

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمار ثلجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT
كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
Mémoire de MASTER

Domaine : **Technologie**
Filière : **Génie Civil**
Option : **Ressources en eau**

PAR : TOUMI SLIMANE & CHERIF MOUSLEM

THEME

**ANALYSE STATISTIQUE DES PLUIES ET SYNTHÈSE
CARTOGRAPHIQUE DES ZONES INONDABLES D'UNE ZONE ARIDE
« Cas de la région de GHARDAIA »**

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

Mr. Chettih M.	Pr.	Président
Mr. Guidoum A.	M.A	Examineur
Mr. Stamboul M.	Pr.	Examineur
Mme. Yamani K.	M.A	Rapporteur
Mr. Sekkoum M.	M.A	Co-rapporteur

Année Universitaire 2014/2015

Remerciement

Je remercie tout d'abord ALLAH , le tout puissant qui nous a fourni l'aide et la confiance pour réaliser ce Travail.

Mes remerciements s'adressent aux membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Mr Chettih M	Pr	Président
Mr Guidoum A	M.A	Examineur
Mr Stamboul M	Pr.	Examineur

Tous nos infinis remerciements à notre encadreur :

- Mme Yamani K.*
- Mr Sekkoum M.*

pour ses aides, ses conseils et ses remarques qui nous ont permis de présenter ce travail dans sa meilleure forme.

*Nous remercions également tous **les enseignants** de l'université de Laghouat qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire.*

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvons ici l'expression de notre profonde gratitude et profonds respects.

Mr. S. Toumi & Mr C. Mouslem

Juin 2015

TABLE DES MATIERES

Introduction Générale	6
CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'INONDATION	8
I.1 RISQUES MAJEURS-INONDATIONS.....	8
I.2 CONNAISSANCE DU RISQUE D'INONDATION	9
I.3 PARAMETRES FONDAMENTAUX D'UN COURS D'EAU.....	11
I.4 LES FACTEURS GENERATEURS DES CRUES.....	14
I.5 INFLUENCE DES FACTEURS NATURELS.....	14
I.6 LES PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISANT D'INONDATION	15
I.7 PROCESSUS CONDUISANT AUX CRUES ET AUX INONDATIONS.....	16
I.8 FACTEURS AGGRAVANTS LE PHENOMENE D'INONDATION.....	16
I.9 LES DEGATS CREES PAR LES INONDATIONS.....	17
I.10 STRATEGIES DE GESTION DES RISQUES D'INONDATIONS	17
I.11 CAUSES DES CRUES CATASTROPHIQUES EN ALGERIE	19
Chapitre II : LA ZONE D'ETUDE DE LA VALLE DE L'OUED M'ZAB -GHARDAIA.....	22
II.1 CADRE GÉOGRAPHIQUE	22
II.1.2. LES VILLES HISTORIQUE DE LA VALLEE DU M'ZAB.....	23
II. 2 LA FORME GEOLOGIQUE GENERAL DE LA REGION.....	24
II.3 - HYDROGÉOLOGIE.....	27
II. 4 LES RESSOURCES EN EAU	29
II.5 VEGETATION ET CULTURE :	30
II.6 LES OASIS DE GHARDAIA	31
II.7 PLAN D'OCCUPATION DE SOL	32
II.8 PRESENTATION DES BASSINS VERSANT DE LA VALLEE DU M'ZAB :	33
II.9 CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES :	37
II.10. PROFIL EN LONG DE L'OUED M'ZAB A GHARDAIA.....	40
II.11 TEMPS CARACTERISTIQUES :	42
II.12 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT CR:.....	44
II.13 ETUDE DES CRUES :	45
II.14 INONDATIONS DU 1 OCTOBRE 2008	49
Chapitre III: ANALYSE STATISTIQUE DES PLUIES.....	53
III.1 CLIMATOLOGIE :	53
III.2 ANALYSE STATISTIQUE DE PLUIE	60
III.3 TEST D'AJUSTEMENT PAR LE LOGICIEL HYDROGNOMON 4	63
III.4 CONSTRUCTION DES COURBES IDF :	65
III.5 HYDROGRAMME DE CRUE:.....	68
III.6 TRANSPORT SOLIDE :	71
III.7 CONCLUSION DE L'ANALYSE STATISTIQUE	72
CHAPITRE IV : MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	74
IV.1. LES MODELES HYDROLOGIQUES	74
IV.2. UTILISATION DES MODELES EN HYDROLOGIE.....	74
IV.3. LA MODELISATION PLUIE-DEBIT.....	74
IV.4 MODELISATION PAR HEC-HMS.....	81
IV.5. SIMULATIONS DU MODELE HEC-HMS :	84
IV.6. RESULTATS DE SIMULATION.....	85
IV.7 DISCUSSION DES RESULTATS DE LA SIMULATION PAR HEC HMS	87

ChapitreV. Modélisation Hydraulique PAR HEC-RAS	89
V.1 MODELISATION HYDRAULIQUE :.....	89
V.2. MODELISATION UNIDIMENSIONNELLE.....	89
V.3. LES DIFFERENTS MODELES HYDRODYNAMIQUES	94
V.3.5. LOGICIEL HEC-RAS.	96
V.4 MODELISATION PAR HEC RAS SU BASSIN VERSANT	99
V.5 . SIMULATION PAR HEC-RAS	103
V.6. AVANTAGES.....	105
V.7 INCONVENIENTS.....	105
V.8 DICUSSION DU RESULTAT HEC RAS.....	106
 CHAPITRE VI : CARTOGRAPHIE DES ZONE INONDABLES.....	108
VI.1 INTRODUCTION.....	108
IV-2 DONNEES UTILISEES	109
■ ARCGIS.....	111
■ HEC-GEORAS	111
VI.4. CARTOGRAPHIE DE LA ZONE INONDEE.....	113
VI.5 DISCUSION DE RESULTAT DE CARTOGRAPHIE.....	115
VI.6 PLAN O.R.S.E.C. INONDATION.....	116
 Conclusion Générale.....	117
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	118
RECOMMANDATION	120

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ce projet consiste à l'analyse statistique des pluies et la modélisation hydrologique et hydraulique du bassin versant de Oued Mzab afin d'établir des cartographies des zones inondables.

La modélisation mathématique est un outil scientifique parmi d'autres. Elle est de plus en plus adopté pour simuler et comprendre les phénomènes hydrologiques et hydrauliques. En outre, les systèmes d'information géographique sont désormais indispensables à la bonne gestion dans ce domaine comme dans d'autres.

Les inondations sont des phénomènes naturels qu'on ne peut contrôler. Elles sont les plus fréquentes, les plus dangereuses et les plus destructrices. L'homme a naturellement peuplé les lits majeurs des oueds et des rivières pour pouvoir utiliser toutes les richesses de celles-ci. Mais les crues peuvent engendrer des inondations qui causent chaque année des dégâts matériels et humains considérables du fait de la présence de plus en plus importante d'activités humaines au bord des rivières. Elles entraînent généralement des dommages économiques considérables. Mais elles sont aussi des sources de vie, car les terres inondables des plaines alluviales et humides, comptent parmi les plus fertiles.

L'Algérie est parmi les pays qui sont affectées par des crues engendrant des inondations dues généralement aux débordements des cours d'eau traversant des villes et des agglomérations. Ces crues dont l'apparition est soudaine, souvent difficilement prévisibles, de temps de montée rapide et de débit spécifique relativement important. Elles sont généralement liées à des épisodes pluvieux intenses et se manifestent sur des bassins de taille modérée. Plusieurs catastrophes provoquées par ces crues ont été recensées en Algérie (*Bab El Oued en novembre 2001, Sidi Bel Abbès en avril 2007, Ghardaïa en octobre 2008, etc.*).

La croissance de la population de la ville de Ghardaïa entraîne une intense urbanisation, Elle est heurtée aux contraintes du relief, en particulier à l'étroitesse de la vallée, l'extension incontrôlée de l'habitat dans la palmeraie ainsi que dans le lit mineur de l'oued. Ce dernier phénomène a gravement modifié les conditions de passage des crues de façon inadmissible les risques de destruction et d'accidents majeurs liés à ces événements. La cartographie des zones inondables est un outil d'aide à la décision dans la gestion de l'urbanisation et l'élaboration de plan **ORSEC**.

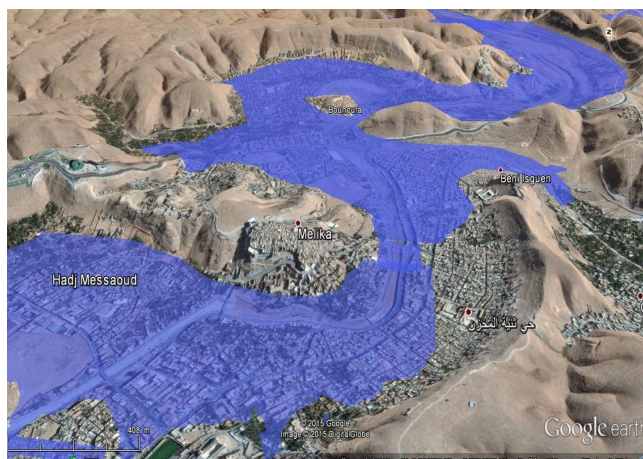
Les enjeux de ce projet sont divers à savoir l'enjeu social qui consiste à assurer le bien être de la population, l'enjeu économique afin de diminuer les dégâts causés par les inondations. Ces dernières étant la conséquence des crues violentes que connaît Oued M'zab et des enjeux environnementaux consistant à diminuer l'impact des inondations sur la faune et la flore.

Ce mémoire de fin d'études est composé des chapitres suivants :

1. Le premier chapitre s'intéresse aux risques d'inondations ;
2. Le deuxième et le troisième chapitre sont consacrés à la présentation de la zone d'étude ;
3. Le quatrième chapitre présente la modélisation hydrologique par HEC-HMS ;
4. Le cinquième chapitre présente la modalisation hydrodynamique par HEC-RAS ;
5. Le sixième chapitre illustre la cartographie des zones inondables de la ville de Ghardaïa.

CHAPITRE I

INONDATIONS



Niveau de la crue > à 6.00 m

CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'INONDATION

I.1 RISQUES MAJEURS-INONDATIONS

Le **risque** est la possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition à un danger. C'est la composante de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté (incident ou accident) et la gravité de ses conséquences.

Les différents types de risques auxquels chaque individu peut être exposé sont regroupés en cinq grandes familles (Merabet, 2008) :

- **Les risques naturels** : avalanches, feux de forêts, **inondations**, mouvements des terrains, cyclones, tempêtes, séismes et éruptions volcaniques.
- **Les risques technologiques** : d'origine anthropique, ils regroupent les risques industriels, nucléaires, biologiques, ruptures des barrages.
- **Les risques de transports collectifs** (personnes, matières dangereuses) sont des risques technologiques. Il s'agit d'un cas particulier car les enjeux varient en fonction de l'endroit où se développe l'accident.
- **Les risques de la vie quotidienne** (accidents domestiques, accidents de la route...etc.).
- **Les risques liés aux conflits**.

Si un de ces risques s'associe au phénomène d'inondation, les conséquences seront encore plus désastreuses.

Seules les trois premières catégories font partie de ce qu'on appelle le risque majeur. Deux critères caractérisent le risque majeur :

- **Une faible fréquence** : L'homme et la société peuvent être d'autant plus enclins à l'ignorer que les catastrophes sont peu fréquentes ;
- **Une énorme gravité** : Nombreuses victimes, dommages importants aux biens et à l'environnement.

La définition du risque majeur, d'après Haroun TAZIEFF «c'est la menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations, la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre » (Merabet, 2008).

L'inondation, qui fait partie des risques les plus répandus, est une submersion d'une zone pouvant être habitée ou non. Elle correspond au débordement des eaux lors d'une crue. **Le débit** d'un cours d'eau en un point donné est la quantité d'eau (m^3) passant en ce point par seconde. **Une crue** correspond à l'augmentation du débit (m^3/s) d'un cours d'eau, dépassant plusieurs fois le débit moyen : elle se traduit par une augmentation de la hauteur d'eau.

I.2 CONNAISSANCE DU RISQUE D'INONDATION

Il y a risque lorsque nous sommes sur une parcelle avec une occupation du sol incompatible avec l'aléa. Le risque étant déterminé par le croisement entre l'aléa et la vulnérabilité, il faut être capable de les comparer. Ceci est possible avec les modèles hydrologiques en débit, durée et fréquence qui permettent de traduire dans la même unité les deux facteurs.

Si la vulnérabilité est plus faible que l'aléa, la parcelle est considérée comme ne présentant pas de risque. Elle est correctement protégée, voire surprotégée. Dans le cas contraire, une parcelle à risque qu'il faudra protéger ou évacuer est à identifier.

L'inondation : Etymologiquement le mot inondation vient du latin: « inundatio » qui signifie submersion. La **crue** correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans la rivière (débit) et peut concerner l'ensemble du lit majeur de la rivière. L'importance de l'inondation dépend de trois paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue.

Ces paramètres sont conditionnés par les précipitations, l'état du **bassin versant** et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur de la vallée, etc.). Ces caractéristiques naturelles peuvent être aggravées par la présence d'activités humaines.

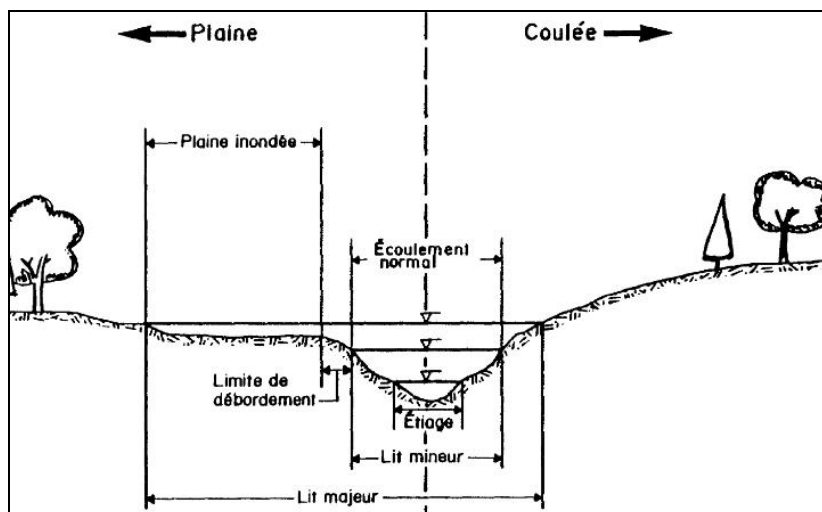


Figure 1 : Niveau de crue au niveau des lits de l'oued

La vulnérabilité : Le fait qu'une rivière cause des dégâts résulte de la plus ou moins grande sensibilité du lieu où se produit le phénomène : c'est la **composante vulnérabilité** (DGPC).

La présence de l'homme, qui s'installe dans l'espace alluvial, pour y implanter toute sortes de constructions, d'équipements et d'activités, joue un double rôle : d'une part elle constitue le risque en exposant des personnes et des biens aux inondations, d'autre part, elle aggrave l'aléa et le risque, en amont comme en aval, en modifiant les conditions d'écoulement de l'eau.

L'Aléa : Une rivière qui déborde traduit un phénomène naturel présentant un caractère aléatoire : c'est la **composante aléa** du risque (DGPC).

Les principaux paramètres nécessaires pour évaluer l'aléa d'inondation sont :

- La période de retour des crues
- la hauteur et la durée de submersion
- la vitesse d'écoulement
- la torrentialité du cours d'eau.

La possibilité d'apparition d'une crue dépend de nombreux paramètres, autres que la quantité de pluie tombée : répartition spatiale et temporelle des pluies par rapport au bassin versant, évaporation et consommation d'eau par les plantes, absorption d'eau par le sol, infiltration dans le sous-sol ou ruissellement ... et pour une même quantité précipitée, la crue apparaîtra ou non.

La notion de crue est souvent associée à la notion de période de retour (*crue décennale, centennale, millénaire...*), les débits et l'intensité étant d'autant plus importants que la période de retour est plus longue.

Par ailleurs, les dégâts occasionnés par une inondation dépendent de plusieurs facteurs : la hauteur de submersion, la durée de submersion, les vitesses d'écoulement, le volume de matière solide transporté, l'érosion des berges. (Bensaha, 2009).

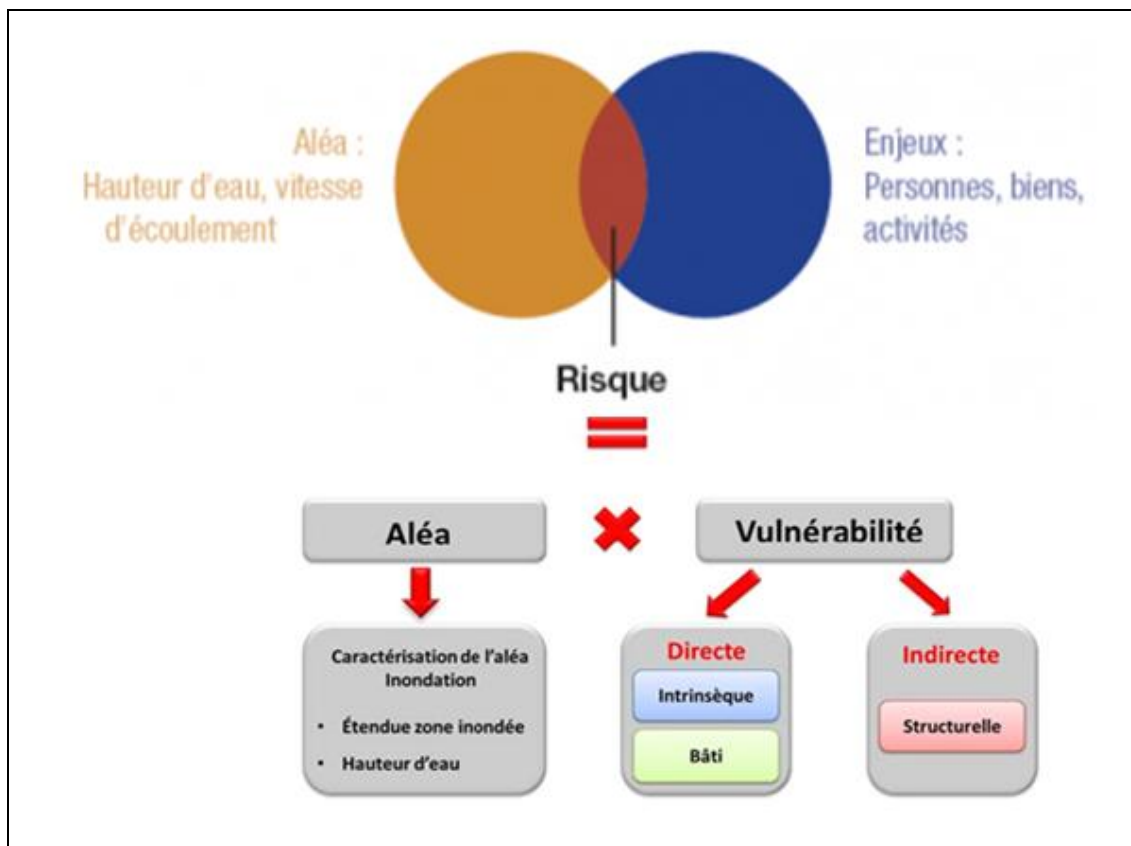


Figure 2 : Caractéristiques de l'aléa et de la vulnérabilité

I.3 PARAMETRES FONDAMENTAUX D'UN COURS D'EAU

I.3.1 Lit d'un cours d'eau

Le lit d'un cours d'eau est, en général, la partie la plus profonde de la vallée dans laquelle s'écoule par gravité un courant d'eau. De manière classique, ce lit de la rivière étant façonné par les eaux qu'il transporte. Ses dimensions sont fortement liées aux régimes hydrologiques. Il faut distinguer le lit mineur limité par des berges, du lit majeur occupé temporairement par les eaux débordantes et le lit moyen qui est entre les deux lits cités (MEDD, 2004).

Tableau I.1 : Critères d'identification des zones à risques

ALEA	DEFINITION	CRITERES D'IDENTIFICATION
Elevé	Zones où les vitesse de l'écoulement et/ou les hauteurs d'eau peuvent être importantes lors des crues exceptionnelles.	-Ces zones correspondent principalement au lit mineur et à ses abords immédiats (berges instables). -fonds des ravines
	Zones où il est envisageable que le talweg principal puisse changer de tracé et/ou évoluer dans son tracé (méandres) .	Le changement de tracé d'un cours d'eau peut se produire lors de débordements importants durant une crue exceptionnelle et/ou par suite d'accumulation ponctuelle importante d'embâcles et/ou d'apports solides
Moyen	Dans ces zones, les vitesses et les hauteurs de submersion pourront être faibles voire moyennes , la durée de submersion étant limitée.	-zones de débordement au niveau du lit majeur lors des crues exceptionnelles -zones de stagnation des eaux pluviales avec hauteur de submersion relativement importante
Modéré	Zones où les vitesse d'écoulement seront faibles voire nulles	-zones de stagnation des eaux pluviales -zones inondées par remontée de nappe
Faible à nul	probabilité d'inondation faible à nulle	-zones hautes -zones en dehors du lit mineur ou majeur d'un cours d'eau -zones éloignées de la bordure littorale

Source : DGPC

- **Lit mineur** : Le lit mineur est constitué par le lit ordinaire du cours d'eau, pour le débit d'étiage ou pour les crues fréquentes (crues annuelles).
- **Lit moyen** : Sous certains climats, notamment méditerranéens, il est possible d'identifier un lit moyen. Pour les crues de période de retour de 1 à 10 ans, l'inondation submerge les terres bordant la rivière et s'étend dans le lit moyen. Il correspond à l'espace fluvial ordinairement sur lequel s'écoulent les crues moyennes.
- **Lit majeur** : Le lit majeur comprend les zones basses situées de part et d'autre du lit mineur, sur une distance qui va de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Sa limite est celle des crues exceptionnelles.

Le lit majeur est occupé par un cours d'eau lors d'une inondation. Il peut-être scindé en deux zones :

- **une zone d'écoulement**, au voisinage du lit mineur, où le courant a une forte vitesse;
- **une zone de stockage des eaux**, où la vitesse est faible. ce stockage est fondamental, car il permet le **laminage** de la crue, c'est-à-dire la réduction du débit et de la vitesse de montée des eaux à l'aval.

La figure suivante représente les lits d'un cours d'eau.

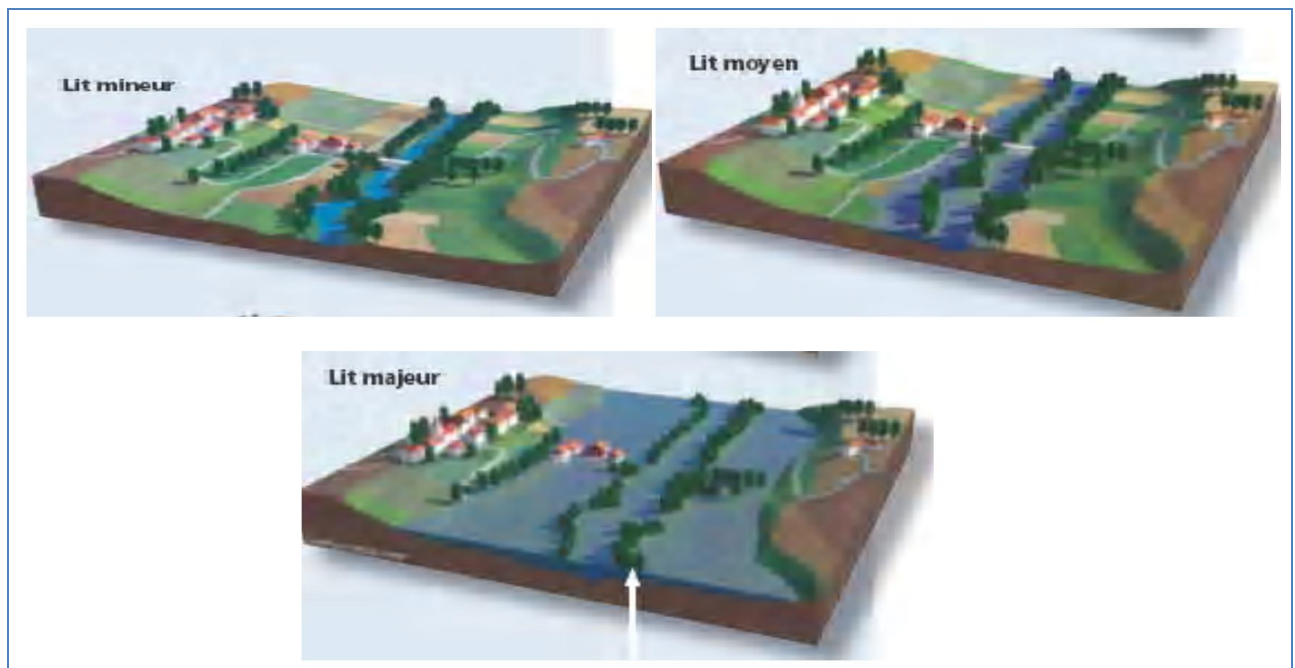


Figure 3 : Lits d'un cours d'eau (MEDD, 2004)

1.3.2 Rive, berge

Rive et berge sont souvent confondues à tort. La berge est le talus incliné qui sépare le lit mineur et le lit majeur. Sa localisation est donc assez précise. La rive est le milieu géographique qui sépare les milieux aquatique et terrestre. Elle démarre au sommet de la berge et constitue une partie plate plus ou moins étendue qui reste sous l'influence du milieu aquatique. (Medjerab, 2009).

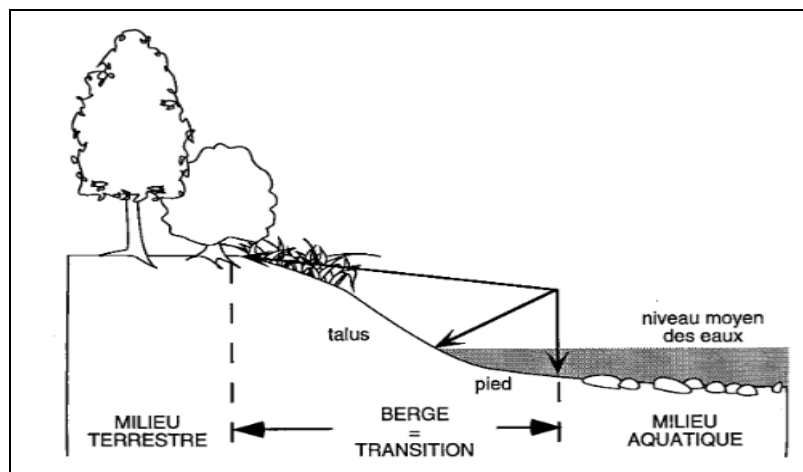
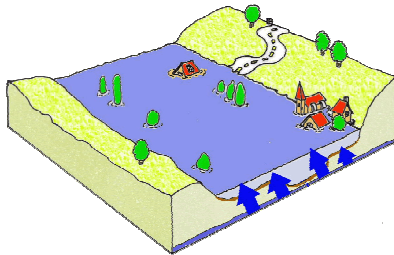


Figure 4 : La berge dans un cours d'eau (Verniers, 1995)

I.4 TYPES D'INONDATION

a) Montée lente des eaux en région de plaine

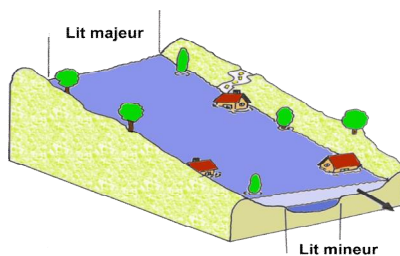
Les inondations de plaine se produisent lorsque la rivière sort lentement de son lit mineur et inonde la plaine pendant une période relativement longue.



- Causée par une saturation des nappes phréatiques.
- Crue et décrue très lentes.

Figure 5 : Les inondations de plaine par la montée de la nappe (DGPC, 2007)

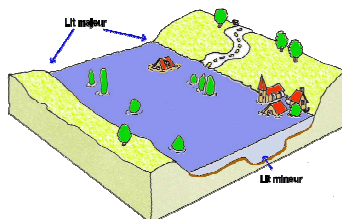
b) La formation rapide de crues torrentielles



- Crue très rapide sur un bassin versant à forte pente.
- Transport de matériaux, embâcles, transformation du lit.

Figure 6 : Les inondations des crues torrentielles (DGPC, 2007)

c) Par stagnation d'eaux pluviales



- Crue lente sur un bassin versant à faible pente.
- Délais d'annonce importants car montée lente et progressive.

Figure 7: Les inondations par stagnation des eaux pluviales (Merabet, 2008)

d) Le ruissellement pluvial en secteur urbain



- Causé par des épisodes orageux violents.
- Sur de petits bassins versants.

Figure 8: Inondations par ruissellement pluvial en secteur urbain (DGPC, 2007)

e) Par submersion de zones littorales (ou lacustres)

f) Par dépressions tropicales et cyclones avec des précipitations pouvant atteindre 2 m par 24h.

g) Par destruction d'ouvrages (*digues, barrages, levées*)

I.4 LES FACTEURS GENERATEURS DES CRUES

I.4.1 Facteurs directs

- **Précipitations**

Les crues sont liées à des averses exceptionnelles (Merabet, 2008).

Le caractère exceptionnel de l'averse est lié à :

- sa durée
 - son intensité
 - sa répartition géographique (par exemple le long d'un cours d'eau)
 - la répétition de plusieurs averses
 - la combinaison de plusieurs des facteurs précédents
-
- **Fonte des neiges**
 - **Crues d'embâcles** (obstruction du lit d'un cours d'eau par un amoncellement de glace) et de **débâcles** (rupture des glaces d'un fleuve gelé) dans les régions subpolaires (Canada, Sibérie)
 - **Accident** : ex : rupture accidentel de barrage "naturel" ou artificiel. Parfois cet accident est lui même lié à un autre phénomène exceptionnel (glissement de terrain, lié à des précipitations importantes, volcanisme, séisme...)

I.4.2 Facteurs indirectes (notamment bassins versant soumis à de "fréquentes crues")

- temps de concentration faible;
- imperméabilisation forte (conséquences d'aménagements urbains ou agricoles);
- avec en parallèle saturation ou sécheresse (faible perméabilité) du sous-sol
- conjonction des crues de deux affluents

I.5 INFLUENCE DES FACTEURS NATURELS

De nombreux paramètres influencent l'apparition d'une crue. Tout d'abord, la quantité et surtout la répartition spatiale et temporelle des pluies, par rapport au bassin versant, sont déterminantes. Il peut s'agir de pluies répétées et prolongées de régime climatique de la région ou d'averses intenses de courte durée, qui touchent de petits bassins versants.

La nature et l'occupation du sol dictent l'évaporation et la consommation d'eau par les plantes. L'absorption d'eau par le sol, l'infiltration dans le sous-sol ou le ruissellement influence fortement le temps de concentration des eaux.

À ces paramètres s'ajoutent des **facteurs naturels aggravants**, comme la fonte des neiges ou la formation et la rupture d'embâcles. Les matériaux flottants transportés par le courant peuvent en effet s'accumuler en amont des passages étroits. La rupture éventuelle de ces embâcles provoque une onde puissante et destructrice en aval. Concernant la fonte des neiges, il est rare en France que des crues importantes soient provoquées uniquement par ce phénomène, même s'il demeure un facteur aggravant.

I.6 LES PRINCIPAUX PARAMETRES CARACTERISANT D'INONDATION

I.6.1 La période de retour de crues

La notion de période (ou temps) de retour est destinée à caractériser la fréquence d'apparition d'un phénomène sont :

- **Les crues fréquentes**, dont la période de retour est comprise entre un et deux ans ;
- **Les crues moyennes**, dont la période de retour est comprise entre dix et vingt ans ;
- **Les crues exceptionnelles**, dont la période de retour est de l'ordre de cent ans ;
- **La crue maximale vraisemblable**, qui occupe l'intégralité du lit majeur.

Un phénomène ayant une période de retour de cent ans (phénomène centennal) a une chance sur cent de se produire ou d'être dépassé chaque année. Cela est vérifié à condition de considérer une très longue période. Mais elle peut aussi, sur de courtes périodes (quelques années, parfois une seule), se répéter plusieurs fois. Autrement dit, en vingt ans, un individu a une chance sur cinq de vivre la crue centennale (*Merabet, 2008*).

I.6.2 La hauteur et la durée de submersion

La hauteur de submersion peut avoir un impact important sur le bâti, notamment lorsqu'elle dépasse la cote de référence. La structure porteuse de l'habitation peut être endommagée et les sols et murs gorgés d'eau.

Lorsque la durée de submersion est importante (supérieure à 24 h voire 48 h), des problèmes sanitaires peuvent survenir.

Pour l'homme, les hauteurs d'eau supérieures à 50 cm sont dangereuses. À titre d'exemple, une voiture commence à flotter à partir de 30 cm d'eau.

