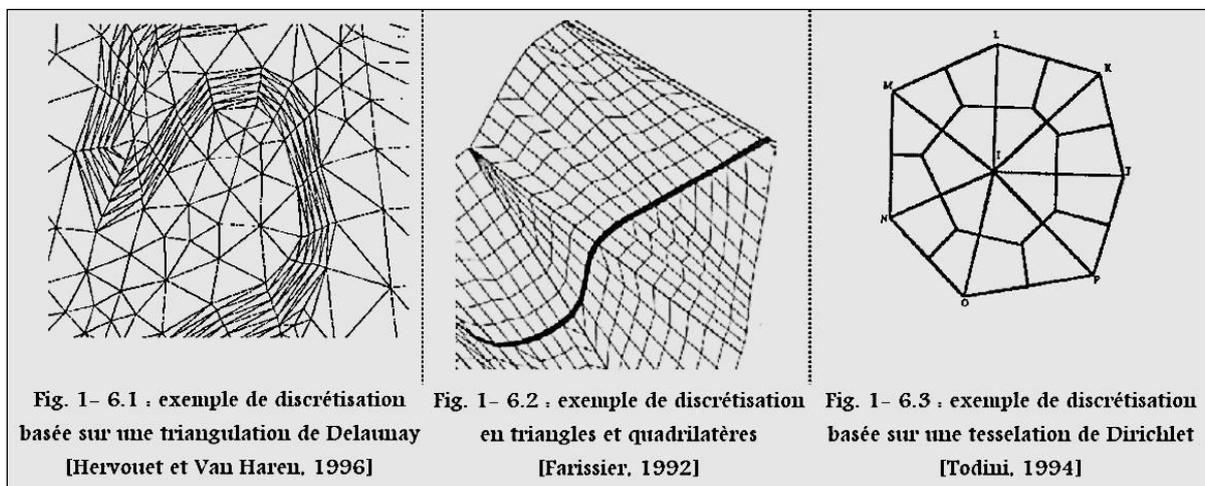


Figure I- 6 : Discretisation spatiale et schémas de résolution des modèles bidimensionnels

Les conditions aux limites sont généralement décrites par un hydrogramme et un profil transversal de vitesse à l'amont, et un limnigramme à l'aval.

Quels que soient le découpage et le schéma de résolution retenus, chaque maille doit être paramétrée en son centre en termes de topographie et de coefficient de rugosité. Le modèle calcule alors, à chaque pas de temps et pour chaque maille (une maille = un nœud de calcul au centre de la maille) un tirant d'eau et une vectrice vitesse.

✓ Les modèles monodimensionnels

□ Hypothèses

Dans le cas monodimensionnel, l'écoulement est supposé bien "canalisé", c'est-à-dire organisé par rapport à une direction préférentielle bien identifiée, appelée "axe d'écoulement" [EDF, 1993], dont l'emplacement est supposé constant au cours de la crue. Les principales hypothèses simplificatrices sont [METL/CETMEF, 1999] :

- ✚ La surface libre est horizontale dans une section en travers : la vitesse et le tirant d'eau sont uniformes dans toute section perpendiculaire à l'axe d'écoulement (appelée section en travers).
- ✚ L'écoulement est graduellement varié (comme en bidimensionnel).
- ✚ La pente moyenne (longitudinale) de l'écoulement est faible.

□ Discrétisation spatiale et schémas de résolution

La géométrie du lit majeur est constituée par une série de profils transversaux et les nœuds ou sections de calcul s'appuient sur ces profils (voir Figure I-7). Des sections supplémentaires de calcul peuvent éventuellement être ajoutées par interpolation des profils.

Les ouvrages (seuils, ponts...) présents sur le long de la rivière provoquent une discontinuité spatiale où les hypothèses du modèle ne sont plus valables. Leur comportement hydraulique est décrit alors par une loi spécifique.

Les conditions aux limites sont généralement décrites par un hydrogramme à l'amont et un limnigramme à l'aval.

Un coefficient de frottement est défini par section de calcul, éventuellement différenciée entre sa partie lit mineur et sa partie lit majeur. Le modèle calcule alors, à chaque pas de temps et pour chaque section de calcul, un tirant d'eau unique et un débit. Contrairement aux modèles bidimensionnels, la cartographie des résultats impose un processus de post-traitement spatial plus ou moins complexe et efficace [Werner, 2001].

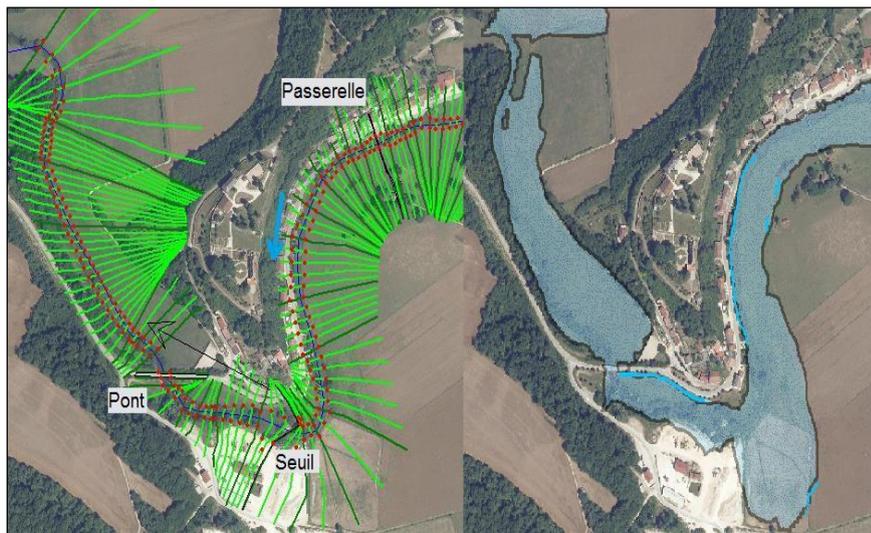


Figure I- 7 : Exemple de discrétisation spatiale en sections de calcul

✓ Les modèles hybrides

□ Présentation

Cette catégorie propose des modèles de fonctionnement spatial intermédiaires entre les modèles monodimensionnels et les modèles bidimensionnels dans le sens où ils essaient de dépasser les limitations fortes imposées par les hypothèses du 1D, tout en cherchant à limiter le nombre très important de points de calculs et de variables à déterminer de certaines modélisations 2D.

En effet, lorsqu'on s'intéresse à une rivière naturelle en crue, la présence de sinuosité et le débordement par-dessus les berges induisent des interactions complexes entre le lit mineur et la plaine en termes d'échange de quantité de mouvement. Ces changements importants dans les caractéristiques de l'écoulement ne sont plus en accord avec les hypothèses du modèle 1D [Ervin et MacLeod, 1999] : la vitesse n'est plus homogène dans une section en travers, l'écoulement n'est plus exactement parallèle au lit mineur en quelques points. Par ailleurs, en présence de lit mineur endigué, il peut exister une phase de débordement où l'écoulement dans la plaine d'inondation est plutôt perpendiculaire au lit mineur et des zones de stockage peuvent apparaître... Les adaptations des modèles monodimensionnels ne suffisent pas.

La figure I-8 montre un exemple du modèle hybride le plus courant est celui dit à casiers, qui incorpore des entités surfaciques (appelées "casiers") dont la taille et la forme sont ajustées aux ordres de grandeurs relatifs des gradients hydrauliques (cote et vitesse) et aux orientations principales de l'écoulement. Pour rester proches de la réalité physique, leurs limites doivent s'appuyer sur les éléments structurants de la plaine : digues, ouvrages de franchissement, déversoirs, chenaux [Hingray, 1999]. Chaque casier est supposé homogène en niveau d'eau et est défini par la relation entre son volume de stockage et la cote du plan d'eau. Les liaisons avec l'écoulement principal ou avec des casiers connexes sont "conceptualisées" soit par une loi d'ouvrage soit par une loi de résistance.

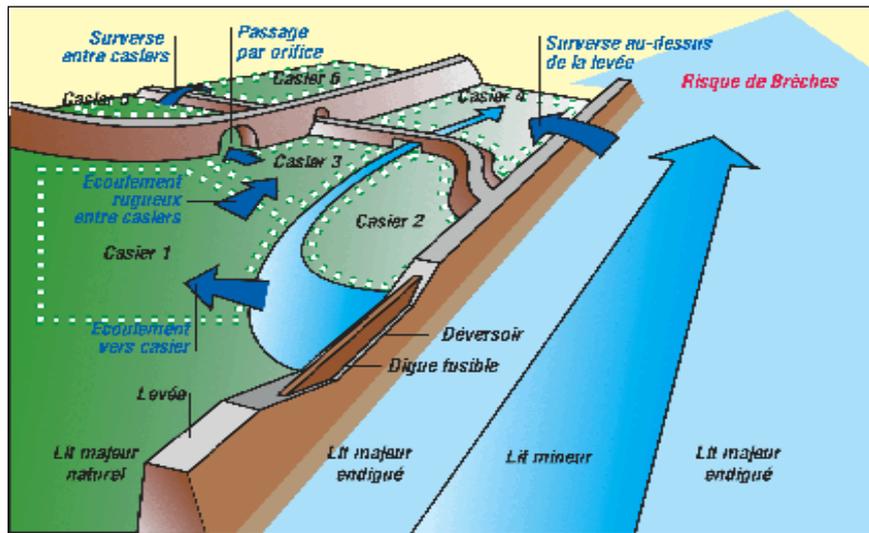


Figure I- 8 : Exemple de modélisation à casiers (illustration sur le modèle Loire, HYDRATEC d'après [METL/CETMEF, 1999])

□ Hypothèses

Dans ce type de modèle, le calcul de l'écoulement est basé sur la continuité du volume dans les casiers et sur des lois d'écoulement sans inertie entre les casiers. Si ces hypothèses sont légitimes à l'intérieur des champs d'inondations (faible vitesse dans le lit majeur), elles le sont beaucoup moins en lit mineur. Ceci a débouché sur plusieurs tentatives de modèles couplés 1D-2D, où l'écoulement dans le lit mineur est représenté par un modèle unidimensionnel, et où l'écoulement dans le champ d'inondation (lit majeur) est représenté par des casiers ou par des équations bidimensionnelles éventuellement simplifiées [Bates et De Roo, 2000].

I.9 Intérêts et limites de ces approches

I.9.1 Approche historique

Le principal intérêt de l'approche historique réside dans la valorisation d'archives, elle permet donc de fournir de très précieuses données à posteriori sur des crues passées. Issues de l'observation et de la mesure, ces données présentent une fiabilité inégalée par les données issues de simulation. Malheureusement diverses contraintes limitent la disponibilité (quantité et répartition spatiale) de ces données. D'un point de vue pratique, cela rend indispensable le recours à une approche faisant intervenir une méthode d'interpolation et d'extrapolation des

informations.

Ainsi, à l'exception de rares cas où la densité de ces informations est suffisante pour établir une cartographie de l'aléa, l'approche historique ne constituera qu'une étape nécessaire, venant alimenter l'une ou l'autre des deux grandes approches en tant que données d'entrée, de calage ou de validation.

I.9.2 Approche hydrogéomorphologique

Pour la cartographie réglementaire dans le cadre du risque d'inondation, son principal avantage réside dans sa rapidité et dans la modestie des moyens techniques auxquels elle fait appel (cartes, levés de terrain, photographies aériennes). Son atout provient de son orientation très géographique, parfaitement en accord avec ce problème spatial qu'est l'inondation.

Les principales limites résultent de :

- La difficulté, dans certaines configurations morphologiques, à délimiter des zones inondables (limites masquées par des phénomènes secondaires comme le biseautage d'un talus par érosion) ;
- La difficulté à prendre en compte les effets d'ouvrages anthropiques récents (qui n'ont pas encore été clairement observés, ou qui n'ont pas eu le temps de façonner le paysage) ;
- La difficulté à récupérer et analyser l'ensemble de ces données éparpillées (notamment des données historiques pour les études d'évolution morphologique) et très disparates (types de documents, qualité...). Dans ce cas, un outil d'archivage et de traitement de données (spatiales) est d'une aide considérable ;
- Le côté un peu opaque de l'obtention du zonage, qui rend la méthode très tributaire de l'opérateur ;
- Le résultat beaucoup plus qualitatif, si la précision de ses résultats (sans recours à une modélisation) peut paraître insuffisante pour des fins réglementaires, son analyse "géographique" (pour la topographie, l'occupation du sol, ...) offre toutefois un grand intérêt au moins à un niveau plus régional dans la compréhension globale d'une vallée ou d'une portion de vallée. Ainsi, le recours à une telle approche géographique se révèle très utile en phase préalable à toute modélisation hydraulique.

En conclusion, l'approche hydrogéomorphologique valorise intelligemment, mais de façon un peu opaque, le maximum de données existantes sur le site étudié par une approche géographique (et donc spatiale). Très efficace à l'échelle de la planification, elle a besoin, pour espérer d'approcher l'échelle locale de l'aménagement et de la réglementation, d'être "consolidée" par des données historiques quantifiées.

I.9.3 Approche par modélisation hydraulique

Des différentes méthodes d'analyse de l'aléa, la modélisation hydraulique est la plus apte à répondre aux questions posées par la gestion des inondations : durée, hauteur et vitesse du courant, même si la détermination de ces vitesses reste un gros problème dans les versions les plus performantes en termes de discrétisation spatio-temporelle et de prise en compte de la turbulence [Wilson et al. 2002].

Son utilisation pour la gestion du risque d'inondation dépasse très largement la cartographie réglementaire en permettant de simuler des scénarios futurs, **de comparer différentes options d'aménagement**, d'étudier la sensibilité d'un système à l'urbanisation d'un bassin versant, à la rugosité etc.... La connaissance "fine" du schéma de propagation des eaux obtenue par modélisation permet également l'étude du transport sédimentaire [Hardy et al, 2000] et donc de l'évolution morphologique, du transport de contaminant [Carroll et al, 2000], ou encore de la dynamique écologique [Whigham et Young, 2001].

Le développement de modèles décrivant des phénomènes de plus en plus complexes, les améliorations en termes de capacité informatique et de disponibilité de données physiques sur les plaines d'inondation, font des modélisations hydrauliques des outils de plus en plus intéressants et d'ailleurs de plus en plus utilisés. L'utilisation de modèles bidimensionnels sur des linéaires de plusieurs kilomètres de rivière, éventuellement aidés par les possibilités croissantes de couplages inter modèles (1D-casiers-2D), devient par exemple courante.

Cependant le choix à priori de la "bonne" structure du modèle reste un problème très délicat puisqu'elle définit le modèle spatial de fonctionnement d'un processus que l'on cherche à comprendre, et à représenter.

Outre le coût de la donnée topographique, une première limite des modélisations toujours plus finement distribuées provient de la lourdeur de leur mise en œuvre, notamment au moment de l'implémentation de la topographie sur le maillage de calcul. De plus, cette course à la complexité soulève de forts questionnements sur la validité, notamment à l'intérieur de la plaine modélisée, du résultat du modèle trop souvent calé et validé sur des événements à dynamique simple avec, faute de mieux, un seul et même hydrogramme à l'aval ; ce qui renvoie inlassablement sur les problèmes de :

- Choix à priori du bon niveau de description du phénomène (structure du modèle : forme, taille, emplacement des mailles...).
- Qualité nécessaire pour les paramètres et variables observés (topographie, conditions aux

limites et éventuellement des conditions initiales).

➤ Calage de nombreux paramètres non observables, qui doivent donc être ajustés par des méthodes inverses.

La modélisation hydraulique est en effet, comme toute modélisation mécaniste de systèmes environnementaux complexes, soumise à ce problème de sur-paramétrisation qui conduit au problème d'équifinalité. Ceci consiste, à accepter plusieurs structures et plusieurs jeux de paramètres fondamentalement différents. Cela vient de notre connaissance restreinte du phénomène hydraulique modélisé, qui ne permet pas de réfuter, ni même de hiérarchiser ces différentes configurations de modèle.

Si bien qu'au stade actuel de nos connaissances, il est impossible d'identifier la part de responsabilité relative aux choix à priori de sa structure (erreurs liées à la discrétisation spatio-temporelle extrêmement tributaires du site d'étude), au paramétrage du modèle, à la procédure d'estimation des paramètres non observables du modèle (calage), ou aux imperfections des données servant à son calage [Bates et al, 1998]. Ceci explique l'importance de l'expertise dans le domaine de la modélisation hydraulique. Seul l'accès à des observations distribuées du phénomène à modéliser peut permettre d'élucider ces questionnements pour mieux prendre en compte les incertitudes et produire des prédictions distribuées plus fiables : Sans ces observations distribuées, il est impossible de hiérarchiser l'importance relative de ces divers facteurs. La priorité doit donc préalablement se tourner vers cette quête d'informations distribuées.

I.10 Les inondations en Algérie

Parmi les quatorze risques majeurs répertoriés par l'Organisation des Nations Unies (ONU), le risque d'inondation en Algérie fait partie des dix risques majeurs présents sur le territoire et cités par la loi 04-20 du journal officiel algérien paru le 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable [J.O.R.A., 2004]. Il est en troisième position après les séismes et les risques géologiques dans le classement national des risques majeurs, vu l'ampleur des dégâts matériels et aussi humains engendrés.

I.10.1 Perturbations météorologiques (origine et mécanisme de formation)

L'Algérie est soumise régulièrement à des systèmes perturbés pluvieux très diversifiés liés, d'une part, à sa grande superficie et d'autre part, à sa situation géographique, considérée comme position centrale entre les phénomènes d'origine polaire et tropicale, subissant des sécheresses et des inondations d'ampleur et de périodicité variables. En effet, les fortes pluies

qui se produisent généralement entre le mois de septembre et le mois de mai sont dues essentiellement aux perturbations du front polaire. Elles sont provoquées par l'arrivée de masses d'air polaire de l'arctique et qui se régénèrent fortement lorsqu'elles parviennent sur les eaux chaudes de la Méditerranée. Le flux fort de la chaleur d'humidité de la mer vers les masses d'air est en effet prépondérant dans l'intensification des perturbations. Ces dernières peuvent parfois pénétrer dans les régions sahariennes, elles sont alors fortement alimentées en humidité en provenance des régions tropicales.

I.10.2 Causes et types des crues catastrophiques en Algérie

Les précipitations sont caractérisées par une très forte irrégularité saisonnière et interannuelle entraînant des étiages extrêmement sévères des cours d'eau et inversement, des fortes crues et des inondations engendrant des dégâts humains et matériels considérables.

La genèse des fortes crues et leurs impacts sur l'environnement, diffèrent d'une région à une autre, et cela en fonction de la nature géographique, les conditions climatiques et d'occupation des sols qui les caractérisent.

Bien que la cause fondamentale de la plupart des inondations est les fortes pluies, d'autres facteurs interviennent, soit pour aggraver les effets d'une crue, soit pour créer eux-mêmes des phénomènes hydrauliques provoqués par la présence des débris et des troncs d'arbres qui réduisent la capacité du lit du cours d'eau.

D'une manière générale, les causes des inondations en Algérie peuvent être classées en trois types [Protection civile, 2009] :

a) Inondations liées à des situations météorologiques remarquables : se traduisant par une forte pluviosité (pluie importantes, orages violents), tels que les inondations de décembre 1957 des bassins de Mazafran et de la Sebaou. Les inondations de l'automne 1969 en Algérie et en Tunisie, les inondations catastrophiques de mars 1973 sur l'Est algérien, les inondations de mars 1974 des bassins versants de l'Algérois et de la Sebaou, les inondations de décembre 1984 sur tout l'Est algérien, les inondations du 10 novembre 2001 à Bâb El Oued etc...

b) Inondations provoquées par des facteurs liés à l'effet de l'homme : la défaillance des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, l'exhaussement des lits des cours d'eau par les décombres et les débris et d'autres agissements humains qui favorisent des dégâts lors des averses saisonnières : les cas de la ville de Tiaret inondée presque chaque hiver, et la plaine du M'Zab où des inondations se produisent tous les 2 à 3 ans illustrant parfaitement l'influence de ces facteurs.

c) Inondations produites dans des régions présentant un environnement topographique

défavorable : comme le cas des villes traversées par des cours d'eau (Bordj Bou Arreridj, Oued R'Hiou, Sidi Bel Abbès) ou situées au pied d'une montagne (Ain Defla, Batna, Médéa). Ces agglomérations à forte concentration des populations et sous l'effet d'une urbanisation anarchique et non réglementée présentent des grands risques, des pertes humaines et des destructions de constructions sont enregistrées à chaque inondation aussi légère qu'elle soit.

Ces inondations selon les caractéristiques des crues, leurs durées et leurs étendues sont de deux types [Protection civile, 2009] :

[1] Inondations engendrées par des crues torrentielles ou crues éclair, affectent les petits bassins versants de quelques dizaines de km² et sont le plus souvent liées à des chutes de pluies isolées et localement intenses issues de phénomènes de convection sous forme de tempêtes orageuses se produisant généralement en automne, et en été. Les crues de ce type sont particulièrement dangereuses en raison de la soudaineté et de la rapidité avec lesquelles elles se produisent. Les ruissellements extrêmement rapides et violents peuvent intervenir moins d'une heure après la pluie et les débits des cours d'eau passent de quelques m³/s à plusieurs milliers de m³/s en 2 ou 3 heures seulement. L'inondation de la ville de Oued R'Hiou, le 20 octobre 1993 en est un exemple, en 20 minutes de pluies des dégâts importants sont enregistrés, 23 morts, 20 blessés et plusieurs disparus.

[2] Inondations des grands bassins versants résultent le plus souvent des précipitations importantes généralisées sur des grandes étendues et caractérisées par leur quantité et leur durée (10 à 15 jours). Ces crues sont massives, lentes et à évolution facilement prévisible sauf lorsqu'elles sont brutalement aggravées par des affluents avals plus courts et plus rapides.

I.10.3 Quelques cas d'inondations catastrophiques en Algérie

L'Agence Nationale des Ressources en Eaux (ANRH) a effectué un inventaire exhaustif des inondations survenues en Algérie durant les quarante dernières années. Cet inventaire différencie les inondations causées par des pluies exceptionnelles généralisées sur plusieurs Wilayas, et d'autre part les inondations dues à des orages locaux, de forte intensité et affectant surtout certaines agglomérations et villes rendues plus vulnérables par prolifération des constructions anarchiques [Lahlah, 2004].

On présente dans ce qui suit par ordre chronologique, un bref aperçu des inondations survenues en Algérie [Lahlah, 2004] :

➤ **28 au 31 mars 1974** : Des chutes de pluie exceptionnelles dans les wilayas d'Alger et de

Tizi Ouzou (688 mm en 4 jours et 381 mm en une journée au col de Sakamody). Les dégâts à Tizi Ouzou sont : 52 morts et 4570 maisons détruites, 130 villages isolés, et plus de 18 000 sinistrés, 13 ponts détruits et des dizaines de kilomètres de routes emportées.

- **03 février 1984** : Les pluies abondantes généralisées sur l'ensemble de l'Est Algérien avec un foyer de maximum sur les monts de Constantine (120 mm en 3 jours) et les monts de Medjerda (80 mm en 3 jours) ont provoqué des inondations catastrophiques dans toutes les wilayas de l'Est Algérien et les dégâts occasionnés sont importants :
- **La wilaya de Jijel** : 20 morts, 500 têtes de bétail emportées et dégâts évalués à 50 millions de dinars.
 - **La wilaya de Constantine** : 1140 familles sinistrées, 200 hectares de cultures détruites.
 - **La wilaya de Skikda** : 8000 habitations envahies.
 - **La wilaya de Guelma** : 03 disparus, 1957 familles sinistrées, 02 ponts détruits et canalisations d'alimentation en eau potable (AEP) détruites à 100 %.
 - **La wilaya de Khenchela** : 777 familles sinistrées et pertes importantes en Cheptel.
 - **La wilaya d'Oum – El – Bouaghi** : 144 maisons détruites et 429 familles sinistrées.
- **29 décembre 1984 au 01 janvier 1985** : Des pluies exceptionnelles (plus de 250 mm en 4 jours seulement et 195 mm en une journée) généralisées sur tout l'Est Algérien provoquent des inondations très catastrophiques dans les wilayas de Jijel, Constantine, Skikda, Guelma, Annaba et El-Tarf. Le Tableau I-1, résume les caractéristiques des fortes crues observées sur l'ensemble des Oueds des bassins versants de la Seybousse des côtières constantinois et du Kebir Rhummel.

Tableau I- 1 : Crues observées du 28/12/1984 au 01/01/1985 dans l'Est Algérien [Lahlah, 2004]

Station	Oued	Hauteur maximale (m)	Débit maximum (m ³ /s)	Volume ruisselé (m ³)
Medjez Amar I	Cherf Aval	6.20	---	---
Medjez Amar II	Bouhamdane	6.10	1450	124.70
Bouchegouf	Mellah	3.89	510	---
Ain Breida	Ressoul	3.05	80	6.84

Mirbeck	Seybousse	14.90	2900	455
Ain El Assel	Kebir Est	10.10	508	71.5
Ain Charchar	Kebir Ouest	11.30	316	113

- **Les 9 et 10 novembre 2001 :** à Bâb El Oued (bassin versant de l'Oued Koriche-Alger) qui a fait plus de 772 morts, 320 blessés, 126 disparus avec des pertes matérielles conséquentes.