I.6.3 La vitesse du courant

La vitesse d'écoulement est conditionnée par la pente du lit et sa rugosité. Elle peut atteindre plusieurs mètres par seconde. L'impact de l'écoulement dépend du couple hauteur / vitesse. À titre d'exemple, à partir de 0,50 m / s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure.(DGPC)

I.6.4 Le volume de matière transportée

Ce volume est communément appelé « **transport solide** ». Il s'agit de matériaux (*argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, etc.*) se trouvant dans les cours d'eau et dont le transport peut s'effectuer soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement sur le fond du lit, du fait des forces liées au courant.

I.7 PROCESSUS CONDUISANT AUX CRUES ET AUX INONDATIONS

Comprendre le processus à l'origine des crues et des inondations suppose d'analyser les différents facteurs concourant à la formation et à l'augmentation temporaire des débits d'un cours d'eau. En simplifiant, on distingue (*Merabet, 2008*):

1.7.1 L'eau mobilisable : fonte des neiges ou de glaces associées ou non à des pluies ; pluies répétées et prolongées de régime océanique, qui affecteront par exemple les grands bassins; averses courtes mais intenses qui toucheront l'ensemble des bassins versants.

1.7.2 Le ruissellement : il correspond à la part de l'eau qui n'a pu s'infiltrer dans le sol. Il dépend de la nature du sol et de son occupation de surface.

1.7.3 Le temps de concentration : il est défini par la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau parvienne jusqu'à l'exutoire.

1.7.4 La propagation de la crue : est fonction de l'axe drainant c'est-à-dire du champ d'écoulement des eaux et du coefficient de la pente.

En relation directe avec la formation et l'augmentation des débits de cours d'eau sont pointés du doigt les facteurs aggravants. En effet, les préoccupations actuelles des spécialistes résultent de l'accroissement des risques.

I.8 FACTEURS AGGRAVANTS LE PHENOMENE D'INONDATION

- **Sur les bassins versants et dans les zones de stockage** : déboisement, modification des écoulements agricoles, suppression des haies, imperméabilisation des sols (routes, parkings...): tout ce qui empêche le laminage de la crue ou la pénétration des eaux dans le sol.

- **Dans les zones d'écoulement** : constructions, obstacles à la circulation des eaux... : tout ce qui contrarie l'écoulement (*DGPC*).

- **L'urbanisation et l'implantation d'activités dans les zones inondables**

- **La diminution des champs d'expansion des crues** : consécutive à l'urbanisation et aggravée par l'édification de digues ou remblais. La conséquence en est une réduction de l'effet naturel d'écèlement des crues bénéfique aux secteurs habités en aval des cours d'eau (*DGPC*).

- **L'aménagement parfois hasardeux des cours d'eau** : sans respecter leur fonctionnement global. Ainsi beaucoup de rivières ont été modifiées localement sans se soucier des conséquences en amont ou en aval. Ces aménagements peuvent avoir pour conséquences préjudiciables l'accélération de crues en aval et l'altération du milieu naturel :

- **La formation et la rupture d'embâcles**

- **La défaillance des dispositifs de protection**

- **L'utilisation ou l'occupation des sols sur les pentes des bassins versants**

- **Le transport et dépôt de produits indésirables**

I.9 LES DEGATS CREES PAR LES INONDATIONS

Les inondations font beaucoup de dégâts qui entraînent de grandes pertes. Il existe principalement trois grandes catégories de dégâts que créent ces inondations :

- les dégâts matériels
- les dégâts humains
- la dégradation du paysage (catégorie moins importante).

I.10 STRATEGIES DE GESTION DES RISQUES D'INONDATIONS

Les stratégies de gestion des risques d'inondations correspondent aux actions qu'il faut mener pour contenir ou réduire le risque, ces actions sont (*Zahour, 2010*):

- la prévention : la connaissance et la sensibilisation aux risques ;
- la protection contre les risques ;
- la préparation ;
- la prévision, la surveillance et l'alerte ;
- l'intervention, le secourisme et la réhabilitation ;
- la Contribution des Organisations Non Gouvernementales et la collaboration internationale.

I.10.1 Prévention : Information, communication et sensibilisation aux risques d'inondations

Il s'agit d'informer le citoyen et les différentes communautés et groupements sociaux sur les causes du risque, ses conséquences et ses impacts à court et à moyen terme et enfin sur les moyens de lutte et les mesures de précaution à prendre pour se défendre contre les agressions de cette catastrophe. La sensibilisation des décideurs à la problématique des risques et leurs impacts sur l'environnement est une action à envisager notamment par les spécialistes de la communauté scientifique.

I.10.2 Préparation

Il s'agit des dispositions à prendre pour maîtriser l'intervention. C'est le cas d'organisation périodiques des exercices de simulation des opérations d'intervention.

I.10.3 Protection contre les risques

Il s'agit d'un ensemble d'activités et des mesures visant à assurer un certain niveau de protection des vies, et des biens individuels ou collectifs.

La protection contre les risques d'inondations exige, un ensemble de mesures et de solutions techniques, entre autres :

- la cartographie des zones à hauts risques et l'identification des zones sensibles et en tenir compte dans les plans d'aménagement urbain (zones potentielles de débordements des eaux de ruissellement sur les voies publiques...). En effet, la géométrie urbaine doit être mieux conçue pour faciliter l'écoulement des eaux ;
- le renforcement de cadre juridique et institutionnel.
- la création de bassins réservoirs, des barrages et des digues pour limiter les débits liquides et capter les débits solides en amont des agglomérations ;
- La lutte contre l'imperméabilité des bassins versants. Cette imperméabilité a pour effet d'accroître les écoulements des eaux et par conséquent d'augmenter les débits reçus en aval. En villes, la création d'espaces verts sont de nature à augmenter l'infiltration des eaux, et à l'opposé, ils réduisent les débits de ruissellements ;
- l'organisation régulière des compagnes de curage et d'entretien des réseaux d'évacuation en milieu urbain.

I.10.4 Prévision, surveillance et alerte du risque

La prévision est la connaissance anticipée de la date et du lieu de la catastrophe. Pour réduire le risque, il faut la mise en place de système de prévision de surveillance et d'alerte. Les systèmes d'alerte actuels reposent sur des instruments de mesure sophistiqués et sur des moyens de communication modernes.

La surveillance est la continuité de l'observation dans l'espace et dans le temps. Les moyens de surveillance sont variés :

- les réseaux sol (postes d'observation et d'alerte tenus par des opérateurs humains et déclenchés par divers moyens de télécommunications).
- les radars et satellites : Ce sont des systèmes assurant l'observation de surfaces très étendues. Le cercle d'acquisition du radar est de l'ordre de 100ème de Km. Alors que celui du satellite dépasse le millier de Km. Les satellites, par exemple, apportent des informations et des indications essentielles pour la prévision météorologique. C'est le cas des prévisions météorologiques qui représente un bon exemple de système de prévision et d'alerte anticipée des risques d'inondations.

I.10.5 Intervention, secourisme et réhabilitation

D'une façon générale, la stratégie opérationnelle de secourisme, d'urgence et de réhabilitation comprend :

- La création d'une cellule de gestion de crise spécifique en cas de désastre pilotée par les hautes autorités compétentes et qui comprend tous les services concernés ;
- la définition du rôle et des responsabilités de chaque intervenant pendant la crise ;
- La création de procédures d'urgence et de secours immédiats (corps médical, sauveteurs spécialistes comme les sapeurs pompiers pour évacuer les blessés graves et les populations menacées et aider à la survie (fournitures de couvertures, eau, relogement même précaire...) ;
- La constitution d'un "fond d'urgence catastrophe" pour répondre aux besoins de la population ;
- en fin lors de la réhabilitation, il faut évaluer les coûts induits par la catastrophe, et mettre en place un système d'assurance pour couvrir les indemnisations des sinistrés.

I.10.6 PROBLEMATIQUE D'INONDATION EN ALGERIE

Plusieurs régions sont soumises aux inondations se manifestant de façon catastrophique et constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social. D'après le recensement effectué par les services de la protection civile, une commune sur trois (485communes) est susceptible d'être inondée en partie ou en totalité. Ces inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus destructrices, provoquant d'importants dégâts humains et matériels (*DGPC*).

L'Algérie septentrionale présente un climat semi-aride qui se caractérise par une forte irrégularité pluviométrique. D'une manière générale, les bassins versants sont imperméables (Kadi, 1997). Ce qui donne sur le plan des régimes hydrologiques:

- une extrême irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements qui est accentuée par de longues périodes de sécheresse;
- des crues violentes et rapides;
- une érosion intense et des transports solides importants.

I.11 CAUSES DES CRUES CATASTROPHIQUES EN ALGERIE

Les précipitations caractérisées, en Algérie, par une très forte irrégularité intra et interannuelle entraînent des étiages extrêmement sévères et inversement des fortes crues torrentielles engendrant des dégâts humains et matériels considérables (DGPC, 2007).

La genèse des fortes **crues** et leurs impacts sur l'environnement sont caractérisés par les différentes activités d'une région à une autre en fonction des conditions géographiques, climatiques et d'occupation des sols. Les causes fondamentales de la majorité des inondations sont l'arrivée d'importantes chutes de pluie mais les inondations des terres basses ou les destructions causées par les crues ne sont pas cependant toutes dues à des phénomènes hydrométéorologiques.

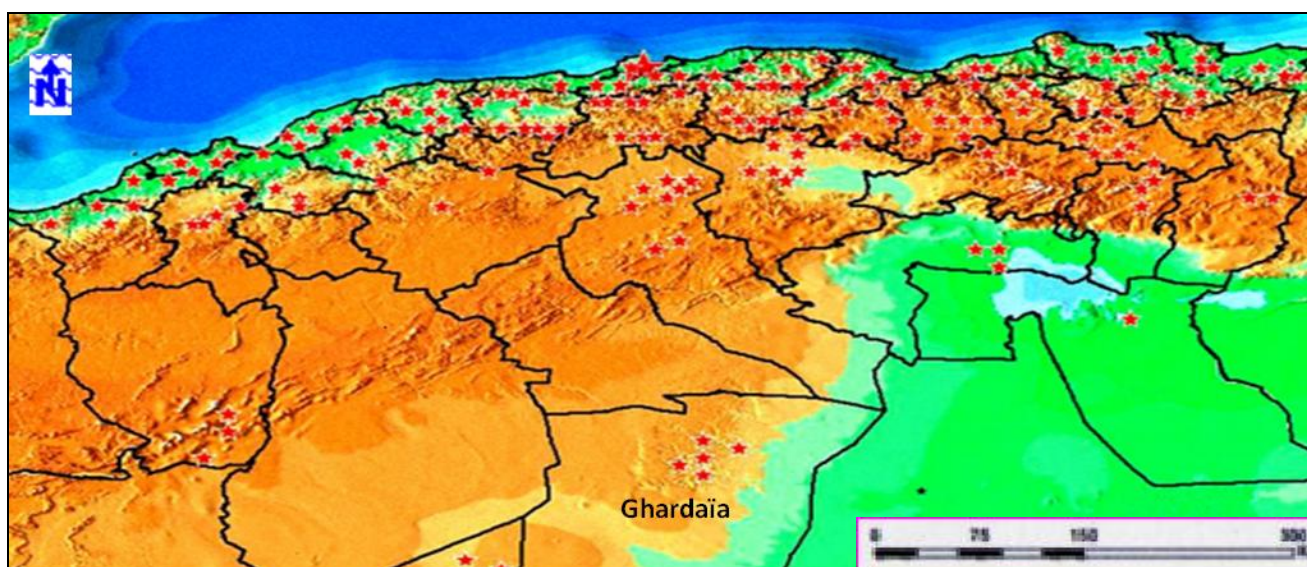


Figure 9 : les Zones touchées par l'inondation en Algérie (DGPC, 2007)

Les inondations liées à des situations météorologiques remarquables se traduisant par une forte pluviosité (*pluies importantes, orages violents*)

Les inondations provoquées par des facteurs liés à l'effet de l'homme: la défaillance des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, le gonflement des oueds par les décombres et les détritiques, sont autant de facteurs qui provoquent des dégâts lors des averses saisonnières. Le cas de la plaine du **M'zab** où des inondations se produisent tous les 02 à 03 ans illustrent parfaitement l'influence de ces facteurs dans l'apparition du phénomène d'inondation. Les inondations produites dans des régions présentant un environnement topographique défavorable comme le cas des villes traversées par des oueds (*Ghardaia, El bayadh, Aflou, Bordj Bou Arréridj, Oued R'hiou, Sidi Bel Abbès*) ou situées au pied d'une montagne (*Ain Defla, Batna, Médéa*). Ces agglomérations à forte concentration de population et sous l'effet d'une urbanisation anarchique et non réglementée présentent de grands risques, des pertes humaines et des destructions de constructions sont enregistrées à chaque inondation aussi légère qu'elle soit, selon les caractéristiques des crues, leurs durées et leurs étendues sont de deux types:

Les inondations engendrées par des crues torrentielles : appelées aussi: crues éclair et affectant les petits bassins versants de quelques dizaines de Km².

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 oueds passent de quelques m³/s à plusieurs milliers de m³/s en 02 ou 03 heures seulement.

Les inondations des grands bassins versants : elles résultent le plus souvent des précipitations importantes généralisées sur des grandes étendues et caractérisées par leurs quantités et leur durée qui peut atteindre 10 à 15 jours. En Algérie, ce type d'inondation survient généralement en saison hivernale entre les mois de décembre et mai.

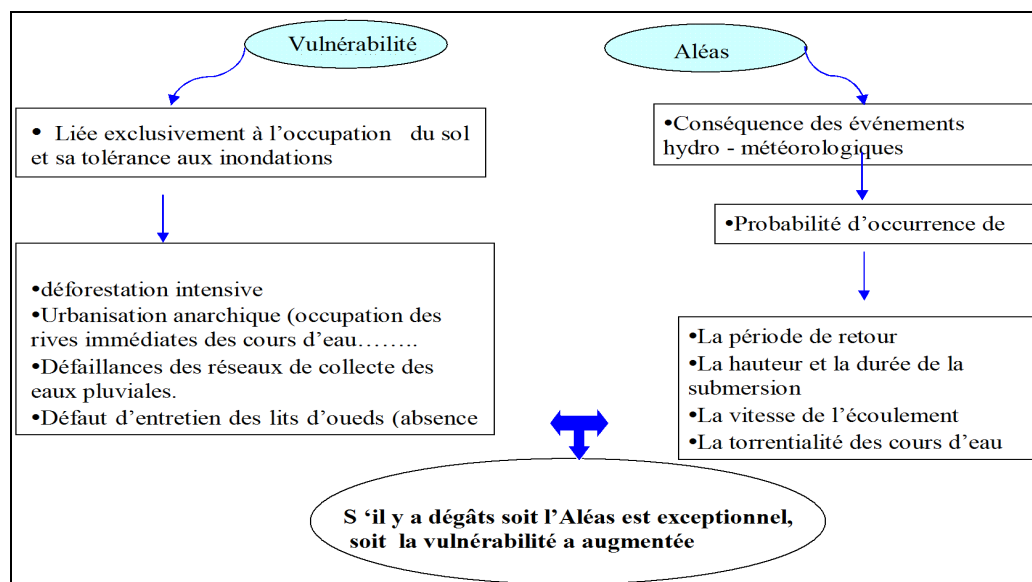


Figure 10: Schématisation de la vulnérabilité et de l'aléa d'inondation en Algérie (DGPC),

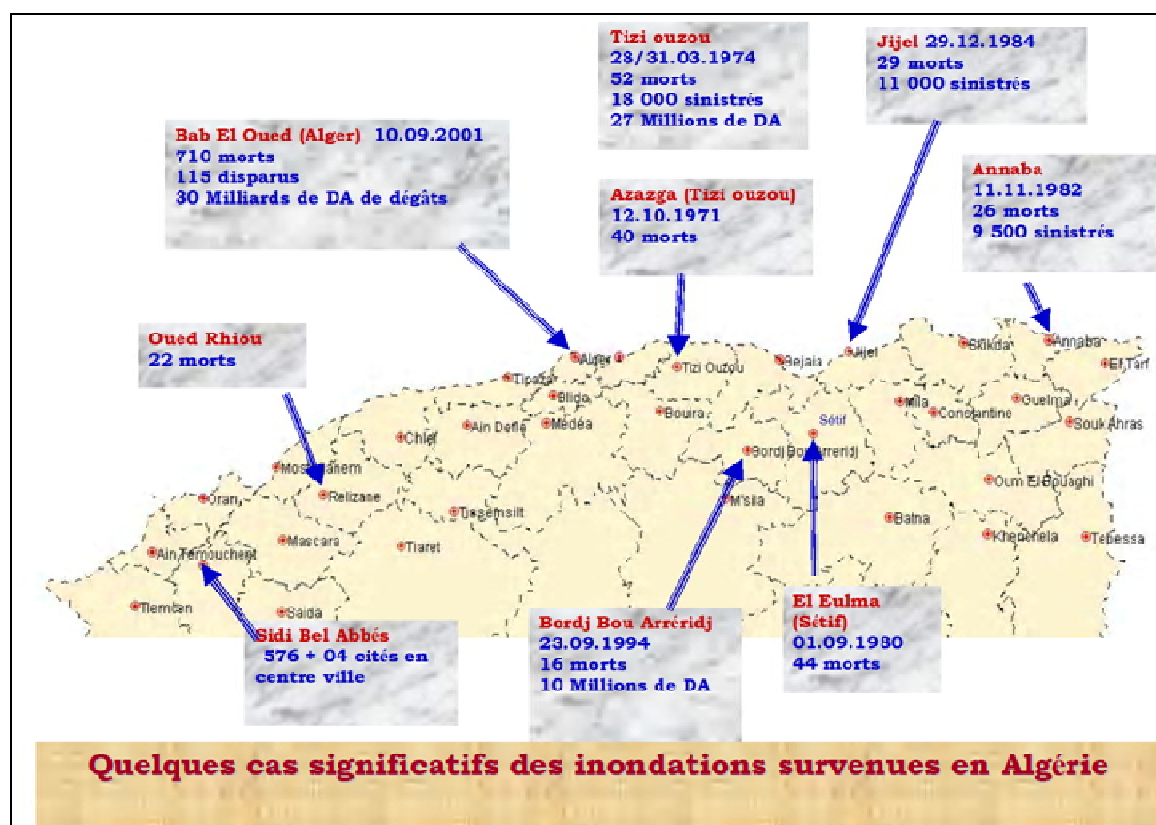
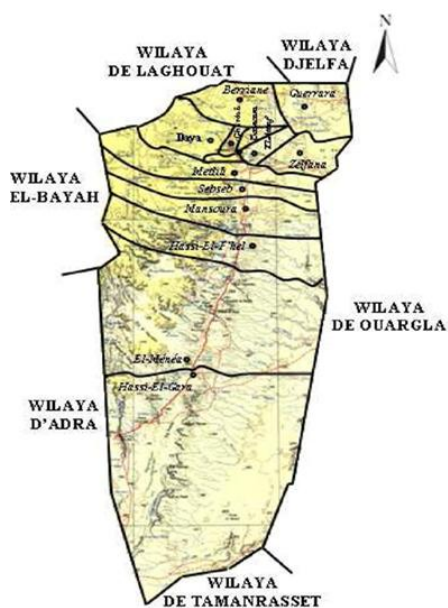


Figure 11 : inondations significatifs survenues en Algérie (DGPC)

CHAPITRE II

LA ZONE D'ETUDE

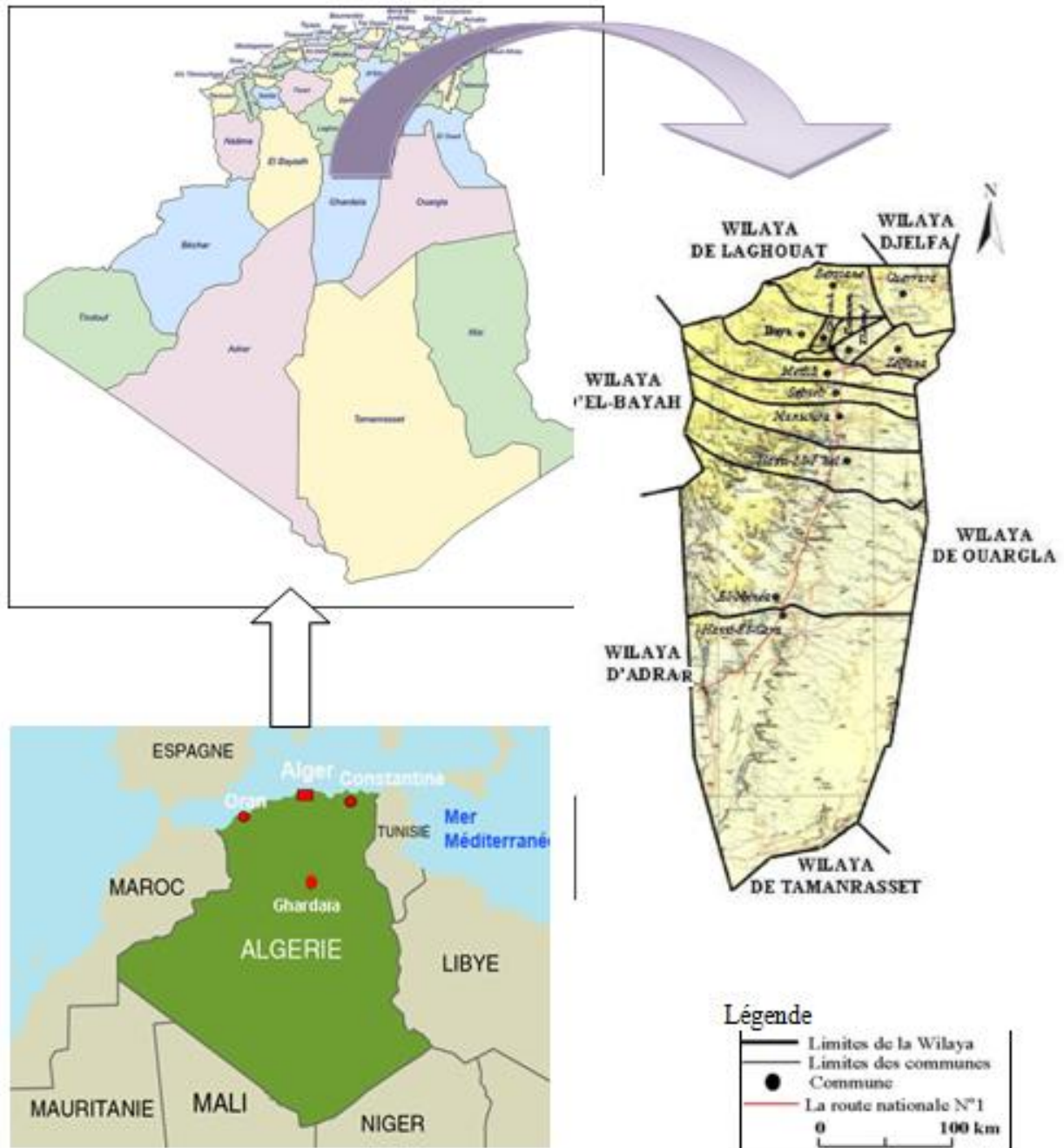
GHARDAIA



CHAPITRE II : LA ZONE D'ETUDE DE LA VALLE DE L'OUED M'ZAB -GHARDAIA

II.1 CADRE GÉOGRAPHIQUE

La région de Ghardaïa est située au centre du Sahara septentrional algérien, à 600 Km au sud de la capitale Algérienne.



La wilaya de Ghardaïa est limitée :

- Au Nord par la wilaya de Laghouat à (200 Km).
- Au Nord Est par la wilaya de Djelfa à (300 Km).
- A l'Est par la wilaya d'Ouargla à (200 Km).
- Au Sud par la wilaya de Tamanrasset à (1.470Km).
- Au Sud- Ouest par la wilaya d'Adrar à (400 Km).
- A l'Ouest par la wilaya d'El-Bayad à (350 Km).

La ville de Ghardaïa, chef lieu de wilaya surnommé ainsi, est située a la tête des cinq cités historiques qui compte la pentapole; « Des villes regroupées en série sur les berges d'une même vallée, qui prend, de part et d'autre de ce groupement, le nom de l'Oued El Biod en amont, et celui de l'Oued M'Zab en aval. »

II.1.2. LES VILLES HISTORIQUE DE LA VALLÉE DU M'ZAB

- **El Atteuf** : C'est la plus ancienne ville du M'Zab; fondée en 1012 sur la rive droite de l'Oued M'Zab à l'extrémité aval de la Pentapole et de manière bien détacher des quatre autres K'seurs.
- **Bounoura** : Fondée en 1046 sur la rive gauche de l'Oued M'Zab, elle est située à 3 km à l'aval de Ghardaïa et elle dépend économiquement comme les autres K'seurs de la Pentapole.
- **Mélika** : Fondée au début du XIème siècle, cette petite cité qui domine la vallée de l'Oued M'Zab et ne possède pas de palmeraie.
- **Béni Izguen** : Fondée en 1347, au confluent de l'Oued N'Tissa et de l'Oued M'Zab, c'est la ville sainte du M'Zab et le foyer intellectuel de l'Ibadisme; sa palmeraie s'étend sur 3 km le long de l'Oued N'Tissa;
- **Ghardaïa** : Fondée en 1048 sur la rive droite de l'Oued M'Zab et à l'amont des quatre autres centres; cette ville est le chef lieu de la wilaya de Ghardaïa et la capitale commerciale du M'Zab.



Figure 2: Situation d'ensemble de la ville de Ghardaïa. « extrait de carte touristique de l'Algérie »

II. 2 LA FORME GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL DE LA RÉGION

La majorité des sols, de la région de Ghardaïa, sont pierreux, la carte suivante montre les différents types du sol de cette région et la forme géologique de la région se compose de:

- Les ergs (massifs de dunes).
- Les Regs, (plaines caillouteuses).

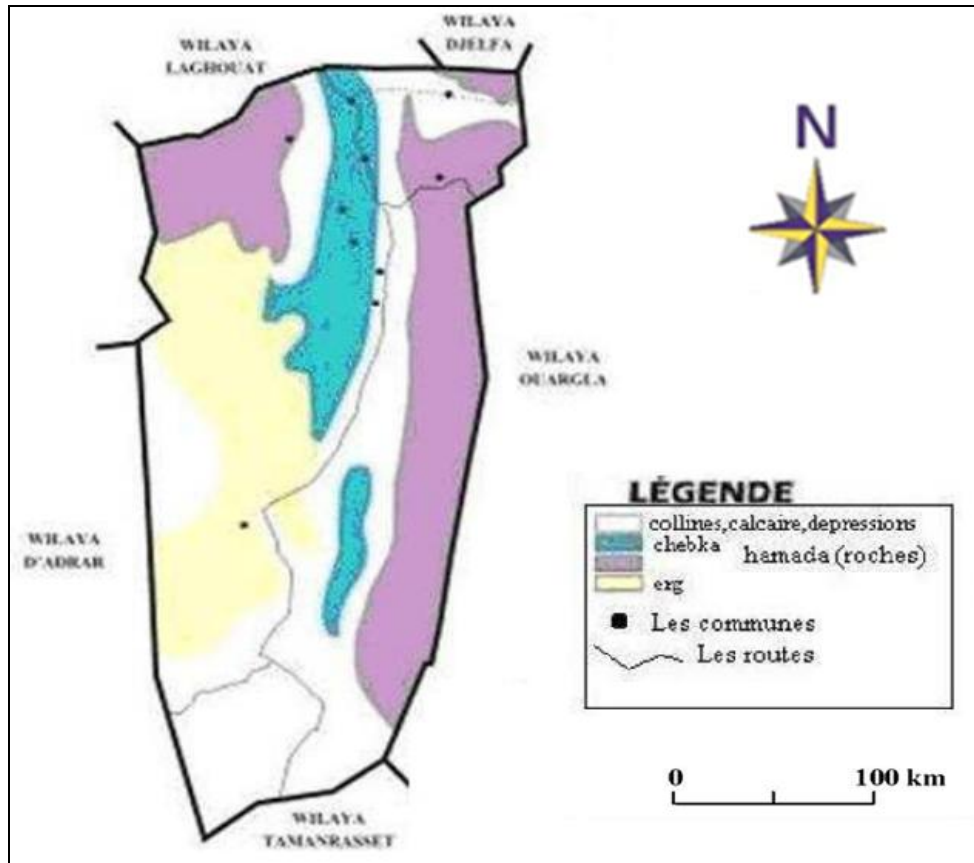


Figure 3 : La structure géologique de Ghardaïa (Atlas de Ghardaïa, 2004)

II.2.1. Le Barrémien :

Caractérisé par des formations détritiques du Crétacé inférieur, ces formations se présentent sous forme de grès fins ou grossiers et d'argiles. Les intercalations carbonatées sont peu nombreuses.

II.2.2. L'Aptien :

Sur 30m en moyenne de dolomie avec d'intercalation d'anhydrite et d'argile, représenté dans la grande partie du Sahara bas, c'est un bon repère lithologique pour les sondages.

II.2.3. Albien :

Représenté généralement par des grès argileux, grès rouges, sables et silt stones argileux constituent un ensemble détritico-azoïque, son épaisseur varie de 280m en Forage de gaz Hr7 (Hassi R'mel) à plus de 400m au niveau des forages DJF et AT à l'est de Ghardaïa.

L'albien constitue le niveau aquifère le plus important du continental intercalaire.

II.2.4. Cénomanien :

Se compose de bas en haut :

- Argiles versicolores silteuses à gréseuses (40m).

- Série gypso-argileux (10m) formant l'imperméable de la nappe phréatique de la chebka du M' Zab.
- Une série d'épaisseur (30m) a dominance carbonatée (surtout dolomitique au niveau de l'Oued El Abiod) renfermant des débris de tests de mollusques.

II-2.5. Turonien :

La série turonienne entièrement carbonatée forme l'ossature de la Chebka de M' Zab et constitue le réservoir aquifère principal, c'est dans sa masse que les oueds ont creusé leurs lits. La base du Turonien, n'est connue que dans la région ouest de la Chebka, du fait du plongement général des couches vers le SE (0,5 degré), son faciès et son épaisseur ont pu être déterminé grâce aux Différents forages de gaz (SONATRACH) effectués dans la région de Ghardaïa - Berriane - Hassi R'Mel de 1956 à 1981.

Le faciès carbonaté dans cette région est constitué, à la base, par des calcaires dolomitiques massifs, au sommet, par des calcaires crayeux blanc, le tout formant d'importantes falaises (D'oued El Abiod) bordures de l'oued El Louha et Tierriane).

MARTEI, en 1955, a observé une dolomitisation progressive des calcaires turoniens du SE vers le NW de la Chebka de M'Zab.

À Ghardaïa, le Turonien a plus de 100 m, le forage de gaz Berriane 1 (50 km au nord de Ghardaïa) le traverse sur 80 m et entre l'Oued El-Abiod et Hassi R'mel, il ne dépasse 45 m.

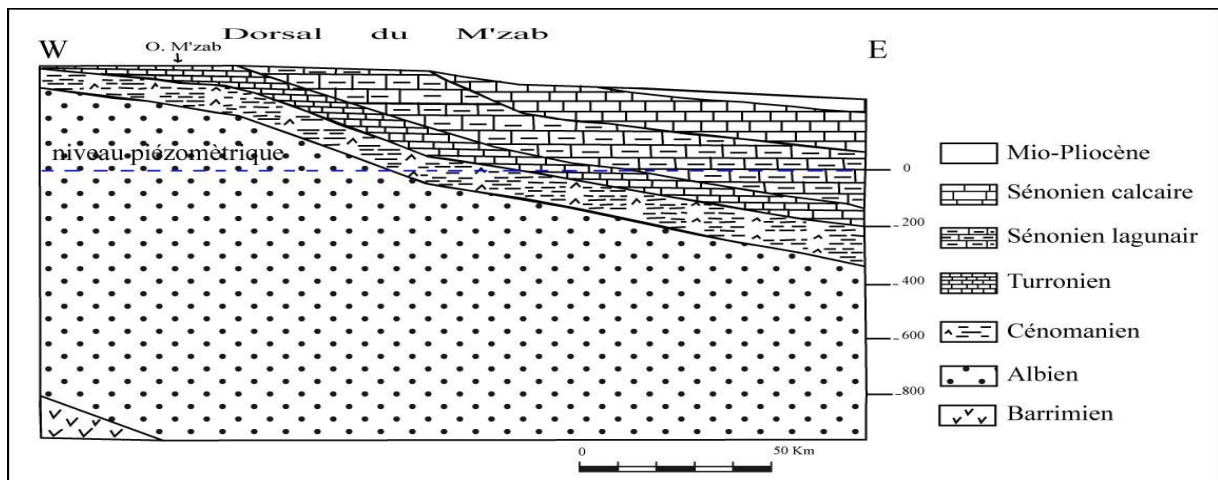


Figure 4 : Coupe géologique du Dorsal de M'zab (ANRH)

II-2.6. Sénonien :

O. TEMPERE en 1955 a distingué trois ensembles dans les environs de Berriane (1^{er} et 2^{ème} ensemble) et de l'oued N'sa à une vingtaine de km de Berriane (3^{ème} ensemble). De bas en haut on a :

1^{er} ensemble : d'épaisseur de 25 à 60m comprenant :

- Une série argileuse plus ou moins riche en évaporites, pouvant atteindre 10m d'épaisseur, elle est discontinue dans la région de Hassi R'mel, et devient continue vers le SE de la chebka (forage de gaz MKA). Elle constitue l'imperméable de la nappe turonienne
- deux corniches de calcaires dolomitiques reformant des oolites, des tests de mollusques, des armélides, et des miliolides.

2^{ème} ensemble : 25m d'épaisseur, dolomies blanches à niveau de silex constitue un ensemble azoïque.

3^{ème} ensemble : 30m d'épaisseur. Une série de calcaires et dolomies silicifiés au sommet à deux microfaciès :

- Calcaire oolithiques à miliolides et ostracodes.
- Calcaire fin à dasyoladacées.

G. Busson interprète une cinquantaine de mètre d'argiles et de calcaires dolomitiques comme l'équivalent du sénonien lagunaire et carbonaté. Quant au comportement hydrogéologique du sénonien

II.2.7.Eocène :

26m d'épaisseur au forage de gaz NL2 au nord de Hassi R'mel ; représenté généralement par des calcaires blancs a silex et a passées d'argilites plastiques azoïques.

II.2.8.Mio-pliocène:

En discordant sur les formations intérieures (Eocène, Sénonien, Turonien). Il est constitué de sable, d'argiles et de niveaux calcaréo-gréseux, son épaisseur est très variable, de quelques mètres a Hassi R'mel a 2000m dans la fosse sud atlasique. Les affleurements du Mio-Pliocène sont localisés aux environs de l'oued N'sa (au NE de Berriane) ainsi qu'au NW de Hassi R'mel.

II-2.9. Plio-Quaternaire (ou bien appelle croute Hamadienne) :

IL à une épaisseur moyenne de 10 à 20m, constitué généralement d'une croute calcaire, Il ne présente pas d'intérêt hydrogéologique.

II-2.10.Quaternaire alluvionnaire :

Composé de sables et d'alluvions d'oued, peut atteindre 40 m d'épaisseur (forage de gaz AF4).Ces alluvions reposent directement sur le Turonien ou même sur les calcaires sommitaux du Cénomanien à l'amont des oueds El-Abiod et Mosk.

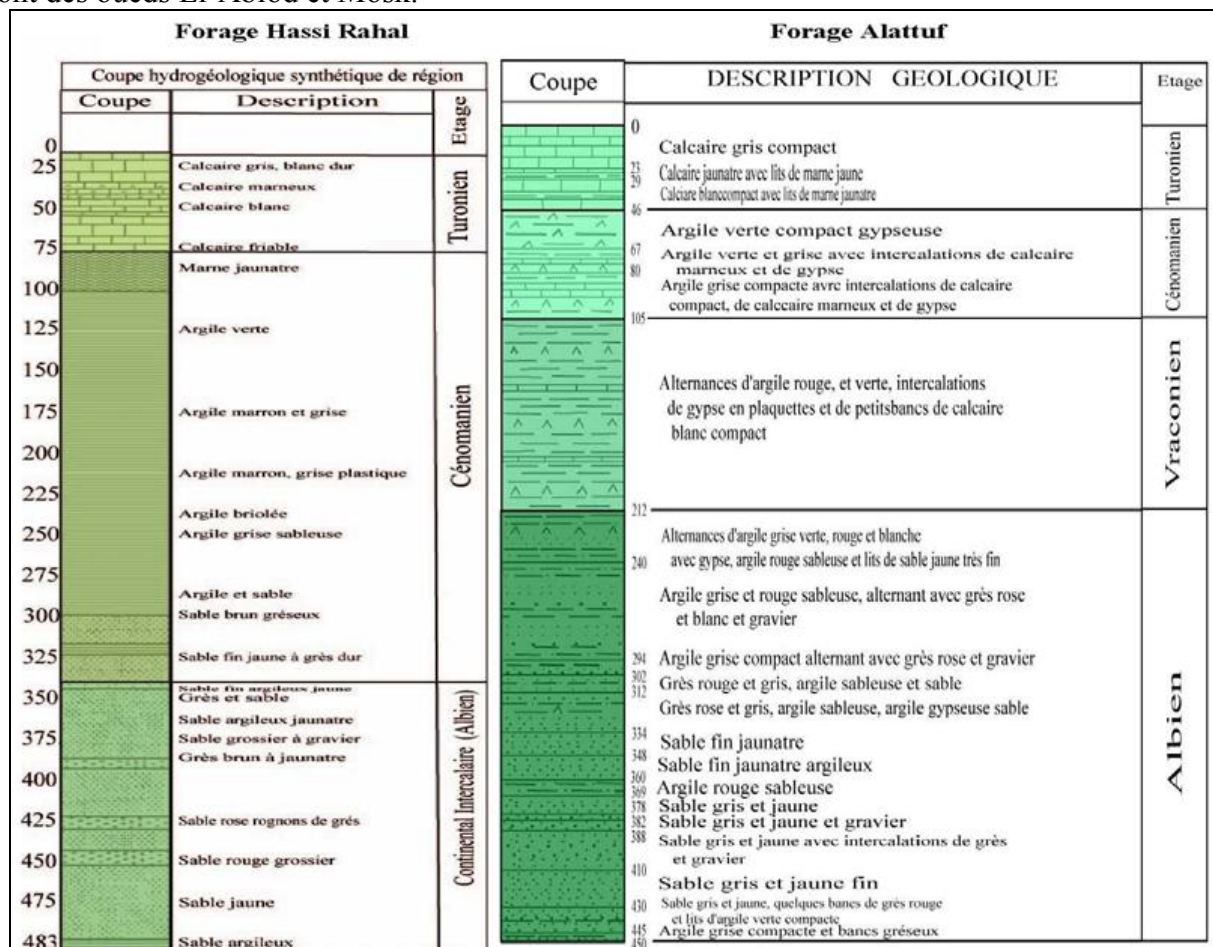


Figure 5 : Coupe lithologique en amont Dayet Ben Dhahoua et en Aval à El Atteuf (ANRH)

II.3 - HYDROGÉOLOGIE

II.3.1 Pluviométrie

Le Sahara, dans l'imaginaire collectif, évoque les étendues désertiques et arides. De fait, la région est peu arrosée et très chaude. Résultat, les faibles précipitations (50 à 100 millimètres en moyenne annuelle) s'évaporent immédiatement. Si l'eau est rare en surface, elle est en revanche présente en profondeur et en quantité.

II.3.2. Identification hydrogéologique

Sur la base des données lithologiques et structurales, nous avons pu ainsi définir les aquifères suivants :

II.3.1. L'aquifère Continental Intercalaire (Albien) :

Le terme « Continental Intercalaire » désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins :

à la base, le cycle du Paléozoïque achève l'orogénèse hercynienne;

au sommet, le cycle du Crétacé supérieur est un résultat de la transgression cénomaniennne.

La nappe du Continental Intercalaire draine, d'une façon générale, les formations gréseuses et grésos-argileuses du barrémien et de l'albien. Elle est exploitée, selon la région, à une profondeur allant de 250 à 1000m localement, l'écoulement des eaux se fait d'ouest en est.

De par, son extension (*de la Saoura à la plaine de Ghadamès en Libye et de la flexure sud atlasique au plateau de Tademaït au Sud*) est la plus importante du Sahara.

II.3.2.2. L'aquifère du Turonien :

Le réservoir carbonaté, en raison de la complexité de son organisation fissurale, est sans conteste, cette aquifère présente les plus grandes difficultés d'étude.

L'existence d'eaux souterraines dans la région du Mzab s'explique par la présence d'assises marneuses imperméables de l'étage cénomanien sous les calcaires turoniens de la Chebka.

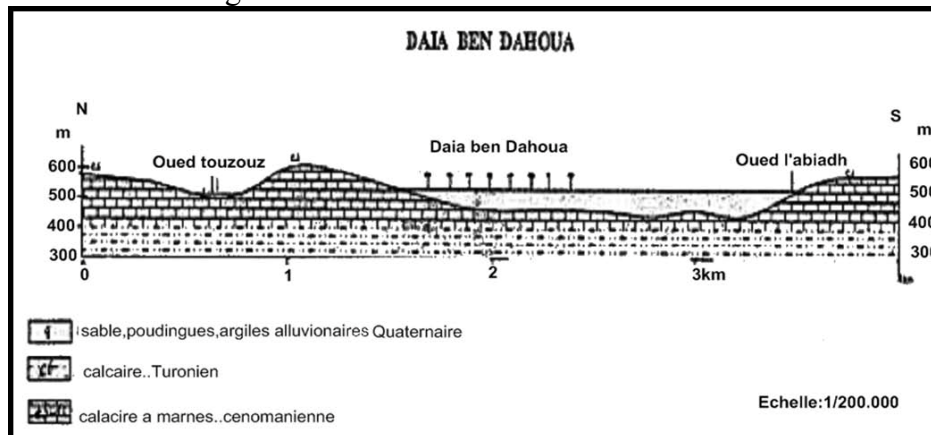


Figure 6 : Coupe géologique dans la région de Daya Ben Dahoua. (Source ANRH)

Les eaux souterraines tendent, d'une façon générale, à se rassembler à la partie inférieure des massifs calcaires et à la partie supérieure des massifs marneux sous jacents. Les eaux provenant des pluies ou celles apportées par les crues des oueds s'infiltrant dans les fissures des calcaires ; arrêtées par les marnes cénomaniennes, elles se rassemblent et forment une nappe qui alimente les puits du Mzab

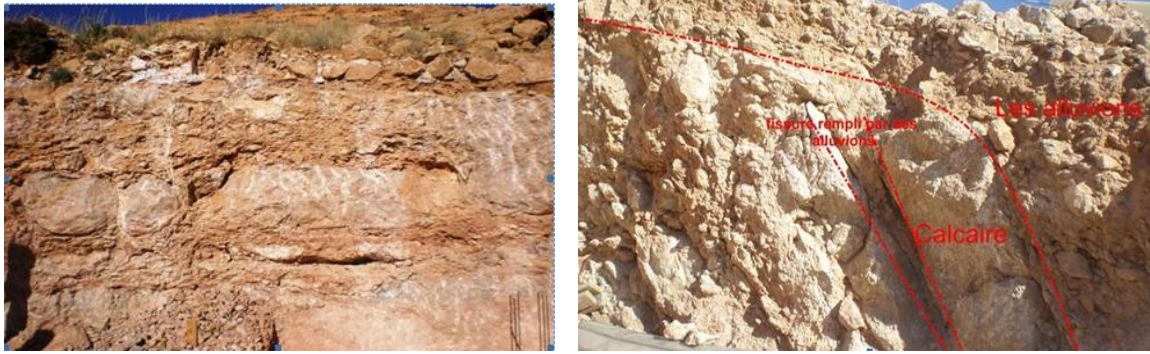


Figure 7 : Le Calcaire de Turonien du Ghardaïa 'ANRH,2009'

II.3.2.3. L'aquifère alluvionnaire Quaternaire :

Dans le Sahara septentrional, s'étend, particulièrement isolé, la Chebka du M'Zab, enveloppe bien ce paysage monotone et fantastique, ce plateau pierreux, la hamada, où les vallées desséchées des oueds sahariens dessinent comme des mailles enserrant la masse des entablements rocheux. Ce désert est traversé par la vallée de l'oued Mzab.

Au creux de cette vallée, des lits sablonneux, primitivement impropres à la culture, qu'il a fallu aménager au prix d'efforts extraordinaires et indéfiniment renouvelés. Ces alluvions renferment la nappe phréatique qui fut jusqu'à une époque récente la seule ressource hydraulique exploitée par des milliers de puits traditionnels.

Les crues des oueds jouent un rôle primordial dans le régime de ces puits. Lors de chaque crue, le niveau de l'eau s'élève dans les puits. Il s'abaisse ensuite plus ou moins lentement, pour arriver à son minimum. Parfois même, l'eau disparaît complètement.

II.3 .3. Relation aquifère alluviale et aquifère turonien :

L'aquifère du Turonien est un aquifère à perméabilité de fissure qui résulte de la karstification de la roche calco-carbonatée constitutive du Turonien.

L'aquifère alluvionnaire quand à lui est caractérisé par une perméabilité d'interstices du fait de sa constitution (Alluvions, sable...).

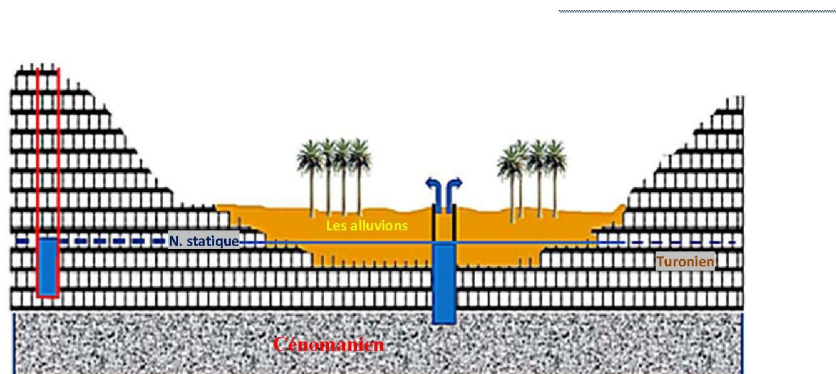


Figure 8 : Relation aquifère alluviale et aquifère turonien(Source ANRH)

Le substratum commun des deux aquifères est constitué d'argile et de marne du Cénomanién et se trouve environ à 50m au dessous de la surface alluvionnaire.

N'existant pas de couche imperméable séparant les deux aquifères de surface, il est évident qu'il y a une interconnexion de charge et de décharge entre ces deux aquifères en fonction de la sollicitation et de la recharge de l'un ou de l'autre.

ERE	Étage		Lithologie	Nature Hydrogéologique	La nappe phréatique
Secondaire	Quaternaire alluvionnaire		sables et d'alluvions	Nappe superficielle	
	Séno nien	Calcaire	Dolomies et calcaires	Substratum	
		Lagunaire	Évaporites, argiles		
	Turonien		calcaire	Nappe des calcaires (Complexe Terminal)	
	Cénomanien		Argiles, marnes	Substratum	
	Albo-Aptien		grès, sables	Nappe albienne (Continental Intercalaire)	
	Barrémien		grès fins ou grossiers et d'argiles		

Figure 9 : Synthèse hydrogéologique régionale des différents aquifères (sans échelle).

II.3.4. Étude Piézométrique :

Cette étude permet d'estimer la distribution spatiale des charges et des potentiels hydraulique. La carte piézométrique est le document de base pour faire une meilleure approche du comportement hydrodynamique d'un réservoir aquifère.

II.3.4.1. Inventaire et caractéristiques des points d'eaux :

II.3.4.1.1. Les puits :

Ces puits captent les alluvions phréatique, ils constituent ainsi l'unique et principale source d'eau en temps ordinaire, le particularisme de ces puits réside dans leur aménagement. Pour atteindre la nappe phréatique, ils doivent atteindre 20 à 55 m, leurs parois sont maçonnées en pierre.

II.3.4.1.2. Les forages :

Les premiers forages profonds ont été réalisés dans les formations de continental intercalaire (albien) dans la région montrons l'importance de cet aquifère.

La wilaya compte actuellement plus de 345 forages, qui se présentent comme suit selon l'ANRH:

- 86 pour l'AEP,
- 134 pour l'irrigation,
- 8 pour l'AEI,
- 24 à caractère mixte AEP
- 93 forages non exploités pour des raisons diverses (équipements, non électrifiés...).

II.3.4.2. Exploitation de la nappe du CI et les Débits d'exploitation

La nappe du continental intercalaire constitue actuellement la principale source d'approvisionnement en eau dans la wilaya de Ghardaïa.

La nappe du CI, selon l'altitude de la zone et la variation de l'épaisseur des formations postérieures au CI est :

- Jaillissante et admet des pressions en tête d'ouvrage de captage (Zelfana. Guerrara et Hassi Fhel et Hassi Gara).
- Exploitée par pompage à des profondeurs variant de 0,5m à 140m (Ghardaïa, Metlili, Berriane,

II. 4 LES RESSOURCES EN EAU

Dans le passé, le manque d'eau a encouragé les hommes du M'Zâb de créer le système le plus performant et sans doute le plus sophistiqué pour le captage de l'eau et pour la distribution équilibrée entre les exploitations. Canaux, rigoles, et l'infiltration pour les surplus qui réalimentent la nappe phréatique, puits, tunnels maçonnés, savantes combinaisons de trouvaillies qui font qu'aucune goutte de pluie ne puisse être perdue.

Dans la ville de Ghardaïa, et comme toutes les zones sahariennes, l'évaporation est plus importante que le niveau de précipitations. La principale source de eau utilisable dans la zone de Ghardaïa, c'est l'eau fossile située dans la couche géologique du continental intercalaire (CI), qui s'appelle **la nappe albienne**.

Cette nappe contient une réserve importante des eaux non renouvelables situées en dessous du grand Erg Oriental, le nombre des forages albiens exploités dans chaque commune (*Atlas de Ghardaïa, DRE., 2009*)

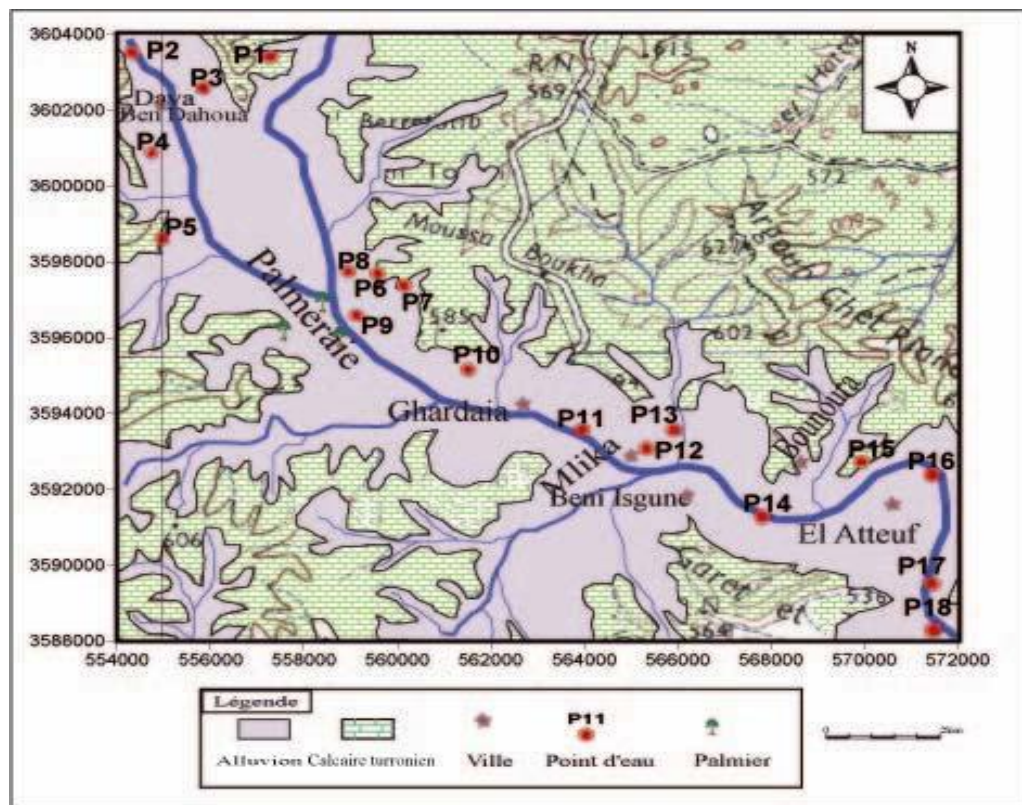


Figure 10 : Inventaire des points d'eaux

II.5 VÉGÉTATION ET CULTURE :

La végétation saharienne apparait comme très pauvre si l'on compare le petit nombre des espèces qui habitent ce désert à l'énormité de la surface qu'il couvre (*Ozenda, 1977*).

Les conditions climatiques et géographiques, font du M' Zab une région désertique à la limite Nord du désert absolu, ce qui explique la rareté de la végétation qui pousse uniquement en bordure des oueds et au niveau des palmeraies. Elle est composée de plantes herbacées et d'arbustes appartenant à la flore saharienne (*Abonneau, 1983 et Douadi, 1992*).

Parmi les arbres, Abonneau (1983) a cité, bétoum (*Astacia atlantica*) et tarfaou (*Tamarix gallica*) et les arbustes sont représentés par l'alenda (*Ephedra fragilis*), l'arich (*Calligonium commosum*), le rtem (*Retma retam*) et le seder (*Zigyphus lotus*). Selon le type de milieu, on note la présence d'un groupe assez important d'adventices où dans les endroits sablonneux et secs tel que les regs.

Zergoun (1994) et Abonneau (1983), signalent les plantes de l'Acheb suivantes : *Aristida pungens* (drinne) et *Aristida obtusa* comme les graminées les plus fréquents, le dhamrane (*Trajanum inidatum*), le baguel (*Haloxylon articulatum*), le merkh (*Genista saharae*) et le cheih (*Artemesia alba*). En aval de l'oued M'Zab se développe des plantes halophiles tel que le guettaf (*Atriplex halemus*), le guedem (*Salsola vermiculata*), l'ajrem (*Anabasia articulata*), le negued (*Astericus graveolus*) et la chaaliat (*Sysimbium iris*) (Abonneau, 1983).

II.6 LES OASIS DE GHARDAÏA

Les oasis de Ghardaïa ont une caractéristique de plus par rapport aux autres oasis de la région, car elles sont le lieu d'habitation des mozabites dans la saison estivale. Où on trouve dans chaque habitat dans la région de Ghardaïa un jardin de palmiers et d'autres cultures comme le montre la photo suivante.

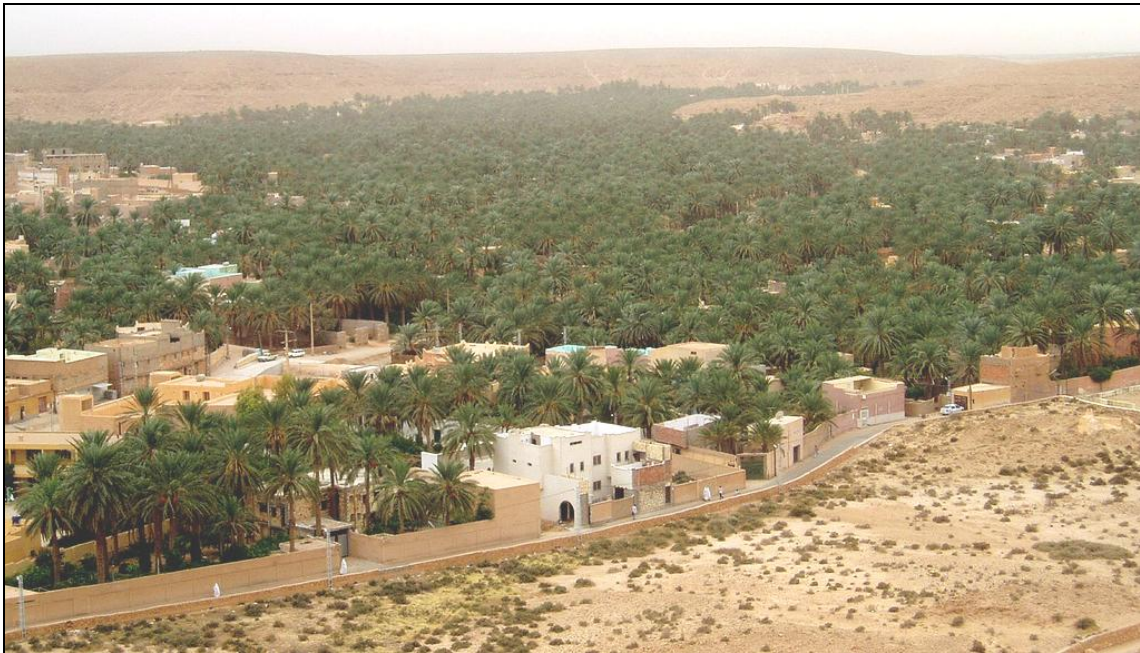


Figure 11 : Vue panoramique des oasis de Ghardaïa (<https://www.flickr.com/12/04/2015>).

II.7 PLAN D'OCCUPATION DE SOL

Comme montre les figures suivantes, le plan d'occupation de sol, et la vue aérienne du Google earth, montrent que la majorité des activités sont concentrées au niveau de la vallée de M'zab ce qui engendre des dégâts importants dans le cas d'une crue catastrophique.

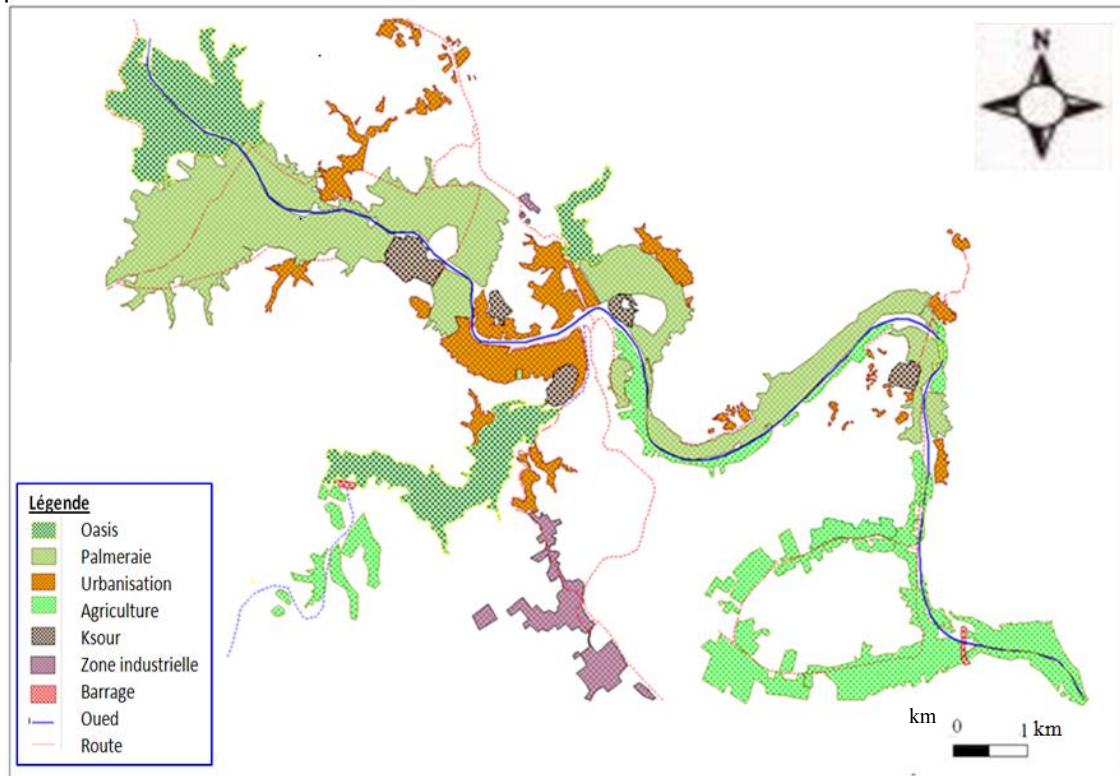


Figure 12 : Plan d'occupation de sol (ANRH,2010)

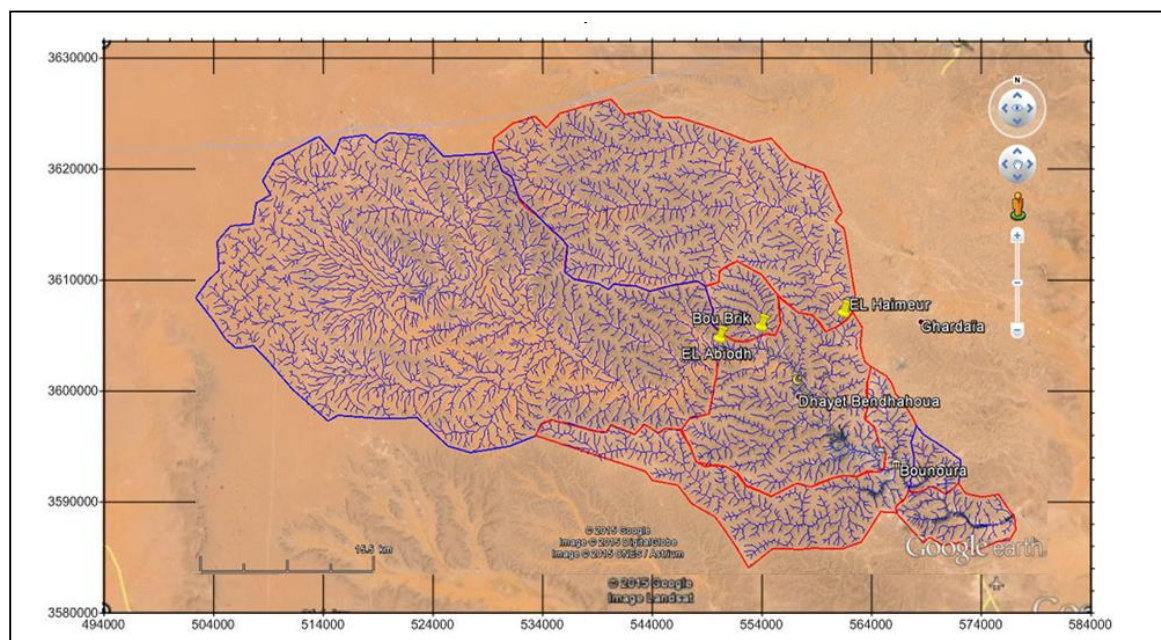


Figure 13 : bassin versant Mzab – Ghardaïa

II.8 PRÉSENTATION DES BASSINS VERSANT DE LA VALLÉE DU M'ZAB :

Surface d'alimentation d'un cours d'eau ou d'un lac. Le bassin se définit comme l'aire de collecte limitée par le contour à l'intérieur duquel se rassemblent les eaux précipitées qui s'écoulent en surface et en souterrain vers une sortie .