I.11 Les inondations dans la ville de Ghardaïa « Oued M'Zab » de 1951 à 1991

Les états mensuels fournis par la commune de Ghardaïa depuis septembre 1951 et complétés par ceux du poste Météorologique de Ghardaïa, sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I- 2 : Liste des crues de l'Oued M'Zab [Glardon et al, 2000]

Année des crues	Dates des crues	Importance	Observations
1951	13 et 19 septembre	Moyenne	Crue moyenne des Oueds secondaires : Bouchamdne, Takdit, Touzouze, Argdane. Une partie de la palmeraie a été arrosée. Une crue de l'Oued M'Zab a été signalée dans son cours Inférieur.
	2 octobre	Forte	L'Oued M'Zab est arrivé jusqu'à El Atteuf, après avoir rempli les barrages de Ghardaïa et Melika. Plus en aval, la crue alimentée par les affluents inférieurs de l'Oued M'Zab atteint Hassi Chegga le 4 octobre.
			Le 17 le lit de l'Oued était encore humide ; un plan d'eau de 250 m ² subsistait à Chaab M'Zab.

1952	24 Avril	Très forte	La chute de pluie a été considérable à partir d'un point situé à 15 km en amont de Ghardaïa et jusqu'au-delà de Zelfana. Les Oueds du bassin supérieur de l'Oued M'Zab n'ont pas ou peu coulé (Oueds El Kekakh, El Abiod, Djaref). A Ghardaïa, la crue ne s'est fait sentir qu'à partir de la Daïa ben Dahoua ; elle est de courte durée, mais violente par suite d'un ruissellement intense. A Zelfana, le débit maximum a pu être évalué entre 500 et 1000 m ³ /sec. La crue emporta des tentes, noya plus de 1200 têtes de bétail.
	23 septembre	Assez forte	Crue de l'Oued M'Zab alimentée par les Oueds immédiatement en amont ; barrages remplis. Forte crue de l'Oued N'Tissa qui remplit le barrage d'El Atteuf : léger déversement de celui-ci. Le barrage de Beni-Isguen a été très endommagé. L'Oued coule en aval d'El Atteuf, grâce aux crues des Oueds inférieurs et surtout Noumerate.
1953	Mars	Faible	La palmeraie de Ghardaïa a été partiellement arrosée.
	12 juillet	Faible	L'Oued Zouil. Quelques jardins de l'oasis de Bou Noura ont été arrosés.
	5 septembre	Faible	Oueds secondaires : Touzouze, Akhalkhal, ... Arrivées des Crues.
1984	Fin octobre	Forte	Au moins le barrage en amont de la palmeraie de Ghardaïa est rempli.
1990	11 mai	Forte	Laisse de crue repérée à l'altitude de 498,85 m à la distance de 473,70 m en amont du pont Adaoud.
1991	2 juin	Très importante	Un violent orage a provoqué des inondations très importantes, ce qui a provoqué la destruction partielle de la digue de El Atteuf et occasionné des pertes importantes dans le cheptel et les palmeraies

I.11.1 Analyse de l'événement pluvieux du 1 et 2 octobre 2008 à Ghardaïa

Les violents orages accompagnés par des pluies diluviennes, qualifiées de « tsunami fluviale », ont commencé le vendredi 26 septembre 2008, après quatre années de sécheresse. La pluie a continué progressivement le dimanche avec une intensité moyenne, puis le mercredi 1^{er} Octobre une pluie diluvienne a eu lieu, totalisant près de 150 mm en une heure. Les principaux Oueds de la région (M'Zab, Zeghir, Nsa, Metlili) ont fonctionné à plein régime. Selon les sources locales, c'est la première fois depuis 70 ans que les trois Oueds affluents de l'Oued M'Zab sont en crue. Habituellement seul un des trois Oueds déborde sans mettre en danger les populations environnantes. C'est une crue exceptionnelle puisqu'elle a atteint la Sebkhia Séfioune à environ 180 km de Ghardaïa [Medejerab, 2009].

I.11.2 Etude synoptique

L'analyse des images du capteur MODIS prises durant la période allant du 25 septembre au 2 octobre 2008 (voir figure I-9) montre une masse nuageuse convective qui englobe le Sahara central, le Nord Sahara et l'Atlas Saharien, persistant durant toute cette période. Le suivi de l'évolution des nuages montre bien leur concentration sur la région de Hassi R'mel et le Sahara central où on a enregistré 43 mm à la station de Hassi R'mel (située à l'extérieur du bassin versant de l'Oued M'Zab à environ 20 km de l'amont).

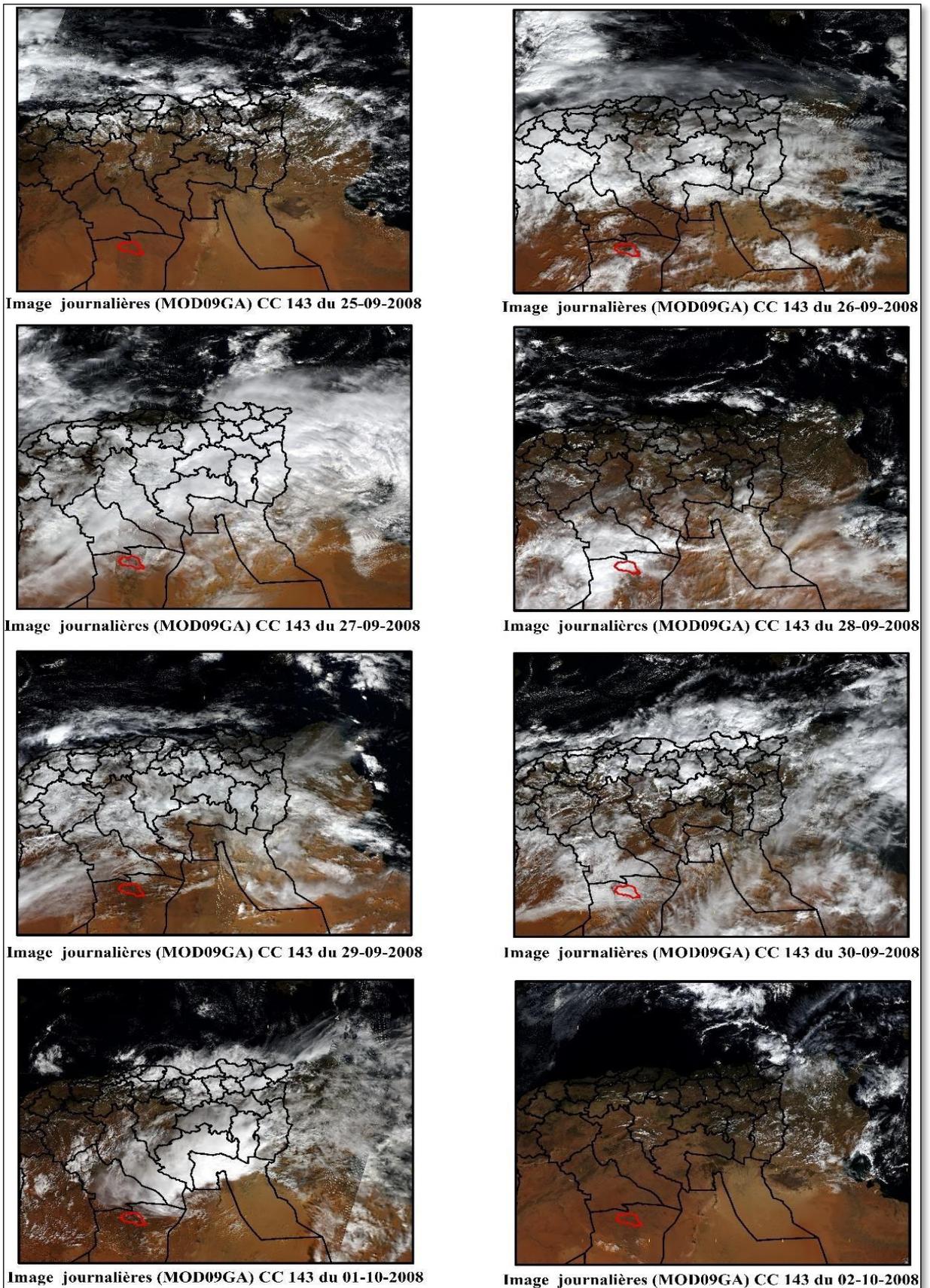


Figure I- 9 : Des images du satellite MODIS (25/09 – 02/10/2008)

I.11.3 Les impacts immédiats des inondations du 1^{er} octobre 2008

Jamais dans la mémoire des résidents de la vallée de l'Oued M'Zab, la région n'a vécu une telle catastrophe. L'Oued M'Zab, qui est sorti de son lit vers 4 h du matin, en effet, tout emporté sur son passage. Les dégâts sont énormes : décès de 100 personnes, 89 blessés, 756 familles sinistrées, 19 établissements scolaires endommagés, 7200 foyers privés d'électricité et 2300 familles privées d'eau [Medejerab, 2009].

Quelques exemples des dégâts enregistrés lors de cette catastrophe sont représentés dans les figures I-10, I-11 et I-12.

Plus de 1200 ha de cultures maraîchères, arboricoles et de palmeraies ont été laminés par les eaux. Plus de 1000 têtes de bétail ont péri et plus de 300 véhicules ont été emportés par les eaux (voir figure I-13). Une usine de fabrication de batteries sous licence (Tudor), employant plus de 200 ouvriers, a été complètement saccagée par les eaux. L'estimation des dégâts touchant les infrastructures avoisine les 20.1 Milliards de Dinars, soit environ 200 millions d'euros [Medejerab, 2009].



Figure I- 10 : Le niveau d'eau a atteint
10 m dans la palmeraie



Figure I- 11 : Des dégâts énormes

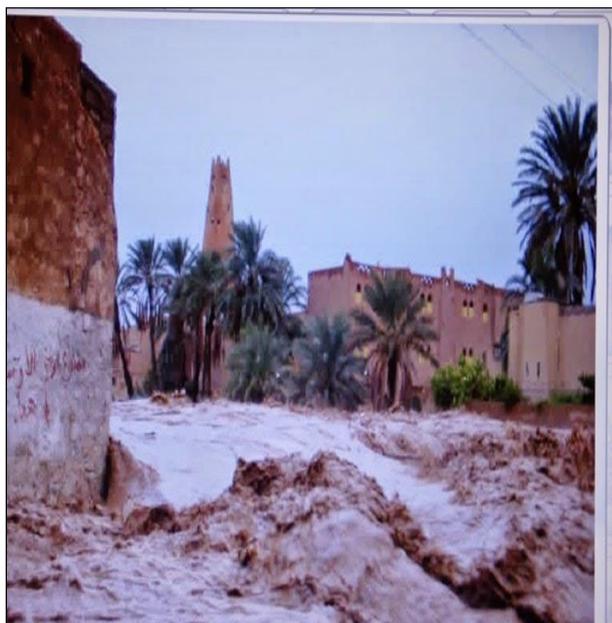


Figure I- 12 : Un quartier transformé
En torrent



Figure I- 13 : Des voitures emportées
par les eaux

I.12 Conclusion

La modélisation hydraulique offre de réelles potentialités de représentation réaliste des phénomènes complexes. Elle semble même l'approche privilégiée pour répondre aux diverses problématiques liées au risque d'inondation, en offrant une représentation multi-échelles de l'inondation qui intègre l'échelle de l'aménagement. Ces attentes obligent la détermination des caractéristiques (hauteurs, vitesse et durée) à l'échelle locale (échelle de la parcelle cadastrale) et le recours à des modélisations qui seront dites finement distribuées pour la régénération des crues antérieures.

L'approche historique, si elle ne constitue pas, à elle seule une méthode indépendante, elle constitue une étape indispensable aux deux autres grandes méthodes d'analyse de l'aléa notamment l'approche hydrogéomorphologique et la modélisation hydraulique.

Enfin, ce qu'on projette à concrétiser dans notre étude est de voir l'apport des différentes options d'aménagement pour minimiser le risque par l'application de l'approche de modélisation hydraulique en validant nos premiers résultats par l'approche historique.

Introduction

II.1

La wilaya de Ghardaïa, se situe dans la zone septentrionale du Sahara algérien, elle s'étend sur plus de 86 000 km² et bordée au Nord par les wilayas de Laghouat et de Djelfa, à l'Est par la wilaya de Ouargla, à l'Ouest par les wilayas d'Adrar et d'El Bayadh et au Sud par la wilaya de Tamanrasset (voir figure II-1).

On peut déjà signaler ici, comme on le verra plus loin, que la zone d'étude (la vallée de l'Oued M'Zab) s'étend sur moins du millième de la surface de la wilaya mais concerne près de 45 % de sa population.

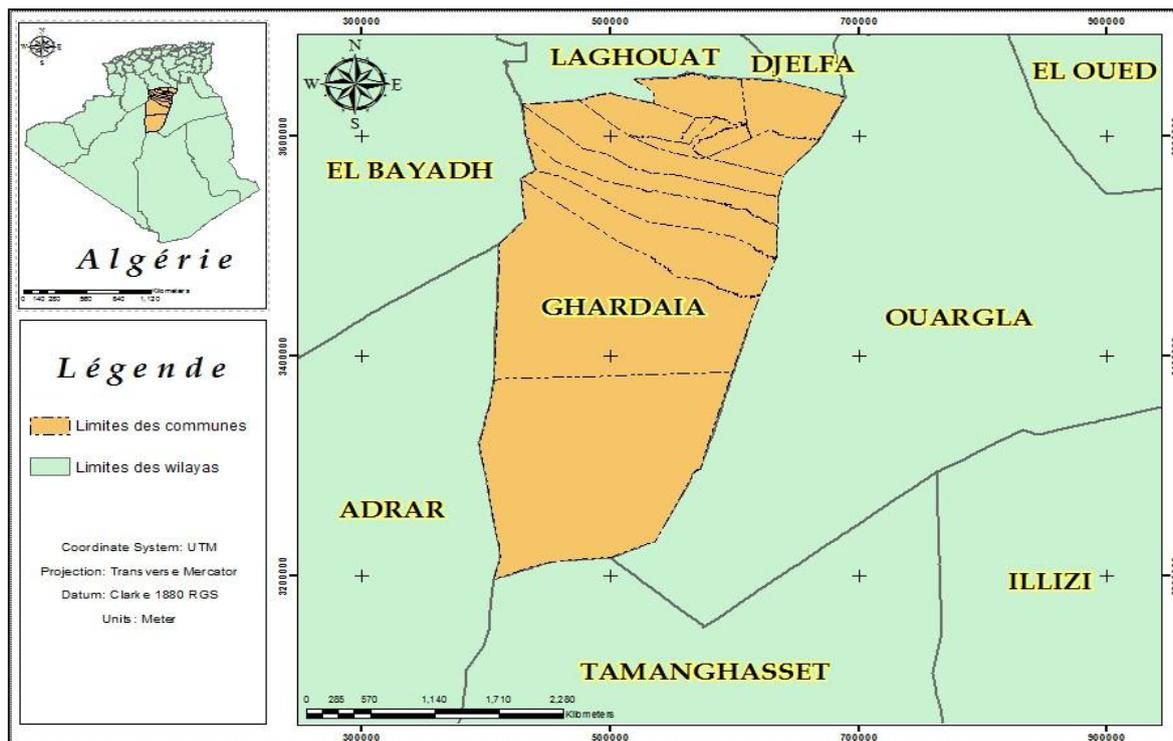


Figure II- 1 : Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa

II.2

Situation géographique de la vallée de l'Oued M'Zab

La région de l'Oued M'Zab, située à 600 km au sud de la capitale est considérée comme l'une des grandes oasis du Sahara algérien. Administrativement, elle fait partie de la wilaya de Ghardaïa, regroupant les chefs lieu de trois communes, la ville de Ghardaïa occupant l'amont et le centre de la vallée, Bounoura et El Atteuf occupant la partie aval de la vallée.

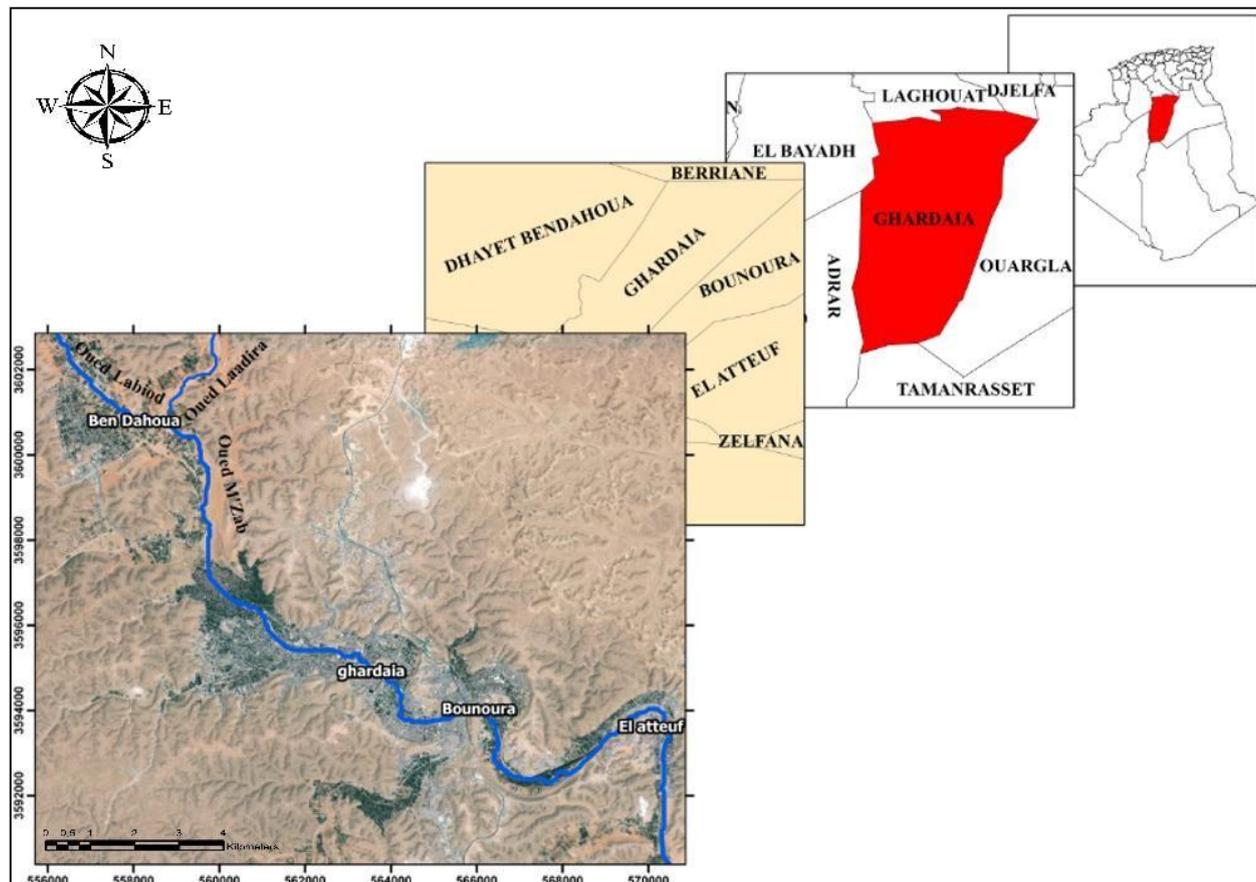


Figure II- 2 : Situation géographique de la vallée de l'Oued M'Zab

Géographiquement la vallée de l'Oued M'Zab est comprise entre 32° 26' et 32° 31' en latitude et entre 3° 37' et 3°46' en longitude. Elle est alignée approximativement Nord-Ouest, Sud-Est. Comme illustre la figure II-2, en partant de Bouchen, zone de confluence de l'Oued El Hameur (Laadira) avec l'Oued Labiod, jusqu'à El Atteuf sur une longueur de 23.50 km. La largeur de la vallée varie entre 1.50 et 2.35 km en amont et diminue au fur et à mesure vers l'aval pour atteindre 0.55 km tout au sud de la ville d'El Atteuf.

Les altitudes quant à elles, sont relativement faibles, elles diminuent progressivement de l'amont vers l'aval, de 514 à 508 mètres à Bouchen, de 505 à 485 mètres au niveau de la ville de Ghardaïa, de 455 à 450 mètres au niveau d'El Atteuf et de 429 mètres à Ahbas point le plus bas de l'oasis d'El Atteuf.

II.3 Démographie

La Wilaya de Ghardaïa, qui représentait une région fortement déshéritée avant la mise en exploitation de la nappe albienne, ne pouvait être que traversée par des caravanes ou parcourue par des nomades [Gardon et al, 2000].

Ces populations se répartissent entre deux grands ensembles ethniques :

- Les Chaâmba où des nomades qui se regroupent autour de points d'eau (4 communes en tout, dont la principale est Metlili) ;

- Les mozabites qui appartiennent au second groupe, qui occupent les Ksour ;

II.3.1 Evolution de la population de la Wilaya de Ghardaïa (1966-2008)

La ville de Ghardaïa a été nommée wilaya 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.

Les populations de l'actuelle Wilaya à l'horizon 1966 ont donc dû être estimées sur la base des données par districts. Les conclusions générales pour la période 1966 - 2008 sont les suivantes:

- Rythme de croissance de la population de la Wilaya supérieur au rythme moyen de toute l'Algérie.
- Population fortement agglomérée (enivrent 97 %) (voir tableau II-1 et figure II-3).
- Déséquilibre dans la répartition spatiale : 3 communes concentrent plus de 80 % de la population (voir tableau II-1 et tableau II-2) [Glardon et al, 2000].

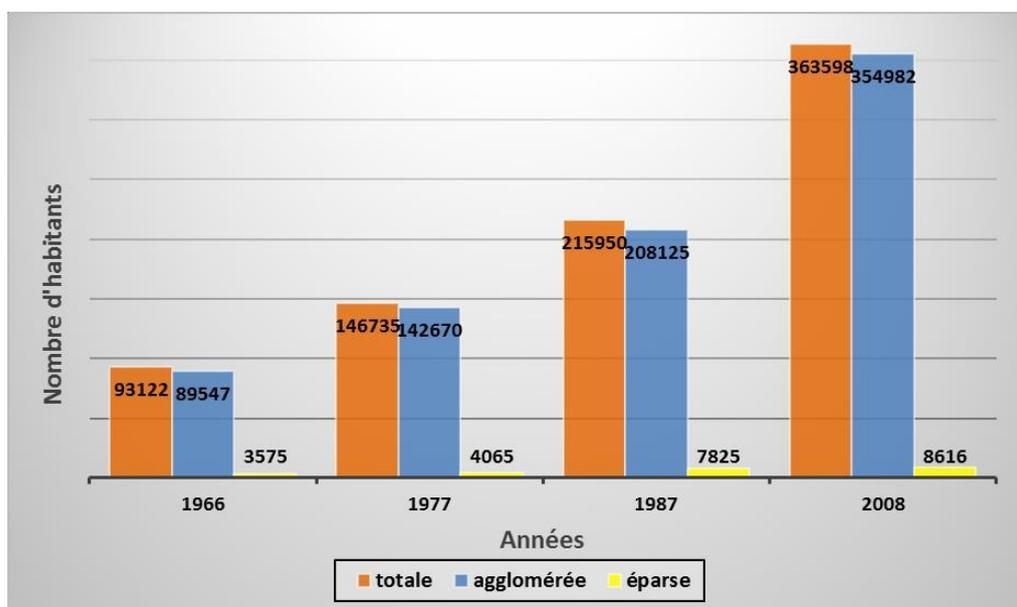


Figure II- 3 : Evolution de la population de la Wilaya de Ghardaïa (1966 – 2008)

II.3.2 Evolution de la population de l'agglomération de Ghardaïa (1966-2008)

De 1966 à 2008, pendant quarante-deux ans, l'agglomération de Ghardaïa a gagné 111478 habitants, le plus grand accroissement est enregistré au chef-lieu de la wilaya avec 64 000 habitants, puis vient celui des autres communes avec une moyenne de 115 000 habitants, ces accroissements sont représentés dans le tableau et les figures suivants.

Tableau II- 1 : Evolution de la population dans l'agglomération de Ghardaïa (1966-2008)

Communes	1966		1977		1987		2008	
	Agglomérée	Éparse	Agglomérée	Éparse	Agglomérée	Éparse	Agglomérée	Éparse
Ghardaïa	29 421	----	49 129	----	62 518	----	93423	----
Bounoura	10 100	----	13 104	269	18 751	----	35405	----
El Atteuf	4 175	532	5 012	1 375	8 553	160	14752	----
Daya	1 049	----	2 374	111	5539	82	12643	----

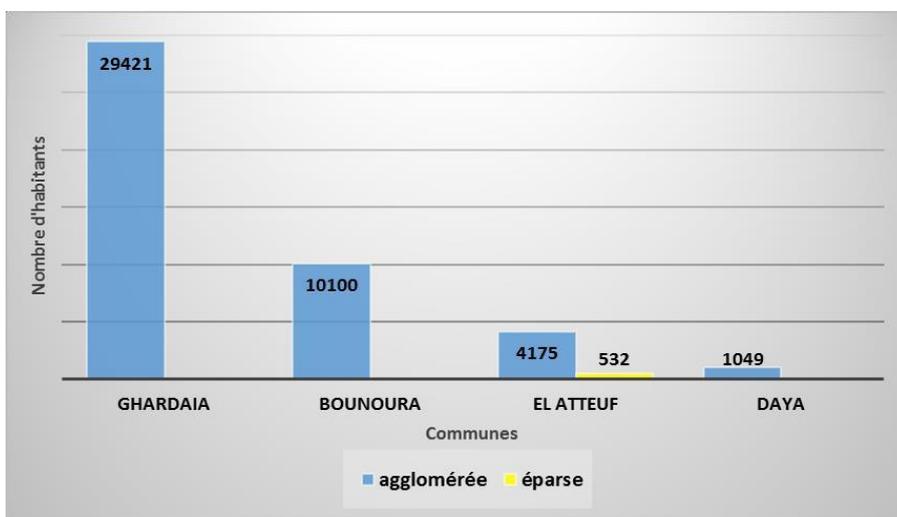


Figure II- 4 : Populations dans les communes de Ghardaïa, Bounoura, El Atteuf et Daya en 1966

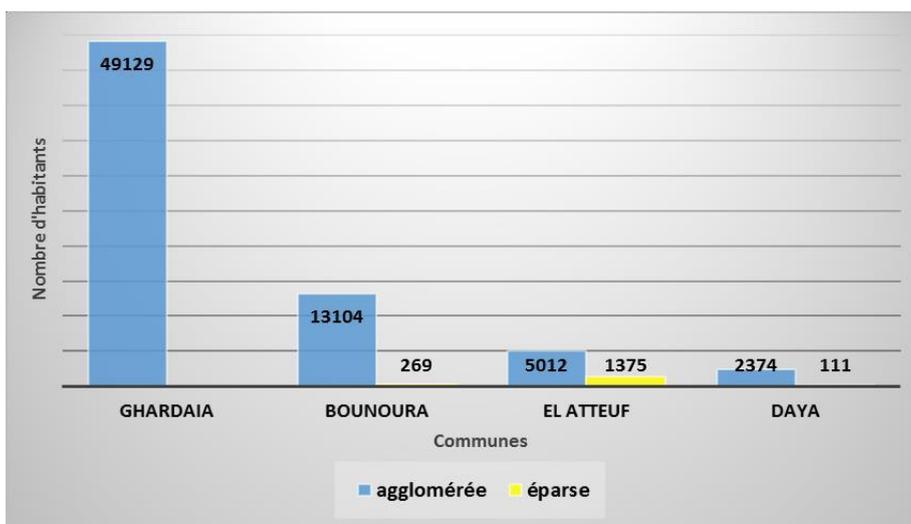


Figure II- 5 : Populations dans les communes de Ghardaïa, Bounoura, El Atteuf et Daya en 1977

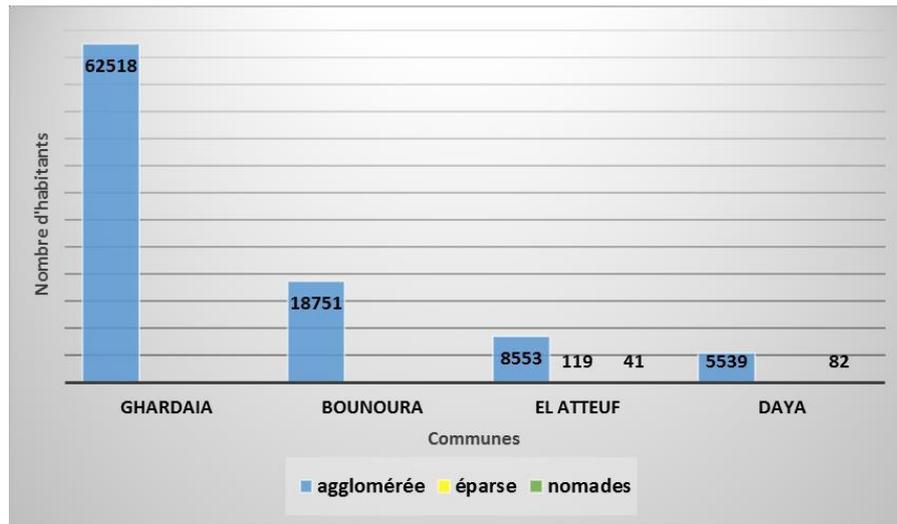


Figure II- 6 : Populations dans les communes de Ghardaïa, Bounoura, El Atteuf et Daya en 1987

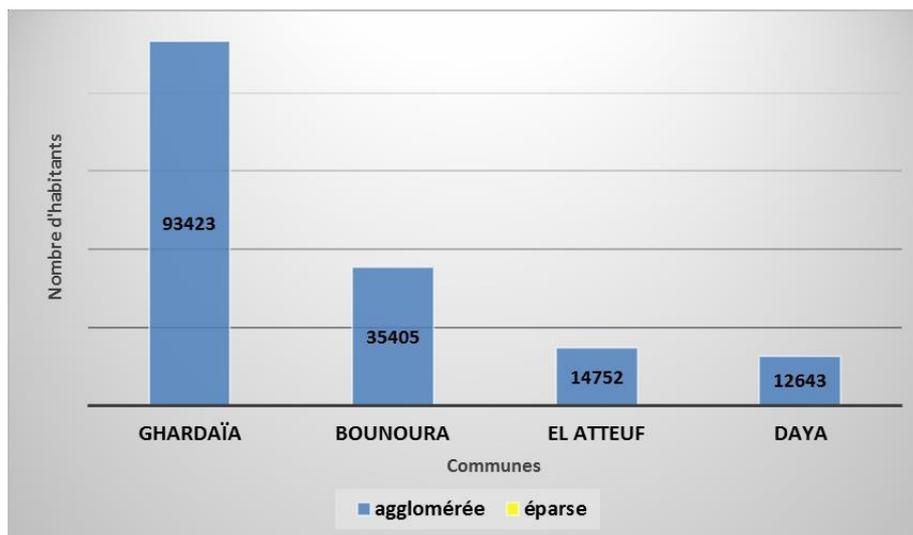


Figure II- 7 : Populations dans les communes de Ghardaïa, Bounoura, El Atteuf et Daya en 2008

II.4 Extension urbaine

La ville de Ghardaïa a connu une période très importante dans le domaine de l'urbanisation durant cette dernière décennie. En effet, un développement important des nombres des habitations, des infrastructures et des équipements qui traduisent une pression démographique importante.

Comparant les photos aériennes prises en 1959 avec une image satellitaire de 2007, couvrant la ville de Ghardaïa, on constate que le tissu urbain de la ville a connu une extension rapide et non étudiée, comme présenté dans les figures II-8, II-9 et II-10, ceci est expliqué par l'augmentation des habitations construites sur le lit de l'Oued M'Zab, le long des terres agricoles et dans les Oasis de palmiers.

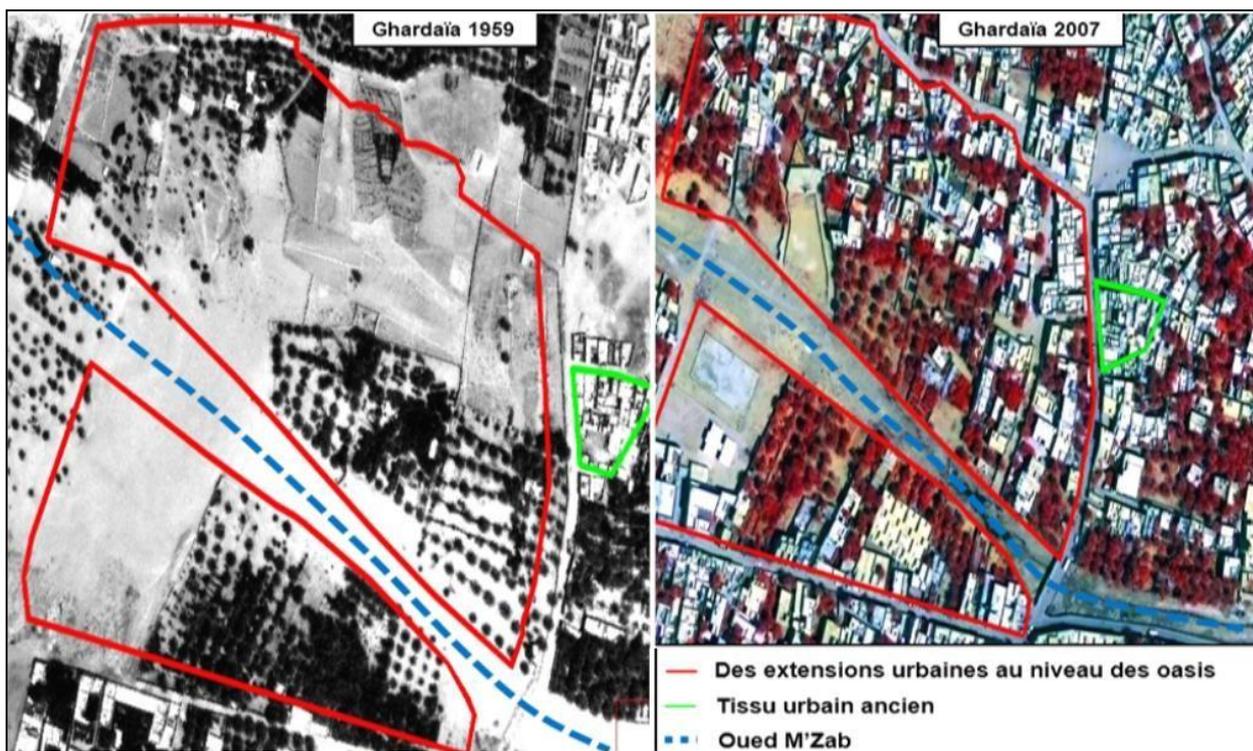


Figure II- 8 : Les extensions urbaines de la ville de Ghardaïa sur le lit de l'Oued M'Zab (1959-2007)

-centre-ville-

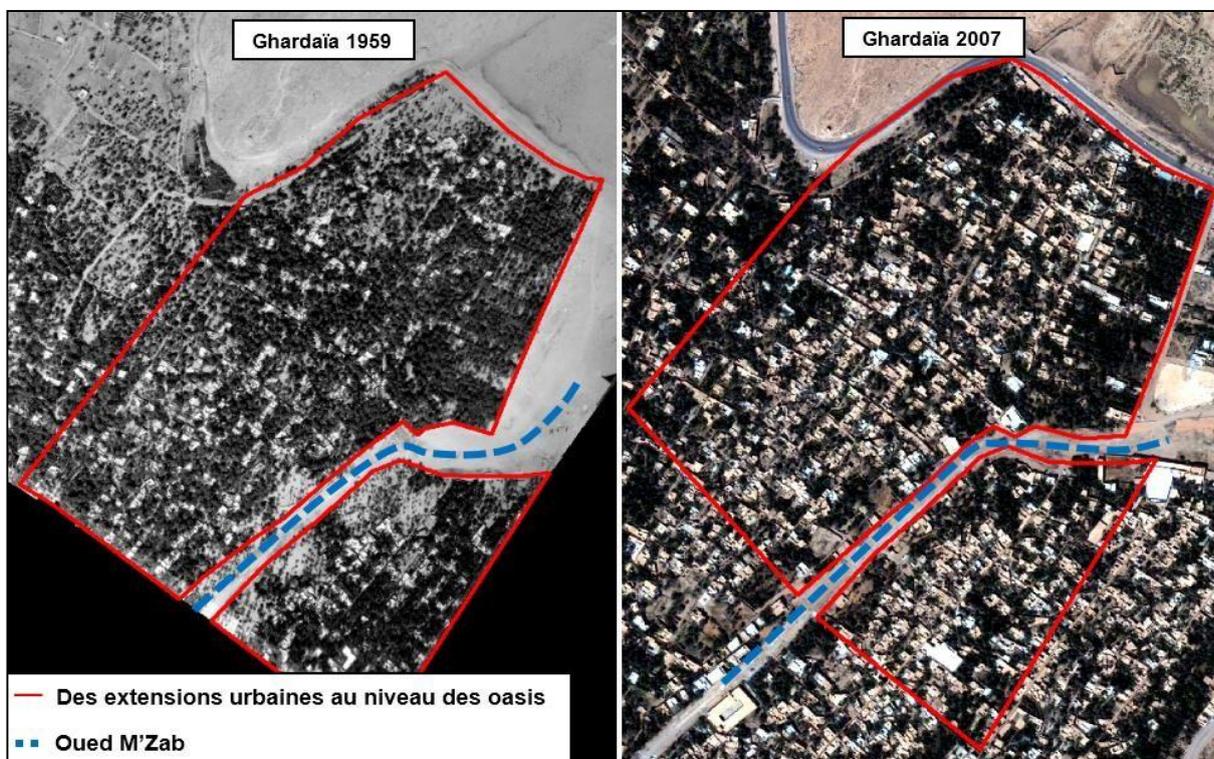


Figure II- 9 : Les extensions urbaines de la ville de Ghardaïa sur le lit de l'Oued M'Zab (1959-2007) -Quartier El Ghaba-

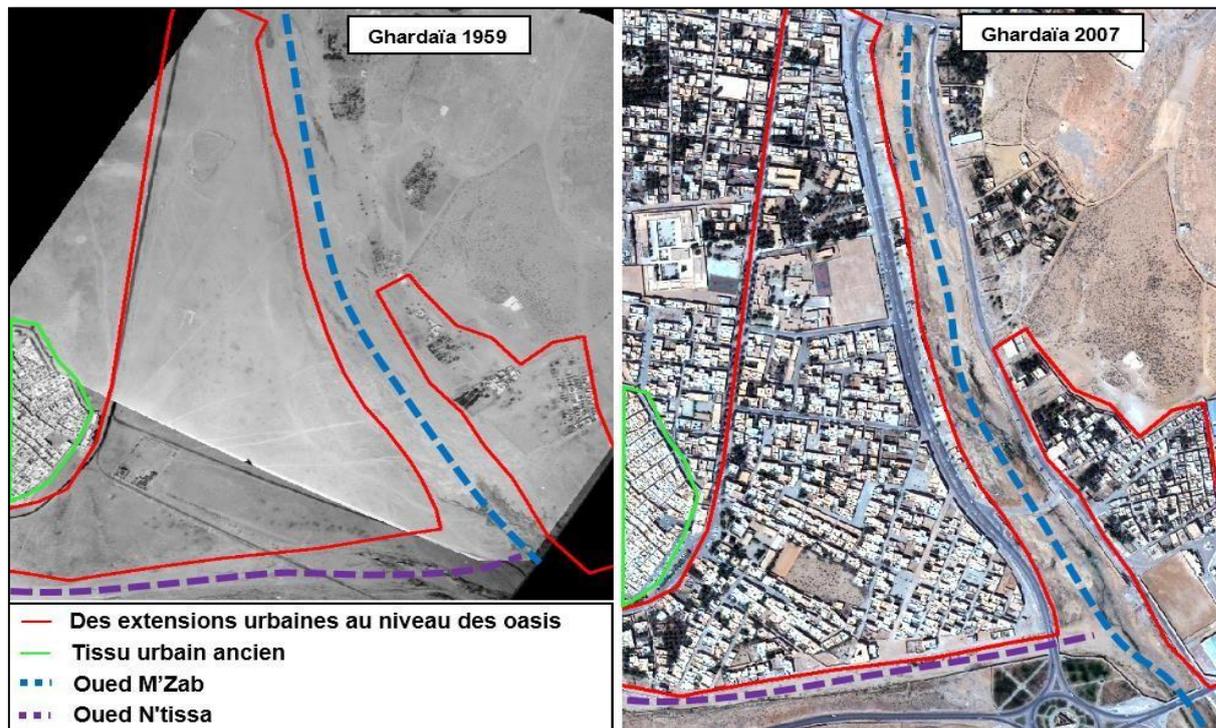


Figure II- 10 : Les extensions urbaines de la ville de Ghardaïa sur le lit de l'Oued M'Zab et l'Oued N'tissa (1959-2007)

-Ksar de Beni Isguen-

II.4.1 Le Lit de l'Oued M'Zab

Actuellement le lit de l'Oued M'Zab est considéré comme un espace public (voir figure II- 11). Dans certains tronçons comme la palmeraie de Touzouze, il est utilisé comme voie de circulation, et très fréquemment comme moyen direct de passer d'une rive à l'autre tant pour les personnes que les véhicules. L'altération de son rôle et de son image, liée à la présence fréquente d'eaux usées, a conduit les populations à le considérer comme un lieu de décharge (gravats, ordures ménagères, etc...), ce qui a des conséquences tant sur la qualité de l'environnement (hygiène, odeurs, vue, etc...) que sur les possibilités d'écoulement des crues, par diminution de la section d'écoulement ou par obstruction des ouvrages de franchissement de la vallée de l'Oued. Enfin le lit de l'Oued est quelquefois utilisé pour l'aménagement de terrains de sport spontanés.



Figure II- 11 : Le lit de l'Oued M'Zab considéré comme un espace public

II.5 Contexte socio-économique

L'agriculture oasienne représente la principale activité de la vallée, dont le terrain est occupé selon trois modes de culture :

- Culture des palmeraies en premier lieu.
- Culture des arbres fruitiers.
- Culture maraîchère et fourragère en intercalaire.

Le système d'irrigation se fait par submersion traditionnelle (seguias), rare sont ceux pratiquant le mode d'aspersion et la goutte à goutte. D'autres activités portant notamment sur le commerce, l'artisanat des tapis, ainsi que des petites et moyennes industries (verres, textiles, agro-alimentaires, cosmétiques etc.) [Glardon et al, 2000].

II.6 Conditions climatiques de la région

L'intérêt de l'étude des conditions hydro-climatiques réside principalement, à l'estimation du bilan hydrique d'un système hydraulique, où la pluviométrie demeure le paramètre le plus important, car elle conditionne l'infiltration dans le sous-sol, l'alimentation des nappes d'eau souterraines, et plus particulièrement l'écoulement superficiel des cours d'eau.

Les stations météorologiques utilisées, dont leurs positions sont représentées dans la figure II-12, sont la station de Ghardaïa, localisée approximativement en aval du bassin, la station de Hassi R'mel, située à l'extérieur du bassin à environ 20 km de l'amont du bassin et celle de Ouargla, à 40 km à l'Ouest de la station de Ghardaïa. L'altitude des stations varie de 764 m à Hassi R'mel, 136 m à Ouargla, en passant par la station de Ghardaïa à 450 m. L'emplacement ainsi de ces stations, nous permettra de suivre l'évolution du régime climatique le long du bassin en espace qu'en altitude.

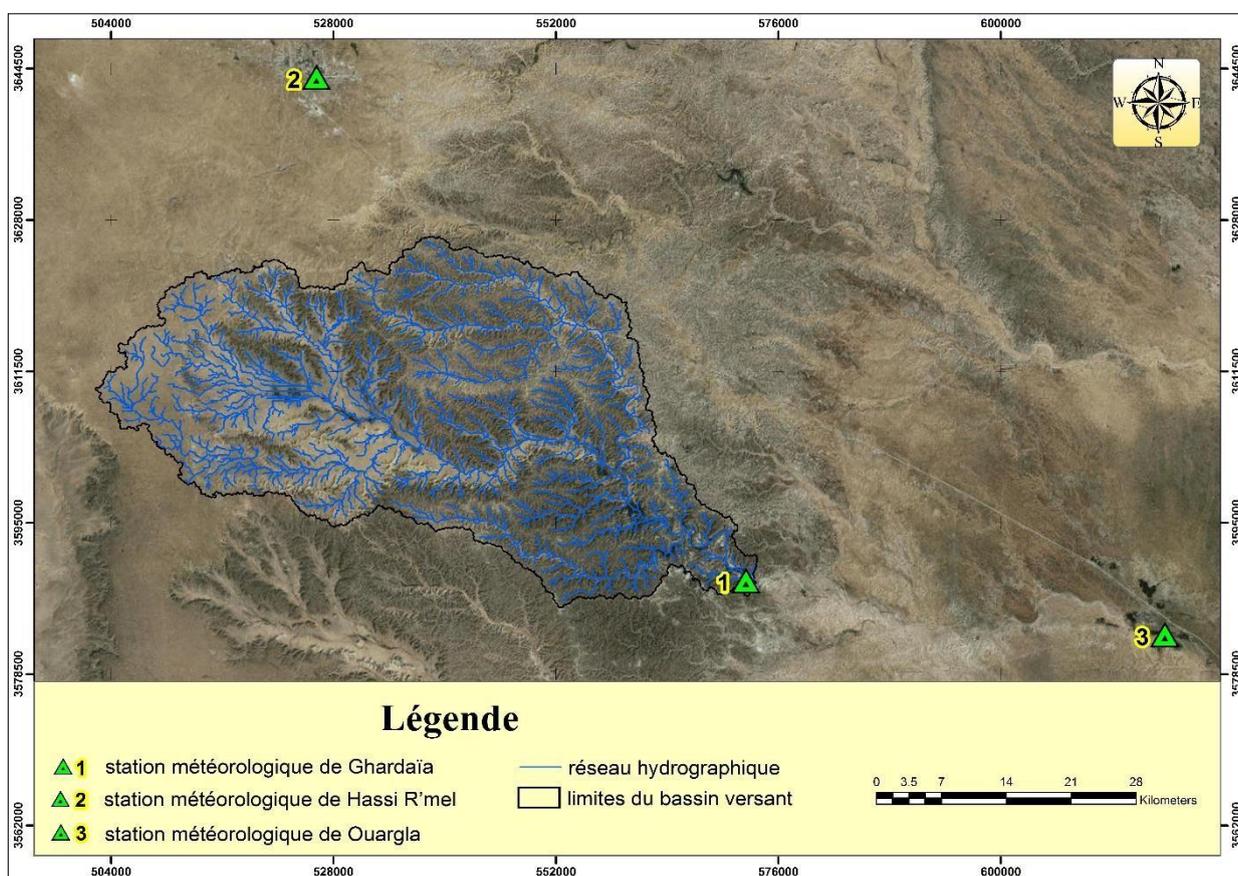


Figure II- 12 : Situation géographique des stations météorologiques

Les données sont fournies par l'Office Nationale de la Météorologie (ONM), après leur examen, on révèle que les trois stations Hassi R'mel, Ghardaïa, Ouargla, présentent des séries complètes allant respectivement, de 1998 à 2008, 1986 à 2009 et 1990 à 2009.

II.6.1 Précipitations

La faiblesse et l'irrégularité des précipitations sont les principaux facteurs du climat saharien. La quantité de pluie tombant durant toute l'année, peut tomber pendant le même mois des années de sécheresse [Dubief, 1953].

D'après la figure II-13, J. Dubief (1953) a localisé notre région entre l'isohyète 50 et 100 mm. Conventionnellement, l'isohyète 100 mm est pris comme limite nord du domaine du désert. Le trait essentiel qui s'en dégage montre une évolution latitudinale des précipitations avec une diminution du Nord vers le Sud.

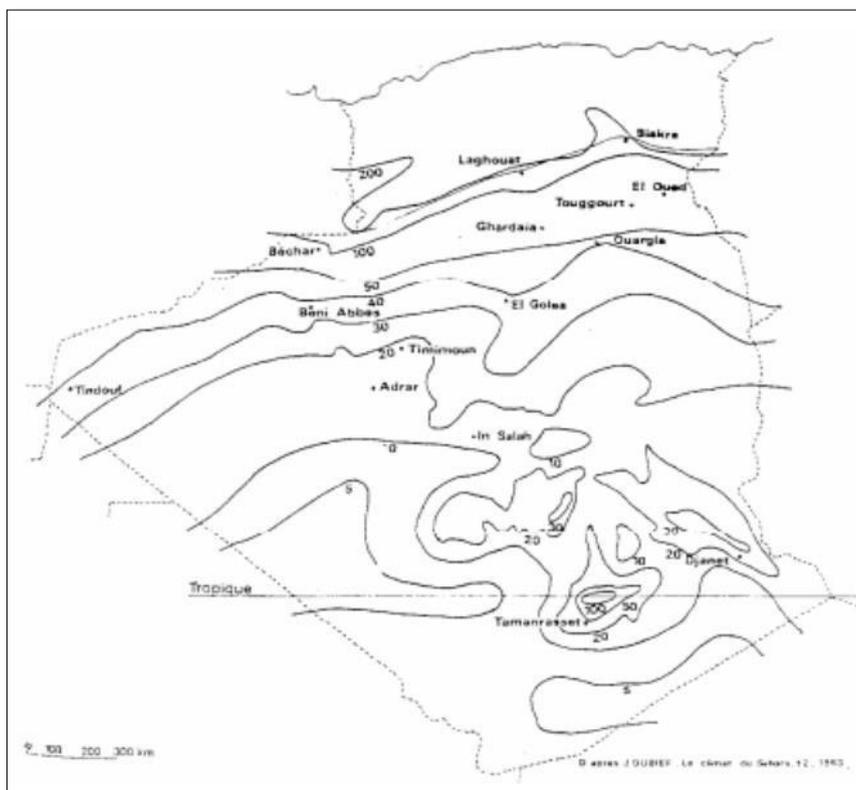


Figure II- 13 : Carte des isohyètes [Dubief, 1953]

II.6.1.1 Précipitations moyenne annuelles

Le tableau II-3 illustre les moyennes annuelles calculées au niveau des stations de Hassi R'mel, Ghardaïa et Ouargla.