L'écoulement dans la vallée du M'Zab provient essentiellement des trois grands oueds Laadhira et Bou Brik Labiode de l'Ouest, se rejoignant dans l'endroit nommé «Amlaga » qui désigne en langue arabe « Moultaqa » à la commune de Daya Ben Dahoua pour donner naissance à oued M'Zab

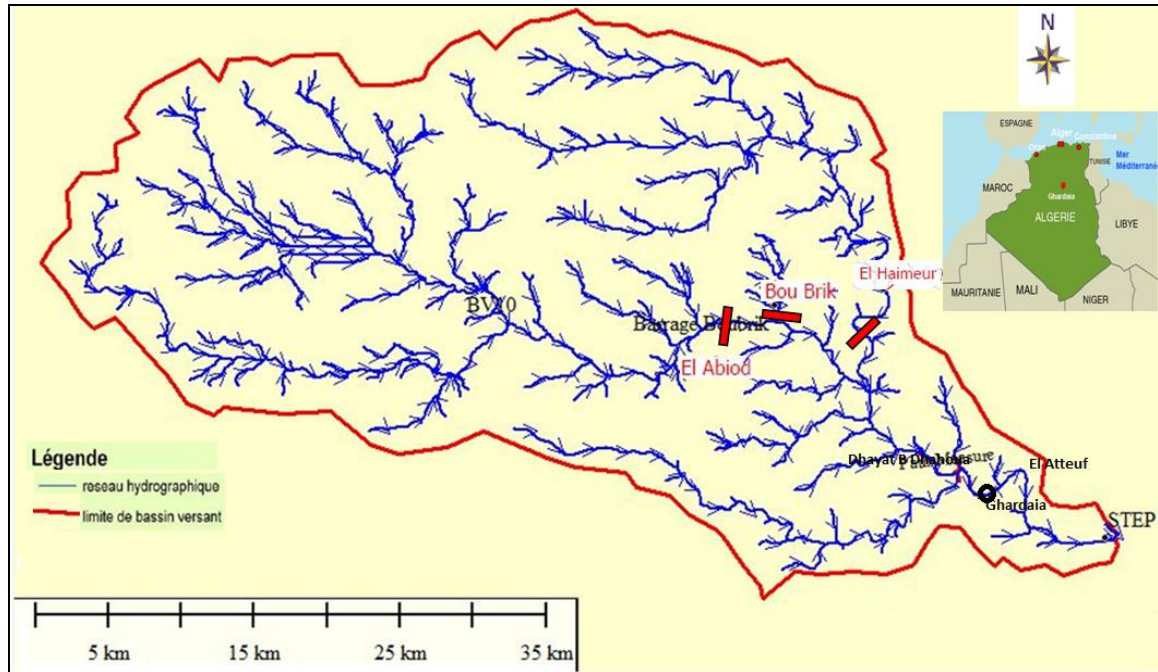


Figure 14 : Situation du bassin versant la vallée de l'Oued M'zab – Ghardaia

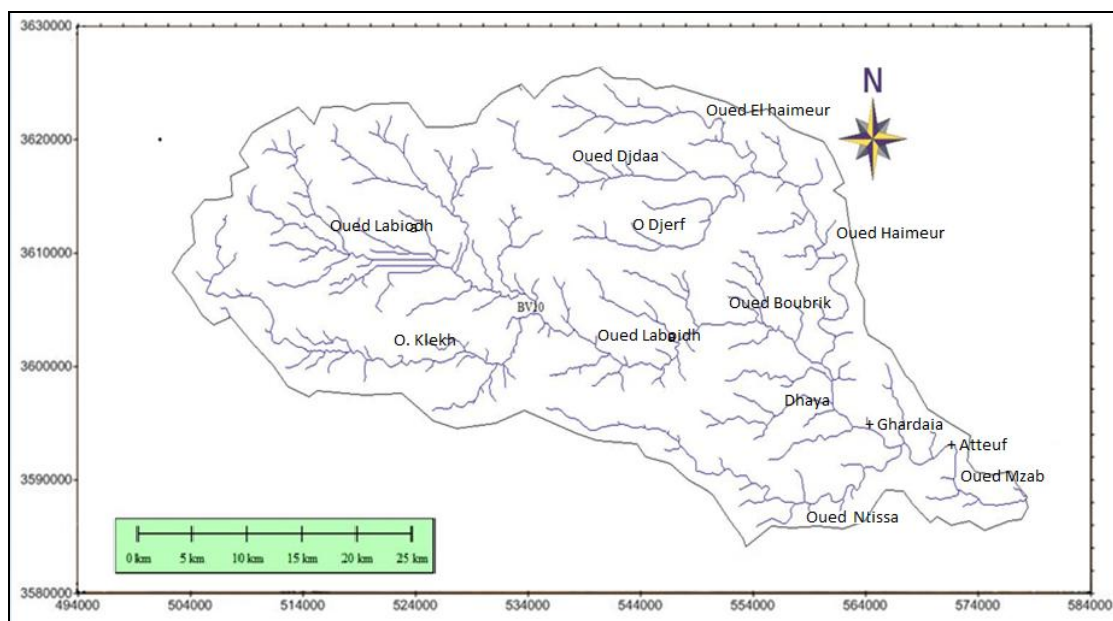


Figure 15: Réseau hydrographique du Bassin Versant Oued Mzab – Ghardaia

II.8.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUO-GÉOGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT :

Les caractéristiques physico-géographiques (surface du bassin versant, la forme du bassin, la pente et le réseau de drainage) du bassin versant ont été déterminées à partir de la MNT du terrain.

Les surfaces des bassins versants sont déterminées à partir de la surface obtenue de la projection horizontale du territoire délimité par la ligne de partage superficielle.

II.8.2.1 INDICE DE COMPACITÉ DE GRAVELEUS :

C'est le rapport du périmètre du bassin sur la circonférence du cercle de rayon **R** ayant la même superficie **S** que le bassin, cet indice exprime la forme du bassin versant, il est en fonction de la surface du bassin et de son périmètre. son expression est comme suite :

$$K_G = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{S}{\pi}}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \dots\dots\dots \text{Eq: 1}$$

P : périmètre du bassin versant (Km).

S : surface du bassin versant (Km²).

II.8.2.2 COEFFICIENT D'ALLONGEMENT :

Ce coefficient est obtenu par la relation : $Ca = \frac{L^2}{S} \dots\dots\dots \text{Eq: 2}$

L : la longueur du talweg principal.

S : la superficie du bassin versant.

II.8.2.3 RECTANGLE ÉQUIVALENT :

C'est une transformation purement géométrique en un rectangle de dimensions' **L'** et '**l**', ayant la même surface que le bassin versant. Il permet de comparer les bassins versants entre eux de points de vue de l'écoulement. Les courbes de niveau sont des droites parallèles aux petits cotés du rectangle et l'exutoire est l'un de ces petits cotés.

$$L = \frac{K_G\sqrt{S}}{1,128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right) \dots\dots\dots \text{Eq: 3}$$

$$l = \frac{KG\sqrt{S}}{1,128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_G} \right)^2} \right) \dots\dots\dots \text{Eq: 4}$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en (Km).

l : Largeur du rectangle équivalent en (Km).

II.8.3 PARAMÈTRES DU RELIEF:

Le relief et caractéristiques physiques d'un bassin versant ont une forte influence sur l'hydrogramme de crue. Car une forte pente occasionne un écoulement aussi rapide en un temps de concentration très court et donc montée plus rapide.

Le relief se détermine au moyen d'indices ou de caractéristiques tels que :

- La courbe hypsométrique.

- L'altitude moyenne.
- L'indice de pente globale I_g .
- L'indice de pente roche I_p .
- L'indice de pente moyenne du bassin versant I_m .

II.8.3.1 COURBE HYSOMÉTRIQUE :

Elle fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin en fonction de l'altitude.

Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique

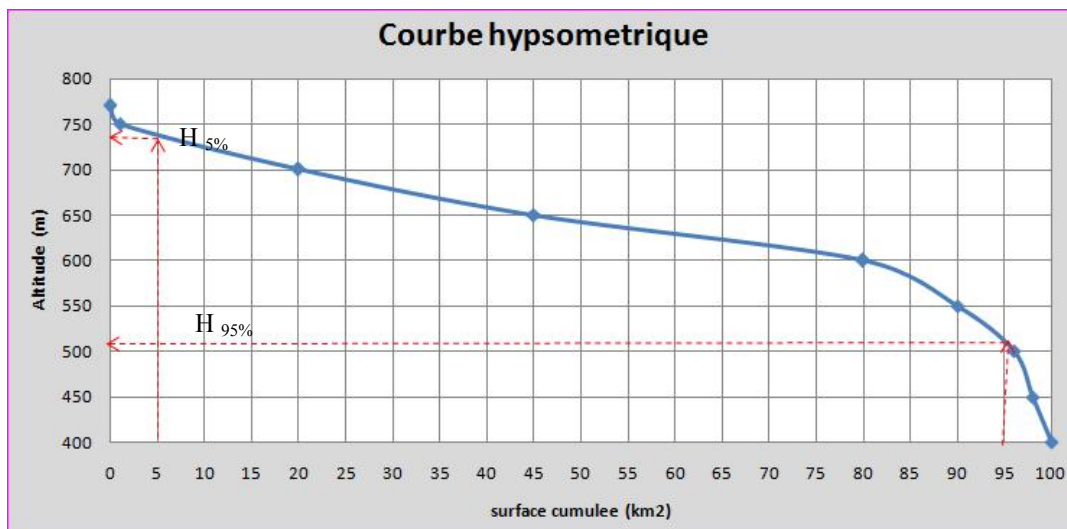


Figure 19 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab

II.8.3.2 LES INDICES :

Le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin versant et de permettre des comparaisons et des classifications. Les indices de pente se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin

II.8.3.3 INDICE DE PENTE DE ROCHE I_p :

I_p est la moyenne de la racine carrée des pentes mesurées sur le rectangle équivalent, et pondérée par les surfaces comprises entre deux courbes de niveau H_i et H_{i-1} . Il est donné par la formule suivante :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n \sqrt{S_i} (H_i - H_{i-1}) \quad \text{Eq: 5}$$

L : Longueur de rectangle équivalent (m).

S_i : Surface partielle correspondante (%).

II.8.3.4 INDICE DE PENTE GLOBALE I_g :

L'indice global de pente évalue le relief. De la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la superficie du bassin. On en déduit les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ entre lesquelles s'inscrit 90% de l'aire du bassin. Il est égal à :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \text{Eq: 6}$$

Où :

D : Dénivelée entre $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$.

L : la longueur du rectangle équivalent (km).

$$D = H_5 - H_{95} \quad \text{Eq: 7}$$

II.8.3.5 INDICE DE PENTE MOYENNE DU BASSIN VERSANT I_M :

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. Elle est considérée comme une variable indépendante. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration, et influence directement le débit de point lors d'une averse.

$$I_m = \frac{\Delta H \cdot (0,5l_1 + l_2 + l_3 + \dots + 0,5l_n)}{S} \dots\dots\dots \text{Eq: 8}$$

Avec :

- ΔH : Dénivelé entre deux courbes de niveau ;
- l_i : Longueur de la courbe de niveau d'ordre 1, 2, 3, ..., n.
- S : Surface du bassin versant (Km^2).

II.9 CARACTÉRISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES :

II.9.1 Densité de drainage :

C'est le rapport entre la longueur total de tous les talwegs « L_i » du bassin versant, à la surface « S » Elle reflète la dynamique du bassin, la stabilité du chevelu hydrographique et le type de ruissellement de surface. Elle est exprimée en Km/Km^2 .

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S} \dots\dots\dots \text{Eq: 9}$$

Avec :

- $\sum_{i=1}^n L_i$: La longueur totale de tous les cours d'eau.
- S : Superficie du bassin versant en ;

II.9.2 Coefficient de torrentialité :

Il est défini comme étant :

$$C_t = D_r \cdot F_1 \dots\dots\dots \text{Eq: 10}$$

$$F_1 = N_1 / S \dots\dots\dots \text{Eq: 11}$$

Avec :

- D_r : est la densité de drainage.
- N_1 : est le nombre des talwegs d'ordre 1.
- S : est la surface du bassin versant ;

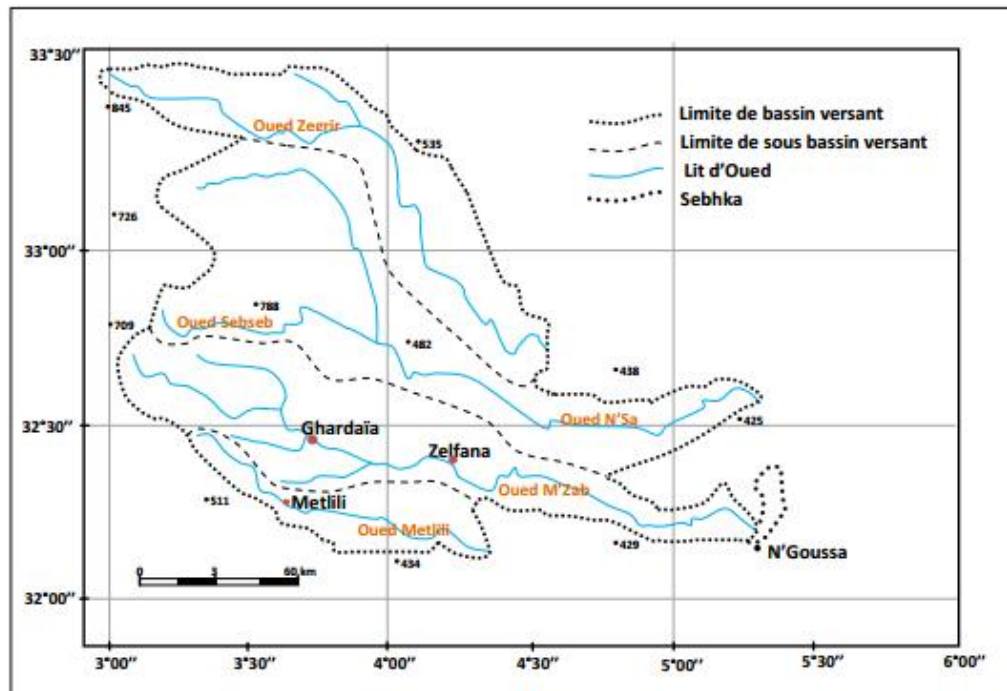


Figure 20 : Bassin versant global de la région du M'Zab (Benaouedj,2012)

Tableau 1 : Caractéristique du bassin versant global de M'zab (Benaouedj, 2012)

N°	Caractéristiques	Symbole	Valeur	selon J.Debief
1	Superficie du bassin (km ²)	A	5779	5000
2	Périmètre (km)	P	553,3	
3	Indice de compacité	Kc	2,04	
4	Longueur du RE (km)	L	253,89	
5	Largeur du RE (km)	l	22,76	
6	Altitude maximale (m)	Hmax	779	750
7	Altitude minimale (m)	Hmin	141	107
8	Altitude de fréquence (m)	H1/2	450	
9	Altitude moyenne (m)	Hmoy	452,5	
10	Dénivelée simple (m)	D	512,5	
11	Indice de pente globale (m/km)	Ig	2,02	
12	Indice de pente de roche	Ip	1,59	
13	Dénivelée spécifique (m)	Ds	153,56	
14	Densité de drainage (Km-1)	(Dd)	0,41Km-1	
15	Temps de Concentration : a)- formule de GIANDOTTI b)-formule SCS (soil conservation service)	(Tc)	1,5 Jours 3,5 Jours	
16	vitesse d'écoulement de l'eau (m/s)	(Vc)	1,46	

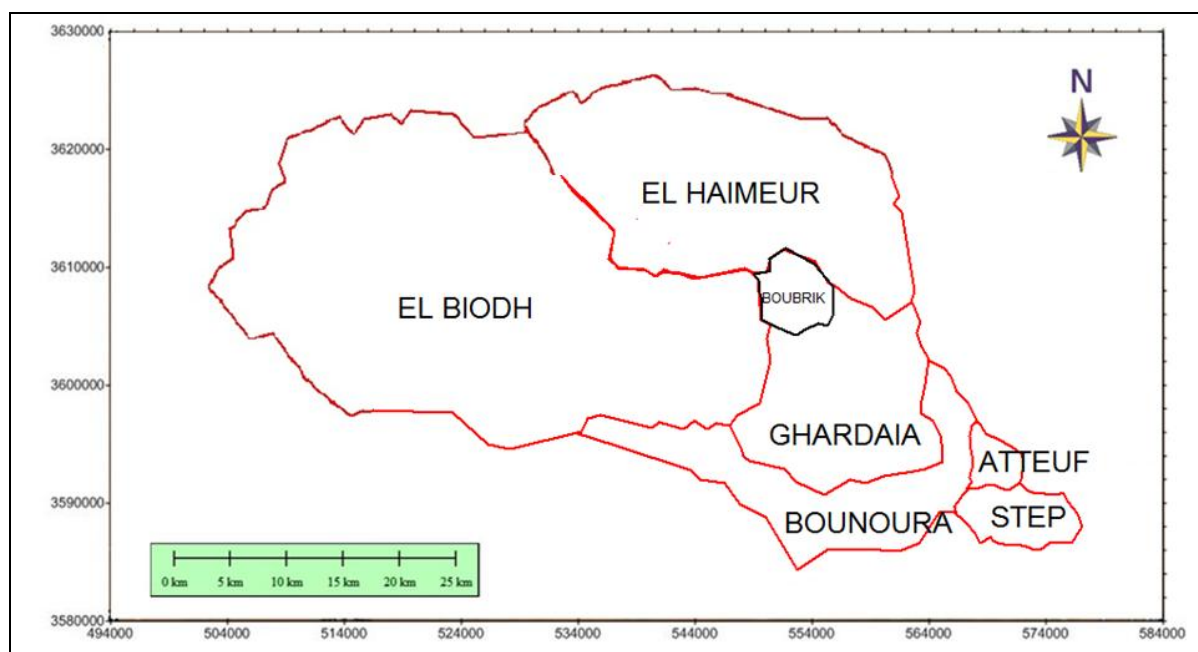


Figure 21 : Découpage des sous bassins Valle Mzab – Ghardaia

Tableau 2 : Récapitulatif Des Paramètres Morphométriques

Sou bassin versant	Périmètre (Km)	Superficie (Km2)	Indice de compacité KG	Longueur équivalente (Km)	Largeur équivalente (km)
EL Haimeur	91	386	1.30	33.74	11.44
BOU BriK	24	35	1.14	6.66	5.26
EL BIODH	132	822	1.29	48.63	16.90
Ghardaia	64	198	1.27	23.26	8.51
Bounoura	100	168	2.16	45.99	3.65
El Atteuf	18	18	1.19	5.87	3.07
Step	29	43	1.24	10.17	4.23
Bassin versant Global	202	1670	1.38	79.20	21.09

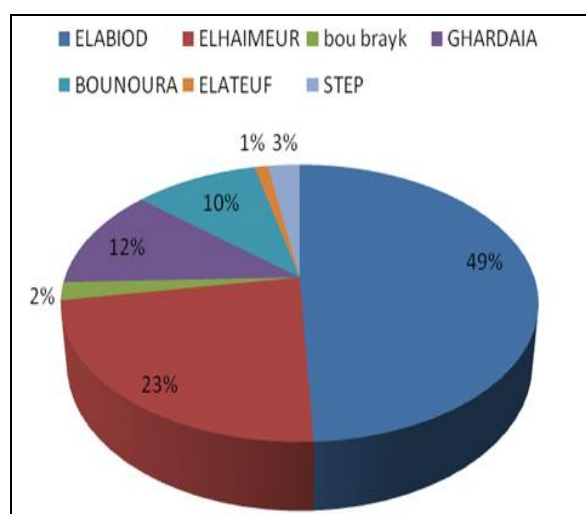


Figure 21 : Reapartition de la superficie des SBV de l'Oued M'zab

Tableau 3 : Caractéristique du bassin Oued M'zab- Ghardaia

Caractéristique	Paramètre	Unité	Symbole	Valeur
Morphologie du Bassin versant	Superficie	Km ²	A	1670
	Périmètre	Km	P	202
	Indice de compacité	-	K _c	1.39
	Longueur du rectangle équivalent	Km	L	79.89
	largeur du rectangle équivalent	Km	l	20.95
Relief	Altitude maximale	m	H _{max}	762
	Altitude minimale	m	H _{min}	432
	Altitude moyenne	m	H _{moy}	639
	Indice de pente de Roche	%	I _p	5.19
	Indice de pente globale	%	I _g	3.71
	Pente moyenne	%	I _{moy}	0.37
	Dénivelée spécifique	m	D _s	355
Réseau Hydrographique	Longueur du talweg principal	Km	L _p	95
	Coefficient d'allongement	-	E	5.4
	Densité de drainage	Km/Km ²	D _d	0.218
	Coefficient de torrentialité	-	C _t	0.23
	Temps de concentration	heures	T _c	23
	Rapport de confluence	-	R _c	0.93
	Rapport de longueur	-	R _l	1.4

II.10. PROFIL EN LONG DE L'OUED M'ZAB A GHARDAIA

Les profils en long de l'oued M'Zab et de ses grands formateurs jusqu'à El Atteuf ont été mesurés.. Les pentes, mises à part dans les quelques premiers kilomètres, sont relativement régulières et rectilignes de l'amont vers l'aval; C'est là une caractéristique des systèmes désertiques. Toutefois, on remarque aussi que la pente devient plus abrupte dès la confluence des oueds El Abïodh et Lahdhira. Ainsi, la pente moyenne de l'Oued El Abïodh jusqu'à la confluence de l'oued El Kelakh, est de 6,3 m/km, puis elle passe à 2,8 m/km jusqu'à Dhayet Ben Dhahoua. L'oued M'Zab dans l'agglomération mozabite a une pente moyenne de 3,4 m/km (Benaouedj, 2012).

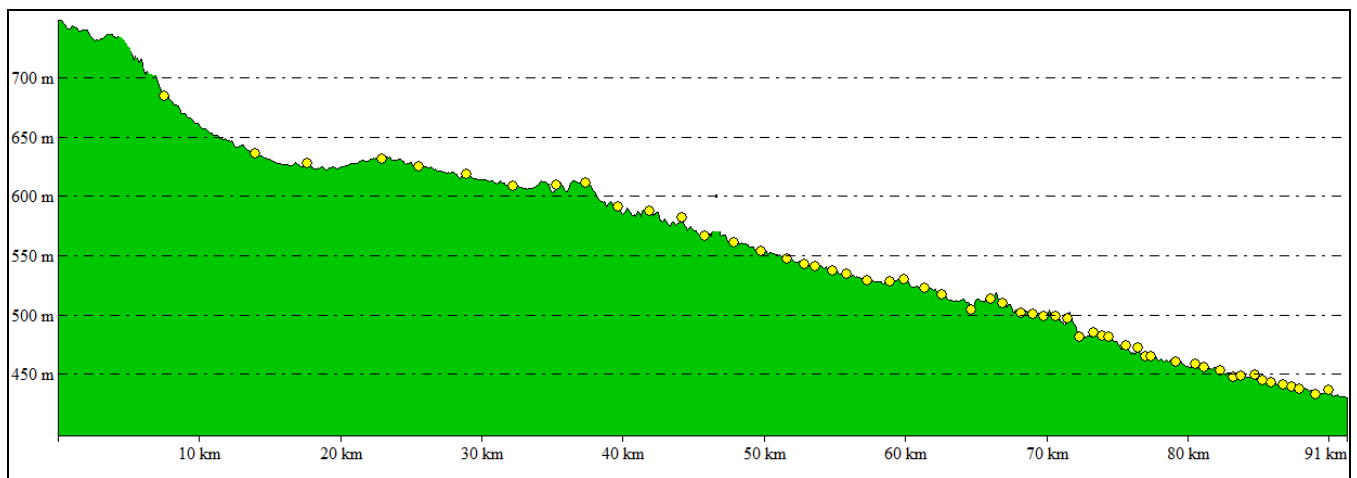


Figure 22 : Profil en long de l'Oued M'zab - Ghardaïa par GLOBAL MAPPER

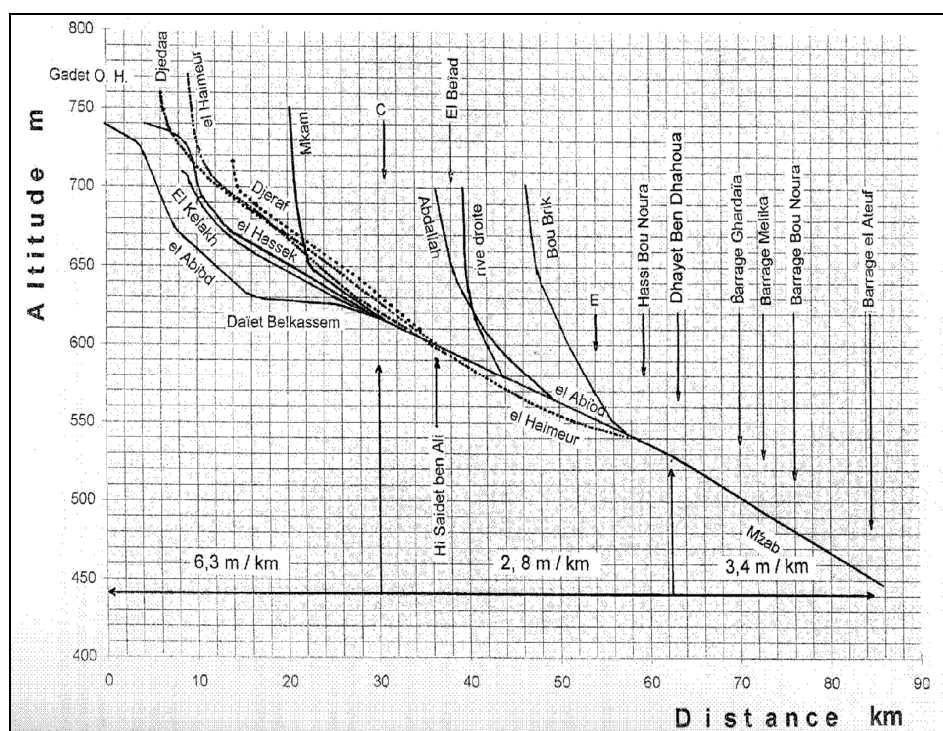


Figure 23 : Profils en long de l'oued M'zab (Benaouedj)

II.11 TEMPS CARACTÉRISTIQUES :

II.11.1 Temps de concentration du bassin versant t_c :

Le temps de concentration t_c , des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier. C'est le temps que met la particule d'eau la plus éloignée pour arriver à l'exutoire.

Les conditions hydrauliques ne sont pas les mêmes lorsque s'écoule un film d'eau relativement mince et lorsque déferle une lame d'eau importante. Il s'ensuit que la forme des hydrogrammes de crue n'est pas semblable pour les faibles et les fortes crues.

Le temps de concentration est composé de trois termes différents :

- t_h : Temps d'*humectation*. Temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.
- t_r : Temps de *ruissellement* ou d'*écoulement*. Temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).
- t_a : Temps d'*acheminement*. Temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration t_c est donc égal au maximum de la somme de ces trois termes, soit :

$$t_c = \max(\sum(t_h + t_r + t_a)) \quad (2.1)$$

Théoriquement on estime que t_c est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement (cf. chapitre 11). Pratiquement le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques.

• Formule SCS

Le modèle SCS Curve Number (CN) estime l'excès de précipitations comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation suivante (HEC-HMS, 2000):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

OÙ, P_e : L'excès de précipitation : P : est le total des précipitations accumulées au temps t :

I_a : Les pertes initiales et S : est le potentiel maximum de rétention.

" I_a " et " S " sont liés par la formule empirique :

$$I_a = 0,2S$$

D'où:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

Le potentiel de rétention maximum, S , et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du nombre de courbe CN (Curve Number) par:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

$$CN_{moy} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i}$$

Où, j : L'indice associé à la subdivision du bassin de type de sol uniforme;
 a_{ij} : l'aire de la subdivision j dans le sous-bassin
i et A_i : l'aire du sous-bassin i.

- **Formule Giandotti**

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

A : Surface du bassin versant en [Km²] ;
L : longueur du talweg principale en [Km];
H_{moy}, H_{min} : respectivement la hauteur moyenne et minimale du B.V en [m].

- **Formule de California**

$$T_c = \left(\frac{0.87 \cdot L^3}{H_{max} - H_{min}} \right)^{0.386}$$

avec

T_c : temps de concentration du bassin versant (h)

L : longueur du thalweg principal (m)

H_{max} : Altitude max du bassin versant (m)

H_{min} : Altitude min du bassin versant (m)

Tableau 4 : temps de concentration

S/Bassin	Périmètre	Surface	L oued	Temps de concentration (heure)			
	(km)	(km ²)	(km)	Giandotti	SCS	California	Moyenne
EL Haimeur	91	386	55.2	21.00	13.13	8.64	10.88
BOU Brik	24	35	10.81	7.60	2.66	4.67	3.66
EL BIODH	132	822	46.55	23.98	10.72	8.09	9.40
Ghardaia	64	198	10.63	11.15	2.22	5.85	4.04
Bounoura	100	168	38	16.81	9.68	9.46	9.57
El Atteuf	18	18	7.55	7.23	2.20	5.46	3.83
STEP	29	43	7.61	6.46	1.64	5.58	3.61

Le tableau ci-dessus résume le coefficient de ruissèlement de chaque sous bassin de la valle Oued Mzab-Ghardaïa . Les deux méthode de SCS et California donnent des valeurs proches, Alors la moyenne arithmétique est calculée à partir de ces méthode

II.12 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT CR:

Le coefficient de ruissellement est le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée et la hauteur d'eau précipitée au cours d'un événement «averse-crue». Ce coefficient de ruissellement est généralement considéré comme constant au cours d'une averse. Sa valeur est choisie en fonction de la nature du bassin, de sa couverture végétale, de la pente, et du type de sol.

Coefficient de ruissellement global: ($C_r = \frac{H_n}{HP}$).....

- C_r : Le coefficient de ruissellement.
- H_n : La hauteur d'eau ruisselée (mm).
- HP : La hauteur d'eau précipitée (mm).

Tableau 5 : Le coefficient de ruissellement moyen selon le type d'habitation (Roux-2004)

Type d'habitation	Cr
Très dense	0.9
Dense	0.6 à 0.7
Moins dense	0.4 à 0.5
Résidentiels	0.2 à 0.3
Zone industrielles	0.2 à 0.3
Espaces verts	0.05 à 0.2
Rue goudronnées	0.9
Rue non goudronnées	0.35
Jardins	0.15
Terrains nus	0.3

II.13 ETUDE DES CRUES :

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

La crue dépend essentiellement de l'abondance et de l'intensité de la pluie : son évolution obéit principalement à la puissance et l'intensité de l'averse. Sa vitesse est largement influencée par le couvert végétal, la lithologie, par des paramètres morphométriques du bassin (*indice de compacité, densité de drainage, rapports des confluences et des longueurs etc. ...*), par la pente des thalwegs et la forme du lit.

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

II.14. 1 Historique des crues de la vallée du M'Zab

Tableau 6. Inventaire des crues de l'oued M' Zab :

a- Les crues de 1264 à 1908

Dates des crues	Importance	Observations
1264		Crue catastrophique de 1264 d'après Motylinski « à la suite de 7ans de sécheresse »
1306		Le 20 décembre 1306 d'après la communication de M. RAMDAN Kamel OPVM (2009)
1780		Inondation de la pentapole du M' Zab
Décembre 1820		8 jours d'écoulement, la crue a atteint la placette de SALM O Aissa
1848		Après 7 ans de sécheresse, l'inondation de la pentapole du M' Zab causant des dommages sur le système de partage des eaux a Ben Isguen « TAGHARBIT »
1884		Les habitants d'El Atteuf se sont réfugiés dans les mosquées, et à Beni-Isguen 300 maisons sont détruites
Ravage de 30 septembre 1901		2 jours d'écoulement après 10 ans de sécheresse, où le niveau d'eau a atteint 10m de hauteur dans la palmeraie de Ghardaïa, avec des dommages au niveau de barrage AJDID1897. Dit la crue qui efface tous(MASSAH)
Avril 1908		Au moins 2 morts

b- Les crues de 1903 à 1915

D'après lieutenant **Charlet**, l'historique suivant de l'écoulement de l'oued est:

- 17 et Septembre 1903.
- 18 à 19 février 1906.
- Octobre 1909.
- Décembre 1913.
- 7 à 8 février 1914.
- 20 juillet 1915.

c-Les crues de 1921 à 1935

Dubief «communiqués à Capot-Rey, en février 1938. »

28 mai 1921	Importante	La crue a atteint le 3ème barrage, la palmeraie est inondée.
23 mai 1923	Importante	Inondation des oasis de Ghardaïa, Melika, Bou Noura, El Atteuf. Elle a atteint Zelfana à 64 km en aval de Ghardaïa, à 150 km de la source
15-17 mars 1925	Importante	Dépasse Bou Noura après avoir rempli tous les barrages situés en amont.
7 Septembre 1929	Importante	Remplissement de tous les barrages
29 mai 1931	Importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
8 novembre 1932	Importante	oasis inondée.
1932 décembre	Importante	Remplit les barrages de Ghardaïa et s'arrête à celui de Melika.
3 novembre 1933	Très Importante	Elle a inondée les barrages de Ghardaïa, Melika, et Bou Noura.
23 avril 1935	De faible importance	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa

d-Les crues de 1938 à 1951

Dubief « d'après les états mensuels fournis par l'Annexe de Ghardaïa depuis avril 1938, complétés par ceux du poste météorologique de Ghardaïa »

18 avril 1938	Importante	Coule jusqu'à la ville de Ghardaïa
25 novembre 1938	Importante	Inondation totale des oasis de Ghardaïa, Beni Isguen, parcelle de celle de Bou Noura (oued Zouil)
février 1939	Importante	Arrive jusqu'à El Atteuf, remplissant à moitié le barrage d'aval de l'oasis. Tous les barrages situés sur le parcours aval de l'oued ont été remplis
mars 1940	Légère	Crues des affluents des oueds El Abiodh et Mzab. Le barrage "Sed Edjedid" ou bien "Habbas Djedid" a été partiellement rempli.
mars 1941	Importante	Inondation de la palmeraie
avril 1941	Moyenne	Inondation de l'oasis; barrage en parti rempli
7 juin 1942	Moyenne	Crue des oueds secondaires
18 février 1943	Faible	Crue de l'Oued Adira au NW de Ghardaïa
mars 1943	Faible	Partie N de la palmeraie arrosée
avril 1943	Faible	Inondation de l'oasis. Fortes crues des oueds secondaires
octobre 1943	Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa.
décembres 1943	Peu Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa
février 1944	Peu Importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
mars 1944	Peu Importante	
21 janvier 1946	Très Importante	Inondation de toutes les oasis. L'oued M'zab est arrivé à El Atteuf, tous les barrages ont été remplis
24 avril 1946	Assez Important	Inondation de la partie nord de l'oasis de Ghardaïa
15 septembre 1946	Faible	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
6 avril 1947	Moyenne	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
avril 1948	Faible	
septembre 1948	Fortes	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa par des oueds secondaires
24 mars 1949	Légère	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa

CHAPITRE II: LA ZONE D'ETUDE : VALLE DE L'OUED M'ZAB - GHARDAIA

24 avril 1949	Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa.
6 septembre 1950	Forte	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa
Octobre 1950	Forte	Inondation de l'oasis de Ghardaïa
5 mars 1951	Forte	Inondation de l'oasis de Ghardaïa. La crue arrive jusqu'à El Atteuf

e-Les crues de 1951 à 1953

la période entre 1951 à 1953 par : Communication personnelle de J. Dubief recueillie par M.A. Roche (1996)

13 et 19 septembre 1951	Moyenne	Crue moyenne des oueds secondaires Bouchamdjane, 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 (renseignement de l'annexe d'Ouargla).
-------------------------	---------	--

e-Les crue de 1951 à 1953

2 octobre 1951	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 du M' Zab atteint Hassi Chegga a eu lieu 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.
24 avril 1952	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 du M' Zab n'ont pas ou peu coulé (oueds El Kekakh, El Abiod, Djaref). A Daya 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 / seconde. La crue emporta des tentes, noya plus de 1200 têtes de bétail (renseignements d'Ouargla).
23 Septembre 1952	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 1953	Faible	Oued Zouil. Quelques jardins de l'oasis de Bou Noura ont été arrosés.
5 septembre 1953	Faible	Les oueds secondaires: Touzouze, Akhalkhal, les ont été atteints par la crue.
17 novembre 1980	Important	98,9mm de précipitation et 4 jours d'écoulement
fin octobre 1984		Le barrage en amont de la palmeraie de Ghardaïa est rempli.
11 mai 1990	Important	des traces de crue ont été observées à une altitude de 498,85 à la distance de 473,70 m en amont du pont Adaoud.
2 juin 1991	Très importante	Nombreux dégâts.
1993	forte.	
30 septembre 1994	Très Important	Très importante avec une précipitation de 151mm, Q _{crue} = 873m ³ /s. « ANRH».
8 octobre 1995	Assez forte	Des dégâts importants
1997	Important	La station ANRH Ghardaïa enregistrée 46,4mm de précipitation
juin 2004	important	Crue importante causée par chutes de grêles, des dégâts matériels importants.
1 octobre 2008	Très importante	6 jours d'écoulement, pertes humaines considérables (43 victimes), provoque la destruction des infra structures, et des dégâts matériels très importants.