Tableau II- 2 : Précipitations moyennes annuelles (mm)

Station	Altitude (m)	Période	Moyenne annuelle (mm)
H. R'mel	764	1998-2008	115.5
Ghardaïa	450	1986-2009	80.6
Ouargla	136	1990-2009	37.1

On remarque que la moyenne annuelle de pluviosité enregistrée à Hassi R'mel étant égale à 115.5 mm, est plus importante à celle de Ghardaïa qui est de l'ordre de 80.6 mm ; La plus faible est celle enregistrée à Ouargla (37.1 mm). Ceci est en accord avec la situation géographique des trois stations.

II.6.1.2 Précipitations moyenne mensuelles

Le Tableau ci-dessous montre la répartition des hauteurs moyennes mensuelles des précipitations pour les trois stations considérées.

Tableau II- 3 : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

Mois	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At
H. R'mel	17.5	21.6	11.2	13.6	20.4	2.9	3.6	8.1	3.5	6.0	1.4	5.7
Ghardaïa	16.3	8.2	7.6	4.9	10.9	3.3	9.2	7.4	3.3	3.4	1.0	5.1
Ouargla	3.7	8.3	7.0	2.0	5.6	1.3	4.3	1.6	1.2	0.1	0.6	1.4

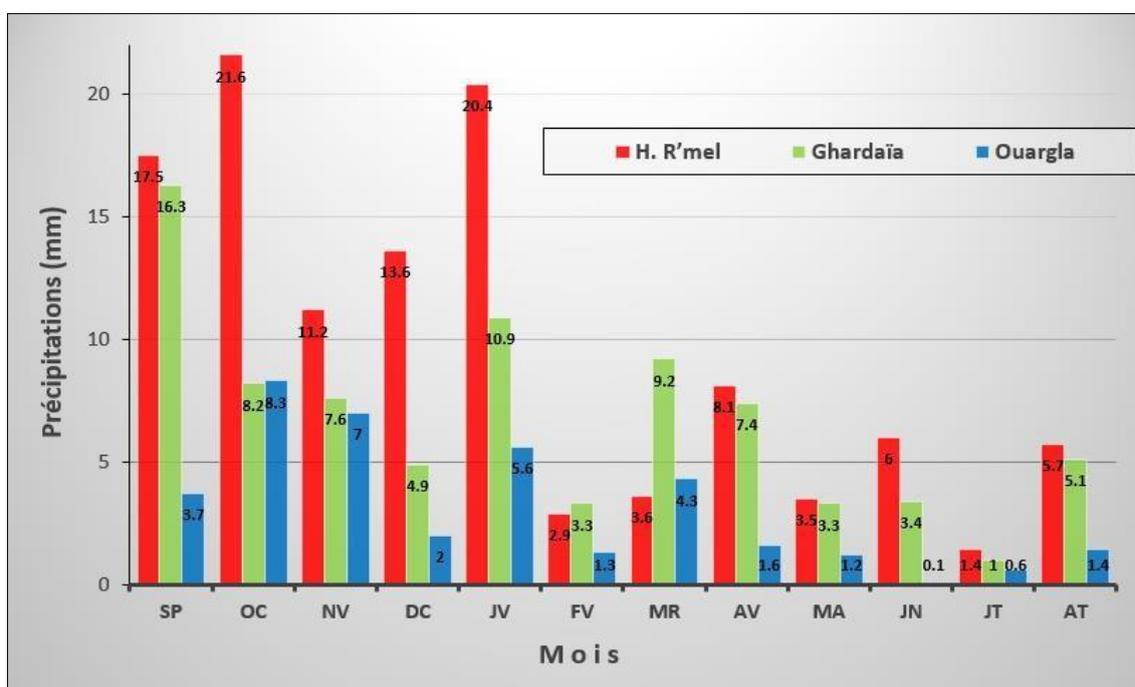


Figure II- 14 : Variation mensuelle moyenne de la hauteur des pluies

À travers la figure II-14, on constate clairement l'irrégularité de la pluie mensuelle sur les différentes stations. La période allant du mois de septembre jusqu'au mois de janvier est la plus arrosée de toute l'année. Les faibles hauteurs de la pluie sont enregistrées en été.

II.6.2 Température

La température est un facteur important régissant les conditions climatiques, il intervient essentiellement dans l'évaluation du déficit d'écoulement. L'analyse des températures sera faite à partir des données recueillies de l'ONM pour les stations de Hassi R'mel (1998/2008), Ghardaïa (1990/2009) et Ouargla (1990/2009).

II.6.2.1 Température moyenne annuelle

Dans un climat aride comme le nôtre, les valeurs de la température moyenne annuelle ne semblent guère rapporter une grande signification. Seules, les températures moyennes mensuelles ainsi que les amplitudes thermiques peuvent rapporter quelques indications sur

l'aridité de la région, et aussi les conditions auxquelles sont soumis les différents éléments de l'écosystème.

Les valeurs moyennes annuelles enregistrées pour la période considérée sont, 21°C à Hassi R'mel, 22.3°C à Ghardaïa et 23.3°C à Ouargla (voir tableau II-5). Il apparait nettement que Hassi R'mel est la plus froide, par contre la station de Ouargla est la plus chaude. Ceci peut s'expliquer par les effets conjugués de l'altitude et la latitude des trois stations.

II.6.2.2 Température moyenne mensuelle

Le tableau ci-dessous récapitule les températures moyennes mensuelles des stations de Hassi R'mel, Ghardaïa et Ouargla.

Tableau II- 4 : Température moyenne mensuelle et annuelle (°c)

Mois	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
H. R'mel	28.5	19.4	12.3	8.6	10.2	12.5	16.3	21.6	25.5	29.5	33.3	34.2	21.0
Ghardaïa	28.8	22.9	16.2	11.7	10.7	13.1	16.8	20.6	25.9	31.0	34.4	33.9	22.3
Ouargla	30.7	24.6	16.9	12.3	11.8	13.6	18.0	22.6	27.5	32.5	34.8	34.1	23.3

De la figure II-15, il ressort que, pour les stations de Ghardaïa et Ouargla, la période chaude s'étend du mois de mai au mois d'octobre, pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle. La période froide commence du mois de novembre jusqu'au mois d'avril. A l'exception de la station de Hassi R'mel où la période chaude débute du mois d'avril jusqu'au mois de septembre, et la période froide s'étend du mois d'octobre jusqu'au mois de mars.

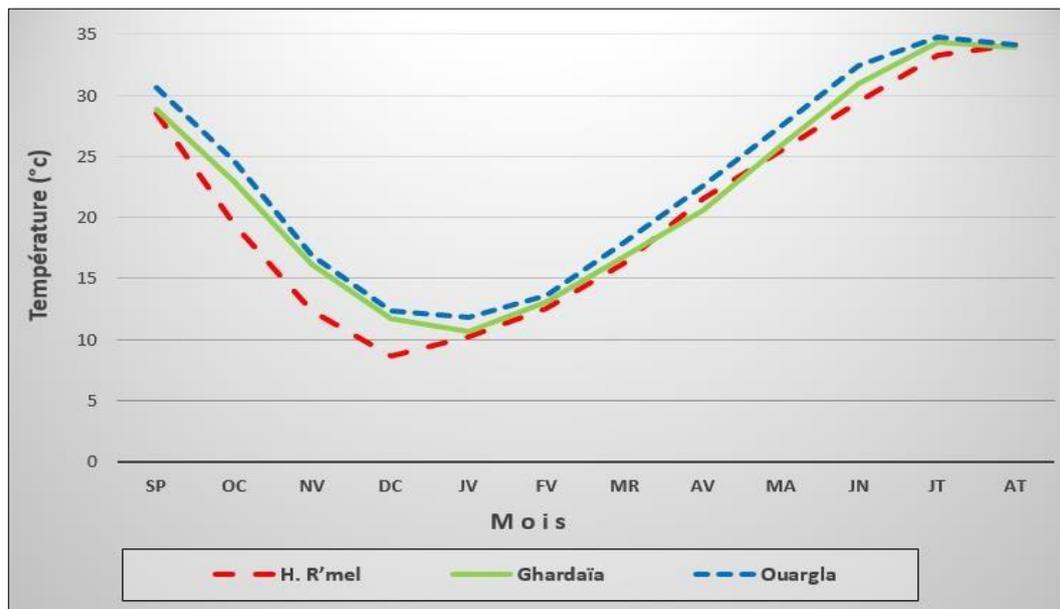


Figure II- 15 : Variation de la température mensuelle moyenne

II.6.2.3 Température extrême

Les écarts observés dans les valeurs de la température mensuelles nous incitent à étudier la dispersion des températures extrêmes moyennes. Dans le tableau II-6 nous indiquons la moyenne mensuelle des maximas et des minimas.

La figure II-16 représente la variation mensuelle des températures moyennes extrêmes (Maximas et minimas) de Hassi R'mel, Ghardaïa et Ouargla.

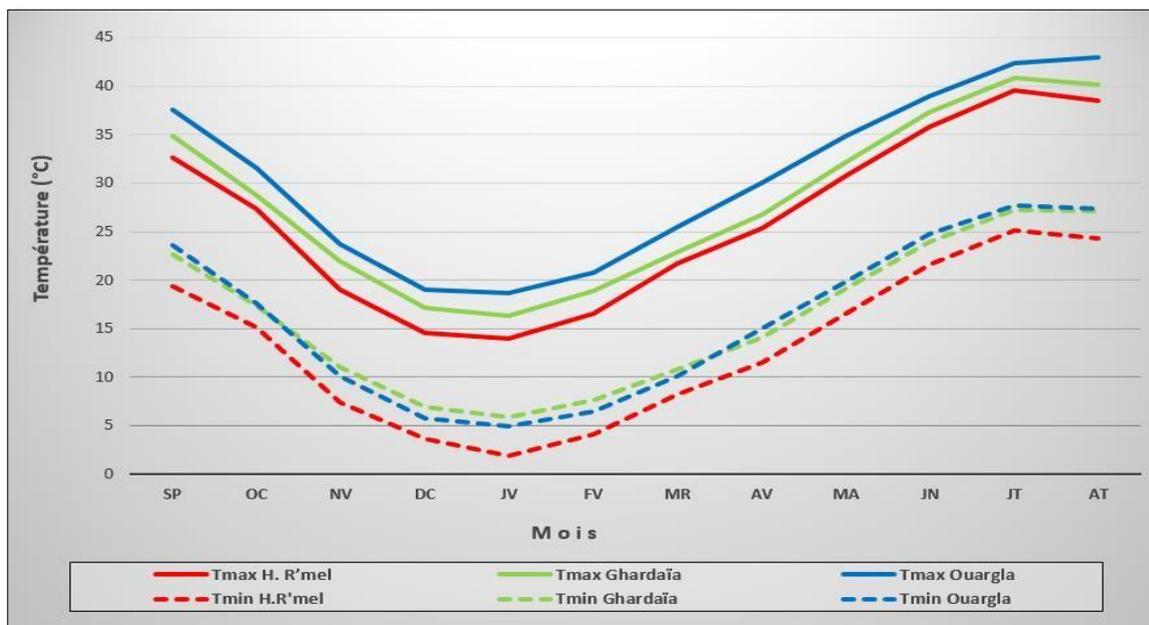


Figure II- 16 : Variation des températures extrêmes moyennes mensuelles

En étudiant le tableau et les courbes ci-dessus, on constate que ;

- Les valeurs des températures maximales sont les plus élevées dans le mois de juillet et le mois d'Aout (39.6 – 40.8 et 42.9°C).
- Les valeurs les plus faibles des minimas sont enregistrées dans le mois de Janvier (1.9 – 5.9 et 4.9°C).
- Les écarts de la température sont en générale assez élevées variant entre 10 à 15.6°C.
- Les plus fortes amplitudes thermiques sont rencontrées en période estivale oscillant entre 13 à 15°C. Ceci est l'une des caractéristiques du climat du domaine continental du Sahara septentrional.

II.6.2.4 Amplitude thermique

Elle représente l'écart entre la température du mois le plus chaud et celle du mois le plus froid de l'année.

Le tableau II-7 résume les moyennes des amplitudes thermiques des différentes stations.

Tableau II- 6 : Amplitude thermique des trois stations (°C)

Station	Température (°C)		
	maximum	minimum	amplitude
H. R'mel	39.6	1.9	37.7
Ghardaïa	40.8	5.9	34.9
Ouargla	42.9	4.9	38

L'amplitude thermique de la station de Hassi R'mel est égale à 37.7°C, plus élevée que celle de la station de Ghardaïa avec 34.9°C et elle atteint une valeur de 38°C à la station de Ouargla.

La répartition spatiale d'amplitude thermique nous montre une diminution progressive le long du bassin versant de l'Oued M'Zab de l'amont vers l'aval. Ceci indique l'influence de la continentalité sur ce facteur ainsi que le contraste thermique entre l'amont et l'aval du bassin versant de l'Oued M'Zab.

II.6.2.5 Diagramme Ombrothermique de Gaussen

Ce diagramme fait intervenir les pluies et les températures moyennes mensuelles. Selon les auteurs, un mois est dit sec si le total mensuel des précipitations en mm est inférieur ou égal au double de la température mensuelle moyenne : $P \leq 2T$.

Cette formule permet de construire des diagrammes ombrothermique traduisant la durée de la saison sèche on se basant sur les intersections des courbes.

Tableau II- 7 : Données de diagramme ombrothermique des trois stations

Station		Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At
H. R'mel	P(mm)	17.5	21.6	11.2	13.6	20.4	2.9	3.6	8.1	3.5	6.0	1.4	5.7
	$\bar{T}_{em}(^{\circ}C)$	57.0	58.8	24.6	17.2	20.4	25.0	32.6	43.2	51.0	59.0	66.6	68.4
Ghardaïa	P(mm)	16.3	8.2	7.6	4.9	10.9	3.3	9.2	7.4	3.3	3.4	1.0	5.1
	$\bar{T}_{em}(^{\circ}C)$	57.6	45.8	32.4	23.4	21.4	26.2	33.6	41.2	51.8	62.0	68.8	67.8
Ouargla	P(mm)	3.7	8.3	7.0	2.0	5.6	1.3	4.3	1.6	1.2	0.1	0.6	1.4
	$\bar{T}_{em}(^{\circ}C)$	61.4	49.2	33.8	24.6	23.6	27.2	36.0	45.2	55.0	65.0	69.6	68.2

La figure II-17 découlant du tableau II-8 et qui représente le diagramme ombrothermique de Gaussen de la région d'étude sur les trois stations, montre que la saison sèche s'étend durant toute l'année où la courbe de la pluie demeure largement écartée de celle de la température. A l'exception de celle de Hassi R'mel où une courte période humide est observée durant le mois de janvier.

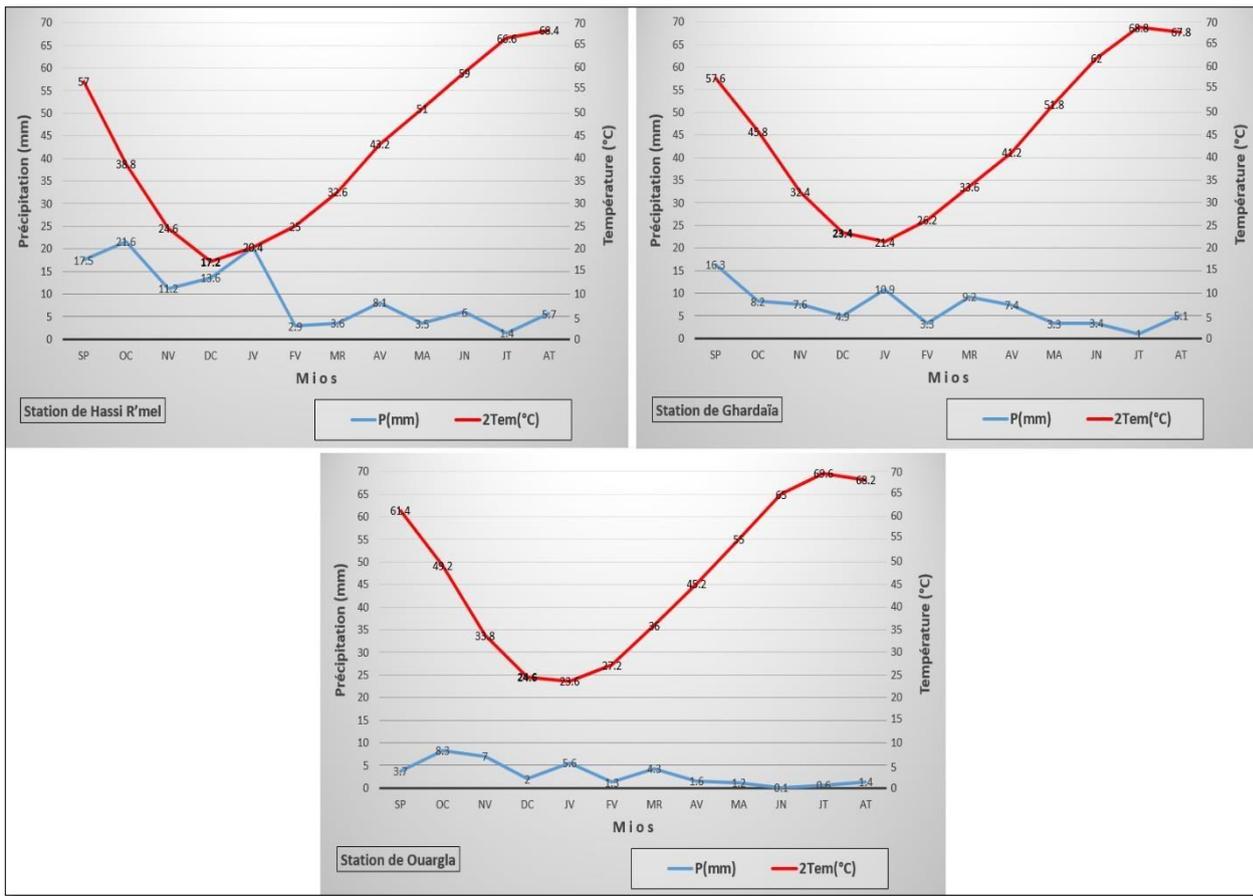


Figure II- 17 : Diagramme Ombrothermique de trois stations

II.6.3 Humidité relative

A défaut d'absence de données météorologiques relatives à l'humidité, au vent et à l'évaporation dans les stations de Hassi R'mel et Ouargla, seules celles de Ghardaïa ont été utilisées.

L'humidité relative représente le rapport de la tension de la vapeur d'eau sur la tension maximum correspondant à la même température. Les données recueillies de la station de Ghardaïa donnent une moyenne annuelle de l'ordre de 39.2%. Les moyennes mensuelles varient de 46.6% à 58.1% en hiver et de 22.9% à 26.2% en été, ce qui est montré sur le tableau II-9.

Tableau II- 8 : Humidité moyenne mensuelle et annuelle dans la station de Ghardaïa (%)

Mois	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
Humidité (%)	34.5	44.0	52.8	58.1	56.3	46.6	40.4	34.7	29.9	26.2	22.9	24.4	39.2

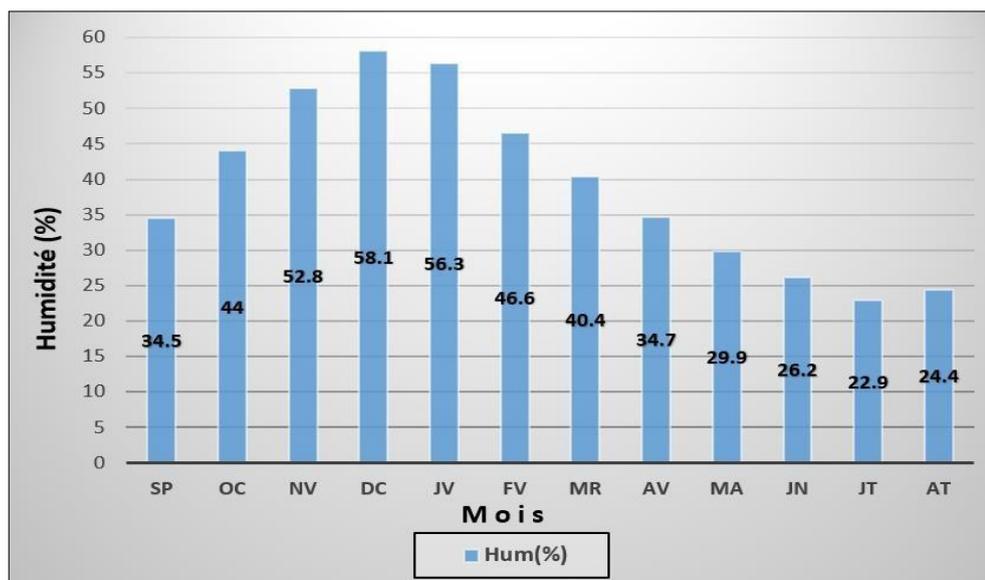


Figure II- 18 : L'humidité moyenne mensuelle (station de Ghardaïa)

D'après les figures II-18 et II-15, on constate que les valeurs de l'humidité mensuelle sont inversement proportionnelles à la température moyenne mensuelle de la station de Ghardaïa. La température, parmi d'autres facteurs, demeure le principal facteur influençant sur la capacité de l'air à contenir de l'eau.

II.6.4 Régime de vent et le sirocco

Le vent est un des facteurs caractéristiques du climat. Il se caractérise par sa vitesse et sa direction. La région de Ghardaïa est régie d'une part, par les circulations des masses d'air propres à la Méditerranée occidentale amenant l'humidité de l'Atlantique nord, et d'autre part, à l'ouverture des vents sahariens chauds (Sirocco). Les vents dominants soufflent du Nord-Ouest.

Les vitesses moyennes mensuelles observées au niveau de la station de Ghardaïa, montrent une répartition assez régulière comprise entre 3.3 et 4.8 m/s sur toute l'année, ce qui les classe dans la catégorie des vents modérés.

Tableau II- 9 : Vitesse moyenne du vent à la station de Ghardaïa

Mois	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
Vmoy (m/s)	3.6	3.2	3.3	3.5	3.6	3.7	4.4	4.8	4.5	4.2	3.6	3.3	3.8

Selon le tableau II-10, les vitesses les plus élevées s'observent en printemps avec des pics en mois d'avril de 4.8 m/s. En période sèche le sirocco prédomine, il s'agit d'un vent sec et chaud qui souffle du continent vers la méditerranée desséchant ainsi l'atmosphère.

II.6.5 Evaporation

L'évaporation est un élément climatique important à considérer, compte tenu de son rôle dans des divers processus hydro-climatiques, notamment son influence sur les précipitations. Elle est exprimée en millimètres d'eau évaporée.

Dans le tableau ci-dessous, sont exposées les valeurs moyennes mensuelles de la station

Tableau II- 10 : L'évaporation moyenne mensuelle de Ghardaïa

Mois	Sp	Oc	Nv	Dc	Jv	Fv	Mr	Av	Ma	Jn	Jt	At	Année
Evap(mm)	305.0	215.6	138.0	142.0	110.4	138.0	201.3	266.1	329.8	397.9	452.4	413.4	3110

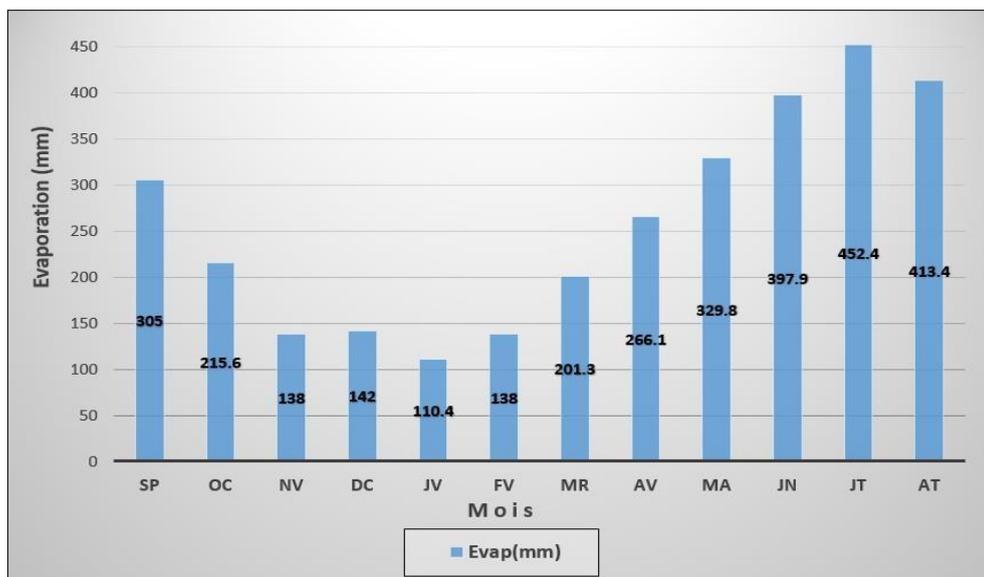


Figure II- 19 : Histogramme D'évaporations moyennes mensuelles

De la figure précédente, on remarque d'abord que les valeurs élevées de l'évaporation moyenne mensuelle (398 mm, 452.4 mm et 413 mm) pendant les mois de juin, de juillet et d'août respectivement sont dues à la forte température et aux vents violents, par contre les valeurs les moins élevées sont enregistrées au cours du mois de janvier et de février.

L'évaporation annuelle à la station de Ghardaïa est de l'ordre de 3110 mm, à savoir 35 fois plus grande que la pluviométrie.

II.7 Contexte géologique de la région

La région de la vallée du M'Zab, fait partie du grand domaine de la plateforme saharienne. Busson (1970) et Fabre (1976), ont largement consacré leurs travaux sur l'étude de dépôts mésozoïques et tertiaires de la plateforme du Sahara septentrional, lesquels une partie de notre synthèse géologique s'est inspirée.

II.7.1 Cadre géologique de la plate-forme saharienne

Le domaine de la plate-forme saharienne correspond à une immense assise de roches sédimentaires d'âge Secondaire et Tertiaire subhorizontale, reposant en discordance sur un socle primaire (Paléozoïque) fortement plissé et érodé au cours de l'orogénèse hercynienne. L'ensemble de ces assises comble une vaste cuvette synclinale qui forme le bassin du bas-Sahara, ou bassin du Chaâmba [Conrad, 1969]. Le centre de la cuvette est occupé par les dunes du Grand Erg oriental. Par contre le Grand Erg occidental couvre en grandes parties ces bordures occidentales et sous ces dunes de sables le bassin correspond à un vaste bombement anticlinal à axe situé approximativement le long de la dorsale du M'Zab. C'est le domaine du

Haut-Sahara [Flandrin, 1957]. La plate-forme saharienne s'étend du massif cristallophyllien du Hoggar au Sud jusqu'au piémont méridional de la chaîne montagneuse de l'Atlas Saharien au Nord. Les deux domaines ; saharien et atlasique, sont nettement séparés par un grand accident structural complexe dit flexure sud atlasique (figure II-20).

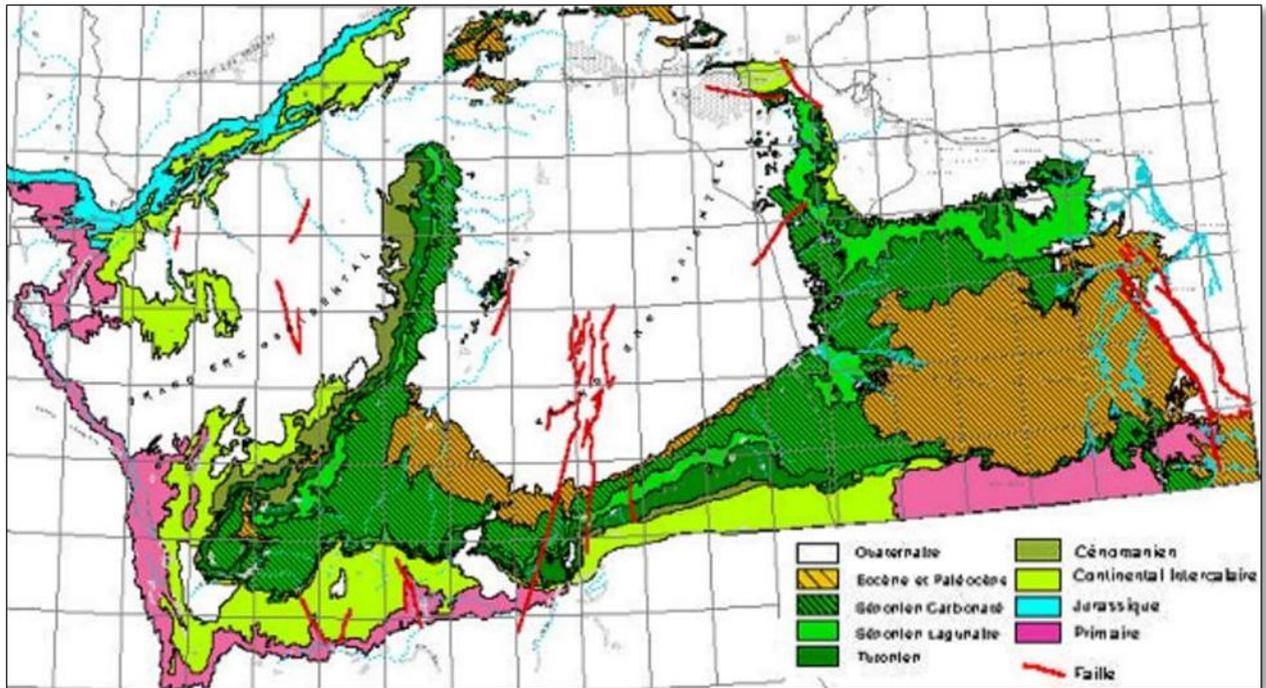


Figure II- 20 : Carte géologique du bassin septentrional du Sahara [O.S.S., 2003]

II.7.2 Cadre géologique de la dorsale de l'Oued M'Zab

La wilaya de Ghardaïa, elle est située sur les bordures occidentales du bassin sédimentaire secondaire du Bas - Sahara, les terrains affleurants sont en grande partie attribués au Crétacé supérieur, composés principalement par des dépôts calcaires turoniens dolomitiques ; qui forment un plateau subhorizontal appelé couramment "la dorsale du M'Zab".

Les terrains affleurant dans la Chebka correspondent à l'aboutissement d'une série de transgressions et de régressions marines : les périodes marines ont généré les terrains calcaires tandis que les périodes continentales ont laissé des sables et des grès qui constituent des réservoirs potentiels d'eau souterraine, le réservoir le plus connu étant le Continental Intercalaire dont l'étage albien constitue la partie supérieure.

Les périodes intermédiaires (flux ou reflux de la mer) ont donné des dépôts lagunaires : argiles à gypse.

Un réseau de 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 dhayates qui est la caractéristique de la Chebka.

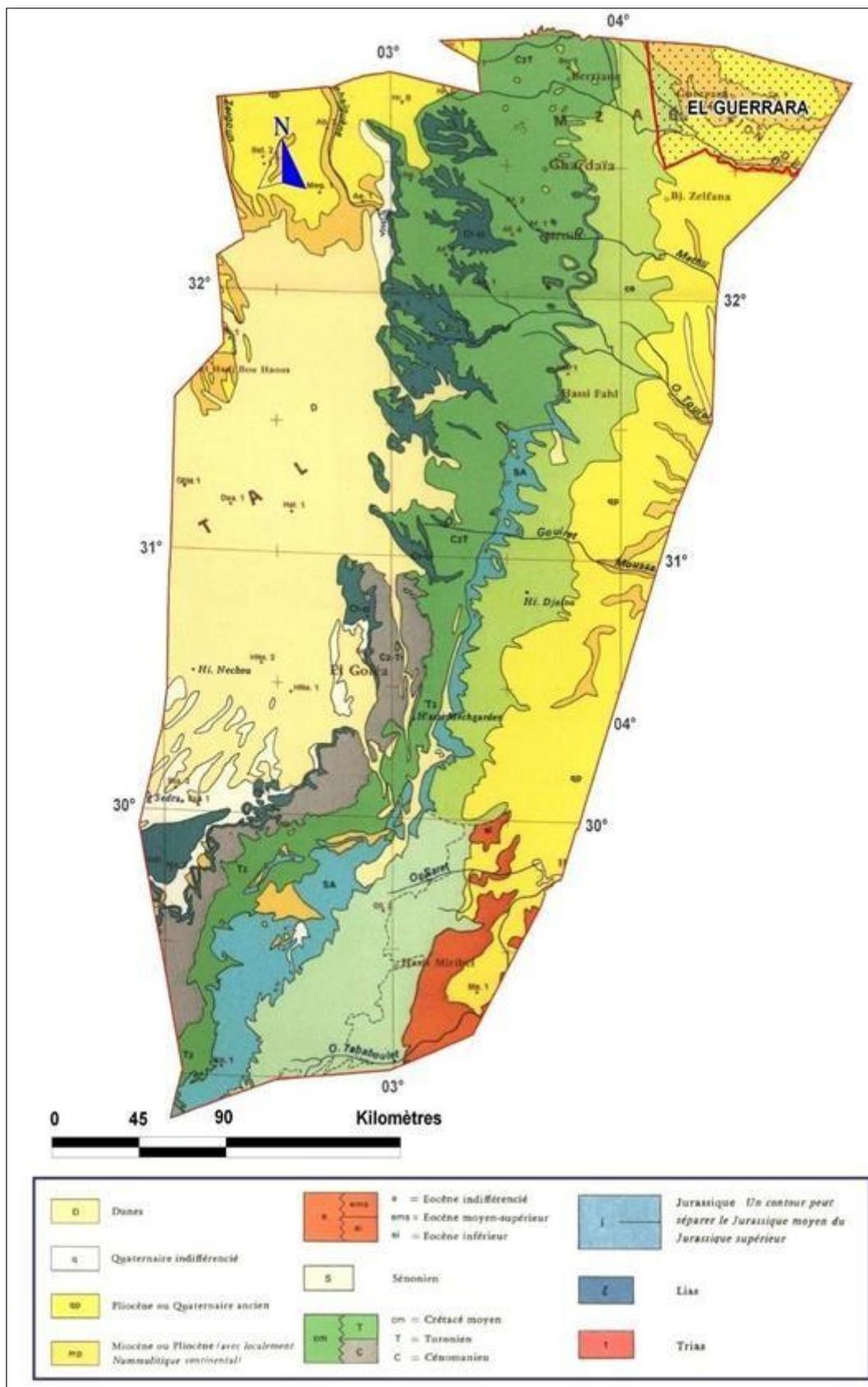


Figure II- 21 : Carte géologique de la wilaya de Ghardaïa [Ouled S. A., 2016]

Conclusion

II.8

Après l'étude des éléments du milieu physique de la vallée de l'Oued M'Zab telles que l'évolution démographique, l'extension urbaine et les caractéristiques climatiques et géologiques, on a constaté que :

L'évolution démographique des habitations de la ville de Ghardaïa est traduite par une extension urbaine accrue très rapide et non étudiée qui touche toute la longueur de la vallée de l'Oued M'Zab, et qui sert vraiment le lit de l'Oued ce qui permet d'aggraver le risque d'inondation.

Le climat de la région de Ghardaïa est typiquement Saharien, caractérisé par deux saisons : une saison chaude et sèche (du mois d'avril au mois de septembre) et une autre tempérée (du mois d'octobre au mois de mars), on constate qu'il y a une grande différence entre les températures de l'été et de l'hiver, avec une moyenne annuelle de 22.2°C, l'évaporation est d'ordre de 3110 mm par an et une faible hauteur de pluies avec une moyenne d'ordre de 77.72mm/an.

III.1 Introduction

Le bassin versant de l'Oued M'Zab présente un chevelu hydrographique important. De ce fait, une étude morphologique semble être très utile, elle nous permettra, en particulier, de classer les cours d'eau selon leurs importances et de déceler leurs développements.

Pour mieux apprécier la réponse hydrologique de ce bassin nous étudierons ses paramètres physiographiques en se basant sur le MNT de SRTM de résolution planimétrique 30 x 30 mètre et de précision altimétrique de 15 mètres (voir la figure III-1). Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel ArcMap version 10.2 édité par ESRI (Environmental System Research Institute). Ce logiciel à langage de développement évolué, est doté d'outils simples et très puissants pour analyser les bases de données spatiales (Géodatabase) ; géométriques et attributaires.

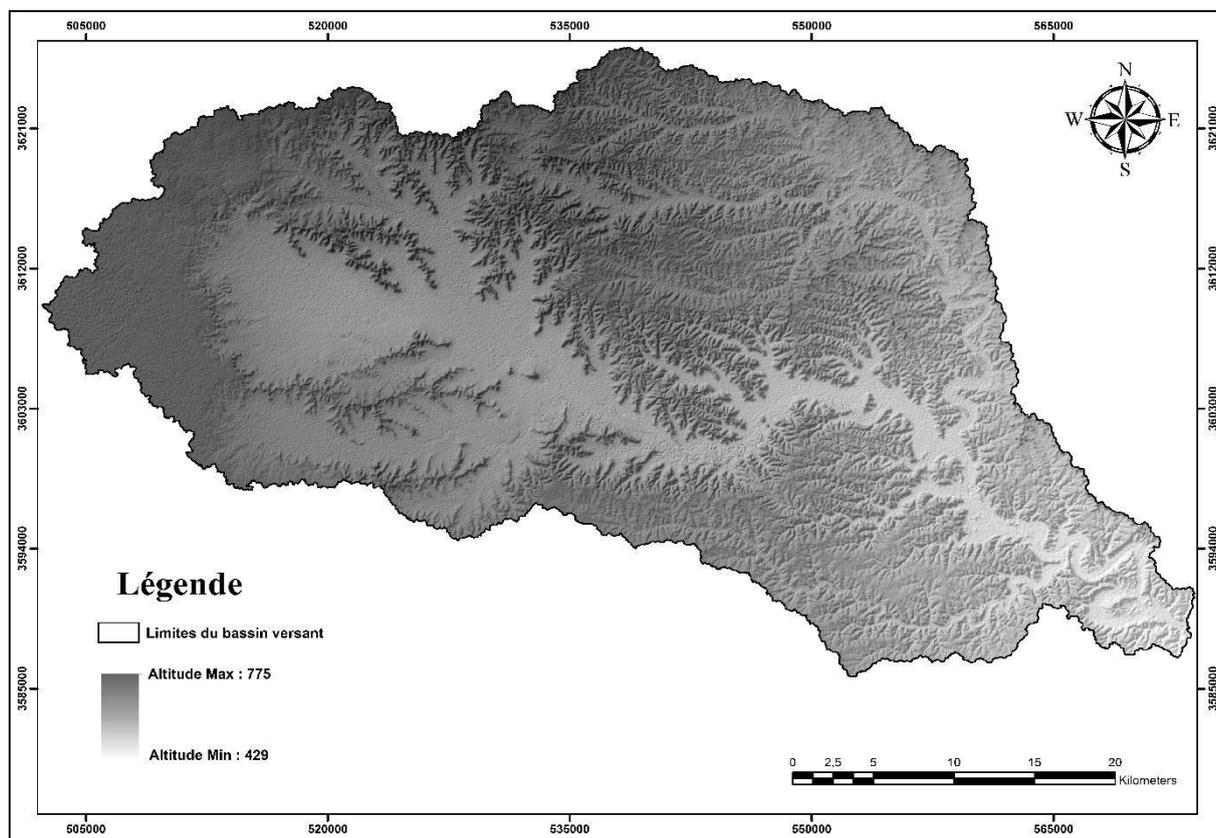


Figure III- 1 : MNT en mode GRID du bassin versant de l'Oued M'Zab

III.2 Présentation du bassin versant de l'Oued M'Zab

Le bassin versant de l'Oued M'Zab, représenté dans la figure III-2, appartient au grand Bassin du Saharien Septentrional, selon l'ANRH, il est classé sous le n° : 13-04. Le bassin est limité en amont par la commune de Daïa Ben Dahoua et en aval par la commune d'El-Atteuf.

Ce bassin versant draine la vallée de l'Oued M'Zab en passant par deux communes de Ghardaïa, soit le chef-lieu de la wilaya et Bounoura. L'Oued M'Zab présente une direction générale Est-Ouest, il se croise en amont avec les deux Oueds de Labiod et Laadira qui se confluent à 8 km au Nord-Ouest de la ville de Ghardaïa. D'autres affluents plus ou moins importants rejoignent l'Oued, notamment, Sur la rive droite, les deux Oueds Touzouze et Aridène qui le rejoignent en amont de la palmeraie de Ghardaïa, plus en aval, l'Oued N'tissa au niveau de Beni Isguen qui traverse la palmeraie de cette ville. A gauche, l'Oued Azouil dans le lit duquel sont situés les jardins de Bounoura.

En outre, l'Oued M'Zab reçoit d'autres venues de faible importance appelées "chaabah", tel qu'Akhalkhal, Belghanem sur la rive droite, et celles d'Inirèz, Baba Ouldjama sur la rive gauche.

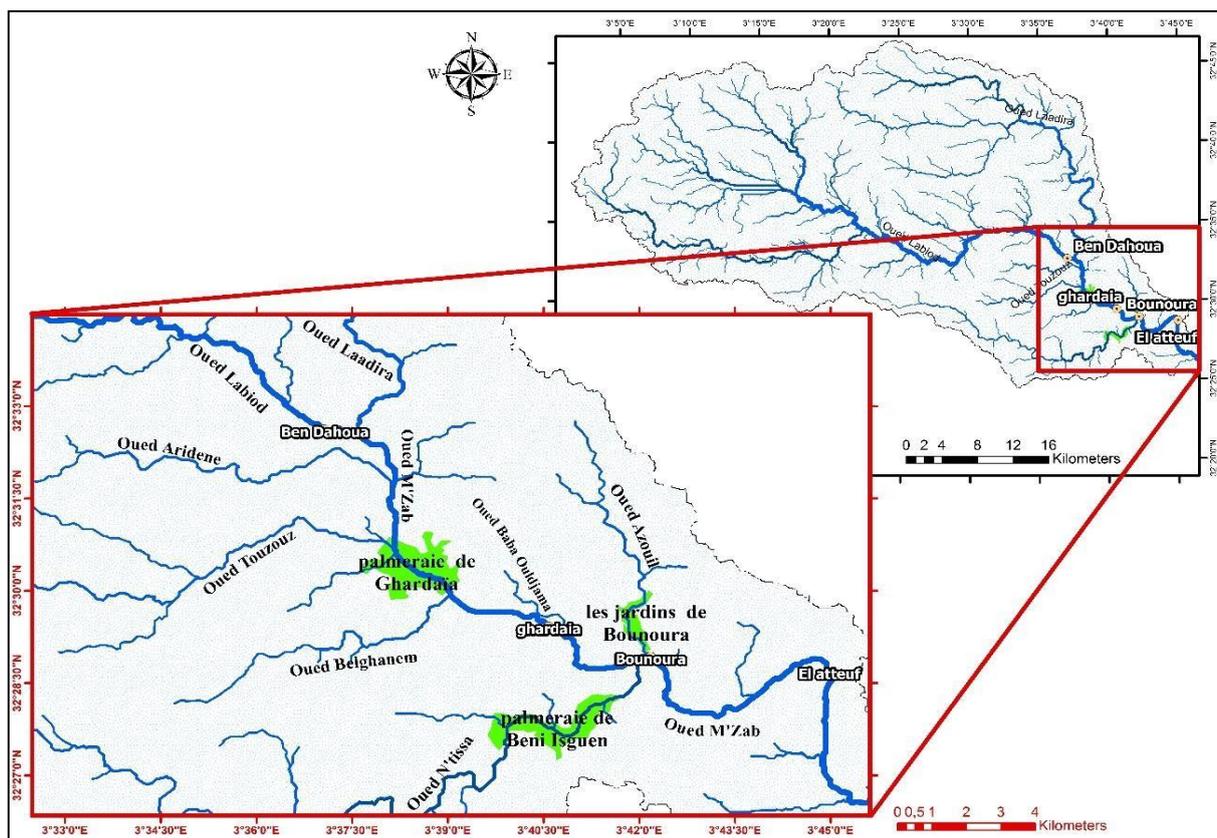


Figure III- 2 : Description du bassin versant de l'Oued M'Zab

III.3 Caractéristiques de bassin versant

Les caractéristiques géométriques, morphométriques et hydrographique du bassin versant ont été calculées à partir du modèle numérique du terrain SRTM.

III.3.1 Les caractéristiques géométriques

Les différentes caractéristiques géométriques extraites du MNT à l'aide du logiciel ArcMap, Sont:

- La surface du bassin versant : $S = 3018.033 \text{ km}^2$;
- Le périmètre du bassin versant $P = 336.36 \text{ km}$;
- La plus grande longueur $L_{\max} = 33.17 \text{ km}$;
- Le plus grand largeur $L_{\max} = 15.86 \text{ km}$;
- L'altitude maximale $H_{\max} = 775 \text{ mètres}$;
- L'altitude minimale $H_{\min} = 429 \text{ mètres}$;
- La distance "Exutoire-Centre de gravité" $D_g = 55.33 \text{ km}$;
- La longueur du plus long thalweg $L_t = 115.28 \text{ km}$;
- Le centre de gravité du bassin versant : C_g : $x = 538590.648 \text{ m}$, $y = 3606975.082 \text{ m}$ /
UTM(WGS)-Z31-N.

III.3.2 Les caractéristiques morpho métriques

III.3.2.1 Coefficient de compacité Kc de Gravelius (1914)

Caractérisant la morphologie d'un bassin versant, ce coefficient est défini comme le rapport entre le périmètre du bassin réel (P) et le périmètre d'un bassin circulaire ayant la même surface [Roche, 1963]. Il s'obtient en appliquant la formule ;

$$k = 0.28 \frac{PBV}{\sqrt{SBV}} \quad \text{(III-1)}$$

Avec :

PBV : Périmètre du bassin versant.

SBV : Surface du bassin versant.

Si : **KC = 1** ; le bassin est ramassé.

KC > 1 ; le bassin est allongé.

Plus ce coefficient s'approche de 1, plus la forme de bassin versant sera ramassée et plus le temps de concentration des eaux sera court, elle sera allongée dans le cas contraire. Pour le bassin versant de l'Oued M'Zab, le coefficient de compacité de Gravelius $Kc = 1.71$, cette valeur indique bien que notre bassin a une forme allongée, ce qui induit un temps important d'acheminement de l'eau vers l'exutoire. Vue l'importance de l'impluvium de ce bassin les débits de pointe des crues sont importants.

III.3.2.2 Le rectangle équivalent

Le bassin versant rectangulaire résulte d'une transformation géométrique du bassin réel dans laquelle on conserve la même superficie, le même périmètre (ou le même coefficient de compacité) et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle.

Le rectangle équivalent est caractérisé par la longueur « L » et la largeur « l » définit respectivement par les formules suivantes :

$$L = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left(1 + \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{1,12^2}{Kc} \right)}}{Kc} \right) \quad \text{(III-2)}$$

$$l = \frac{Kc \cdot \sqrt{S}}{1,12} \left(1 - \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{1,12^2}{Kc} \right)}}{Kc} \right) \quad \text{(III-3)}$$

Les résultats du calcul pour le bassin versant de l'Oued M'Zab nous donnent : $L = 147.26$ km et $l = 20.49$ km. Le tableau suivant expose la largeur de l'intervalle par tranche d'altitude, Ces résultats sont exposés dans la figure III-3.

Tableau III- 1 : Calcul des largeurs des intervalles B.V de l'Oued M'Zab

Altitude de l'intervalle (m)	Surface de l'intervalle (km ²)	Pourcentage de la surface (%)	Largeur de l'intervalle (km)
800-750	42.32	1.40	2.06
750-700	540.84	17.92	26.39
700-650	859.19	28.47	41.92
650-600	788.51	26.13	38.47
600-550	458.86	15.20	22.39
550-500	246.43	8.17	12.02
500-450	72.31	2.40	3.53
450-400	9.58	0.32	0.47
Somme	3018.03	100.00	147.26

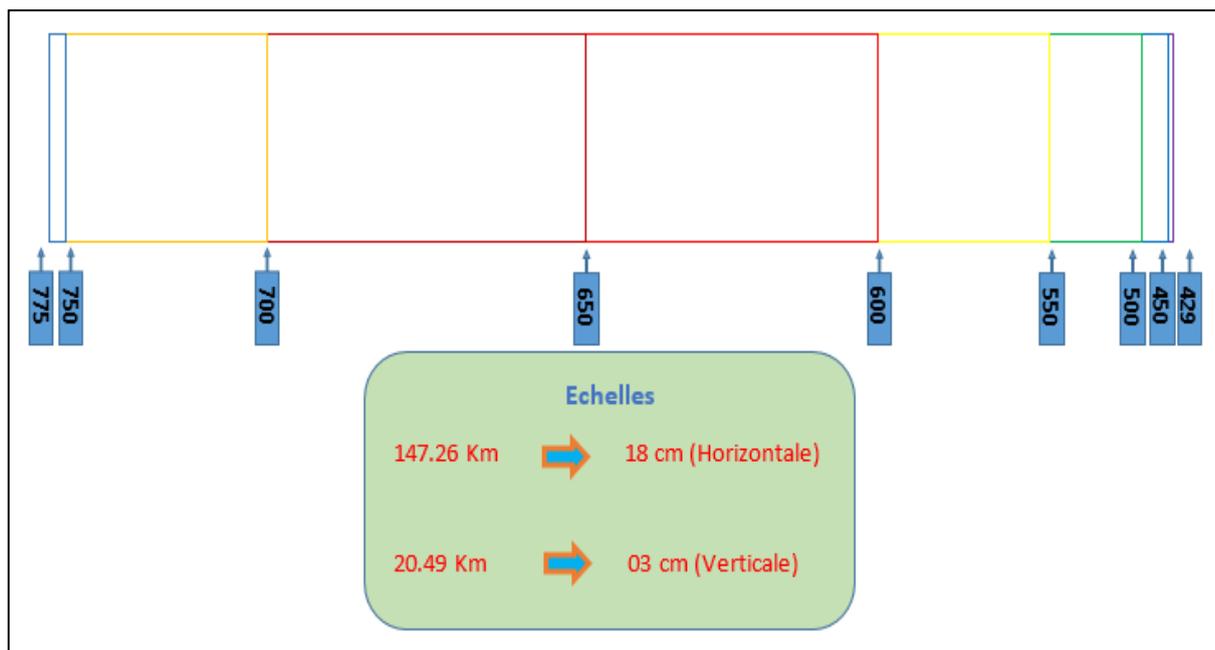


Figure III- 3 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued M'Zab

III.3.3 Caractéristiques du relief

Aborder la question du relief impose l'étude topographique du bassin versant. L'altitude influe sur la météo tandis que la pente influe sur la vitesse d'écoulement et la hauteur d'eau du cours d'eau, donc sur le débit. La courbe hypsométrique est un bon outil de visualisation de la pente du bassin versant et de son altitude moyenne. La pente moyenne renseigne sur la topographie et le temps de concentration (<http://www.risques-meteo.ac-versailles.fr/Bassin-versant>).