II.13.2 Répartition mensuelle des crues importantes

Tableau 7 : Répartition mensuelle des crues pour une période de 107 ans.

mois	Les années des crues										Fréquence
sept	1901	1903	1929	1946	1948	1950	1951	1953	1994		9
oct	1909	1943	1950	1951	1984	1995	2008				7
nov	1932	1933	1938								3
dec	1913	1932	1943								3
jav	1946										1
fev	1906	1914	1939	1943	1944						5
mars	1925	1949	1943	1944	1949	1951	1953				7
avr	1908	1935	1938	1941	1943	1946	1947	1949	1952	1997	10
mai	1921	1923	1931	1941	1990						5
juin	1942	1991	2004								3
juil	1951	1953									2

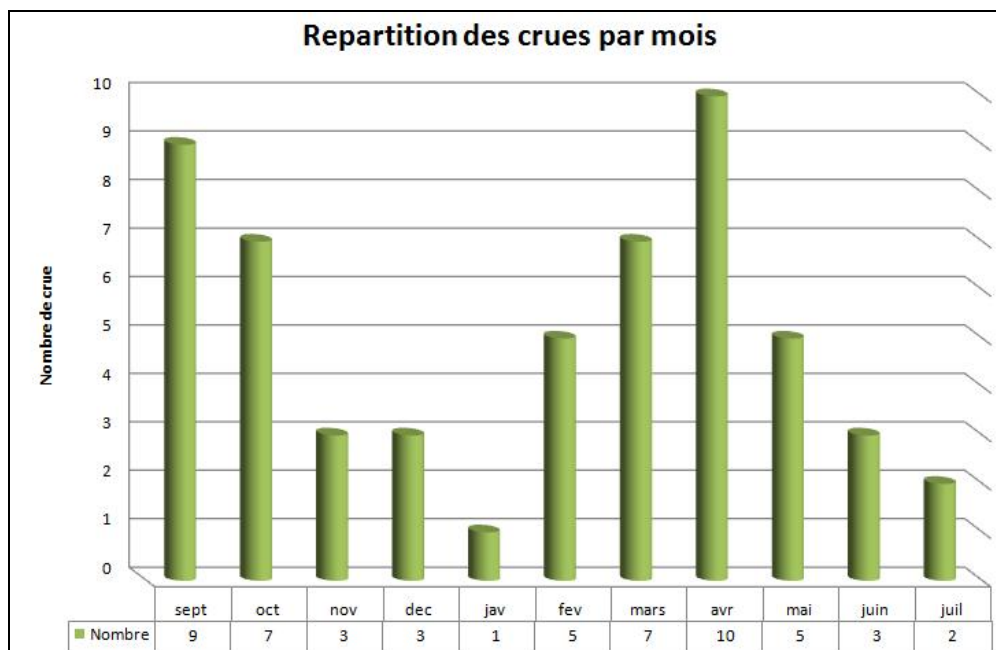


Figure 24 : répartition mensuelle des crues pour une période de 107 ans.

Les mois de crue sont irrégulièrement espacés. Ainsi, peut y avoir plusieurs crues dans une année réparties sur différents mois. Les périodes de sécheresse quant à elle s'étendent sur plusieurs années. La variation de la période de crue au cours de l'année est caractérisée par:

- Deux maximums, l'un en Septembre et l'autre en Avril.
- Deux minimums en août et en janvier.

II.13.3 Intérêts de la recherche historique :

Les crues sont un phénomène suffisamment important pour que l'on conserve le souvenir des principales catastrophes. Ce souvenir peut se traduire par des descriptions écrites, par des repères de niveau marqués par l'homme, par des déplacements de blocs de rochers. La période sur laquelle portent ces souvenirs est variable de quelques dizaines d'années à quelques centaines. Généralement, les crues

sont caractérisées par un niveau d'eau (les débits ne sont guère mesurés que depuis le début du siècle).

Il nous faudra passer des hauteurs aux débits. Ceci ne peut se faire que si une courbe de tarage, établie de nos jours, est valable pour les périodes anciennes. Une telle validité dans le temps n'est justifiée que si le site a été hydrauliquement stable. Cette stabilité est envisageable dans certains cas comme des passages de ponts anciens, des endiguements entre des quais...

De toute façon, le passage des hauteurs aux débits, lorsqu'il est possible, sera toujours entaché d'une forte incertitude. Il se peut très bien que les observations chiffrées disponibles sur une période restreinte ne permettent pas d'envisager l'ampleur de crues excessivement rares et provoquées par des phénomènes tout à fait exceptionnels et d'une autre nature que ceux observés habituellement.

Dans tous les cas, il est donc recommandé de procéder à une investigation "historique". Que ce soit dans des textes anciens ou tout au moins par interrogation des populations locales. Les résultats que l'on peut en espérer serviront essentiellement à vérifier que les estimations de débits de crues faites par d'autres méthodes permettent de rendre raisonnablement compte des différentes crues catastrophiques enregistrées.

II.14 INONDATIONS DU 1 OCTOBRE 2008

Les pluies diluviennes, qualifiées de « tsunami fluviale », accompagnées de violents orages, ont commencé le lundi 29 septembre 2008, après quatre années de sécheresse. La pluie a continué progressivement le mardi avec une intensité moyenne, puis le mercredi 1er octobre le jour de l'Aïd (la fête qui marque la fin du jeun chez les musulmans, c'était le déluge, avec une pluie diluvienne, 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 du l'oued M'Zab sont en crue. Habituellement seul un des trois oueds déborde sans mettre en danger les populations environnantes. Les autorités parlent d'un débit de $900 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette catastrophe qui a touché la ville est liée, d'une part, à l'intensité de l'aléa concerné et d'autre part, à la vulnérabilité de cette région aux inondations (Medejerab, 2009).

C'est une crue exceptionnelle puisqu'elle a atteint la Sebkha Séfiouane. Dubief, qui a travaillé plus de 40 ans sur les précipitations au Sahara algérien, retient le fait que si lors d'une crue les eaux atteignent la Sebkha Sefiouane, considérant que celle-ci est cinquantenaire.

A Metlili située à 40 Km au nord de la ville de Ghardaïa, une hauteur d'eau de 6 m a été enregistrée, alors qu'en aval de Ghardaïa, celle-ci a frôlé les 10m. Ce déluge a entraîné l'effondrement d'une retenue collinaire construite en 2005 au niveau de l'oued Laadhira situé à 20km du chef lieu de la wilaya de Ghardaïa (Fig. II.10). En effet, les fortes pluies ont engendré une accumulation des eaux sur un rayon d'environ 2 km. La pression de l'eau a provoqué une brèche de 70m dans la retenue.

II.14.1 Les dégâts causés par les inondations du 1 octobre 2008

Jamais de mémoire d'octogénaires résidant dans la vallée du 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 a, 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. Plus de 1200ha 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. Une usine de fabrication de batteries sous licence (Tudor), employant plus de 200 ouvriers, a été complètement saccagée par les eaux (Medejerab, 2009).

L'estimation des dégâts touchant les infrastructures avoisine les 20,1 Milliards de Dinars, soit environ 200 millions d'euros.

Figure 25 : Les impacts immédiats des inondations du 1 octobre 2008.



2- Ghardaia en crue



2- la crue atteint les berges



3- Niveau d'eau atteint environ dix 10 mètres



4- des voiture emportées par des crues



5-Destruction d'un pont



6- boues engendrées par les crues



6-Inondation à EL Ghaba - Ghardaia



7-Inondation à El Ateuf - Ghardai



8- Lycée entièrement inondés



9- Rues deviennent inaccessibles après la crue

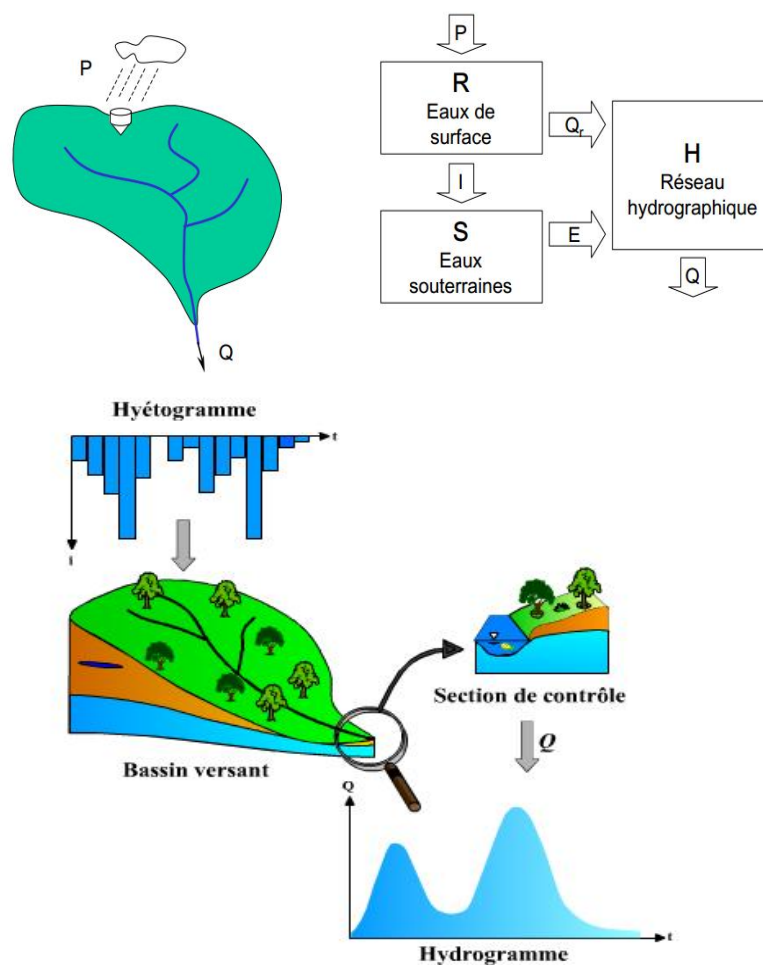


10- Destruction des berges de l'Oued à Bounoura

CHAPITRE III

ANALYSE STATISTIQUE

DES PLUIES



CHAPITRE III: ANALYSE STATISTIQUE DES PLUIES

« L'hydrologie des déserts est encore mal connue en raison du faible nombre de données recueillies et de la difficulté de la documentation. Elle souffre de l'aridité, cause principale, et de la discontinuité des phénomènes » (*J. Fernand, 2006*).

« En effet, les Oueds sahariens n'ont pas un régime de crues régulières, mais plutôt de caractère accidentel; quand les pluies s'abattent, les Oueds coulent quelques jours et débordent même » (*Gardi, 1973*).

« Exceptionnellement, quand les pluies sont importantes, surtout au Nord-Ouest de la région de Ghardaïa, les oueds drainent d'énormes quantités d'eaux. Ainsi, les conséquences sont parfois catastrophiques et les dégâts sont souvent remarquables, notamment par l'oued M' Zab, qui à chaque pluie exceptionnelle cause beaucoup de dommages principalement à la ville de Ghardaïa. » (*ANRH, Ghardaïa, 2003*).

III.1 CLIMATOLOGIE :

Le climat de la région de Ghardaïa est typiquement Saharien, se caractérise par deux saisons: une saison chaude et sèche (*d'avril à septembre*) et une autre tempérée (*d'octobre à mars*) et une grande différence entre les températures de l'été et de l'hiver.

On enregistre une moyenne annuelle de 25°C, avec une évaporation de l'ordre de 3000mm par an et une faible hauteur de pluies avec une moyenne de précipitations de 70mm/an.

III.1.1 station pluviométrique de Ghardaïa

Dans le la tableau suivant, nous représentant les caractéristique de la station pluviométrique de Office Nationale de la Météorologie à Ghardaïa,

Tableau 1 : Caractéristiques de la station pluviométrique de Ghardaïa.

Nom		Ghardaïa
Organisme (source)		Office Nationale de la Météorologie (ONM)
Coordonnées	Latitude	32°, 24 N
	Longitude	03° 48 E
Altitude (m)		468
Période d'observation		1975 — 2010
Nombre d'années observées		36
Observation		Station en fonctionnement

III.1.2. aspect climatiques

Le bassin versant de l'oued M'ZAB se situe dans le domaine climatique désertique Hyper aride et son climat est de type saharien caractérisé par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver. Son climat est également caractérisé par la sécheresse de l'air.

III.1.3 Indice annuel d'aridité E. DEMARTONNE

Cet indice définit l'Aridité « I » de la région par le régime pluviométrique et thermique. Il est obtenu en appliquant la relation suivant

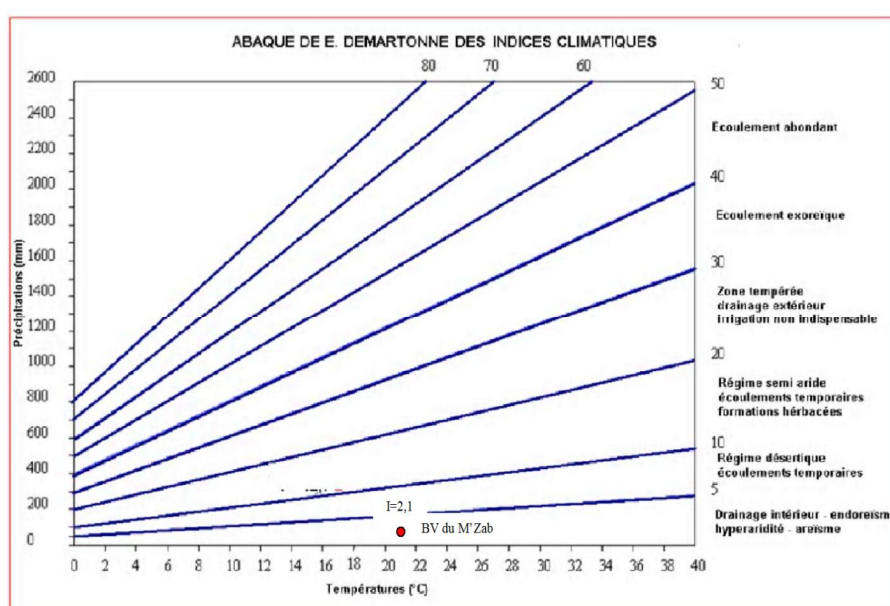
$$I = \frac{P}{T + 10} \dots\dots\dots \text{Eq: 1}$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles

T : Températures moyennes annuelles

Le classement suivant a été réalisé Selon la valeur de « I »



20<I<30: Climat Tempéré
10<I<20: Climat Semi Aride
7.5<I<10: Climat Steppique
5<I<7.5 : Climat Désertique
I<5 : Climat Hyperaride

Figure 1 : Abaque de E.DEMARTONNE des indices climatiques (Merabet, 2008)

L'indice d'aridité est de 2,10, cette valeur a été ensuite reportée sur l'abaque de E. Demartonne qui a permis de classer le climat du bassin versant du M'Zab dans la région « Hyperaride»

III.1.4 Température de l'air (O.N.M) :

En Algérie, la présence du Sirocco, un vent chaud et sec qui vient de Sahara, est caractéristique. Les températures maximales ont pour origine ce phénomène particulier, qui est accompagné par une humidité qui s'en trouve réduite.

L'analyse d'une série d'observation statistique enregistrée au niveau de la Wilaya de Ghardaïa, sur une période d'observation de 46 ans, a fait ressortir que la température moyenne mensuelle enregistrée, est de 22°C, comme il est indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Températures moyennes mensuelle sur une période d'observation (1998/2007).(Mellak 2009)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
T moy (°C)	16.7	19.6	22.5	27.4	33.2	38.1	43.1	41.1	35.3	27.9	21	18.6

III.1.5 Le vent (O.N.M) :

Les vents dominants d'été soufflent du Nord-est et sont forts et chauds tandis que ceux d'hiver soufflent du Nord-ouest et sont froids et humides. Les vents de sable sont très fréquents dans la région de Ghardaïa surtout pendant le printemps, ils soufflent du Sud-est ; environ 20 jours par an, en mois d'avril, mai et juin. Pour ce qui est du Sirocco dans la zone de Ghardaïa, on note une moyenne annuelle de 11 jours/ an pendant la période qui s'étend du mois de mai à septembre

Tableau 3 : Vitesse moyennes mensuelle de vent sur une période d'observation (1998/2007).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
vent (m/s)	3,7	4	4,4	4,8	4,5	4,4	3,7	3,4	3,5	3,2	3,1	3,5

III.1.6 L'humidité de l'air (O.N.M) :

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

Tableau 4 : Humidité moyennes mensuelle sur une période d'observation (1998/2007).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
H moy (%)	57	49	44	37	32	28	24	26	37	46	55	59

III.1.7 L'évaporation (O.N.M) :

Les valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation mesurées au niveau de la station de mesure de Ghardaïa (données issues de l'atlas climatologique national pour la période d'observation) sont les suivantes:

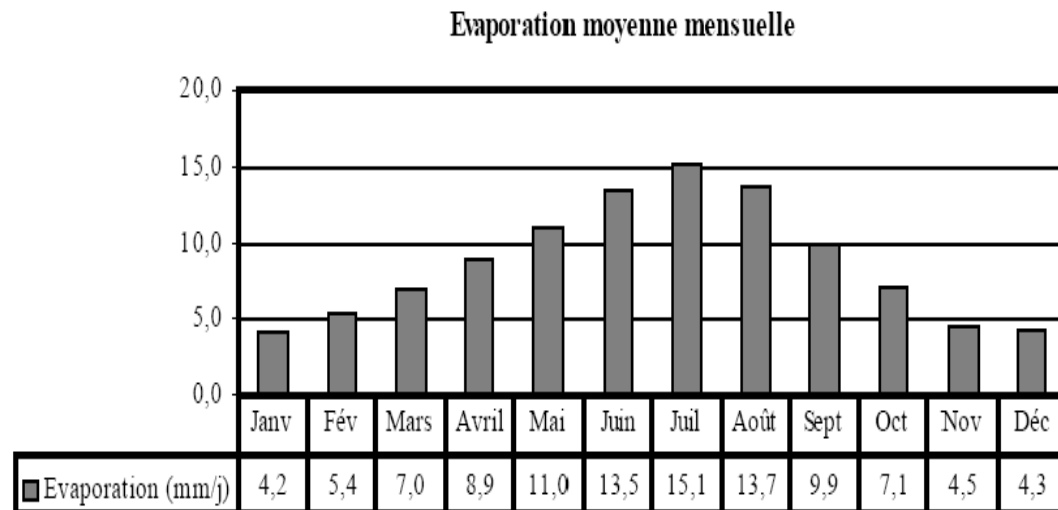


Figure 2 : Répartition mensuelle de l'évaporation sur une période d'observation (1998/2007).

La quantité d'eau évaporée dans la région de Ghardaïa est influencée par le degré de température et les vents et les précipitations, elle augmente quand ceux-ci augmentent et vice versa

L'évaporation des plans d'eau à ciel ouvert (E) peut être déterminée par la formule de **BOUTOUTAOU D.(1995)** appropriée aux conditions climatiques du sud de l'Algérie (**zones arides et semi-arides**) et exprimée par la relation suivante :

$$E = 0.403 n D^{0.73} [1 + 0.39V] \dots \dots \dots \text{Eq: 2}$$

E : évaporation des surfaces libres d'eau, mm.

n : nombre de jours (n =30 pour les calculs mensuels et n = 1 pour les calculs journaliers de l'évapotranspiration E).

V : vitesse du vent, (moyenne mensuelle) m/s ;

D : déficit de saturation de l'air, mb (millibars), donné par la relation suivante

$$D = 0.0632 (H-100) e 0.0632 (t) \dots\dots\dots \text{Eq: 3}$$

H : moyenne mensuelle d'humidité de l'air, % .

t : moyenne mensuelle de la température de l'air °C.

Le résultat de calcul des valeurs de l'évaporation est donné dans le tableau ci-après :

Tableau 5 : Evaporation moyenne mensuelle sur une période d'observation (1998/2007).

Caractéristique	Jan	fev	mar	avr	mai	juin	juil	aout	sep	oct	nov	déc	année
Nbre de Jours	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	*
H, %	57	49	44	37	32	28	24	26	37	46	55	59	*
Déficit mm	5,4	7,4	9,7	13,9	20,7	30,7	39,2	37,4	23,7	13,8	7,6	5,4	*
vent, m/s	3,7	4	4,4	4,8	4,5	4,4	3,7	3,4	3,5	3,2	3,1	3,5	*
Etp mm	104,7	124,8	178,8	237,3	314,7	399,8	443,9	408,8	288,0	190,7	117,6	101,6	2910

La valeur annuelle de l'évaporation est représentée par la somme des évaporations mensuelles :

$$E = 3000 \text{ mm / an}$$

III.1.8 Ensoleillement :

Les valeurs mensuelles moyennes de l'ensoleillement au niveau de la station de mesure de Ghardaïa (données issues de l'atlas climatologique national pour la période d'observation) sont les suivantes :

Ensoleillement moyen mensuel

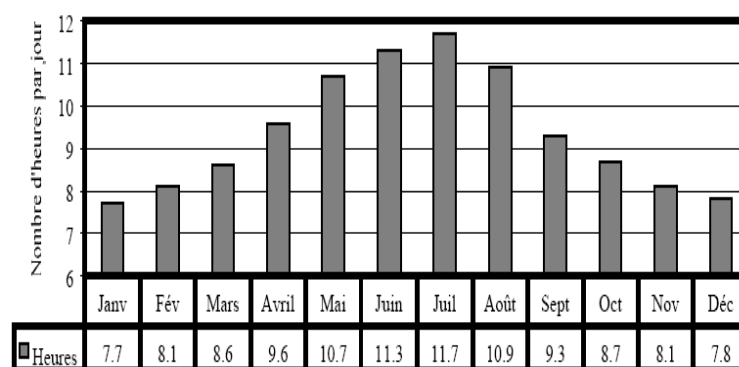


Figure 3 : Ensoleillement moyen mensuel.

III.1.9. Pluviométrie :

L'étude des averses revêt une importance capitale en hydrologie non seulement dans le dimensionnement des ouvrages en assainissement urbain et rural mais aussi dans l'étude des crues et la construction des hydro-grammes probables. La connaissance de la pluie maximale probable est indispensable voir obligatoire pour la détermination du ruissellement. La région connaît des précipitations aléatoires et orageuses provoquant la plupart du temps des crues très importantes. Les séries mises à notre disposition sont homogènes et indépendantes d'après le test d'homogénéité et de l'indépendance.

III.1.9.1 Carte Des Précipitations Moyenne Annuelles :

La carte des précipitations annuelles du SASS (2003) montre une répartition géographique (répartition spatiale) des précipitations caractérisée par une décroissance orientée essentiellement du Nord Est (100mm) vers le Sud Ouest (40mm).

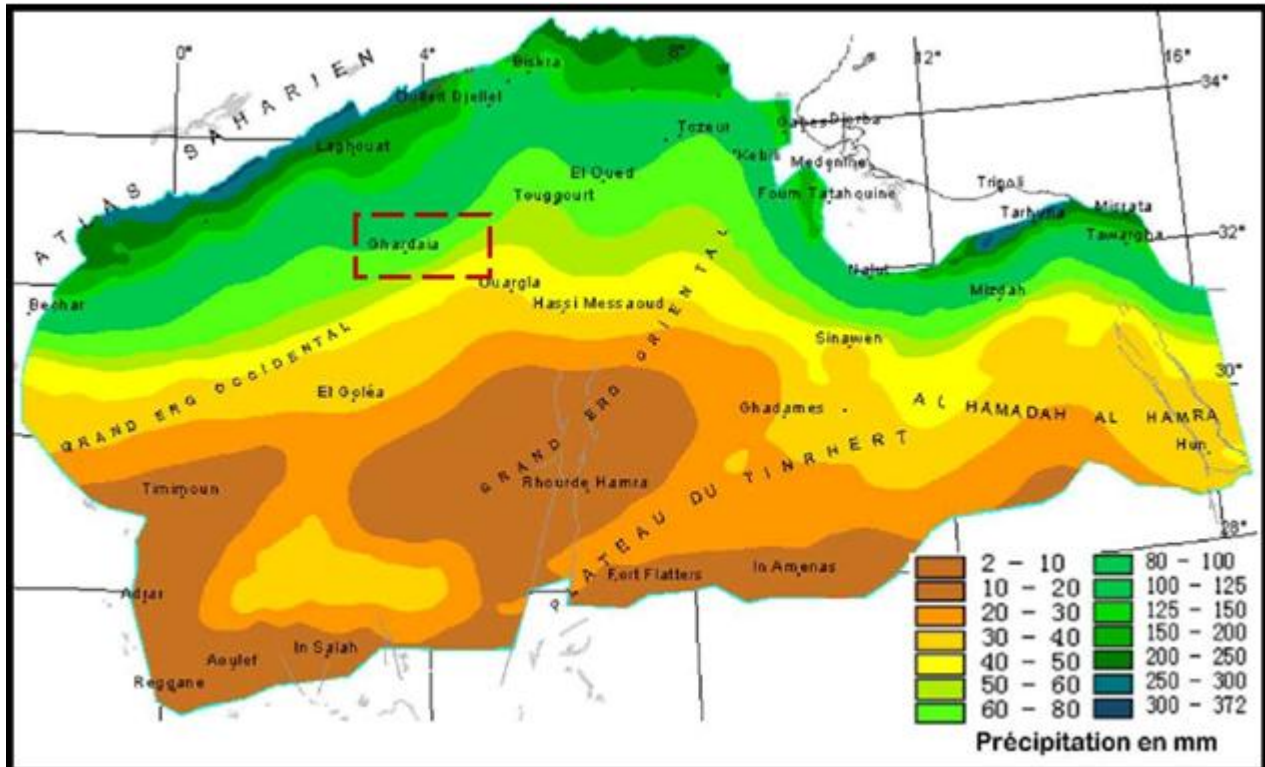


Figure 4 : Zone d'étude dans la carte des isohyètes dans le domaine SASS, source SASS 2003

La hauteur moyenne des précipitations atmosphériques, mesurée à GHARDAIA, est de 67mm sur la période de 1885 à 1994 seulement. Elles tombent essentiellement sous forme de pluies d'orage à l'automne et au printemps.

Certaines années (repartitions temporelle) ont une précipitation exceptionnelle (175mm en 1923), d'autres périodes à une sécheresse remarquable (1897 à 1907).

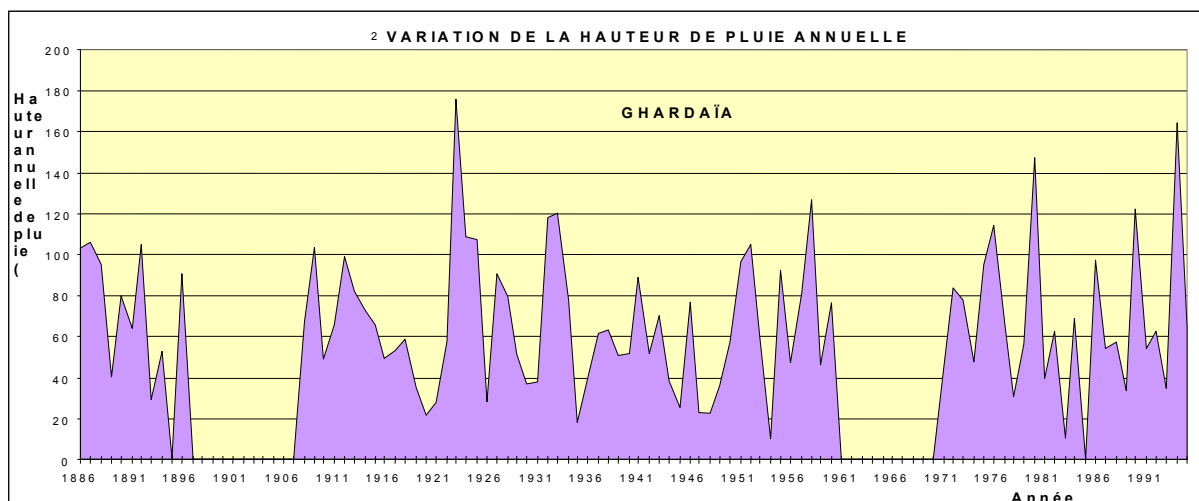


Figure 5 : Les précipitations moyennes annuelles à Ghardaïa entre 1885 à 1991(Roche)

III.1.9.2 Fiabilité des données

La figure suivante représente la fiabilité des données testées par le logiciel Hydrolab

			Droite de rég :		a=	0.284248	Moy. VT =	61.61	
			(VT=a VR+b)		b=	37.6048	E.T. VT =	30.38034	
			Coef de cor. :		r=	0.865794	Moy. VR =	84.45167	
			E. T. des rés. :		Seps=	15.20236	E.T. VR =	92.53581	
			Nb de couples:		n=	39			
			I.C.		à :	(Variable réduite de Gauss :)			
			98 %			u=	2.326785		
Anomalie	à tester	Référence	Reconst.	Résidus de	Nom	Cumul	Borne Sup.	Borne Inf.	
ponctuelle	VT	VR	var. à test.	régression	0	0	0	0	
r.a.s.	57.91	163.04	83.948564	-26.038564	1	-26.038564	35.372624	-35.372624	

Tableau 6 : Analyse des anomalies de la pluviométrie de station de Ghardaïa

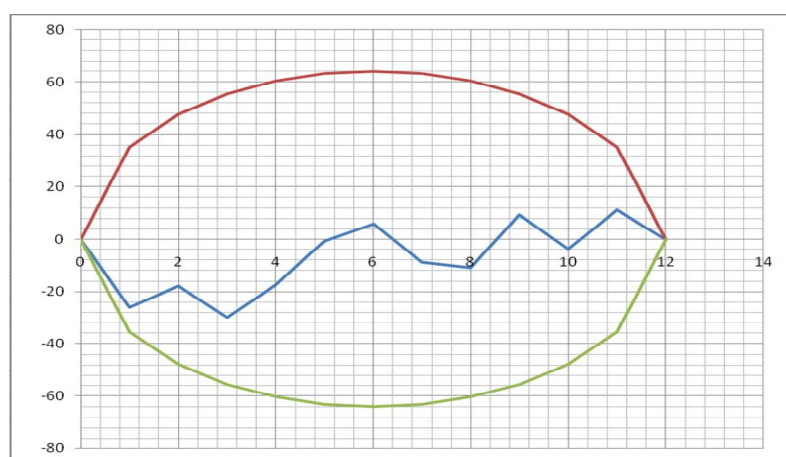


Figure 6 : représentation d'analyse des anomalies de la pluviométrie de station de Ghardaïa

La figure au dessus de l'analyse des anomalies montre que tous les points des données pluviométrique sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

III.1.9.3 Pluie journalière maximale (O.N.M) :

Le tableau suivant résume les résultats des Pluie journalière maximale de la station de Ghardaïa

Tableau 7 : Pluies journalières maximales observées à Ghardaïa (1979-2013).

Année	Pluie journalière maximale (mm)	Année	Pluie journalière maximale (mm)
1975	24,7	1993	11,9
1976	17,2	1994	54,8
1977	17,9	1995	30,0
1978	11,3	1996	12,0
1979	18,6	1997	23,0
1980	46,5	2000	18,0
1981	13,0	2001	18,0
1982	9,4	2002	24,0
1983	2,9	2003	33,0
1984	20,2	2004	46,0
1985	6,8	2005	7,0
1986	36,6	2006	16,2

1987	8,8	2007	10,0
1988	8,9	2008	23,0
1989	6,7	2009	13,1
1990	27,9	2010	8,6
1991	10,9	2011	18
1992	12,6	2012	6.5
1998	3,5	2013	23
1999	26,0	2014	/

N : Taille de la série.= 40 ans ;

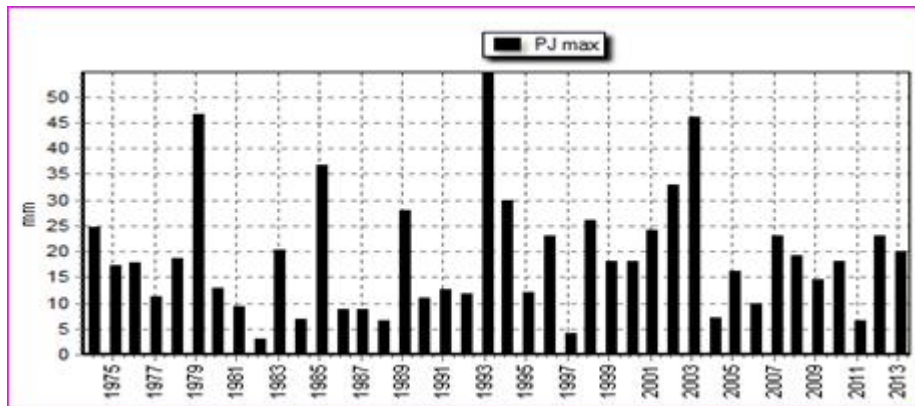


Figure 7 : Répartition des pluies journalières maximales PJ max de 1975 à 2013.

Selon la figure ci-dessus nous constatons que les années de Pjmax sont les années 1980 et 1994 et 2004

III.2 ANALYSE STATISTIQUE DE PLUIE

Pour l'étude des précipitations, nous avons besoin d'une série pluviométrique qui comporte les précipitations maximales journalières pour la période la plus longue possible.

Nous prenons comme base de calcul la série pluviométrique de la station expérimentale de Ghardaïa

La série a une période de fonctionnement de 1975 à 2013 qui a été fournie par l'Office

Nationale de la Météorologie (ONM).

III. 2.1 Estimation des pluies journalières maximales :

L'étude fréquentielle des pluies journalières maximales de la station de Ghardaïa, a pour but l'estimation des valeurs limites atteintes pendant une période de retour donnée. Ceci nous ramène à chercher la loi d'ajustement la mieux adaptée à la distribution des pluies. Les pluies maximales journalières de rares fréquences sont des pluies génératrices des crues d'importants débits.

III. 2.2 Les précipitations maximales journalières :

L'étude consiste à faire un ajustement pour la série de données des précipitations maximales journalières par une loi théorique convenable avec notre région d'étude afin de déterminer une intensité de pluie de chaque période de retour.

Pour notre étude on passe par les étapes suivantes :

- Classer la série des précipitations par ordre croissant.
- Calcul de la fréquence expérimentale.
- Calcul des caractéristiques empiriques de la série de donnée.
- Ajuster graphiquement à la loi choisie.
- Calculer le quantile et son intervalle de confiance.

III.2.3 Choix de la loi d'ajustement :

Comme il existe plusieurs méthodes d'ajustement des séries pluviométrique, l'efficacité d'une méthode d'estimation dépend de la loi de probabilité, de la taille de l'échantillon et de certaines caractéristiques de l'échantillon. Toutefois, de nombreuses études comparatives, autant empiriques que théoriques, ont été menées afin de déterminer dans quelles circonstances une méthode d'estimation est la plus efficace pour une loi donnée.

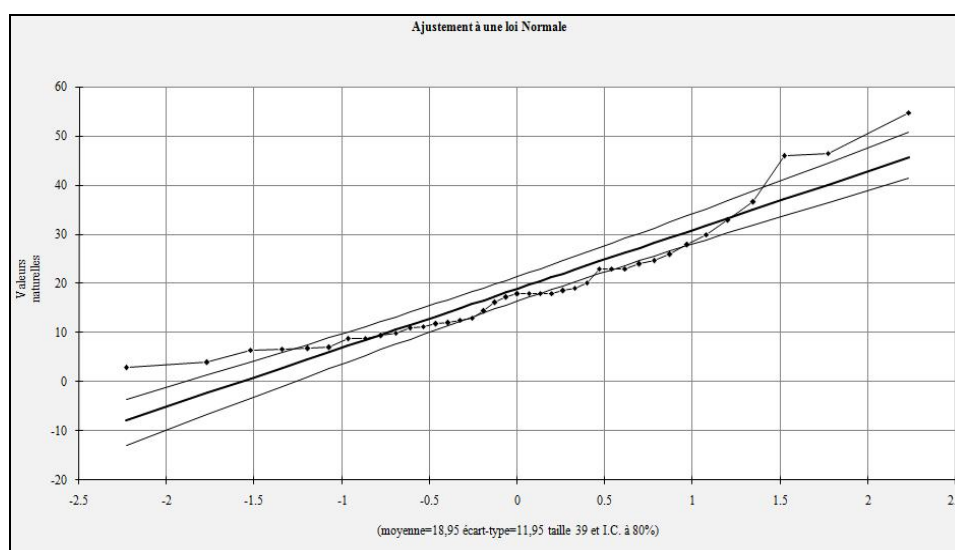


Figure 8 : ajustement a une loi Normale

L'ajustement à la loi Normal ne donne pas de bon résultat, la courbe sort à l'extérieur de l'intervalle de confiance .

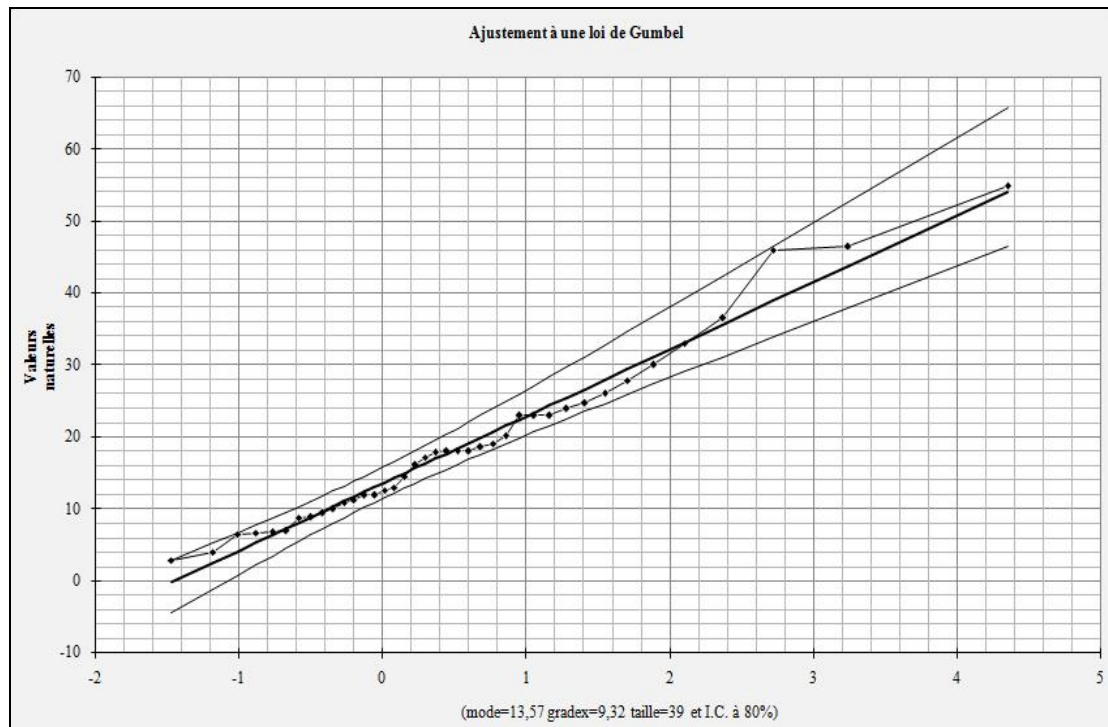


Figure 9 : Ajustement a une loi de Gumbel

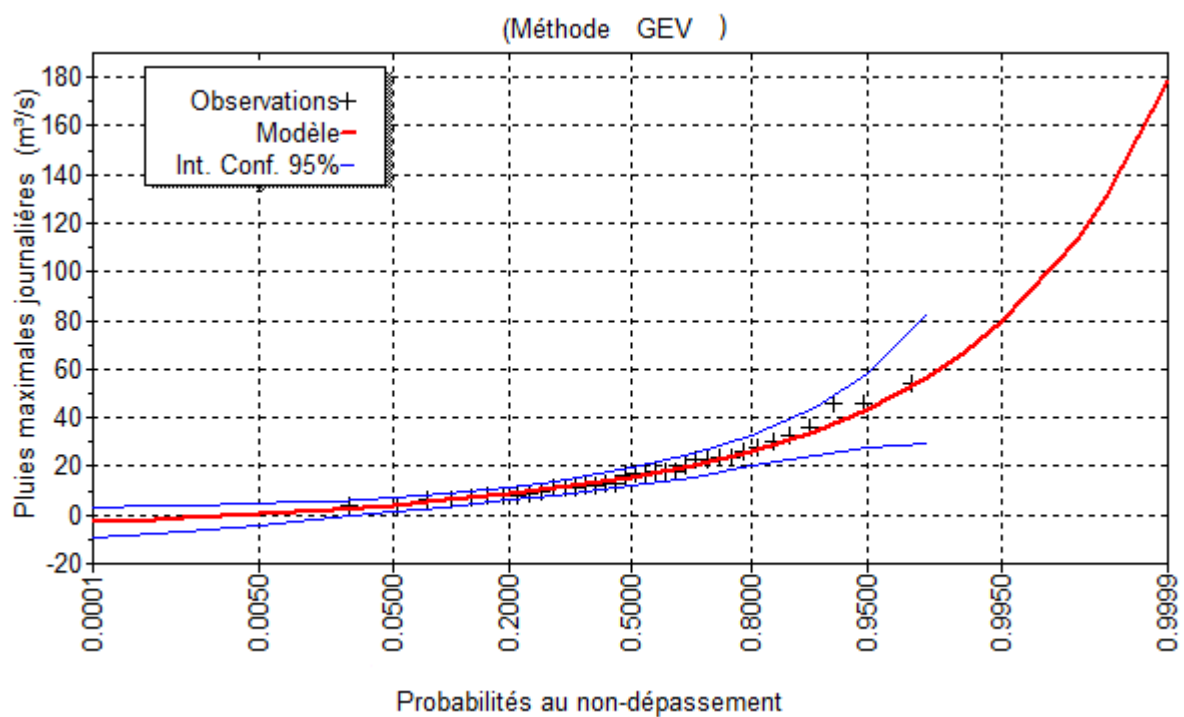


Figure 10 : ajustement a loi de GEV

Nous remarquons que la loi de **Gumbel** et la loi **GEV**, la courbe passe l'intérieur de l'intervalle de confiance.

Tableau 8 : Résultat de l'ajustement par la loi de GEV.

Période de retour (ans)	Probabilité (q)	XT : valeurs extrêmes	Ecart type	Intervalle de confiance (95%)
10000	0.9999	178	133	N/D
1000	0.999	120	57.6	N/D
200	0.995	79.5	28.4	N/D
100	0.99	69.9	20	N/D
50	0.98	56.3	13.7	29.5 - 83
20	0.95	43.3	7.75	28.1 – 58.5
10	0.9	34.5	4.9	24.9 – 44.1
5	0.8	26.3	3.15	20.1 – 32.4
3	0.6667	20.4	2.35	15.7 - 25
2	0.5	15.5	1.85	11.9 – 19.1

GEV (Maximum de vraisemblance) et Nombre d'observations : 39 ans.

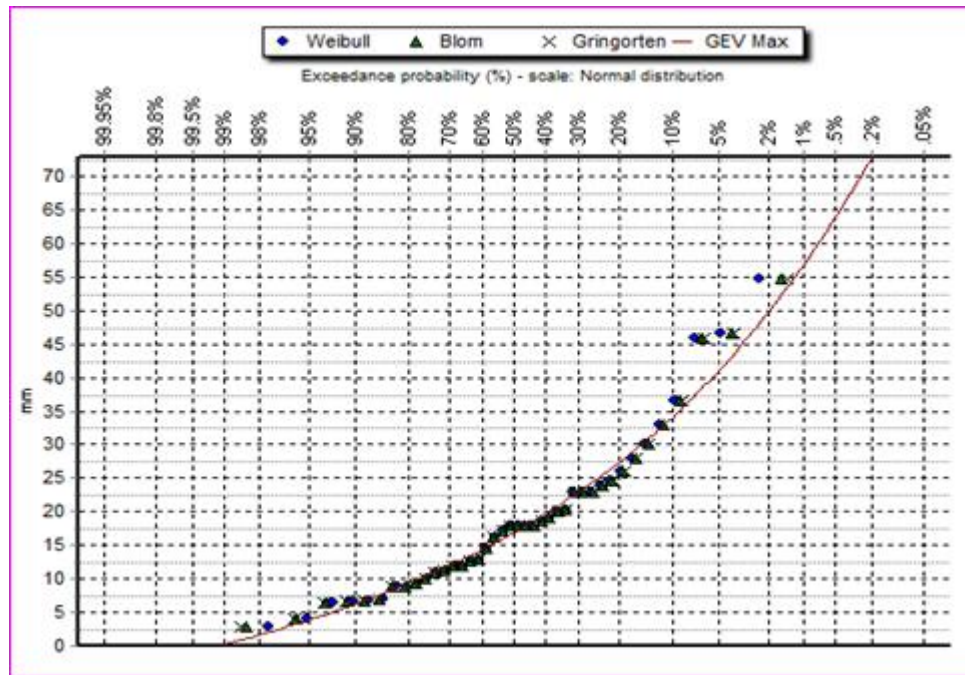


Figure 11 : Ajustement à la loi de GEV

D'après les résultat de l'ajustement ; on trouve que la série des pluies maximales journalières suit la loi de GEV et la loi de Gumbel parce que tous les points sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance. Saut au-delà de $T = 100$ ans, le programme ne peut nous donner les intervalles de confiance.

III.3 TEST D'AJUSTEMENT PAR LE LOGICIEL HYDROGNOMON 4

III.3.1 Test de Chi – Carré.

Le plus connu des tests d'adéquation, bien que peu puissant, il offre l'avantage de fournir une réponse interprétable en terme de probabilité. Il nécessite un découpage en classes ou en groupes et que selon la manière de faire ces classes, les résultats peuvent se situer de part et d'autre d'un seuil de signification.

L'échantillon d'observations étant découpé en k classes, n_i et e_i désignent pour chacune des k classes, les effectifs observés et théoriques pour la distribution de référence, la méthode suppose qu'aucun des effectifs e_i n'est inférieur à 5. Sous l'hypothèse d'adéquation, la quantité :

$$\chi_{ob}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i}$$

Peut être considérée comme une valeur observée d'une variable aléatoire ayant une distribution de χ^2 à $\nu = k - c - 1$ degrés de liberté, c est le nombre de paramètres de la loi de référence qui ont été estimés à l'aide des observations.

Pour un niveau signification α , l'adéquation de la loi est acceptée si : $\chi_{ob}^2 \leq \chi_{\nu, \alpha/2}^2$

Les valeurs de $\chi_{\nu, \alpha/2}^2$ sont tabulées en fonction du ν et de la probabilité $p = \alpha/2$.

III.3.2 Test de Kolmogorov – Smirnov.

La mise en œuvre du test KS de Kolmogorov – Smirnov, nécessite le calcul de la statistique observée :

$$D_{ob} = \max |F_i - F(x_{(i)})|_{i=1, \dots, n}$$

Pour un niveau de signification α %, l'adéquation de la loi est acceptée si $D_{ob} \leq D_{n, \alpha}$, où $D_{n, \alpha}$ c'est la statistique de Kolmogorov – Smirnov.

Les valeurs de $D_{n, \alpha}$ pour les niveaux de signification 1 et 5 % sont données dans le Tableau 16 en fonction de la taille n de l'échantillon (Birnbbaum, 1952).

Tableau 9: Valeurs des quantiles de Kolmogorov – Smirnov.

n	$D_{n, 0.05}$	$D_{n, 0.01}$	n	$D_{n, 0.05}$	$D_{n, 0.01}$
15	0.338	0.404	20	0.294	0.356
16	0.328	0.392	25	0.270	0.360
17	0.318	0.381	30	0.240	0.290
18	0.309	0.371	35	0.230	0.270
19	0.301	0.363	> 35	$1.36/n^{0.5}$	$1.63/n^{0.5}$

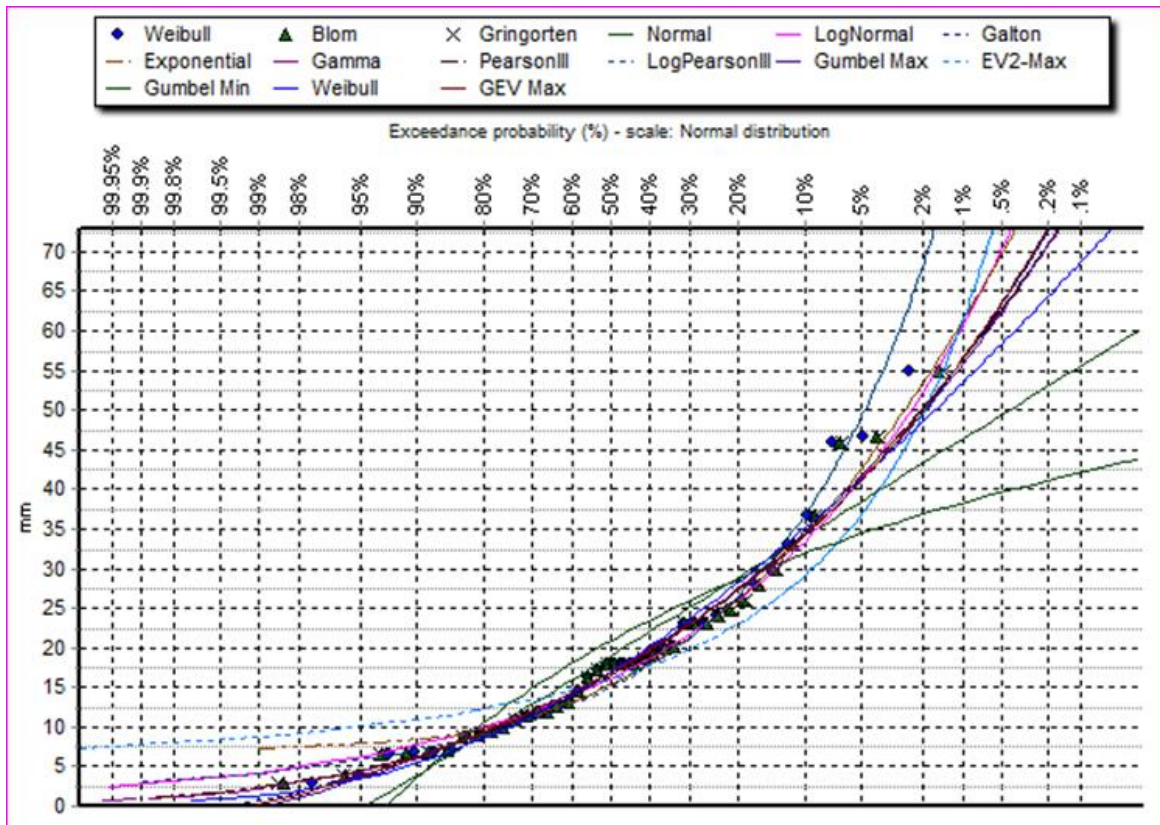


Figure 12 : le choix de la loi Ajustement

Kolmogorov-Smirnov test for: All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60.8106%	0.11722
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	62.9056%	0.11525
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.3544%	0.08522
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9826%	0.05065
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	69.2963%	0.10925
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	64.6771%	0.11358
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.7928%	0.05879
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.7094%	0.06023
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9126%	0.11806
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9920%	0.04869
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	7.92001%	0.19774
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	11.7308%	0.18512
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.7529%	0.05953
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9901%	0.04922
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.8707%	0.06731
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	12.7035%	0.18245
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.7842%	0.07190
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.5383%	0.07271
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.9880%	0.04969
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	16.9842%	0.17239
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	11.7972%	0.18493
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.8065%	0.05851
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	41.0223%	0.13716
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.4362%	0.08190
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	30.6232%	0.14985
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.2568%	0.08536
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	31.9827%	0.14804

Figure 13 : teste des résultat d'ajustement par la méthode Kolmogorov-smirnov

Commentaire :

Les analyses statistiques des pluies effectuées montre que les meilleurs loi d'ajustement sont celle de Gumbel et celle de GEV (Generalized extrême values) les valeurs extrêmes généralisées.

III.4 CONSTRUCTION DES COURBES IDF :

III. 4.1 Pluies de courtes durées de différentes fréquences et leur intensités :

Pour une période donnée (24 h) et une fréquence donnée, on peut estimer les pluies de courtes durées par la loi de BODY.

$$P_{\%}(t) = P_{j\%} (T/24)^b \quad \text{..... Eq: 4}$$

P_%(t) : Pluie fréquentielle de durée t.

P_{j%} : Pluie journalière fréquentielle ;

t: durée de l'averse ;

b : Exposant climatique → b = 0,15 pour la station de Ghardaïa

Les calculs ont donné les résultats suivant :

Tableau 10: Pluies de courtes durées pour différentes périodes de retour.

Durée de l'averse (heure)	Période de retour (an)							
	2	5	10	20	50	100	1000	10000
0,25	8,72	14,32	18,05	21,63	26,22	29,70	41,06	52,50
0,50	9,68	15,89	20,03	24,00	29,09	32,96	45,56	58,26
0,75	10,29	16,89	21,29	25,51	30,92	35,02	48,42	61,91
1	10,74	17,63	22,23	26,63	32,28	36,57	50,55	64,64
2	11,92	19,56	24,66	29,55	35,82	40,57	56,09	71,72
4	13,22	21,71	27,36	32,79	39,74	45,02	62,24	79,58
6	14,05	23,07	29,08	34,85	42,24	47,84	66,14	84,57
12	15,59	25,60	32,26	38,66	46,87	53,08	73,39	93,84
24	17,30	28,40	35,80	42,90	52,00	58,90	81,43	104,12

III.4.2 Intensités maximales de courte durée :

L'intensité moyenne d'une averse s'exprime par le rapport entre la hauteur de pluie observée et la durée t de l'averse :

$$I_{\text{moy}} = \frac{H}{t} \quad \text{..... Eq: 5}$$

Ou, Imoy : est l'intensité moyenne de la pluie (mm/h)

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

$$I_{\text{max}} = \frac{H_{\text{max}}}{t} \quad \text{..... Eq: 6}$$

Ou, Imax : est l'intensité maximale de la pluie (mm/h) ;

Cette notion d'averse est très importante en milieu urbain pour la détermination des débits des eaux pluviales et des petits bassins versants pour l'évaluation des débits de crues.

Tableau 11 : Intensités maximales de durée t (h) et de période de retour T (an).

Durée de l'averse (heure)	Période de retour (an)							
	2	5	10	20	50	100	1000	10000
0,25	34,90	57,28	72,21	86,53	104,89	118,80	164,25	210,02
0,50	19,36	31,78	40,06	48,01	58,19	65,91	91,12	116,51
0,75	13,72	22,52	28,38	34,01	41,23	46,70	64,56	82,55
1	10,74	17,63	22,23	26,63	32,28	36,57	50,55	64,64

2	5,96	9,78	12,33	14,78	17,91	20,29	28,05	35,86
4	3,31	5,43	6,84	8,20	9,94	11,25	15,56	19,90
6	2,34	3,84	4,85	5,81	7,04	7,97	11,02	14,10
12	1,30	2,13	2,69	3,22	3,91	4,42	6,12	7,82
24	0,72	1,18	1,49	1,79	2,17	2,45	3,39	4,34

III. 4.3 Construction des courbes IDF :

Les courbes Intensité -Durée - Fréquence IDF sont construites dans le but de permettre, de synthétiser l'information pluviométrique au droit de la station représentative de la zone d'étude et, d'autre part de calculer succinctement les débits de projet et d'estimer les débits de crue et des eaux pluviales tout en définissant la pluie de projet de type uniforme caractérisée par une intensité constante pour toute sa durée. A partir des résultats obtenus au tableau précédent, il est alors possible de les représenter graphiquement dans le but de tracer les courbes IDF pour les temps de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100, 1000, et 10000 ans

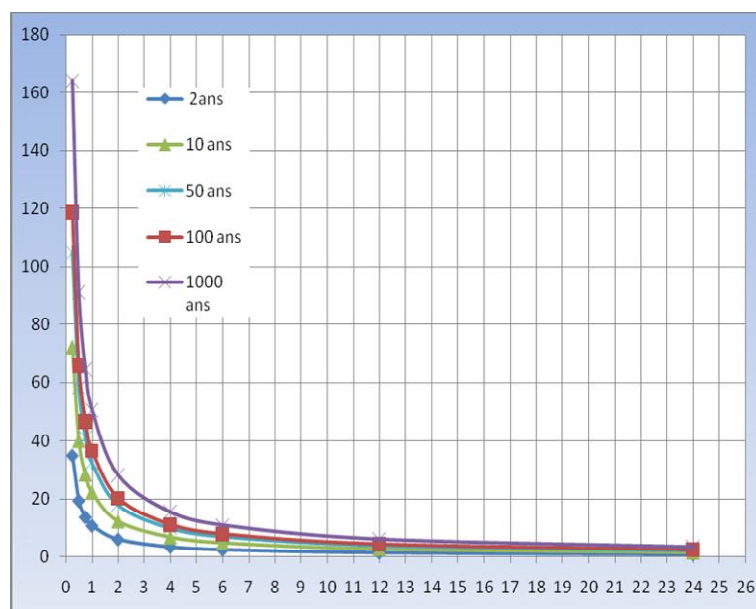


Figure 14: Courbes IDF « Intensité – Durée – Fréquence ».

On peut conclure que dans le tableau suivant les pluie journalières maximales fréquentielles

Tableau 12 : Pluie maximale journalière fréquentielle, Station Ghardaïa

Période de retour T (ans)	10	20	50	100
Pmaxj (mm)	54.3	63.8	75	82.9

III.4.5 Pluies de courtes durées et courbes HDF-IDF (méthode de Bennour)

Pour mieux caractériser l'écoulement fluvial extrême ayant trait aux crues, il faut descendre à l'échelle des pluies horaires pour une analyse complète des phénomènes avers-crues, dans le bassin. L'estimation des pluies de courtes durées par dépouillement et calage de la pluviométrie locale n'est pas possible en raison d'insuffisance de données. Donc en l'absence des données suffisantes, des formules empiriques pour l'estimation des pluies de courte durée sont utilisées.

- Pluies de courtes durées selon la formule de Bennour (1993)

Bennour (1993) utilise une relation « développée pour les régions sahariennes », donnant la hauteur de pluie de fréquence donnée pour une durée donnée:

$$P_{t,p\%} = P_{\max j,p\%} * 0,55 * t^{0,25} \quad \dots\dots\dots \text{Eq: 7}$$

Où

$P_{\max j,p\%}$: Pluie maximale journalière de probabilité donnée ;
 $P_{t,p\%}$: Pluie de courte durée de probabilité donnée ;
 t : est la durée en heure.

Les hauteurs et les intensités de pluies de courtes durées obtenues par application de la formule de Bennour



Figure 15 : Courbes Hauteur-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) selon la formule de Bennour.

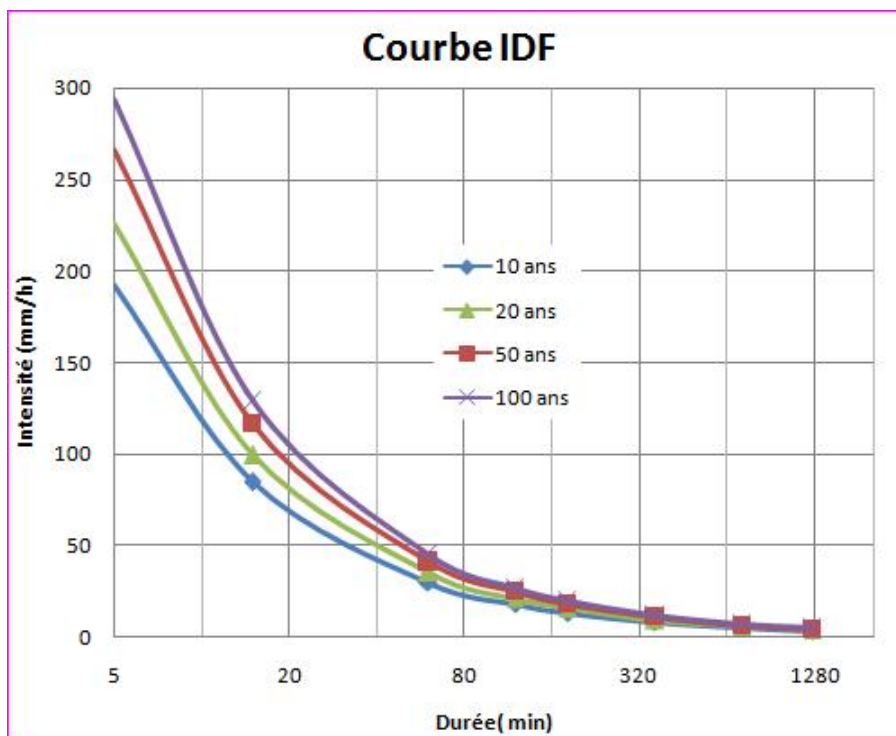


Figure 16 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence (Station de Ghardaïa) selon formule de Bennour

III.5 HYDROGRAMME DE CRUE:

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

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

III.5.1 construction hydrogramme de crue

Avant de présenter la méthode, voici les principales caractéristiques d'un hydrogramme de crue

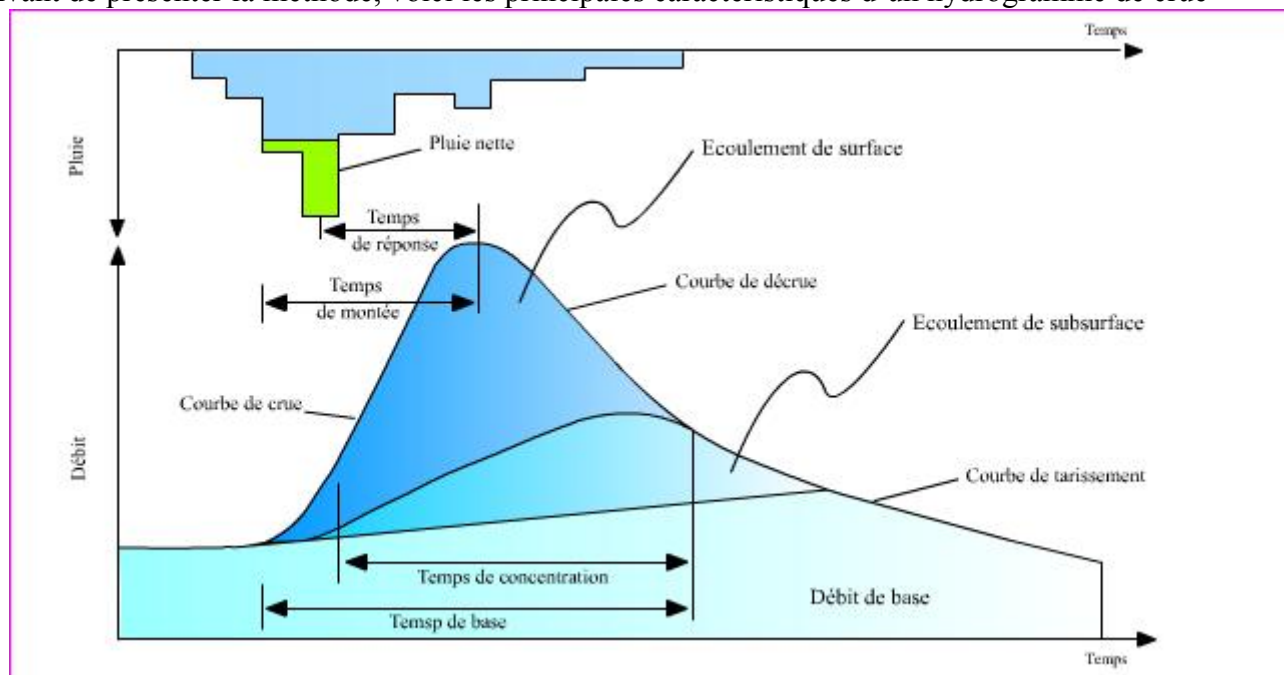


Figure 17 : Caractéristiques d'un hydrogramme de crue (<http://echo2.epfl.ch/e-drologie>)