III.3.3.1 Etude hypsométrique

L'étude hypsométrique nous permet d'analyser la dispersion des altitudes en fonction des surfaces comprises entre les courbes de niveaux.

Le mode opératoire consiste à déterminer par planimétrie la superficie de toutes les surfaces situées au-dessus de la courbe de niveau correspondante, et cela pour les différentes altitudes du bassin versant.

Dans un contexte géomorphologique, la courbe donne une information sur la pente, le relief du bassin versant, ainsi que le niveau de maturité du cours d'eau.

Le traitement numérique du MNT du bassin versant de l'Oued M'Zab avec ArcMap, a permis de générer automatiquement les intervalles d'altitudes et les surfaces correspondantes ainsi que leurs surfaces cumulées. Les résultats sont représentés dans le tableau III-2 ci-dessous.

Tableau III- 2 : Répartition altimétrique des surfaces du bassin versant de l'Oued M'Zab

Altitude	Surface(km ²)	Surface (%)	Surface cumulée(km ²)	Surface cumulée (%)
800-750	42.32	1.40	42.319	1.40
750-700	540.84	17.92	583.159	19.32
700-650	859.19	28.47	1442.349	47.79
650-600	788.51	26.13	2230.859	73.92
600-550	458.86	15.20	2689.719	89.12
550-500	246.43	8.17	2936.149	97.29
500-450	72.31	2.40	3008.457	99.68
450-400	9.58	0.32	3018.033	100.00
Somme	3018.033	100.00		

Les données ci-dessus permettent de tracer la courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab.

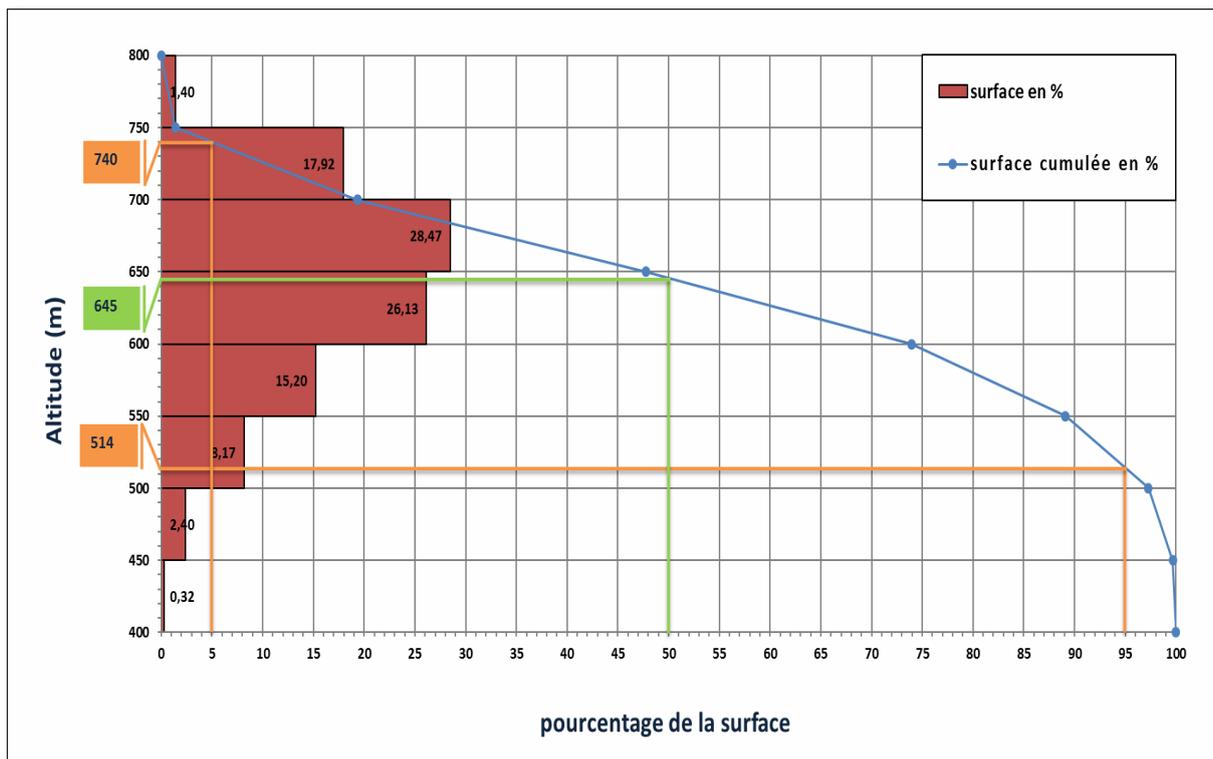


Figure III- 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab

D'après la figure précédente, l'allure de la courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab, montre que sa plus grande partie est caractérisée par des moyennes aux faibles altitudes, et à reliefs des modérés aux faibles. De ce fait on peut conclure que notre bassin versant est en stade de jeunesse avec des faibles précipitations marquées par l'absence d'érodabilité.

III.3.3.2 Etude de la fréquence altimétrique

Cette étude nous permet de mettre en évidence l'influence de l'altitude sur les facteurs climatiques, notamment la température et les précipitations qui régissent les écoulements de surface.

Le traitement nous a permis de dégager huit classes d'altitude, leur report sur un graphe sous forme d'histogrammes de fréquence (voir la Figure III-5) fournit une vue synthétique du relief et de la pente du bassin.

Sur l'axe des ordonnées, ont été reportés le nombre des pixels du MNT raster ayant les mêmes valeurs d'altitude.

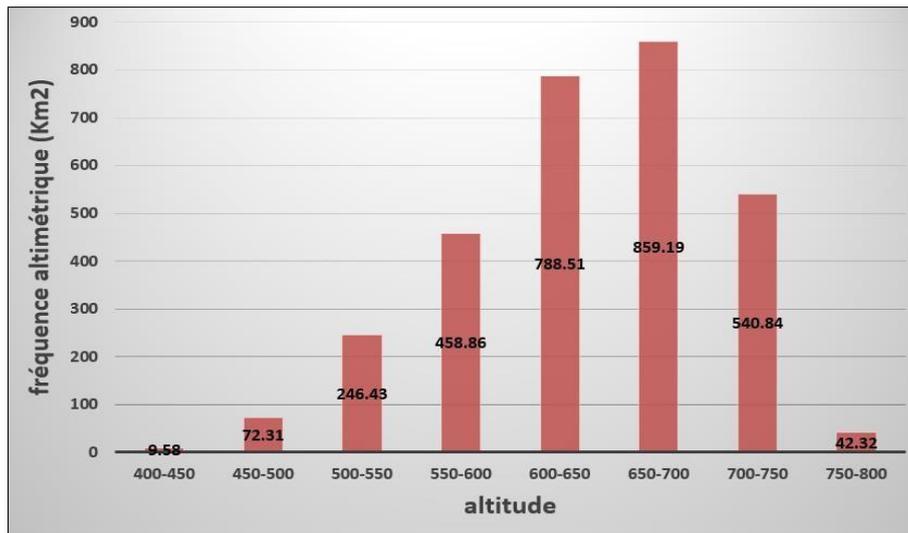


Figure III- 5 : Fréquence altimétrique du bassin versant de l'Oued M'Zab

D'après la figure ci-dessus on remarque clairement que les altitudes les plus fréquentes sur le bassin de l'Oued M'Zab sont comprises entre 600 et 700m, de point de vue géomorphologique la zone d'étude forme un plateau.

III.3.3.3 Etude de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude

La carte de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude a été élaborée à partir du traitement de la grille du MNT.

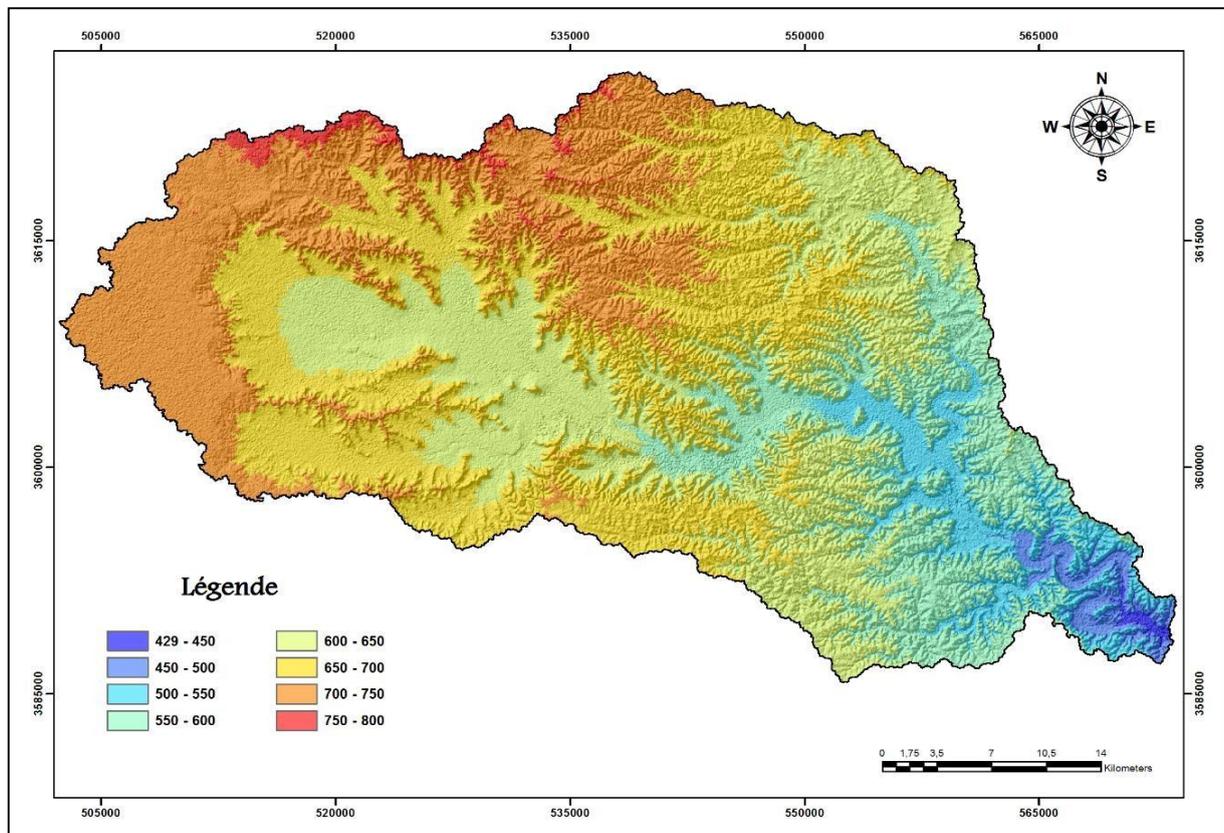


Figure III- 6 : Carte de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude du bassin versant de l'Oued M'Zab

La carte de la figure III-6 montre que les surfaces les plus dominantes sont comprises entre l'altitude 650 m et l'altitude 700 m, elles occupent la partie centrale du bassin versant sur une surface de 859.19 km². Du point de vue lithologique, elle correspond à un plateau types hamadas formées par des dépôts continentaux de calcaires lacustres et poudingues d'âge Pliocène.

Dans les régions occidentales du bassin versant les altitudes varient entre 700 m et 800 m avec un relief plus contrasté s'étalent sur une superficie de 583.16 km². Elles correspondent à l'affleurement des calcaires turoniens de la dorsale de l'Oued M'Zab à réseau hydrologique très ramifié.

Les faibles altitudes (400-450 m) sont situées en aval du bassin, occupant une superficie de 9.58 km².

III.3.3.4 Altitude médiane du bassin

L'altitude médiane du bassin versant est calculée à partir de la courbe hypsométrique. Elle correspond à l'altitude à laquelle la surface soit égale à 50% de la surface totale du bassin. La lecture de cette courbe nous donne une altitude moyenne H50% = 645 mètres.

III.3.3.5 Altitude moyenne du bassin Hmoy

a) Estimation de l'altitude moyenne par formule empirique

Avec :

$$H_{mo} = \frac{\sum S_i H_i}{S} \quad \text{(III-4)}$$

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

S_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ; H_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

S : superficie totale du bassin versant [km²].

Tableau III- 3 : Surface d'altitude par classe du bassin versant de l'Oued M'Zab

altitude	H _i	S _i (km ²)
800-750	775	42.32
750-700	725	540.84
700-650	675	859.19
650-600	625	788.51
600-550	575	458.86
550-500	525	246.43
500-450	475	72.31
450-400	425	9.58
Somme		3018.03
		3

A partir du tableau III-3 l'altitude moyenne calculée est : $H_{moy} = 639.3$ mètres.

b) Estimation de l'altitude moyenne à partir du MNT

En traitant la grille du MNT de la région de l'Oued M'Zab, on a construit l'histogramme de fréquence et calculé les nombres de valeurs d'altitude par classe (voir le Tableau III-4) ; qui nous permet de calculer l'altitude moyenne.

L'altitude moyenne du bassin est calculée par la formule suivante ;

$$\text{Avec ; } H_{mo} = \frac{\sum N_i H_i}{\sum N_i} \quad (\text{III-5})$$

N_i : le nombre de valeurs d'altitude par classe.

H_i : la moyenne d'altitude de la classe [m].

Tableau III- 4 : Nombre de valeurs d'altitude par classe du bassin versant de l'Oued M'Zab

Altitude (m)		Ni	Hi*Ni
Classe	Hi		
800-750	775	24590	19057250
750-700	725	424275	307599375
700-650	675	538020	363163500
650-600	625	467705	292315625
600-550	575	238067	136888525
550-500	525	107125	56240625
500-450	475	33182	15761450
450-400	425	3716	1579300
Somme		1836680	1192605650

L'application de la formule III-5 nous donne une altitude moyenne du bassin versant de l'Oued M'Zab $H_{moy} = 649.3$ mètres.

Nous retenons la valeur de 649.3 mètres comme altitude moyenne du bassin versant de l'Oued M'Zab. Cette valeur est la plus précise, car elle est calculée directement du MNT de la zone.

III.3.4 Etude des pentes

La pente est un facteur capital régissant le régime des écoulements superficiels, ainsi que la dynamique de l'érosion au sien du bassin versant.

A partir du MNT de la région d'étude, nous avons pu réaliser la carte des pentes du bassin versant de l'Oued M'Zab, sur laquelle quatre classes de pentes ont été mises en évidence ;

- Classe des pentes faibles variant entre 0% et 2%.
- Classe des pentes modérées variant entre 2% et 5%.
- Classe des pentes fortes variant entre 5% et 15%.

- Classe des pentes très fortes variant entre 15% et 74.44%.

A partir de la figure III-7, on remarque clairement que la classe des pentes la plus fréquente sur le bassin de l'Oued M'Zab est celle des pentes forte (5% et 15%).

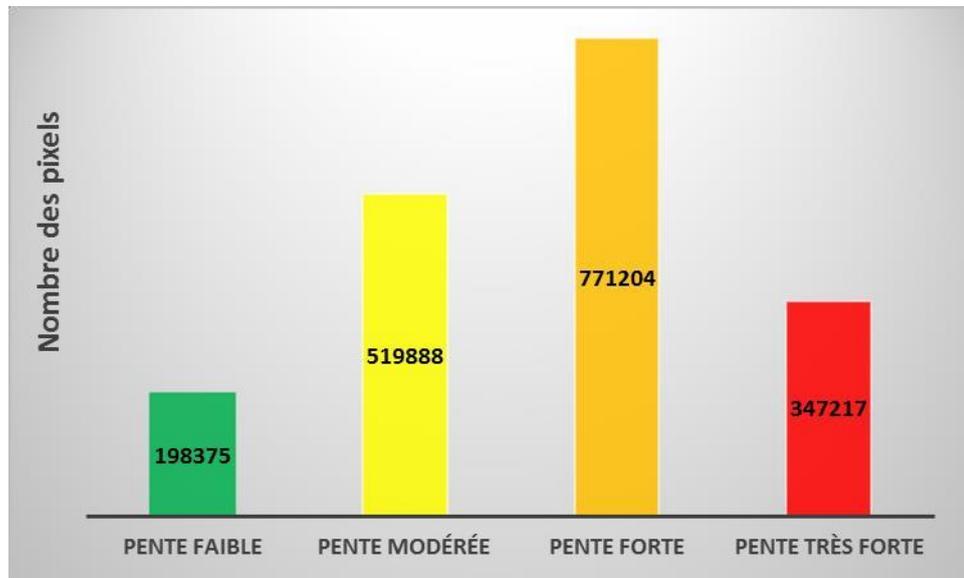


Figure III- 7 : Histogramme de fréquence des pentes du bassin versant de l'Oued M'Zab

La carte des pentes du bassin versant de l'Oued M'Zab présentée dans la figure III-8, montre que les valeurs les plus élevées sont localisées dans la partie avale (les alentours de la ville de Ghardaïa, Cela rend la ville plus vulnérable aux risques des inondations) de [15% à 74.44%], elles correspondent au relief du massif calcaire turonien de la dorsale de l'Oued M'Zab à chevelu orographique très dense.

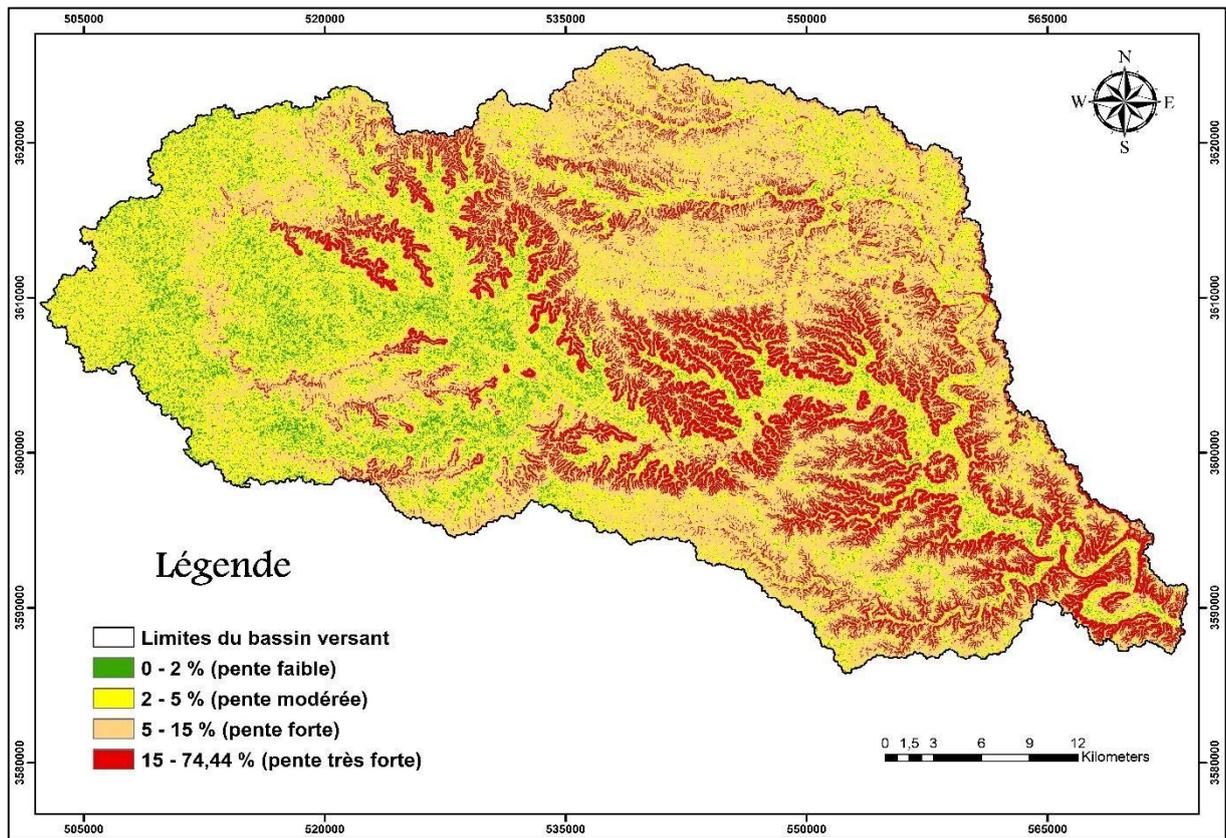


Figure III- 8 : Carte des pentes du bassin versant de l'Oued M'Zab

III.3.4.1 Indice de pente de Roche

Le relief d'un bassin versant est caractérisé par des indices qui ont été définis pour rendre compte de l'influence de la pente sur le régime hydrologique. Pour comparer des bassins entre eux, l'indice de Roche est utilisé avec succès. Cet indice, représente la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées entre les lignes de niveau pondérée par les surfaces.

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i \cdot d_i} \tag{III-6}$$

Avec ;

I_p : indice de pente de Roche ;

L : longueur du rectangle équivalent (km) ;

a_i : fraction de la surface comprise entre deux courbes de niveau voisines (%) ; d_i : distance séparant les deux courbes de niveau voisines (m).

Tableau III- 5 : Calcul de l'indice de Roche

Altitude de l'intervalle (m)	Dénivelée di (m)	Surface de l'intervalle (km ²)	Fraction de la surface ai (%)	$\frac{\sqrt{a_i} \cdot d_i}{d_i}$
800-750	50	42.32	1.40	8.37
750-700	50	540.84	17.92	29.93
700-650	50	859.19	28.47	37.73
650-600	50	788.51	26.13	36.15
600-550	50	458.86	15.20	27.57
550-500	50	246.43	8.17	20.21
500-450	50	72.31	2.40	10.95
450-400	50	9.58	0.32	4.00
Somme		3018.03	100.00	174.91

On se basant sur les résultats affichés sur le tableau ci-dessus, et par l'application de la formule III-6, l'indice de pente de Roche pour le bassin versant de l'Oued M'Zab est $I_p = 14.41$.

III.3.4.2 Indice de pente moyenne

L'indice de pente donne une bonne indication sur le temps de ruissellement des eaux, il est calculé en divisant la dénivelée totale sur la longueur du rectangle équivalent. Il est donné par la formule suivante :

$$I = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_r} \tag{III-7}$$

Avec ;

I_m : indice de pente moyenne (m/km) ;

H_{max} : altitude maximale du bassin versant (m) ;

H_{min} : altitude minimale du bassin versant (m) ; L_r :

longueur du rectangle équivalent (km).

Pour notre bassin versant de l'Oued M'Zab, l'indice de pente moyenne est de 0.235 %.

III.3.4.3 Indice de pente globale

L'indice de pente globale est l'un des indices les plus utilisés. Il sert de base pour la classification de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM) il s'obtient à partir de la dénivelée utile ($D_u = H_{95\%} - H_{5\%}$) déterminée directement à partir de la courbe hypsométrique du bassin versant.

$$I_g = \frac{D_u}{L_r} = \frac{(H_{5\%} - H_{95\%})}{L_r} \tag{III-8}$$

Avec ;

I_g : indice de pente globale (%) ;

D_u : dénivelée utile (m) ;

H95% : altitude à laquelle la surface soit égale à 95% de la surface totale du bassin (m), tirée de la courbe hypsométrique ;

H5% : altitude à laquelle la surface soit égale à 5% de la surface totale du bassin (m), tirée de la courbe hypsométrique ;

L_r : longueur du rectangle équivalent (km).

Les valeurs de H5% et H95% sont respectivement, 740 et 514 m. Le bassin versant de l'Oued M'Zab a un indice de pente globale I_g = 0.153 %.

Tableau III- 6 : Classifications des reliefs selon l'indice de pente globale (ORSTOM)

Classe	Relief	IG
R1	Relief très faible	IG < 2
R2	Relief faible	2 < IG < 5
R3	Relief assez faible	5 < IG < 10
R4	Relief modéré	10 < IG < 20
R5	Relief assez modéré	20 < IG < 50
R6	Relief fort	50 < IG < 100
R7	Relief très fort	100 < IG

Selon la classification d'ORSTOM (voir le Tableau III-6), le bassin versant de l'Oued M'Zab appartient à la classe R1 (I_g < 2) à relief très faible (un plateau faiblement marqué par l'érosion).