Sur cet hydrogramme, on peut distinguer par ordre de chronologie :

- La courbe de concentration ou courbe de montée (*correspondant au temps de montée*)
- La pointe de l'hydrogramme ou débit de pointe ;
- La courbe de décrue (*diminution du débit ruisselé*) ;
- La courbe de tarissement (*le ruissellement est terminé : l'écoulement hypodermique et souterrain alimente le réseau hydrographique*) ;
- Le temps de montée (*entre le début du ruissellement direct et la pointe de la crue*) ;
- Le temps de réponse ou « lag » (*entre le centre de gravité de la pluie dite « efficace » (autrement dit la portion de la pluie qui se transforme totalement en écoulement) et la pointe de l'hydrogramme*;
- Le temps de base ou durée du ruissellement (*entre le début de la pluie efficace et la fin du ruissellement*) ;
- Le temps de concentration (*entre la fin de la pluie efficace et la fin du ruissellement direct*) ;

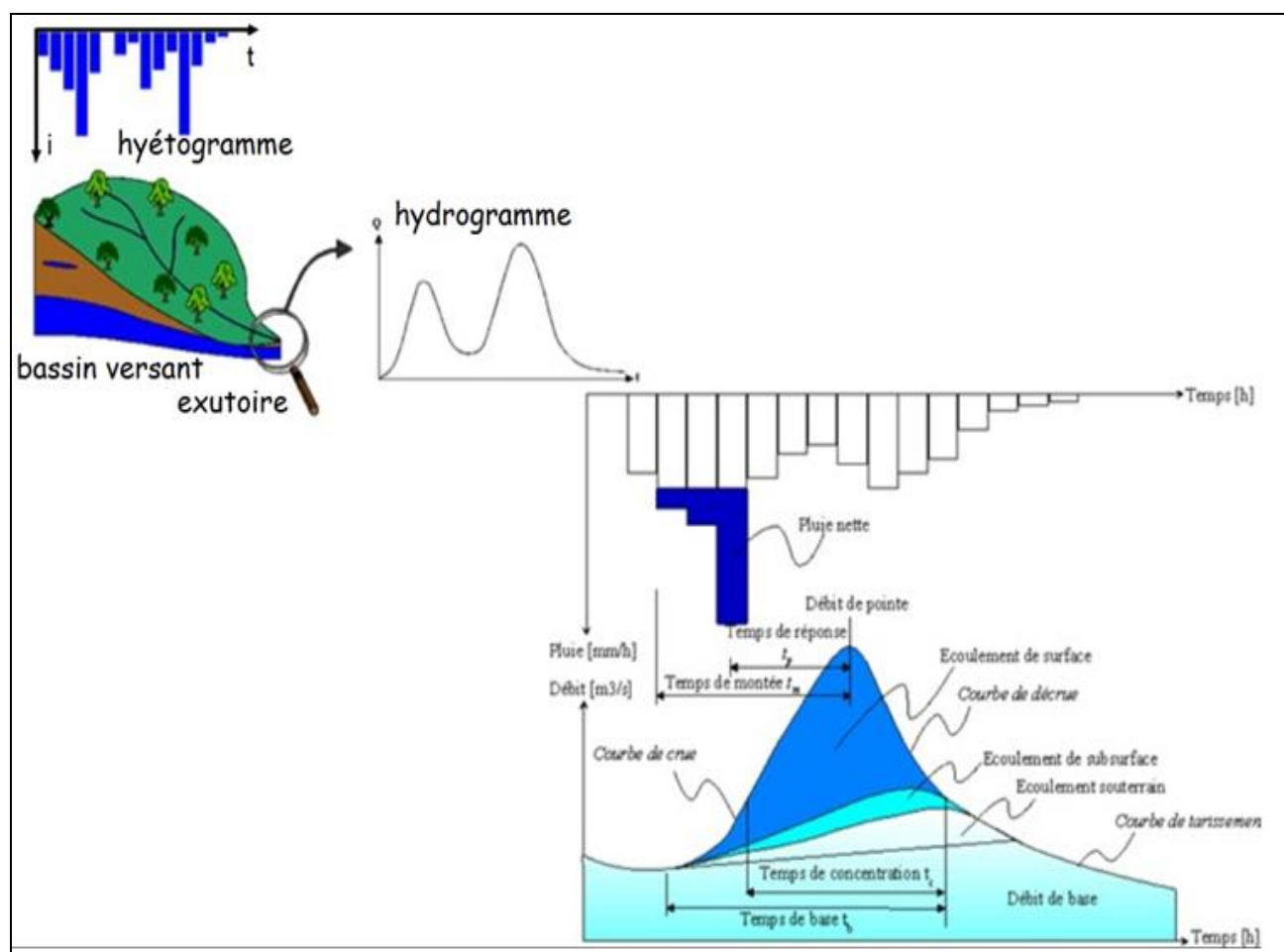


Figure 18 : Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un événement pluie-débit
(<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre11/chapitre11.html>/20/04/2015)

III.5.2. Présentation de la méthode

Pour la construction d'un hydrogramme de crue, la méthode de Sokolovski permet de calculer les débits lors de la crue, et lors de la décrue. a. Débits de montée Pour la crue, le débit se calcule comme suit :

$$Q_t = Q_{\max} * (t/t_m)^2$$

Où, t_m est le temps de montée de la crue, qui selon Sokolovsky, peut être égal au temps de concentration t_c

Pour la décrue, le débit par contre se calcule avec une autre méthode :

$$Q_t = Q_{\max} * ((t_d - t')/t_d)^3$$

Avec, $t' = t - c$ et $t_d = \gamma * t_m$

γ étant un coefficient qui est fonction de la taille du bassin versant et de la perméabilité du sol, et a pour valeurs :

$\gamma = 2$ pour les bassins versants dont la superficie est inférieure à 5 km².

$\gamma = 2$ à 3 pour les bassins versants non boisés.

$\gamma = 3$ à 4 pour les grands bassins versants boisés et perméables.

Pour le bassin versant de la vallée du M'Zab, γ prend une valeur de 2,5

Donc : $t_d = 2,5 * t_m$

III.5.3 Estimation de la crue de 2008 :

Pour la détermination du débit de crue de l'année 2008, nous avons procédé au relevé de laisses de cette crue qui s'est déclenchée principalement de notre oued.

III.5.4 Relevé de laisses de crue :

Le relevé de laisses de crue consiste à identifier sur le terrain les traces physiques laissées par les eaux après la crue. Les levés servent par la suite à délimiter les zones inondées.



Figure 19 : laisses des crues à six (06) mètres

Cette évaluation est bien sûr peu précise mais permet d'obtenir rapidement un ordre de grandeur. Dans la mesure du possible, il est relevé un repère de crue sur chaque rive de manière à recouper l'information. Sur terrain, nous avons effectué le relevé de trois sections transversales pour pouvoir comparer les résultats obtenus à partir de chaque section.

III.5.5 Conditions d'application de la formule de Manning – Strickler :

L'utilisation de la formule du type **Manning – Strickler** nécessite :

- Une section transversale régulière ;
- Des alignements droits ;
- Des zones où le lit du cours d'eau est unique ;
- L'absence d'un confluent ;

III.5.6 La formule de Manning – Strickler :

$$Q = 1/n \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot S \dots\dots\dots \text{Eq: 8}$$

Avec:

n : Coefficient de Manning – Strickler qui dépend de la nature du lit du cours d'eau.

R_h : rayon hydraulique en mètre;

S : surface mouillée en mètre carré;

P : périmètre mouillé en mètre;

I : pente du fond du lit ;

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Le calcul du débit max se fait avec la formule de Manning-Strickler sur une section au niveau du pont d'Ahbes Jdid au niveau de l'entrée de la ville de Ghardaïa et de l'entrée de la palmeraie. La formule s'écrit comme suit :

$$Q = K_s \cdot R_h^{0.66} \cdot I^{0.5} \cdot S_m$$

Où, Q : est le débit max traversant la section (m^3/s);
 K_s : le coefficient de rugosité ;
 R_h : rayon hydraulique (m);
 I : la pente du terrain
 S_m : la section mouillée (m^2).

a-Calcul du débit dans la section d'entrée de la palmeraie

Grace aux laisses de crue sur les murs des maisons, et aux levées topographiques, la section mouillée S_m a pu être calculée en découpant la forme géométrique de la section en plusieurs rectangles facilement calculable.

Le rayon hydraulique R_h est égal au rapport de la section mouillée au périmètre mouillé, le périmètre mouillé a été calculé à l'aide de profil en travers, et égale à 280 m, d'où : $R_h = 2,57m$;

La pente géométrique, I , est égale à 0,002;

Le coefficient de rugosité de l'Oued M' Zab a été estimé par BG à : $K = 23$.

Le débit max au niveau de l'entrée de la palmeraie est égal à : $Q = 1355,86 m^3/s$

b- Calcul du débit dans la section au niveau du pont d'Ahbes Jdid

La section mouillée S_m a été calculée par rapport aux laisses de crue d'une hauteur de 6m, de deux maisons distantes de 58,5 m, disposées aux deux extrémités de la section.

Le rayon hydraulique R_h est égal à 6 m, vu que la section est rectangulaire, et que la hauteur est négligeable par rapport à la largeur.

La pente géométrique, I , est égale à 0,003.

Le coefficient de rugosité de l'Oued M' Zab a été estimé par BG à $K = 23$.

D'où le débit max qui passe par le pont d'Ahbes JDID est égal à : $Q = 1255 m^3/s$

On remarque que les hypothèses de la formule de **Manning – Strickler** sont grossièrement et difficilement vérifiées sur le terrain et que réellement l'écoulement hydraulique dans un oued est considéré comme un écoulement bidimensionnel d'un côté et de l'autre côté que les traces de l'eau laissées sur les rives par le passage des crues sont difficilement identifiables avec précisions, ce qui nous poussent à se retrouver dans une situation peu enviable où les résultats calculés nous semblent risqués et moins sécurisant.

III.6 TRANSPORT SOLIDE :

Le transport solide dépend de l'étendue, du relief du bassin versant, de la nature géologique des sols et de leur résistances à l'érosion, liée elle même à la couverture végétale, au régime des pluies et des températures. Le transport solide et le charriage du fond permettent la détermination du volume mort en fonction de la durée de vie de la retenue.

L'emploi des formules empiriques est inadéquat en raison de la particularité de leurs domaines d'applications. En conséquence, le volume mort sera important voir controuvé. A cet égard, nous procédons à l'analogie de d'autres bassins arides ou semi arides.

III.6.1 Analogie :

L'évaluation du transport solide s'est élaborée à partir de mesures faites sur d'autres bassins versants arides ou semi arides dans d'autres régions en appréciant les différences possibles avec Ghardaïa au

niveau de l'érodabilité du bassin. Cette étude a proposé une concentration moyenne de **5 g/l** de matières en suspension et à un charriage de fond équivalent en poids au transport en suspension.

L'évaluation des apports liquides a été faite en ne considérant que les pluies dont l'intensité est suffisante pour provoquer un écoulement et en leurs appliquant un coefficient de ruissellement inférieur à 1.

Selon des observations faites sur les précipitations, seules les pluies journalières supérieures à **5 mm**, qui représentent **50 %** des précipitations totales (**70 mm/an**), soit environ **35 mm/an**, déclenchent un écoulement ; au niveau des intensités, ce sont les pluies d'intensité moyenne supérieure à **2 mm/h**, et de hauteur supérieure à **5 mm**, soit environ **30 mm/an**, qui sont susceptibles de déclencher un écoulement. Le coefficient de ruissellement pour une pluie centennale et une superficie de 100 km² est de **50 %** environ. Ce coefficient diminue pour des événements pluvieux plus fréquents et pour des superficies de bassin versant plus grandes. (*Bonnard & Gardel Bureau d'étude Suisse, 1996*)

Pour un calcul prudent de ces apports solides, on a finalement retenu une hauteur de précipitation annuelle conduisant à un écoulement de **35 mm** et un coefficient de ruissellement de **50 %**. Ces valeurs définissent un apport de matières en suspension pendant une durée de **50 années** de :

$$\begin{aligned} \text{MES}_{50} \text{ en (Tonnes)} &= S \text{ (km}^2\text{)} \times 50 \% \times 35 \text{ mm} \times 5 \text{ g/l} \times 50 \text{ années} \\ \text{Vmort} &= \text{MES}_{50} / \gamma_s \dots (\text{m}^3)\dots \end{aligned}$$

$$\text{Avec, } \gamma_s = 1,62.$$

III.7 CONCLUSION DE L'ANALYSE STATISTIQUE

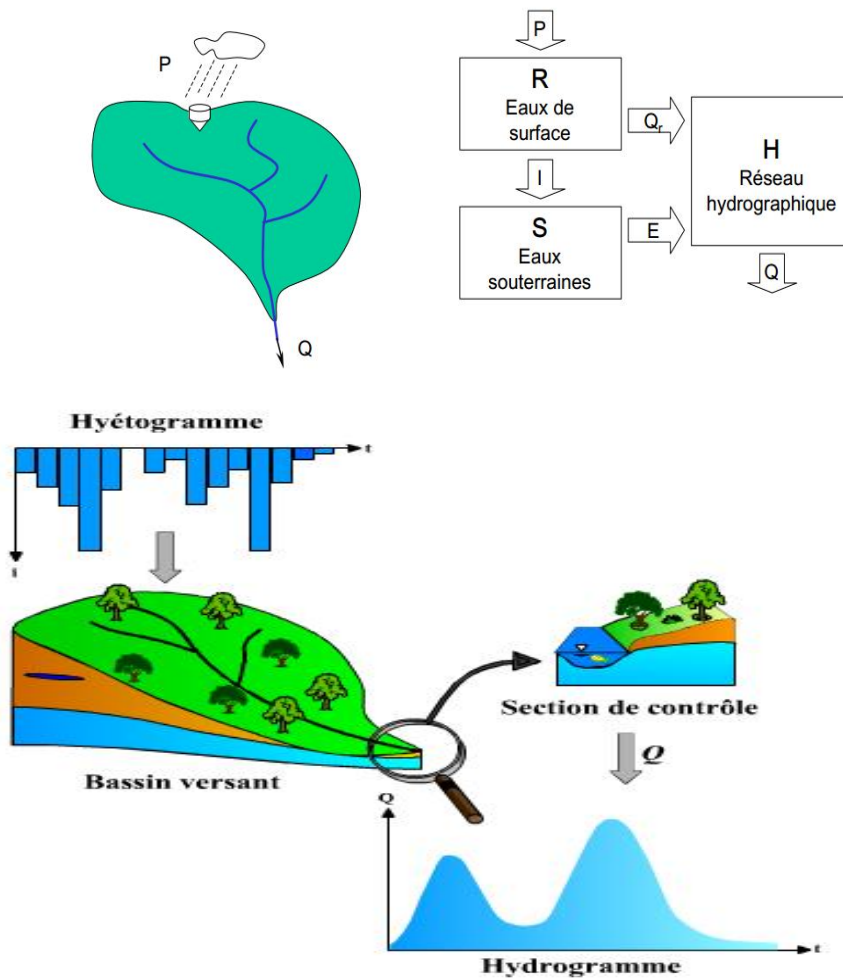
Suite à l'analyse statistique des pluies maximales nous aboutissant à la détermination de :

- *La pluie maximale journalière est de = 83 mm*

CHAPITRE IV

MODELISATION

HYDROLOGIQUE



CHAPITRE IV : MODELISATION HYDROLOGIQUE

IV.1. LES MODELES HYDROLOGIQUES

Un modèle est une représentation qui décrit les relations entre les différents éléments d'un système. En particulier, un modèle hydrologique de bassin versant est une représentation simplifiée du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant, afin d'expliquer la réponse du bassin aux différentes conditions auxquelles il est soumis.

La représentation de tout ou partie du cycle de l'eau (démarche de modélisation) à des fins variées, se heurte à la difficulté d'appréhension, de description ou de compréhension des phénomènes et des systèmes étudiés. Par conséquent, les représentations de ces systèmes, c'est à dire des modèles, sont nécessairement simplificatrices, réductrices de la complexité naturelle, et donc grossièrement inexactes.

Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la moins inexacte possible.

Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments (Perrin, 2000) :

- a.** le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, qui en définissent l'objet et ses limites (spatiales ou temporelles). La connaissance du système est conditionnée par la mesure de ses caractéristiques et l'acquisition de données sur les flux, les stocks et les transformations de phase.
- b.** l'objectif de modélisation, pour lequel le modèle est développé.
- c.** le choix d'une formulation de la réalité. Après la définition des deux points précédents, l'essentiel de la démarche de modélisation consiste à trouver la formulation de la réalité la plus satisfaisante relativement aux objectifs fixés. La formulation d'un modèle est conditionnée par la connaissance antérieure des processus ou des systèmes considérés, par les idées et l'imagination du modélisateur et par les hypothèses qui sont formulées.

IV.2. UTILISATION DES MODELES EN HYDROLOGIE

Trois types d'utilisation des modèles en hydrologie existent (Gaume, 2000):

- **La modélisation comme outil de recherche**
- **La modélisation comme outil de prévision**
- **La modélisation comme outil d'extrapolation**

IV.3. LA MODELISATION PLUIE-DEBIT

Un modèle pluie-débit est une représentation de la relation qui relie les pluies mesurées sur un bassin versant et le débit mesuré à l'exutoire de celui-ci. Un modèle pluie-débit est décomposé en deux sous modèles : un modèle de production qui permet de séparer la pluie nette (qui va ruisseler) de la pluie brute (on dit que c'est le modèle qui va produire la partie qui va ruisseler) et un modèle de transfert qui permet de transférer cette pluie nette vers l'exutoire du bassin versant.

La représentation de l'ensemble des phénomènes hydrologiques et des systèmes hydrauliques d'une manière simple et précise constitue une modélisation pouvant avoir une interprétation mathématique. Il a une structure dynamique dans l'espace et dans une échelle de temps bien définie entre: une entrée: cause (précipitation) et une sortie: effet (écoulement) (Charifi, 2006).

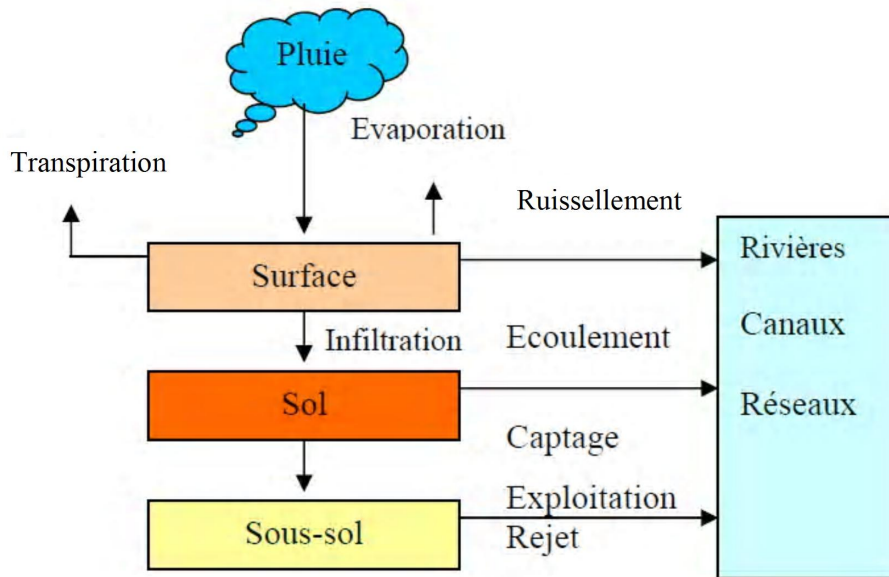


Figure 1 : Cycle de l'eau (Charifi, 2006)

Considérons une pluie d'intensité $P(t)$ tombant sur une surface S est désignons par $E(t)$ et $I(t)$ les intensités d'évaporation et d'infiltration :

Le volume $W(t)$ d'eau entrée dans le cours d'eau ou le réseau à l'instant t vérifie l'équation:

$$W(t + \Delta t) - W(t) = S[P(t) - E(t) - I(t)]\Delta t \quad (2.1)$$

Où, en notation différentielle:

$$\frac{dW}{dt} = S[P(t) - E(t) - I(t)] \quad (2.2)$$

Ainsi, l'état initial t_0 et les états successifs du système sont analytiquement traduisibles par une fonction dont les principaux paramètres sont: la transmissibilité, les coefficients des pertes, rétentions, etc. et la propagation des flux de l'écoulement.

IV.3.1 Objet et enjeux de la modélisation pluie-débit

Les objectifs d'un modèle hydrologique peuvent être de connaître le fonctionnement d'un bassin versant, prévoir des débits en fonction des scénarii météorologiques ou d'aménagement, simuler des débits sur des cours d'eau où les mesures sont insuffisantes, modéliser le transport de polluants. L'applicabilité de la modélisation dépend de l'étalonnage (l'ajustement aux paramètres d'entrée), de la validation (qui permet d'évaluer les possibilités d'utilisation) et de la mesure de la sensibilité du modèle (l'étude de l'influence des variations des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie) (Charifi, 2006). Ceci dit, on peut distinguer les problématiques suivantes :

- Simulation de débits, pour le comblement de lacunes dans les séries de données, la reconstitution de débits historiques (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits) ou pour permettre des traitements statistiques ;
- Prédétermination des débits de crue ou d'étiage qui peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagement dans le lit (mineur à majeur) du cours d'eau ;
- Prévision des crues et des étiages ; il s'agit d'évaluer par avance, connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiage pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource en eau ;

- Influence d'aménagement sur l'hydrologie : on désire pouvoir prédire les changements de la réponse du bassin suite à des modifications des caractéristiques du bassin d'origine humaine ou à des changements environnementaux.

La pertinence des réponses que l'on peut leur apporter est conditionnée par celle du modèle dans sa représentation du bassin relativement aux objectifs fixés (Perrin, 2000).

IV.3.2 Classification des modèles Pluie-débit

On trouve à travers la littérature de nombreuses classifications des modèles hydrologiques. La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait de la grande diversité des approches entraînant une non moins grande diversité des caractéristiques des modèles. Il est alors presque impossible de distinguer des catégories de modèles nettement distinctes (Perrin, 2000), et ce d'autant plus que la terminologie employée est encore fluctuante.

Dans cette section, les deux types de classifications qui semblent les plus importants sont présentés:

IV. 3.2.1 Classification de Clarke (1973) et Ambroise (1998)

Clarke (1973) et Ambroise (1998) ont proposé quelques clés de différenciation des modèles

- **Modèle déterministe ou stochastique** : Un modèle est qualifié de déterministe si c'est une valeur unique qui est associée aux variables d'entrée et aux paramètres. Un modèle est appelé stochastique lorsque ce sont des distributions de probabilité qui sont associées à ces grandeurs.
- **Modèle global ou distribué** : un modèle est dit global lorsqu'il traite le bassin versant comme un objet unidimensionnel. Au contraire, dans le modèle distribué, le bassin est fragmenté en sous unités qui seront prises en compte séparément. Il existe aussi parfois de modèles semi-distribués. Malgré quelques confusions sur cette dernière dénomination, on dira qu'elle caractérise le découpage du bassin en sous-bassins versants élémentaires sur lesquels une approche globale est envisagée.
- **Modèles Empiriques**, conceptuels ou théoriques (fondés sur la physique), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation de système modélisé.
- **Modèles Cinématiques** (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs), suivant que l'évolution temporelle du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause.
- **Modèle événementiel ou continu** : le mode événementiel, comme son nom l'indique, correspond à représenter le débit pour un événement pluvieux ponctuel. Dans ce cas, on s'intéresse aux phénomènes les plus importants, responsables du pic de crue. La modélisation continue consiste à reproduire la variation du débit dans le temps (une saison, une année). Elle tient compte de l'ensemble des processus hydrologiques.

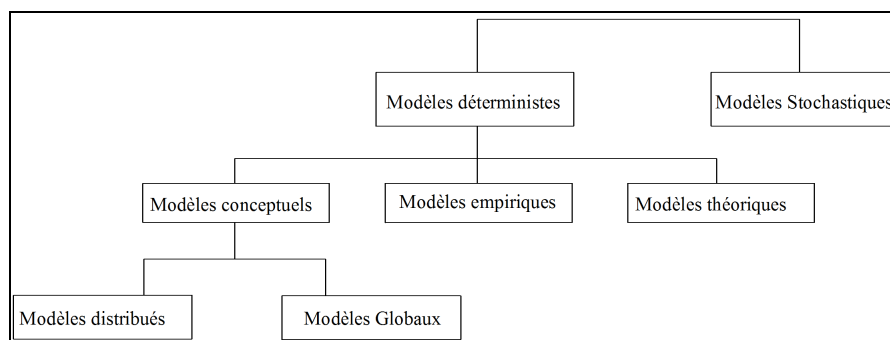


Figure 2 : Classification des modèles Pluie-débit selon Clarke (1973), Ambroise (1998)

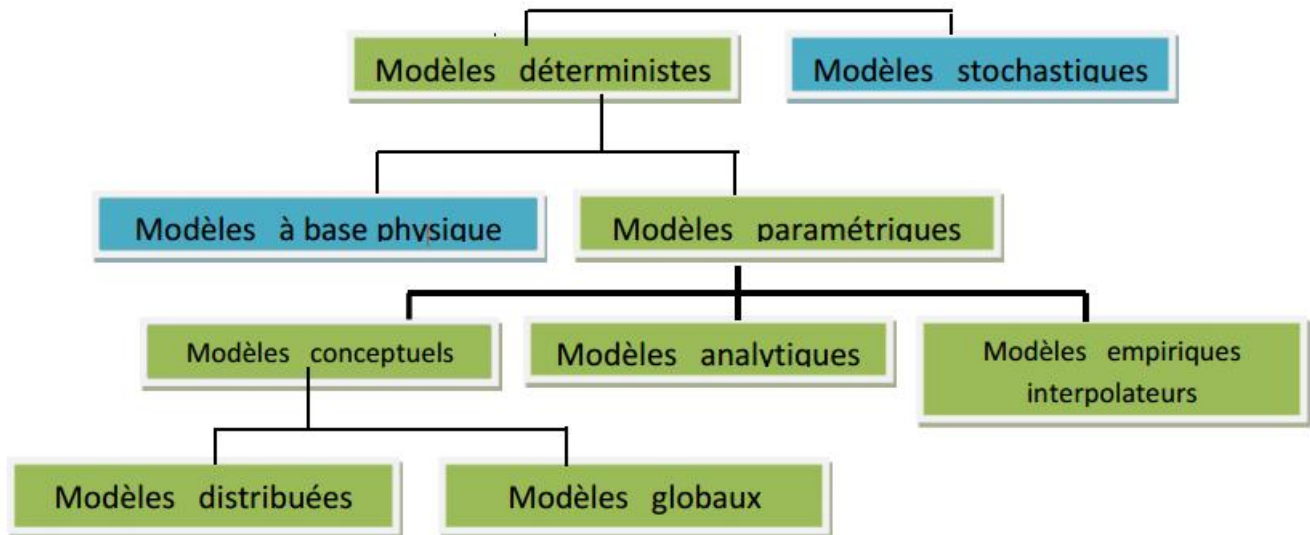


Figure 3 : les différentes approches de modélisation [GAUME 2002]

IV.3.2.2 Classification de Perrin (2000)

Perrin (2000) a proposé une classification simplifiée où trois catégories de modèles, les modèles 'boite-noire', les modèles 'à réservoirs' conceptuels ou empiriques et les modèles fondés sur la physique sont identifiés.

➤ Les modèles 'boite-noire' (Black-box)

Ces modèles ont en commun de ne faire appel qu'aux seules variables d'entrée et de sortie d'un bassin, sans faire intervenir de données sur sa nature physique : le bassin est considéré comme une boîte noire (blackbox). Ils s'appuient sur des fonctions et paramètres globaux sans grande signification physique ou non directement reliables à des propriétés mesurables (Ambroise, 1998), donnant une description purement mathématique du fonctionnement du bassin versant. Dans cette catégorie, les modèles ou sous-modèles qui établissent un pur lien mathématique entre les variables d'entrée et de sortie du système sont classés. Ces modèles sont globaux. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, les Modèles ARMAX, Les modèles des réseaux de neurones artificiels et Les modèles de l'hydrogramme unitaire (HU).

L'Hydrogramme unitaire est un modèle mathématique qui se traduit par un hydrogramme de crue caractérisant un bassin versant qui répond à une pluie nette unitaire uniformément répartie sur tout le bassin. L'hydrogramme unitaire est invariant dans le temps et reflète l'ensemble des caractéristiques du BV. Pour construire un hydrogramme unitaire on a besoin de sélectionner des couples averse – crue (crue généralisée sur tout le bassin et averse ayant un corps central bien marqué).

- Calcul des ordonnées de l'HU

- Séparer le ruissellement direct de l'écoulement de base;
- Calculer le volume de ruissellement direct V_r
- Calculer la lame d'eau ruisselée : $L_r = V_r/S$;
- Extraire les ordonnées de l'hydrogramme de ruissellement direct pour chaque pas de temps;
- Calculer pour chaque pas de temps les ordonnées de l'HU en multipliant les ordonnées de l'hydrogramme de ruissellement par le rapport $1/L_r$

- Les modèles 'à réservoirs', conceptuels ou empiriques

Ces modèles sont schématiquement constitués de réservoirs interconnectés qui assurent la transformation de la pluie en débit. Ils sont moins abstraits que les modèles 'boite noire' dans leur

représentation de la transformation pluie-débit, même si leur interprétation physique n'est généralement pas immédiate. Ces modèles sont structurés à partir de deux composants majeurs :

- Un module de production responsable de la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire de la répartition de la pluie brute en pluie nette (alimentant le débit), en quantité évaporée et en quantité stockée. Parfois présentes dans les modèles, les fonctions d'échanges en eau, permettant de simuler des pertes et/ou des apports vers ou de l'extérieur, font généralement partie de ce module ;
- Un module de routage ou transfert permettant d'assurer la répartition temporelle de la quantité d'eau transitant dans le cours d'eau.

➤ **Modèles fondés sur la physique**

Contrairement aux modèles précédents qui mettent l'accent sur la représentation du comportement hydrologique final (à l'exutoire), les modèles fondés sur la physique tentent d'utiliser des explications physiques à ce comportement.

IV.3.3 Critères de sélection des modèles pluie-débit

Les critères de sélection d'un modèle hydrologique dépendent : Du type de l'approche qu'il utilise, de la qualité des résultats qu'il fournit, de son utilisation, comme par exemple les performances des interfaces graphiques utilisées (sa convivialité), de la portabilité du logiciel, la gestion et la structure des entrées/sorties, ainsi que de la facilité d'intégration et d'interconnexion avec d'autres outils de traitements et d'exploitation des résultats (pré et post-traitement).

Les principaux critères doivent répondre aux exigences suivantes (Henine, 2004):

- Le type d'approche utilisée : Le modèle choisi doit tenir compte des conditions climatologiques et topographiques des bassins à étudier ;
- L'importance des sorties du modèle : Il doit prédire les variables requises;
- Les différents processus hydrologiques modélisés doivent estimer adéquatement les différentes variables ;
- Disponibilité des entrées du modèle ;
- La disponibilité du modèle dans le domaine public. Si non, on doit rajouter le critère du prix du modèle. Les prix des modèles hydrologiques varient très considérablement.

IV.3.4 Présentation de quelques modèles pluie-débit

Dans cette section nous allons présenter une petite description des différents modèles disponibles dans le domaine public à analyser. L'objectif de cette analyse est de ressortir vers la fin avec un modèle hydrologique qui satisfait l'ensemble des critères de sélection.

IV.3.4.1 Modèle spatialisé fondé sur la physique : le modèle SHE (Système Hydrologique Européen)

Le SHE offre un cadre informatisé modulaire qui permet l'intégration d'ensembles de sous-modèles mis en œuvre pour chacun des phénomènes physiques qui entrent en jeu. En 1995, il existait deux versions du SHE: une version universitaire de recherches et d'applications limitées, utilisée par University of Newcastle-upon-Tyne (GB), et un progiciel véritable commercialisé par DHI sous le nom de MIKE-SHE.