III.3.4.4 Dénivelée utile

Elle est déterminée directement de la courbe hypsométrique du bassin versant, tel que,

$$D_u = (H_{5\%} - H_{95\%}) \tag{III-9}$$

Avec ;

H95% : altitude à laquelle la surface soit égale à 95% de la surface totale du bassin (m). H5%

: altitude à laquelle la surface soit égale à 5% de la surface totale du bassin (m).

D'après la courbe on a H5% = 740 m et H95% = 514 m. La dénivelée utile déterminée pour le bassin versant de l'Oued M'Zab est D_u = 226 mètres.

III.3.4.5 Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique dérive de la pente globale (I_g) en prenant compte l'effet de la surface.

Sa détermination permet de définir les différents types de reliefs des bassins versants.

La dénivelée spécifique s'obtient en appliquant la formule ;

$$D = \frac{D_u}{L_r} \sqrt{S_g} = \frac{D_u}{L_r} \sqrt{\frac{r}{r}} I_g = D \frac{I_g}{\sqrt{I_r}} \tag{III-10}$$

Avec ;

D_s : La dénivelée spécifique ;

I_g : indice de pente globale (m/km) ; S :

La surface du bassin versant ;

D_u : dénivelée utile (m) ;

L_r : longueur du rectangle équivalent du bassin versant (km) ; I_r :

largueur du rectangle équivalent du bassin versant (km).

La classification d'ORSTOM en fonction de la dénivelée spécifique, a défini sept classes, comme il est indiqué dans le Tableau III-7 ;

Tableau III- 7 : Classifications des reliefs selon la dénivelée spécifique (ORSTOM)

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

La dénivelée spécifique calculé pour le bassin versant de l'Oued M'Zab $D_s = 84.3$ m.

D'après les classifications de l'ORSTOM, notre bassin versant appartient à la classe R4 ($50 < D_s < 100$) à relief modéré.

III.3.5 Caractéristiques du chevelu hydrographique

III.3.5.1 Hiérarchisation du chevelu

La hiérarchisation des talwegs nous permet d'étudier la ramification du réseau, pour laquelle chaque cours d'eau reçoit un numéro en fonction de son importance, appelé ordre du cours d'eau. Parmi les méthodes de numérotation élaborées, on a adopté celle de Shumm et Strahler (1952) basée sur trois règles ;

- Tout thalweg sans affluent est d'ordre 1.
- Au confluent de deux thalwegs d'ordre n , le résultant est d'ordre $n+1$.
- Un thalweg recevant un affluent d'ordre inférieur garde son ordre.

Le traitement numérique des données du MNT (voir la figure III-1), a permis d'établir la classification de réseau de talwegs et de dresser la carte du chevelu hydrographique du bassin versant présentée par la figure III-9.

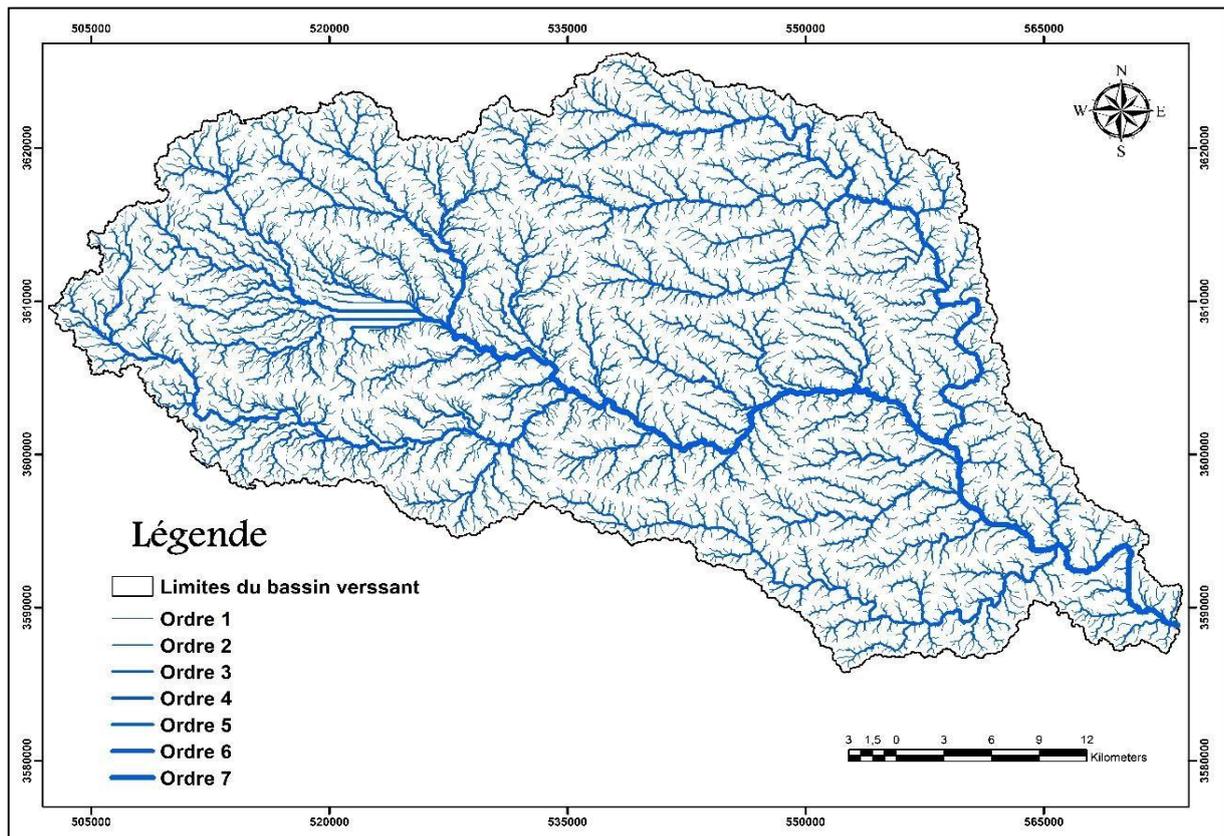


Figure III- 9 : Hiérarchisation de réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued M'Zab

III.3.5.2 Les rapports morphométriques (lois de Horton)

Horton a formulé des équations empiriques qui prends en considération le nombre, la longueur moyenne et l'ordre des thalwegs. Ces équations sont le rapport de confluence (Rc) et le rapport des longueurs moyennes (RL). Sur un bassin versant relativement homogène, les deux rapports sont sensiblement constants.

a) Rapport de confluence

Ce rapport est connu aussi sous le nom de rapport de bifurcation (bifurcation ratio). Il se définit par le rapport du nombre de thalwegs (N) d'ordre x par celui des thalwegs d'ordre supérieur (x+1). Les grandes valeurs du RC indiquent qu'il y a beaucoup d'affluents d'ordre élevé (les apports d'eaux plus important), les faibles valeurs indique qu'il y a une faible hiérarchisation des thalwegs (les apports d'eaux plus faibles). Il se calcule par la formule ;

$$R_c = \frac{N_x}{N_{(x+1)}} \tag{III-11}$$

Tableau III- 8 : Calcul du quotient des nombres des thalwegs

Ordre x	Nombre Nx	Nx/Nx+1
1	5203	
2	1147	4.54
3	249	4.61
4	48	5.19
5	9	5.33
6	3	3
7	1	3
Rcmoy = 4.28		

D'après le tableau ci-dessus, le rapport de confluence pour le bassin versant de l'Oued M'Zab Rcmoy = 4.28. Cette valeur indique que le bassin présente une bonne hiérarchisation.

En portant sur un graphe semi logarithmique, en abscisse les rangs (ordres) des thalwegs et en ordonnée leur nombre, on peut aisément constater un bon alignement des points et l'ajustement d'une droite (voir la figure III-10).

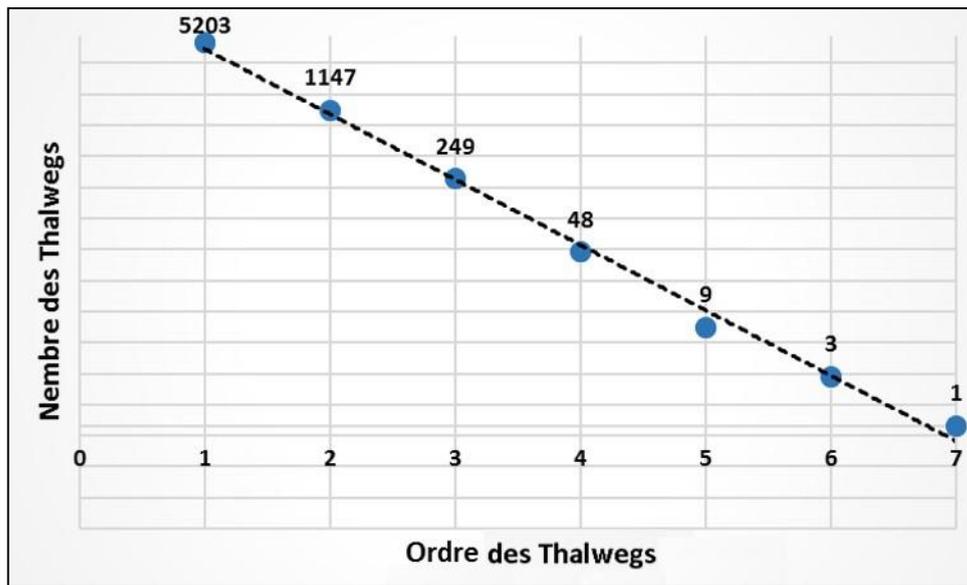


Figure III- 10 : Nombre des thalwegs en fonction de leur ordre

Selon la formulation de Horton, on peut écrire ;

$$N_x = R^{k-x} \Rightarrow \log N_x \tag{III-12}$$

Avec ;

K = ordre du thalweg principal

Pour notre cas on a ; k = 7 et $\log (R_c) = \log (4.28) = 0.631$. Donc l'équation du nombre d'affluents du bassin versant de l'Oued M'Zab s'écrit :

$$\log N_x = 0,631 (7 - x) \tag{III-13}$$

b) Rapport de longueur moyenne

Il se définit par le rapport de la longueur moyenne (Lm) des thalwegs d'ordre (x) par celui des thalwegs d'ordre immédiatement inférieur(x-1). Il est donné par la formule ;

$$R = \frac{L_m(x)}{L_m(x-1)} \tag{III-14}$$

Tableau III- 9 : Calcul du rapport des longueurs des thalwegs

Ordre x	Longueurs Lx(km)	Nombre Nx	Longueurs moyennes Lm(km)	Lm(x)/Lm(x-1)
1	2176.65	5203	0.42	2.045
2	981.43	1147	0.86	2.466
3	525.3	249	2.11	2.569
4	260.13	48	5.42	2.075
5	101.19	9	11.24	1.149
6	38.75	3	12.92	5.563
7	71.86	1	71.86	
Total	4155.31		R_{lmoy} = 2.64	

D'après les résultats (Tableau III-9), le rapport des longueurs moyennes du bassin versant de l'Oued M'Zab est de 2.64.

Les couples (Lx, x) portés sur un graphe semi log nous permet d'ajuster approximativement une droite, comme montre la figure III-11.

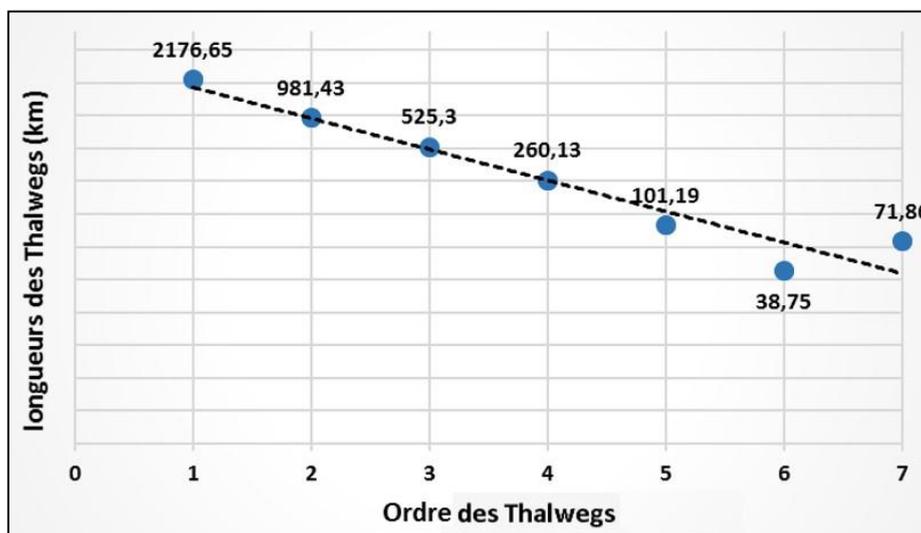


Figure III- 11 : Longueurs des thalwegs en fonction de leur ordre

Horton relie le rapport des longueurs avec les longueurs moyennes par la formule ;

$$L_m(x) = L_{mp} L_c^{k-p} \Rightarrow \log L_m(x) = (k - p) \log L_{mp} \quad \text{(III-15)}$$

III.3.5.3 Densité des thalwegs élémentaires

Elle est définie par le rapport du nombre des thalwegs d'ordre 1 (N1) à la surface totale (S) du bassin versant.

$$F_1 = \frac{N_1}{S} \quad \text{(III-16)}$$

La densité des thalwegs élémentaires calculée pour le bassin versant de l'Oued M'Zab nous donne : $F_1 = 1.72$ thalwegs/km², ce résultat témoigne d'un faible drainage des surfaces du bassin en question.

III.3.5.4 La densité de drainage

La densité de drainage (Dd) s'exprime en km⁻¹. Elle caractérise le chevelu hydrographique d'un bassin versant. Pour un bassin de superficie S, elle se définit comme la longueur totale des cours d'eau de tout ordre sur la surface drainée.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^x L}{S} \quad \text{(III-17)}$$

Avec,

Dd : densité de drainage en km⁻¹ ;

$$\frac{\sum_{i=1}^x L}{S}$$

$\sum_{i=1}^x L$: Longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin en km ;

S : aire du bassin en km².

En général, cet indice varie de 0.002 km⁻¹ dans certaines régions calcaires à 300 km⁻¹ dans les badlands. D'après Smith et Stopp (1979), et comme montre la figure III-12, la densité du chevelu influence l'hydrogramme observé à l'exutoire du bassin. Une forte densité favorise le ruissellement et augmente le temps de réponse d'un bassin versant.

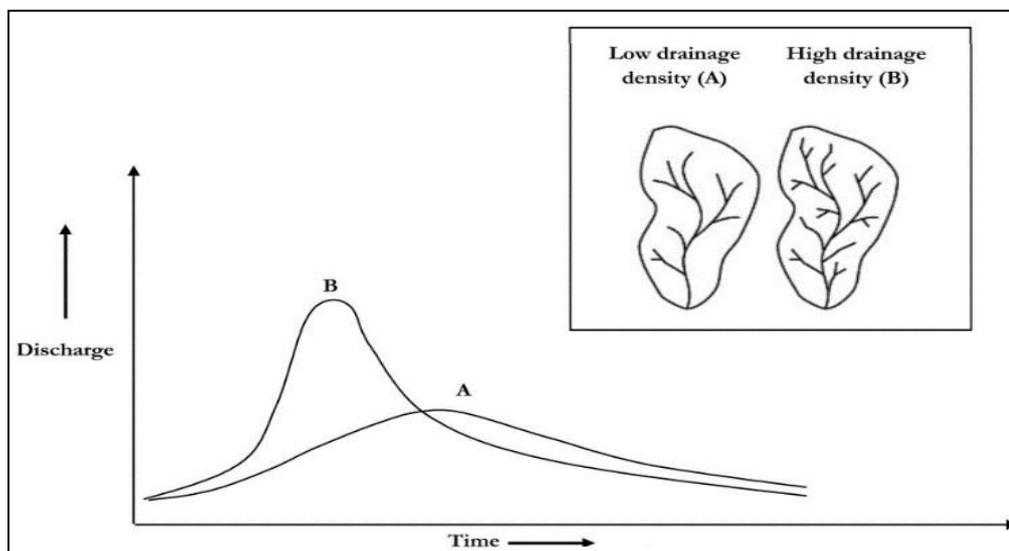


Figure III- 12 : Relation entre la densité de drainage et le débit à l'exutoire [Smith et Stopp, 1979]

Pour une longueur totale des thalwegs du bassin versant de l'Oued M'Zab $L_x = 4155.31$ km et une superficie de 3018.033 km², on obtient une densité de drainage $D_d = 1.38$ km⁻¹, cette valeur reflète un réseau hydrographique lâche.

III.3.5.5 Coefficient de torrentialité

Il se définit comme le produit de la densité des thalwegs élémentaires (F1) d'un bassin versant par sa densité de drainage (Dd) ;

$$C_t = F_1 \cdot D_d \quad \text{(III-18)}$$

Le résultat du calcul nous donne pour notre bassin versant de l'Oued M'Zab un coefficient de torrentialité $C_t = 2.37$.

III.3.5.6 Détermination de la longueur du cours d'eau principal

La longueur du thalweg principal qui est égale à 115.28 km, est déterminée par ArcMap et est représentée sur la figure III-13.

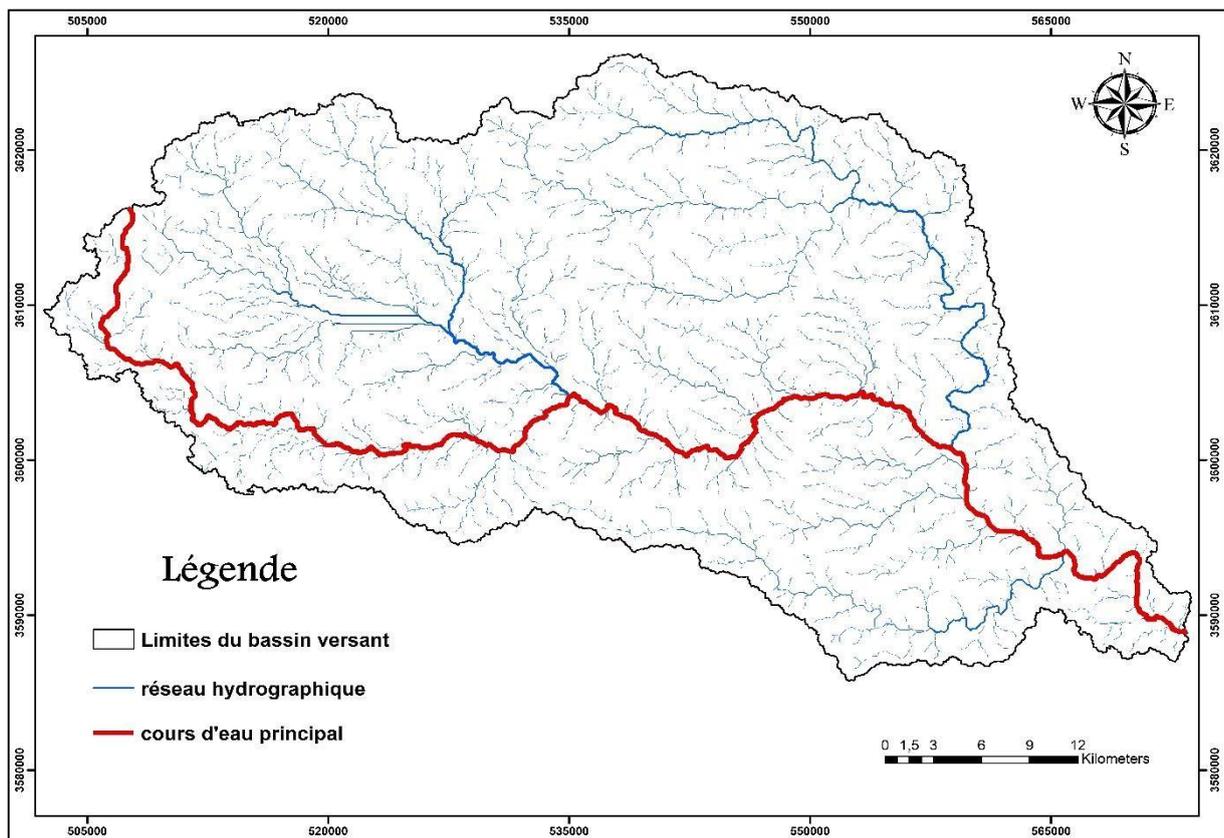


Figure III- 13 : Cours d'eau principal du bassin versant de l'Oued M'Zab

III.3.5.7 Détermination du profil en long du cours d'eau principale

Le profil en long est représenté par une coupe longitudinale du cours d'eau suivant l'axe de l'écoulement. Sur un diagramme réduit à une échelle convenable on reporte les points (x_i, h_i) , avec x_i la distance d'un point i à l'exutoire et h_i l'altitude du fond du lit au point i , la pente moyenne du cours d'eau principal est déterminée à partir de son profil en long.

Le traitement cartographique altimétrique permet de tracer ce profil, dont l'extrémité en zone amont est située à l'altitude 739 mètres et en aval à l'altitude 429 mètres. La pente moyenne du thalweg principal est égale à 3.70 %. Le profil en long du thalweg principal et la variation de la pente longitudinale sont représentés dans la figure III-14.

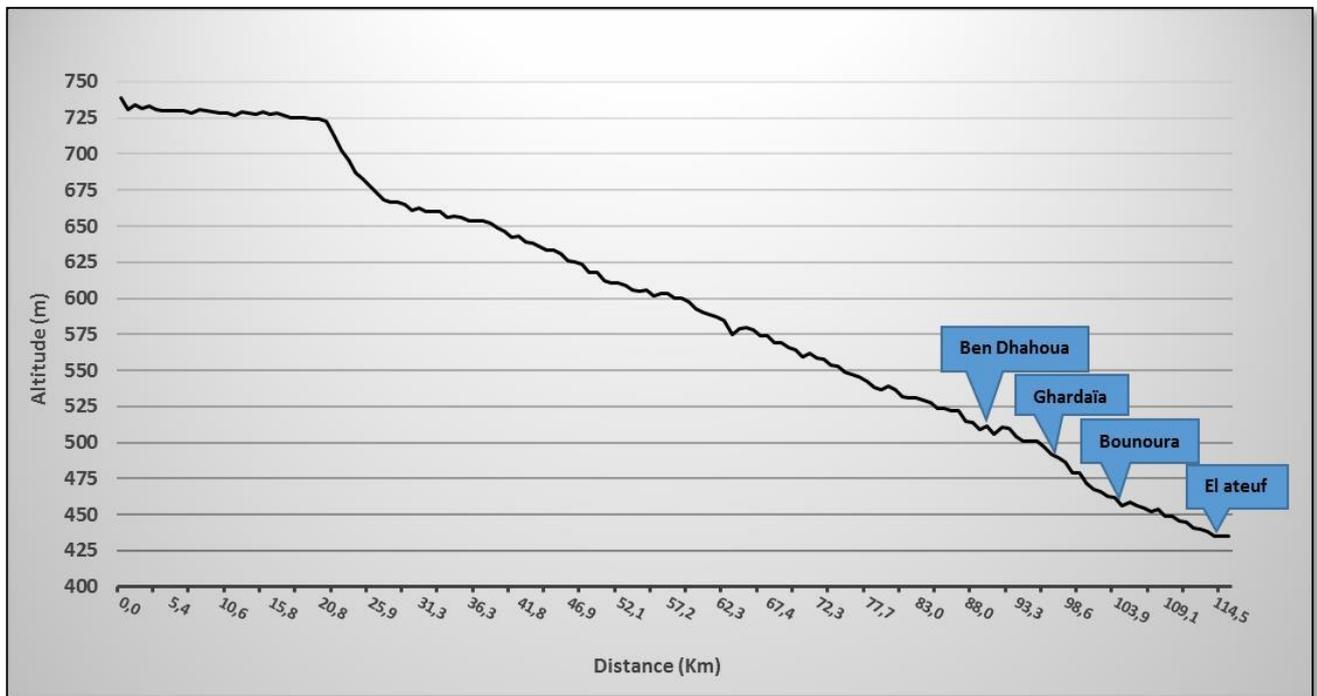


Figure III- 14 : Profil en long du cour-d'eau principale de l'Oued M'Zab

III.3.6 Temps de concentration

Le temps de concentration TC est considéré comme un temps caractéristique de l'écoulement sur un bassin versant donné. Il est défini comme le temps que met une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné en amont du bassin versant pour atteindre l'exutoire.

Pour estimer le temps de concentration de notre bassin, parmi les formules les plus utilisées nous citons :

III.3.6.1 La formule de L'ANRH : (Sogreah 1989)

Cette formule a été développée par Sogreah sur demande de l'ANRH, elle est vérifiée et recommandée pour les petits bassins versants de l'Algérie, s'écrit :

$$T = 3 * \left[\frac{SBV * L_{cp}}{(10 * PBV)^{3/2}} \right] \quad (III-19)$$

Avec :

TC : temps de concentration (H) ;

SBV : La superficie du bassin versant (Km²) ;

Lcp : Longueur du cours d'eau principal (Km) ;

PBV : La pente du bassin versant en (%).

L'application numérique, nous donne un temps de concentration TC= 18.81 heures.

III.3.6.2 La formule de Ventura : 1

$$T_c = 7,62 * \left[\frac{S_{BV}^2}{P_{BV}} \right] \quad (III-20)$$

Avec :

TC : temps de concentration (min) ;

SBV : La superficie du bassin versant (Km²) ;

PBV : La pente du bassin versant en (m/m).

Après l'application numérique nous obtenons $T_c = 36.27$ heures, soit 1 jour et 12 heures et 16 minutes.

III.3.6.3 La formule de Giandotti

$$T_c = 60 * \left[\frac{0,4\sqrt{S_{BV}} + 0,0015 L_{cp}}{0,8\sqrt{P_{BV}} * L_{cp}} \right] \quad (III-21)$$

Avec :

TC : temps de concentration (min) ;

SBV : Superficie du bassin (Ha) ;

Lcp : Longueur du thalweg principal (m) ;

PBV : La pente du bassin versant de l'Oued M'Zab (m/m).

Après l'application numérique nous obtenons $T_c = 07.52$ heures.

III.3.6.4 La formule de la California Highways and Public Works

$$T_c = 0,95 * \left[\frac{(L_{cp})^{\frac{3}{5}} * 0,38}{D_H} \right] \quad (III-22)$$

Avec :

TC : temps de concentration (h) ;

Lcp : Longueur du thalweg principal (km) ;

DH : La dénivelée du bassin versant de l'Oued M'Zab (m).

L'application numérique, nous donne pour le bassin versant de l'Oued M'Zab un temps de concentration TC= 24.07 heures, soit 1 jour.

Tableau III- 10 : Estimation du temps de concentration (Tc, heures)

Les Formules	Temps de concentration (heurs)
La formule de L'ANRH	18.81
La formule de VENTURA	36.27
La formule de Giandotti	07.52
La formule de California Highways	24.07

Le tableau ci-dessus donne les différentes valeurs des temps de concentration Tc pour notre bassin versant. Les formules retenues sont celle de l'ANRH, et California Highways car elles donnent des résultats très rapprochées.

Comme temps de concentration du bassin versant de l'Oued M'Zab, on va prendre en considération la valeur moyenne, donc Tc = 21.44 heures. Ce choix nous a parus plus logique, car les distance des parcours des eaux sont très éloignées.

III.3.7 Vitesse d'écoulement de l'eau

Elle est donnée par l'expression suivante :

VC : Vitesse d'écoulement de l'eau (m/s) ;

TC : temps de concentration (sec) ;

Lcp : Longueur du thalweg principal (m).

Après l'application, nous obtenons une vitesse d'écoulement de l'eau dans le bassin versant de l'Oued M'Zab VC=1.49 m/s.

Le tableau III-11 récapitule les paramètres morphométriques et géométriques obtenus du bassin versant de l'Oued M'Zab.

$$V_c = \frac{L_{cp}}{T_c} \tag{III-23}$$

Avec :

Tableau III- 11 : Les paramètres morphométriques et géométriques du bassin versant de l'Oued M'Zab

Caractéristiques géométriques du bassin versant		
Surface du bassin	S	3018.033 km ²
Périmètre du bassin	P	336.36 km
La plus grande longueur du bassin	L_{max}	33.17 km
La plus grande largeur	l_{max}	15.86 km
Distance Exutoire-Centre de gravité	D_g	55.33 km
Longueur du plus long thalweg	L_t	115.28 km
Centre de gravité du bassin	C_g	x= 538590.648 m ; y= 3606975.082 m
Longueur du rectangle équivalent	L_r	147.26 km
Largeur du rectangle équivalent	L_r	20.49 km
Coefficient de compacité de Gravelius	K_c	1.71
Caractéristiques du chevelu hydrographique du bassin versant		
Nombre d'ordre des thalwegs		7
Nombre total des thalwegs		6660
Longueur totale des thalwegs	L	4155.31 km
Rapport de confluence	R_c	4.28
Rapport de longueur moyenne	R_L	2.64
Densité des thalwegs élémentaires	F₁	1.72 thalw/km ²
Densité de drainage	D_d	1.38 km ⁻¹
Coefficient de torrentialité	C_t	2.37
Temps de concentration	T_c	21.44 H
Vitesse d'écoulement de l'eau	V_c	1.49 m/s
Caractéristiques de relief du bassin versant		
Indice de pente de Roche	I_p	14.41
Indice de pente moyenne	I_m	0.235 %
Indice de pente globale	I_G	0.153 %
Dénivelée spécifique	D_s	84.3 m

Dénivelée utile	Du	226 m
Altitude de fréquence du bassin	H50 %	645 m
Altitude maximale du bassin	H_{max}	775 m
Altitude minimale du bassin	H _{min}	429 m
Altitude moyenne du bassin (formule)	H_{moy}	639.3 m
Altitude moyenne du bassin (MNT)	H _{moy}	649.3 m

III.4 Conclusion

L'étude hydro-morphométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab nous a permis de déterminer les différents indices et paramètres qui définissent notre Bassin Versant. Il présente une superficie totale de 3018.033 km² et un périmètre de 336.36 km, s'identifie par un relief composé d'un plateau marqué par des vallées (la vallée de l'Oued M'Zab). Le coefficient de compacité $KC = 1.71$ qui traduit l'allongement du bassin versant. Selon l'indice de pente globale, le bassin versant est caractérisé par un relief de pente élevée vers les hautes altitudes est faibles au niveau de la vallée. La topographie est marquée par une altitude maximale de 775 m et une altitude minimale de 429 m et une pente moyenne du cours d'eau principal égale à 3.70 %, ce qui génère des ruissellements en nappes. Sa torrencialité est liée à la densité du chevelu hydrographique, avec un temps de concentration long lié à l'étendu du Bassin Versant.

Conclusion générale

Dans l'intérêt de l'élaboration de notre modeste contribution à l'étude des impacts d'aménagements sur le risque d'inondation dans la wilaya de Ghardaïa (Oued Mzab) et dans le cadre de la préparation de notre projet de fin d'étude, nous avons voulu montrer que pour tout projet performant les études bien élaborées constituent les conditions essentielles adéquates des ouvrages projetés.

Le phénomène des inondations constitue un risque majeur vu l'ampleur des dégâts matériels et aussi humains engendrés, sa définition demande une compréhension de la définition d'aléa, la vulnérabilité et le risque ; la typologie, l'évaluation, les mesures de gestion et caractérisation des risques d'inondations. L'Algérie a connu plusieurs inondations particulièrement la ville de Ghardaïa qui possède un réseau hydrographique dense et qui détient à son historique un nombre assez important, ce qu'on projette à concrétiser dans notre étude est de voir l'apport des différentes options d'aménagement pour minimiser le risque par l'application de l'approche de modélisation hydraulique en validant nos premiers résultats par l'approche historique.

L'évolution démographique des habitations de la ville de Ghardaïa est traduite par une extension urbaine accrue très rapide et non étudiée qui touche toute la longueur de la vallée de l'Oued M'Zab, et qui sert vraiment le lit de l'Oued ce qui permet d'aggraver le risque d'inondation. Le climat de la région de Ghardaïa est typiquement Saharien, caractérisé par deux saisons : une saison chaude et sèche (du mois d'avril au mois de septembre) et une autre tempérée (du mois d'octobre au mois de mars), on constate qu'il y a une grande différence entre les températures de l'été et de l'hiver, avec une moyenne annuelle de 22.2°C, l'évaporation est d'ordre de 3110 mm par an et une faible hauteur de pluies avec une moyenne d'ordre de 77.72mm/an.

L'étude hydro-morphométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab nous a permis de déterminer les différents indices et paramètres qui définissent notre Bassin Versant. Il présente une superficie totale de 3018.033 km² et un périmètre de 336.36 km, s'identifie par un relief composé d'un plateau marqué par des vallées (la vallée de l'Oued M'Zab). Le coefficient de compacité $KC = 1.71$ qui traduit l'allongement du bassin versant. Selon l'indice de pente globale, le bassin versant est caractérisé par un relief de pente élevée vers les hautes altitudes est faibles au niveau de la vallée. La topographie est marquée par une altitude maximale de 775 m et une altitude minimale de 429 m et une pente moyenne du cours d'eau principal égale à 3.70 %, ce qui génère des ruissellements en nappes. Sa torrencialité est liée à la densité du chevelu hydrographique, avec un temps de concentration long lié à l'étendu du Bassin Versant.

On doit signaler que cette étude, ne présente pas une solution définitive aux Problèmes des inondations dans la ville de Ghardaïa. Il s'agit d'une étude qui nous a permis aussi de fournir des éléments d'aide à la décision.

Enfin ce travail nous a aidés à améliorer nos connaissances sur le risque d'inondation d'une façon plus détaillée.

OUVRAGE :

- AMBROISE B :** « La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus », facteurs, modèles, Bucarest, Ed. H.G.A., 200 P, 1999.
- BACHELARD :** « Les valeurs épistémiques de l'imagination », Cit., p. 79. P 29,1979.
- BRAVARD J.P. et F. PETIT :** «Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial», Armand Colin, Paris, 213 p, 1997.
- BATES ET DE ROO:** «A simple raster-based model for flood inundation simulation». Journal of Hydrology 236 (54–77), 2000.
- CONRAD J. GAISER:** « method of conditioning fabrics », 6009 Seaside Walk, Long Beach, Calif. 90803, Filed Aug. 13, 1965, Ser. No. 479, 590, Int. C. B44d 1/46, Mai 6, 1969.
- DUBIEF J :** «Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara», GGA, Direction du Service de la Colonisation et de l'Hydraulique, Service des Etudes Scientifiques, Alger, 457 p, 1953.
- ERVINE, D.A:** «Modelling a river channel with distant flood banks. Proceedings of the Institution of Civil Engineers», Water Maritime and Energy 136, 21–33, MacCleod, 1999.
- GILARD O:** The «INONDABILITE» method, Sistema Terra, Year IV issue 3, 61-64, 1995.
- GILARD O. et al :** « Guide pratique de la méthode Inondabilité », coll. des cahiers Techniques Inter-Agences, Etude Inter- Agences n° 60, 1998.
- GILARD.O, N. GENDREAU,** « Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable Du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants », 429 – 444. Revue des sciences de l'eau, 3 (1998),
- HINGRAY :** «inondation urbaines dans les P.E.D : un indicateur géométrique Caractéristique du comportement hydrodynamique du bati.Rev» .SCI. Eau, Soumis, 16P, 1999.
- HERVOUET J-M, VAN HAREN L:** « Recent advances in numerical methods for fluid Flows. In Floodplain Processes, Anderson MG, Walling DE, Bates PD (Eds). Wiley : Chichester » ; 183–214, 1996.
- Hubert G et Ledoux B :** «Le cout du risque. L'élévation des impacts socio-économiques Des inondations. Presses de l'école Nationale des ponts de chaussées» 232 p, 1999.
- LAHLAHS :** «Les inondations en Algérie », Actes des journées techniques, Batna, 2004.

-**MEDEJERAB, A** : (2009). «Les inondations catastrophiques du mois d'octobre 2008 à Ghardaïa»- Algérie. Geographia, Technica. Numéro spécial, p 311 – 319,2009.

-**(OSS) OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL** : «Système Aquifère Du Sahara Septentrional, Gestion Commune D'un Bassin Transfrontière étude sur les réseaux D'observation du sass», juin 2003.

-**ROCHE** : « Hydrologie De Surface, Office De La Recherche Scientifique Et Technique Outre-Mer» - (Paris), Gauthier - Villars Éditeur – Paris ,1963

-**TORTEROTOT J.P** :«Le coût des dommages dû aux inondations : estimation et Analyse des incertitudes, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 361 p+ Annexes, 1993.

- **P. A. WHIGHAM* AND W. J. YOUNG**: « Modelling River and Floodplain Interactions for Ecological Response, CSIRC Land and Water, P.O. Box 1666 Canberra, A.C.T. 2601, Australia. Mathematical and Computer Modelling 88, 2001.

Autres documents et sites :

-**ANRH** : Archives de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
Archives de la Protection Civile de la ville de Ghardaïa, 2009.

-**CETMEF** : Guide enrochements : l'utilisation des enrochements dans les ouvrages Hydrauliques – version française du Rock Manual- 2ème édition, 2009.

<http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/guide-enrochement-a130.html>.

-**HARDY ET AL**: «Strategy, Discourse and Practice: The Intensification of Power. JOURNAL OF MANAGEMENT STUDIES, 51 (2), pp.320-348, 2000.

<https://doi.org/10.1111/joms.12005>

-**Protection civile**, 2009 : <http://www.protectioncivile.dz>.

-<http://www.risques-meteo.ac-versailles.fr/Bassin-versant>

-<http://www.asal.dz/>

<http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-oussillon/risques/zi/aude/methodologie.htm>

- www.cred.be.

TABLE DES MATIERES

Titre	N° de page
Remerciements	2
Dédicace	3
Les abréviations	5
Sommaire	6
Résumé	7
Introduction générale	8
Chapitre1 : Description du Phénomène d’Inondation et Problématique des Crues en Algérie	
Introduction	11
I.2 Définition et genèse du phénomène d’inondation	11
I.3 La vallée fluviale	11
I.3.1 Le lit mineur	12
I.3.2 Le lit majeur	12
I.3.3 Le lit moyen	12
I.4 L’aléa et la vulnérabilité des risques des inondations	12
I.5 Typologie des risques d’inondation	13
I.5.1 Le risque d’origine pluvial	13
I.5.2 Le risque fluvial	14
I.5.3 Le risque torrentiel	14
I.6 Évaluation du risque d’inondation	14
I.7 Mesures de gestion du risque d’inondation	15
I.8 Caractérisation de risque d’inondation	16
I.8.1 L’approche historique	16
I.8.1.1 Les limnigrammes	16
I.8.1.2 Les "laisses" de crues	17
I.8.1.3 Les témoignages	17
I.8.2 L'approche hydrogéomorphologique	17
I.8.2.1 Informations requises	18
I.8.2.2 Résultats	19
I.8.3 L’approche par modélisation hydraulique	20
I.8.3.1 Performance d’un modèle hydraulique	20
I.8.3.2 Typologie des modèles utilisés en hydraulique fluviale	21
□ Les modèles bidimensionnels	21
□ Discrétisation spatiale et schémas de résolution	21
□ Les modèles monodimensionnels	22
□ Discrétisation spatiale et schémas de résolution	23
□ Les modèles hybrides	23
□ Hypothèses	25

I.9	Intérêts et limites de ces approches	25
I.9.2	Approche hydrogéomorphologique	25
I.9.3	Approche par modélisation hydraulique	26
I.10	Les inondations en Algérie	28
I.10.1	Perturbations météorologiques (origine et mécanisme de formation)	28
I.10.2	Causes et types des crues catastrophiques en Algérie	28
I.10.3	Quelques cas d'inondations catastrophiques en Algérie	30
I.11	Les inondations dans la ville de Ghardaïa « Oued M'Zab » de 1951 à 1991	32
I.11.1	Analyse de l'événement pluvieux du 1 et 2 octobre 2008 à Ghardaïa	33
I.11.2	Etude synoptique	34
I.11.3	Les impacts immédiats des inondations du 1 ^{er} octobre 2008	36
	Conclusion	38
Chapitre 2 : Description des Eléments du Milieu Physique de la Vallée du M'Zab		
II.1	Introduction	39
II.2	Situation géographique de la vallée de l'Oued M'Zab	39
II.3	Démographie	40
II.3.1	Evolution de la population de la Wilaya de Ghardaïa (1966-2008)	41
II.3.2	Evolution de la population de l'agglomération de Ghardaïa (1966-2008)	41
II.4	Extension urbaine	42
II.4.1	Le Lit de l'Oued M'Zab	44
II.5	Contexte socio-économique	45
II.6	Conditions climatiques de la région	46
II.6.1	Précipitations	46
II.6.1.1	Précipitations moyenne annuelles	47
II.6.1.2	Précipitations moyenne mensuelles	48
II.6.2	Température	48
II.6.2.1	Température moyenne annuelle	48
II.6.2.2	Température moyenne mensuelle	49
II.6.2.3	Température extrême	49
II.6.2.4	Amplitude thermique	50
II.6.2.5	Diagramme Ombrothermique de Gaussen	51
II.6.3	Humidité relative	52
II.6.4	Régime de vent et le sirocco	53
II.6.5	Evaporation	53
II.7	Contexte géologique de la région	54
II.7.1	Cadre géologique de la plate-forme saharienne	54
II.7.2	Cadre géologique de la dorsale de l'Oued M'Zab	54
	Conclusion	57
Chapitre 3 : Environnement physiographique du bassin versant de l'Oued M Zab		
III.1	Introduction	

III.2	Présentation du bassin versant de l'Oued M'Zab	58
III.3	Caractéristiques de bassin versant	59
III.3.1	Les caractéristiques géométriques	59
III.3.2	Les caractéristiques morpho métriques	60
III.3.2.1	Coefficient de compacité Kc de Gravelius (1914)	60
III.3.2.2	Le rectangle équivalent	60
III.3.3	Caractéristiques du relief	61
III.3.3.1	Etude hypsométrique	62
III.3.3.2	Etude de la fréquence altimétrique	63
III.3.3.3	Etude de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude	64
III.3.3.4	Altitude médiane du bassin	65
III.3.3.5	Altitude moyenne du bassin Hmoy	65
III.3.4	Etude des pentes	66
III.3.4.1	Indice de pente de Roche	68
III.3.4.2	Indice de pente moyenne	69
III.3.4.3	Indice de pente globale	69
III.3.4.4	Dénivelée utile	70
III.3.4.5	Dénivelée spécifique	70
III.3.5	Caractéristiques du chevelu hydrographique	71
III.3.5.1	Hierarchisation du chevelu	71
III.3.5.2	Les rapports morphométriques (lois de Horton)	72
a)	Rapport de confluence	72
b)	Rapport de longueur moyenne	74
III.3.5.3	Densité des thalwegs élémentaires	75
III.3.5.4	La densité de drainage	75
III.3.5.5	Coefficient de torrentialité	76
III.3.5.6	Détermination de la longueur du cours d'eau principal	76
III.3.5.7	Détermination du profil en long du cours d'eau principale	76
III.3.6	Temps de concentration	77
III.3.6.1	La formule de L'ANRH : (Sogreah 1989)	77
III.3.6.2	La formule de Ventura	78
III.3.6.3	La formule de Giandotti	78
III.3.6.4	La formule de la California Highways and Public Works	78
III.3.7	Vitesse d'écoulement de l'eau	79
	Conclusion	82
	Conclusion générale	83
	Bibliographie	84
	Table des matières	86
	Liste des figures	89
	Liste des tableaux	91

Liste des figures :

TITRE	N° de Page
Figure I- 1 : Les composants de la vallée fluviale	12
Figure I- 2 : Décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité	13
Figure I- 3 : Les trois modes de gestion du risque d'inondation [Gilard, 1998]	15
Figure I- 4 : Unités hydrogéomorphologiques et niveaux d'exposition à l'aléa associés [METL/MATE, 1996]	17
Figure I- 5 : Exemple de caractérisation hydrogéomorphologique (http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-Roussillon/risques/zi/aude/methodologie.htm)	19
Figure I- 6 : Discrétisation spatiale et schémas de résolution des modèles bidimensionnels	21
Figure I- 7 : Exemple de discrétisation spatiale en sections de calcul	22
Figure I- 8 : Exemple de modélisation à casiers (illustration sur le modèle Loire, HYDRATEC d'après [METL/CETMEF, 1999])	24
Figure I- 9 : Des images du satellite MODIS (25/09 – 02/10/2008)	34
Figure I- 10 : Le niveau d'eau a atteint 10 m dans la palmeraie	36
Figure I- 11 : Des dégâts énormes	36
Figure I- 12 : Un quartier transformé en torrent	36
Figure I- 13 : Des voitures emportées par les eaux	36
Figure II- 1 : Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa	38
Figure II- 2 : Situation géographique de la vallée de l'Oued M'Zab	39
Figure II- 3 : Evolution de la population de la Wilaya de Ghardaïa (1966 – 2008)	40
Figure II- 4 : Populations dans les communes de Ghardaïa, Bounoura, El Atteuf et Daya en 1966	41
Figure II- 5 : Populations dans les communes de Ghardaïa, Bounoura, El Atteuf et Daya en 1977	41
Figure II- 6 : Populations dans les communes de Ghardaïa, Bounoura, El Atteuf et Daya en 1987	42
Figure II- 7 : Populations dans les communes de Ghardaïa, Bounoura, El Atteuf et Daya en 2008	42
Figure II- 8 : Les extensions urbaines de la ville de Ghardaïa sur le lit de l'Oued M'Zab (1959-2007) -centre-ville-	43

Figure II- 9 : Les extensions urbaines de la ville de Ghardaïa sur le lit de l'Oued M'Zab (1959-2007)-quartier El Ghaba-	43
Figure II- 10 : Les extensions urbaines de la ville de Ghardaïa sur le lit de l'Oued M'Zab et l'Oued N'tissa (1959-2007) -Ksar de Beni Isguen-	44
Figure II- 11 : Les lits de l'Oued M' Zab considéré comme un espace public	45
Figure II- 12 : Situation géographique des stations météorologiques	46
Figure II- 13 : Carte des isohyètes [Dubief, 1953]	47
Figure II- 14 : Variation mensuelle moyenne de la hauteur des pluies	48
Figure II- 15 : Variation de la température mensuelle moyenne	49
Figure II- 16 : Variation des températures extrêmes moyennes mensuelles	50
Figure II- 17 : Diagramme Ombrothermique de trois stations	52
Figure II- 18 : L'humidité moyenne mensuelle (station de Ghardaïa)	53
Figure II- 19 : Histogramme D'évaporations moyennes mensuelles	54
Figure II- 20 : Carte géologique du bassin septentrional du Sahara [O.S.S., 2003]	55
Figure II- 21 : Carte géologique de la wilaya de Ghardaïa [Ouled S. A., 2016]	56
Figure III- 1 : MNT en mode GRID du bassin versant de l'Oued M'Zab	58
Figure III- 2 : Description du bassin versant de l'Oued M'Zab	69
Figure III- 3 : Rectangle équivalent du bassin versant de l'Oued M'Zab	61
Figure III- 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab	63
Figure III- 5 : Fréquence altimétrique du bassin versant de l'Oued M'Zab	64
Figure III- 6 : Carte de la répartition des surfaces en fonction de l'altitude du bassin versant de l'Oued M'Zab	64
Figure III- 7 : Histogramme de fréquence des pentes du bassin versant de l'Oued M'Zab	67
Figure III- 8 : Carte des pentes du bassin versant de l'Oued M'Zab	68
Figure III- 9 : Hiérarchisation de réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued M'Zab	72
Figure III- 10 : Nombre des thalwegs en fonction de leur ordre	73
Figure III- 11 : Longueurs des thalwegs en fonction de leur ordre	74
Figure III- 12 : Relation entre la densité de drainage et le débit à l'exutoire [Smith et Stopp, 1979]	75
Figure III- 13 : Cours d'eau principal du bassin versant de l'Oued M'Zab	76
Figure III- 14 : Profil en long de la cour d'eau principale de l'Oued M' Zab	77

Liste des tableaux

TITRE	N° de Page
Tableau I- 1 : Crues observées du 28/12/1984 au 01/01/1985 dans l'Est Algérien [Lahlah, 2004]	30
Tableau I- 2 : Liste des crues de l'Oued M'Zab [Glaridon et al. 2000]	31
Tableau II- 1 : Evolution de la population dans 'agglomération de Ghardaïa (1966-2008)	47
Tableau II- 2 : Précipitations moyennes annuelles (mm)	48
Tableau II- 3 : Précipitations moyennes mensuelles (mm)	48
Tableau II- 4 : Température moyenne mensuelle et annuelle (°c)	49
Tableau II- 6 : Amplitude thermique des trois stations (°C)	51
Tableau II- 7 : Données de diagramme Ombrothermique des trois stations	51
Tableau II- 8 : Humidité moyenne mensuelle et annuelle dans la station de Ghardaïa	52
Tableau II- 9 : Vitesse moyenne du vent à la station de Ghardaïa	53
Tableau II- 10 : L'évaporation moyenne mensuelle de Ghardaïa	54
Tableau III- 1 : Calcul des largeurs des intervalles B.V de l'Oued M'Zab	61
Tableau III- 2 : Répartition altimétrique des surfaces du bassin versant de l'Oued M'Zab	62
Tableau III- 3 : Surface d'altitude par classe du bassin versant de l'Oued M'Zab	65
Tableau III- 4 : Nombre de valeurs d'altitude par classe du bassin versant de l'Oued M'Zab	66
Tableau III- 5 : Calcul de l'indice de Roche	69
Tableau III- 6 : Classifications des reliefs selon l'indice de pente globale (ORSTOM)	70
Tableau III- 7 : Classifications des reliefs selon la dénivelée spécifique (ORSTOM)	71
Tableau III- 8 : Calcul du quotient des nombres des thalwegs	73
Tableau III- 9 : Calcul du rapport des longueurs des thalwegs	74
Tableau III- 10 : Estimation du temps de concentration (Tc, heures)	79
Tableau III- 11 : Les paramètres morphométriques et géométriques du bassin versant de l'Oued M'Zab	80