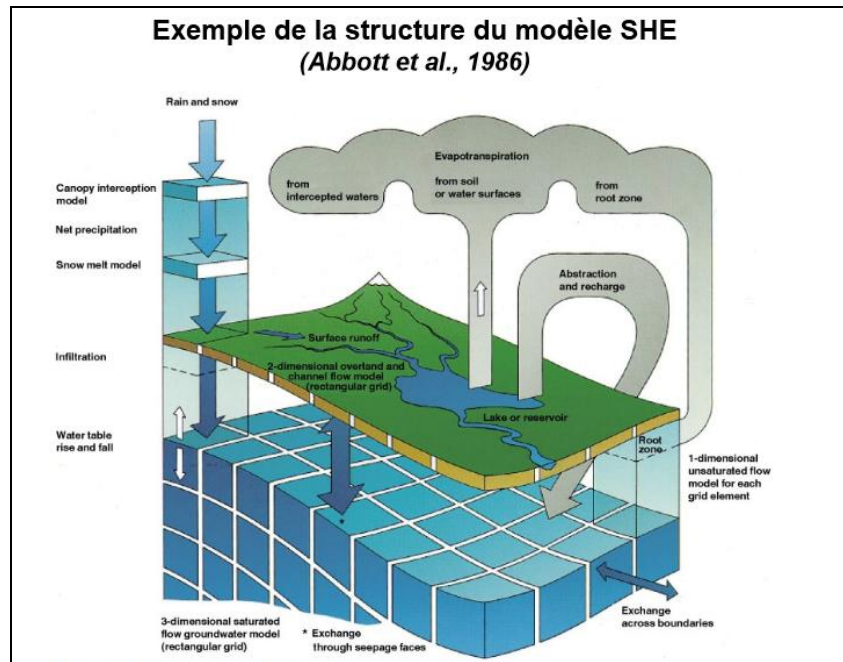


Figure 4: Modèle SHE (Abbott et al, 1986)

IV.3.4.2 Modèles globaux (IHACRES, Orstom)

- Modèle IHACRES

Le modèle IHACRES (*Identification of unit Hydrographs and Component flow from Rainfalls, Evaporation and streamflow data*) est le résultat d'une collaboration entre le CEH (*Centre for Ecology and Hydrology*) du Royaume-Uni et l'Université Nationale de l'Australie (ANU). Ce logiciel peut être appliqué pour des investigations dans des petits bassins versants équipés pour des études spéciales ou pour des études régionales dans des grands bassins.

Le modèle IHACRES utilise la fonction de transfert à partir de trois modules de calcul, en séries. Il permet la simulation des écoulements continus ou instantanés pour n'importe quel bassin versant et n'importe quelle donnée temporelle supérieure ou égale à 1 min.

- Modèle Orstom

Le Modèle ORSTOM est un modèle global basé sur l'application de la méthode de l'hydrogramme unitaire. Le Modèle ORSTOM permet le calcul des caractéristiques de forme de la crue. On applique au volume de la crue le diagramme de distribution moyen du bassin pour obtenir l'hydrogramme de crue résultant de l'averse considérée (CIEH et al, 1996).

La fonction de production, permet d'évaluer le volume de la crue à partir de la pluie ponctuelle mesurée à une station de référence :

$$V = P_j * K_a * K_r * S \quad \dots\dots\dots \text{Eq: 1}$$

Avec:

- Ka : le coefficient d'abattement
- Pj: la hauteur de pluie journalière
- Kr: le coefficient de ruissellement
- S : la superficie du bassin versant

IV.3.4.3 Modèles empiriques : Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)

Le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son

débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

Ces modèles n'ont besoin pour fonctionner que de données continues de pluie et d'évapotranspiration potentielle. Les modèles GR ont un faible nombre de paramètres, ce qui permet de limiter les problèmes de surparamétrisation et leur confère une bonne robustesse (Perrin et al, 2001).

IV.3.4.4 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé : TOPMODEL

TOPMODEL a été développé dans les années 70 par Beven and Kirkby (1979) à l'Université de Lancaster.

IV.3.4.5 Modèles semi-spatialisés (HEC, CEQUEAU, MIKE BASSIN et SWAT)

Il existe plusieurs modèles semi-distribués (ou semi-spatialisés), l'ensemble des modèles sélectionnés peut être utilisé avec succès dans le cadre du projet, l'avantage que présentent les modèles semi-distribués est qu'ils disposent d'une structure à base physique et ils demandent moins de données que les modèles distribués. Le modèle HEC-HMS est un exemple de ce type de modèles connu par ses performances de calcul et par la qualité de ses résultats ; il est disponible gratuitement dans le domaine public.

Modèle	Segmentation de l'espace	Infiltration	Transfert	Zone saturée	Modules supplémentaires
TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1978)	Indice topographique	-	Onde cinématique	Boussinesq simplifié	Interception
SWATCH (Morel-Seytoux et Alhassoun, 1987)	Unités	Green et Ampt	Hydrogramme unitaire Onde cinématique	Boussinesq	-
ANSWERS/2000 (Beasley et Huggins, 1982 ; Bourauil et Dilhata, 1996)	Mailles carrées	Holtan-Overton Green et Ampt	Loi de Manning	Darcy	Interception Détachement et transport
SHE (Abbott <i>et al.</i> , 1986)	Mailles carrées	Richards 1D	Saint Venant Onde diffusante	Boussinesq 2D et 3D	Interception Evapotranspiration Fonte de neige
KINEROS/2 (Woolisher <i>et al.</i> , 1990 ; Smith <i>et al.</i> , 1995)	Unités	Corradini <i>et al.</i> , Smith et Parlange,	Hydrogramme unitaire Onde cinématique	-	Interception Transport de sédiments
THALES (Grayson <i>et al.</i> , 1992)	Unités	Green et Ampt Smith et Parlange	Loi de Manning	Darcy	-
QPBRRM (Loague, 1992)	Mailles carrées	Philip	Onde cinématique	-	-
TOPOG (Vertessy <i>et al.</i> , 1993)	Unités	Richards	Onde cinématique	Richards	-
HYDROTEL (Fotin <i>et al.</i> , 1995)	Mailles carrées	Modèles à réservoirs	Onde diffusante	Modèle à réservoirs	-
LISEM (De Roo <i>et al.</i> , 1995)	Mailles carrées	Holtan-Overton Green et Ampt Richards 1D Smith <i>et al.</i> ,	Onde cinématique	-	Détention superficielle Erosion et déposition
MHYDAS (Moussa <i>et al.</i> , 2002)	Unités	Richards 1D, Green et Ampt, Philip Horton SCS etc.	Onde diffusante	Modèle à réservoirs	Transfert de pesticides

Figure 5 : comparaison des différents modèles hydrologique

IV.4 MODÉLISATION PAR HEC-HMS

La modélisation hydrologique permet de simuler la réponse hydrologique (débit) d'un bassin suite à une entrée donnée, celle, des précipitations. La détermination des débits de crue et d'étiage permettent une analyse plus profonde des phénomènes hydrologiques extrêmes, tels les inondations, mais aussi de mieux prévenir les périodes de sécheresse, ainsi que d'améliorer la gestion des ressources en eau et des aménagements.

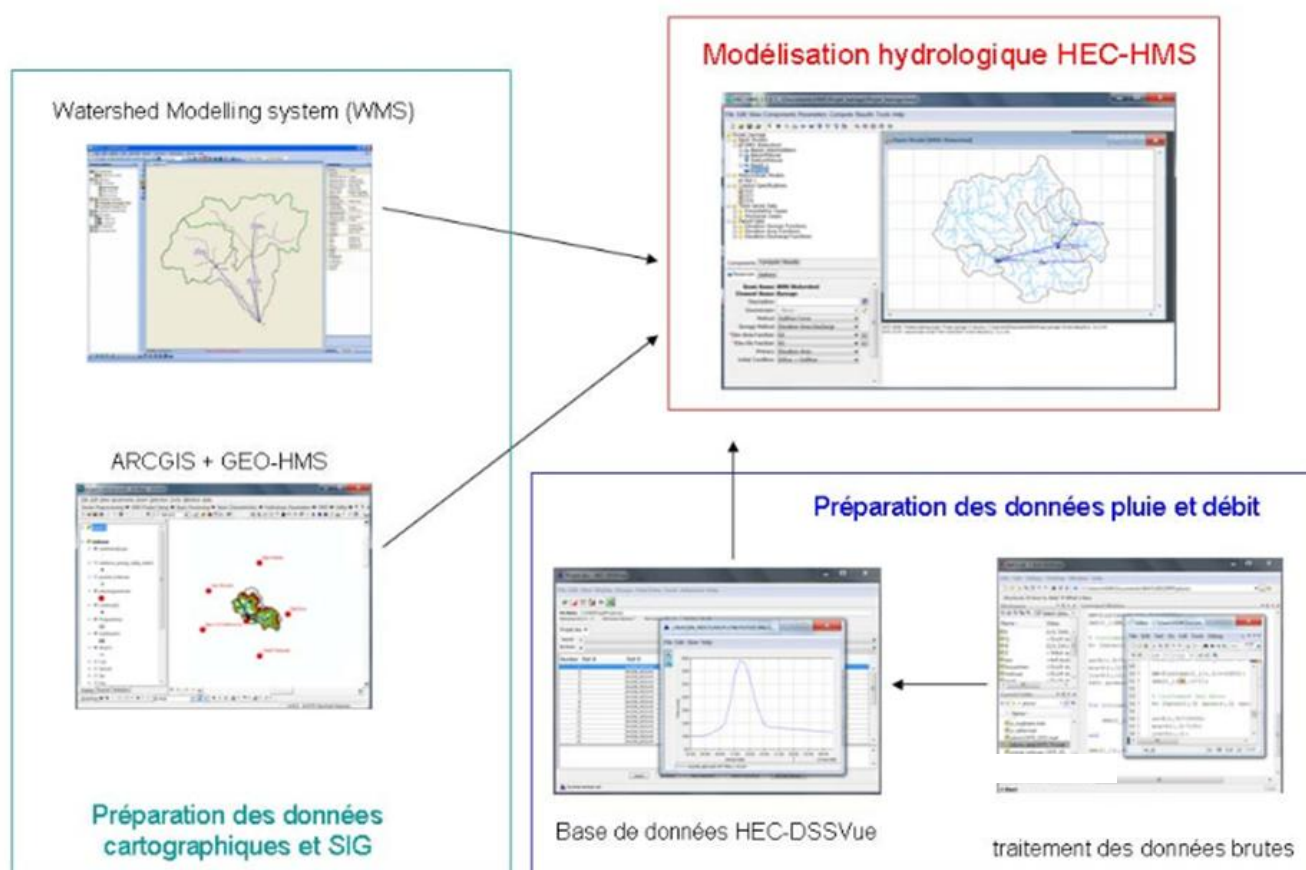


Figure 6 : MODELISATION HYDROLOGIQUE PAR HEC – HMS (USACE)

IV.4.1 Présentation du modèle HEC-HMS :

Le modèle *HEC-HMS*, est un modèle hydrologique **déterministe et conceptuel** *HEC-HMS* (Hydrologic Modeling System). Ce modèle hydrologique a été développé par le « Hydrologic Engineering Center (HEC) » de l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE).

Plusieurs versions sont disponibles, nous nous intéressons dans notre travail à la dernière version publique à savoir *HEC-HMS 3.5*. Le modèle peut être utilisé soit sur une base événementielle, soit pour exécuter des simulations en continu sur une longue période grâce à des modules de calculs d'évapotranspiration, d'humidité du sol et d'accumulation/fonte de neige.

Le modèle *HEC-HMS* est conçu pour simuler les processus de précipitations et des ruissellements des bassins versants avec un réseau hydrographique dendritique. Il est conçu pour être applicable pour des régions géographiques variées, pour résoudre un large éventail de problèmes.

Les hydrogrammes produits par le modèle *HEC-HMS* peuvent être utilisés directement ou en collaboration avec d'autres logiciels pour le drainage urbain, la prévision des débits, l'impact de l'urbanisation, la conception des déversoirs de réservoir, la réduction de l'impact des inondations, la régulation des plaines inondables, l'hydrologie des zones humides et l'exploitation des systèmes de ressource en eau.

- Le modèle **HEC HMS** comprend trois modules : module de calcul des précipitations nettes, module de calcul du ruissèlement et module de calcul des débits de base (écoulement souterrain).

Notons que les données nécessaires requises pour **HEC-HMS** sont :

- La configuration des éléments physiques du bassin (sous-bassin, canaux, réservoirs, jonctions, diversions, sources et exutoire) et leurs caractéristiques ;
- Les précipitations : ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événement pluvieux ordinaires ou exceptionnelle mais aussi à des événements théoriques basés sur une étude statistique ;
- Paramètres de contrôle de la simulation.

Chacun des trois modules, composant HEC-HMS nécessite un certains nombre de données à saisir et un certain nombre de fonctionnalités. Cette configuration permet de faciliter le travail et autorise la réalisation d'un nombre multiple de scénarios dans une optique de confrontations des résultats de ces scénarios.

IV.4.2. Module de gestion du modèle de bassin (Basin Model Manager) :

Ce module représente le cadre qui permet de situer le bassin versant géographiquement et de connaître la disposition des différents éléments du bassin ainsi que la définition de leurs caractéristiques. Un module de gestion du modèle de bassin, peut comporter plusieurs modèles de bassin représentant différentes configuration du bassin.

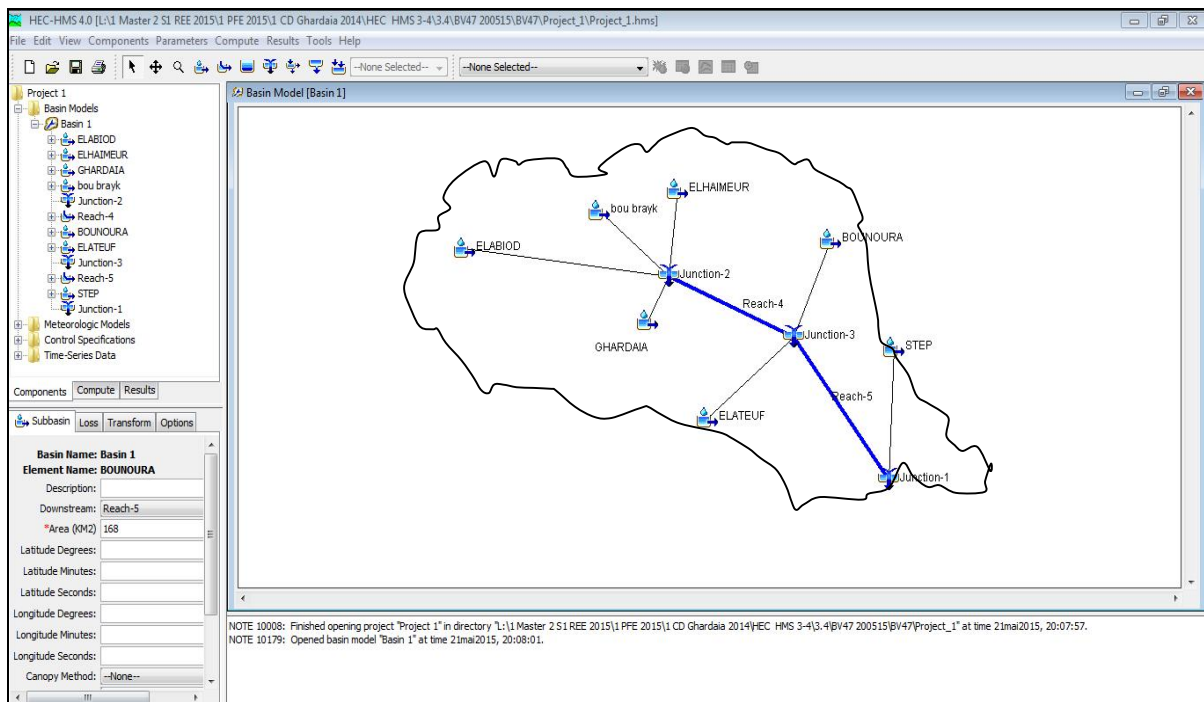


Figure 7 : Modèle du bassin versant de l'Oued M'zab

Le module de bassin comprend les éléments suivants :

- sous bassin (*Subbasin*);
- canaux (*Reach*);
- réservoir (*Reservoir*);
- jonction (*Junction*)
- diversion(*Diversion*);
- source (*Source*);

- exutoire(Outlet).

Ce module comprend par ailleurs une série de données nécessaires à l'application du modèle. Dans ce qui suit les données des éléments de modèle de bassin sont présentés :

IV.4.2.1. Sous-bassin (Subbasin) :

Le sous-bassin est un élément de surface générant un débit de sortie, mais sans apport car ne pouvant recevoir d'écoulement d'élément amont. Le débit de sortie du sous-bassin est généré à partir des données de précipitations brutes après soustraction des pertes d'eau en utilisant une des méthodes de calcul des pertes, et grâce à une des méthodes de transformation, nous obtenons la pluie nette, l'ajout du débit de base à l'écoulement issue de la pluie nette forme l'écoulement final.

Les données des sous-bassins sont :

- Détermination de l'élément connecté en aval avec le sous-bassin ;
- La surface ;
- La méthode ou modèle de calcul de perte (*Loss Method*);
- La méthode de transformation ou modélisation du ruissèlement direct ;
- La méthode modélisation des débits de base.

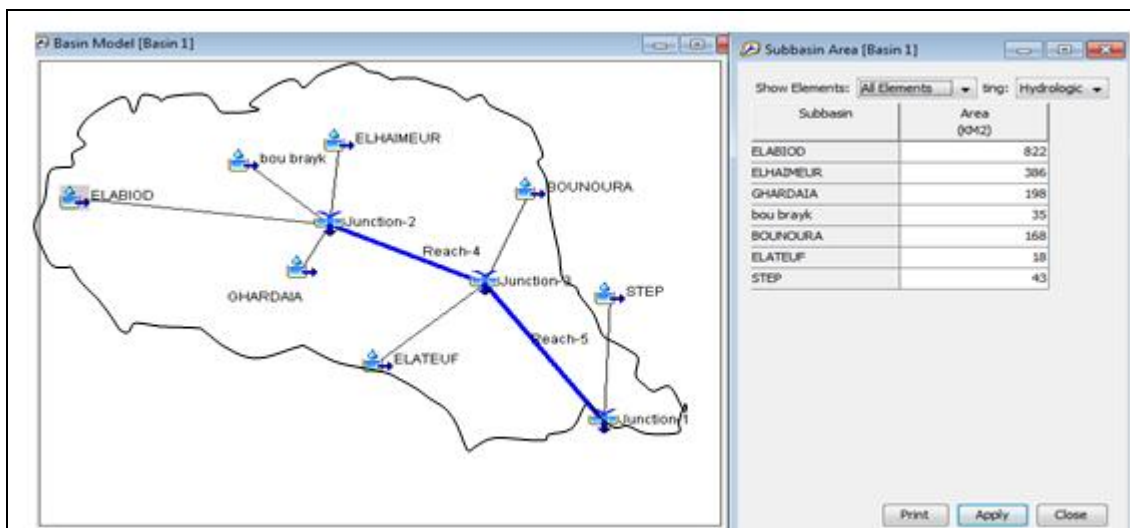


Figure 8 : représentation du bassin versant de l'Oued M'zab sur HEC HMAS

IV.5. SIMULATIONS DU MODÈLE HEC-HMS :

L'intégration des données dans le modèle HEC-HMS, permet d'exécuter la simulation. Parmi les résultats engendrés par l'utilisateur, notre intérêt se porte sur les hydrogrammes d'entrée des réservoirs dans l'objectif de gérer les apports du système de bassin

IV.5.1. La configuration du bassin :

La configuration du modèle de bassin, choisie pour la modélisation doit s'accorder avec l'objectif de notre travail, pour cela une configuration incluant tous les sous-bassins.

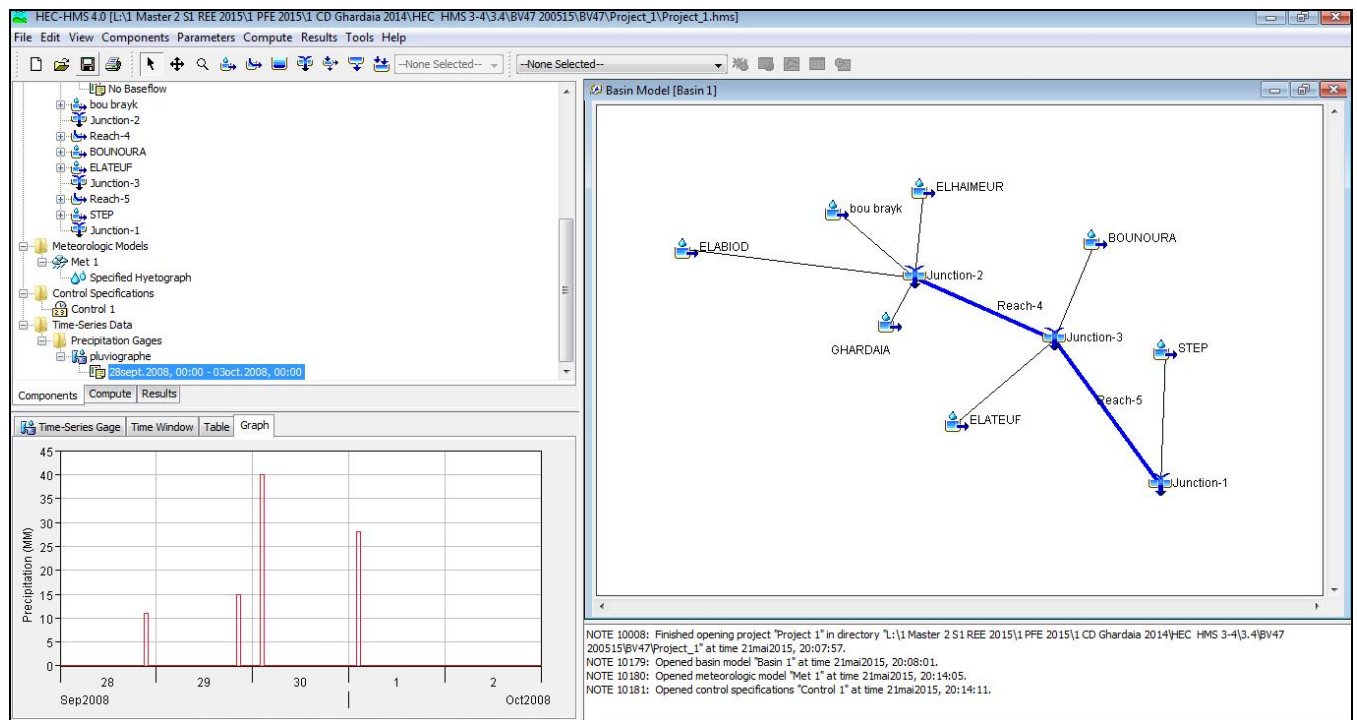


Figure 9 : Schéma de modélisation par HEC-HMS

IV.6. RÉSULTATS DE SIMULATION

Les résultats obtenus à l'échelle journalière et annuelle, pour l'ensemble du bassin et ses sous bassins à partir de la simulation exécutée, concernent les précipitations efficaces, précipitation totale, précipitation perdues par infiltration, date et valeur du débit de pointe, ruissellement directe, débit de base et le débit total.

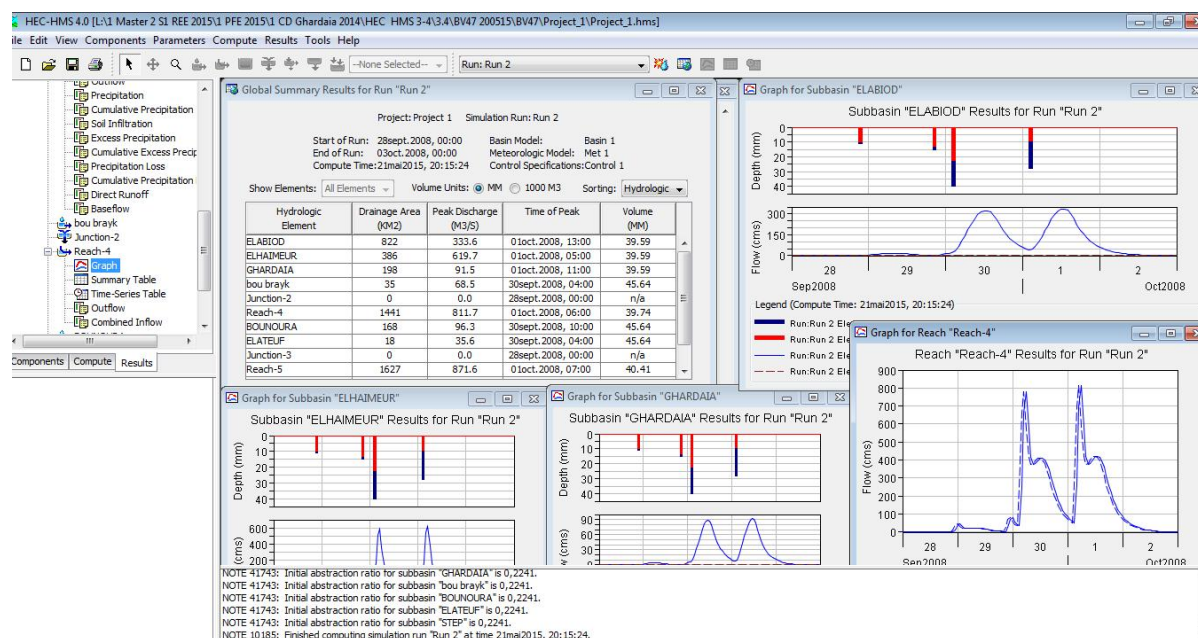


Figure 10 : Affichage des résultats sur HEC-HMS

La figure suivante montre la variation des apports liquides à l'échelle annuelle pour chaque sous bassin versant générés par les bassins versants drainant les cours d'eau des réservoirs.

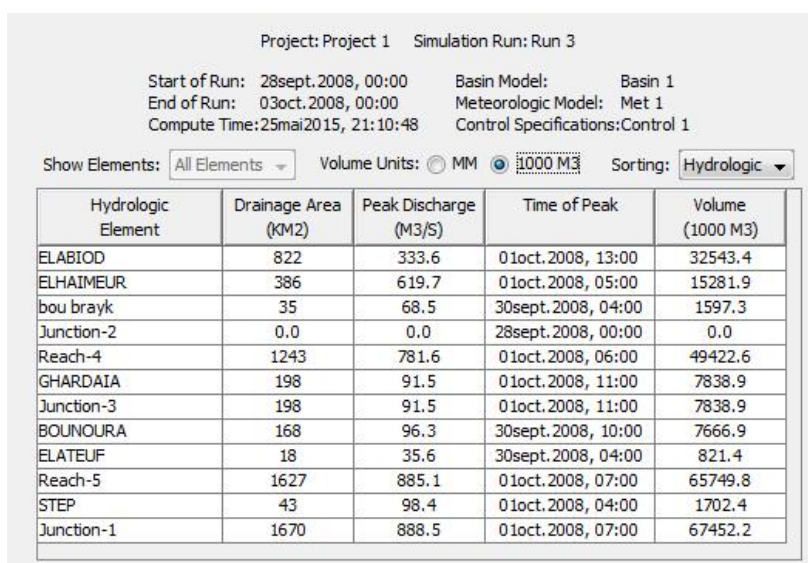


Figure 11 : Résultats de la simulation du bassin versant Oued Mzab par le modèle HEC-HMS.

CHAPITRE IV: MODELISATION HYDROLOGIQUE

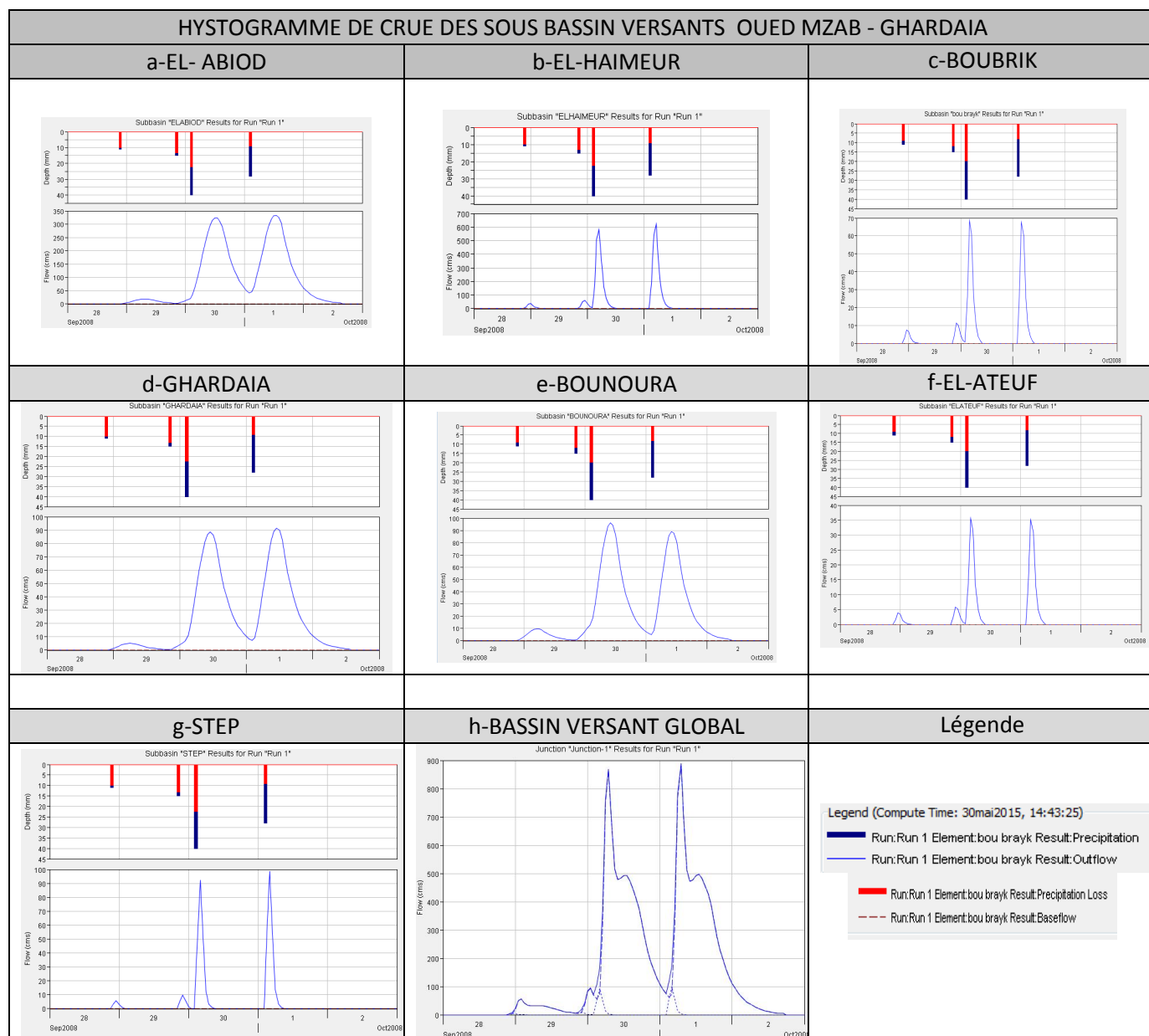
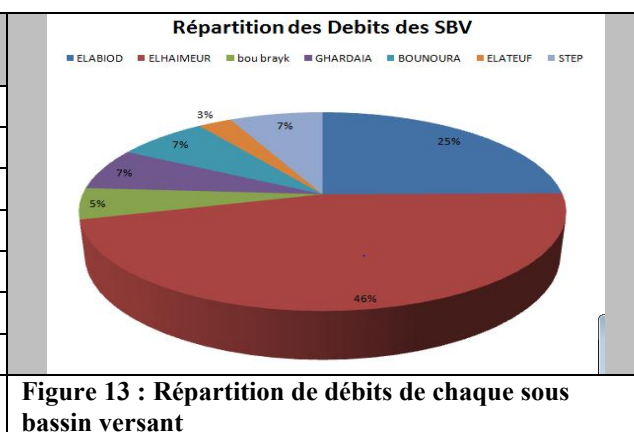


Figure 12 : Hydrogramme de crue des différents sous bassin de la vallée de Oued Mzab –Ghardaia

S/Bassin	Superficie (Km2)	Debit (m3/s)
ELABIOD	822	333.6
ELHAIMEUR	386	619.7
bou brayk	35	68.5
GHARDAIA	198	91.5
BOUNOURA	168	96.3
ELATEUF	18	35.6
STEP	43	98.4

Tableau 1 : Les débits de chaque Sous bassin versant



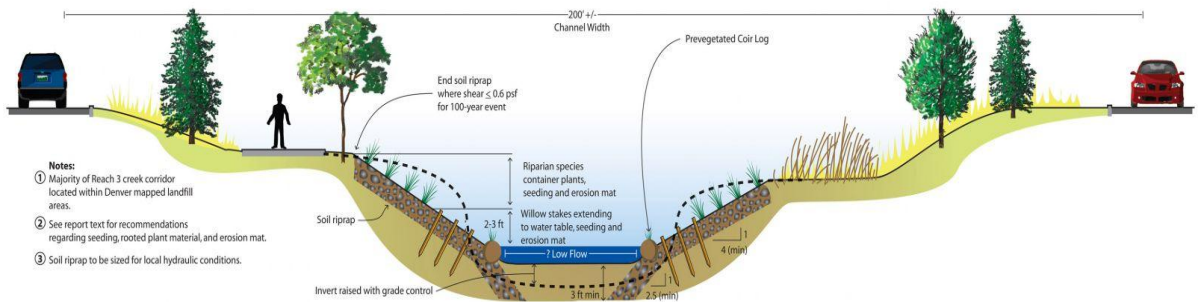
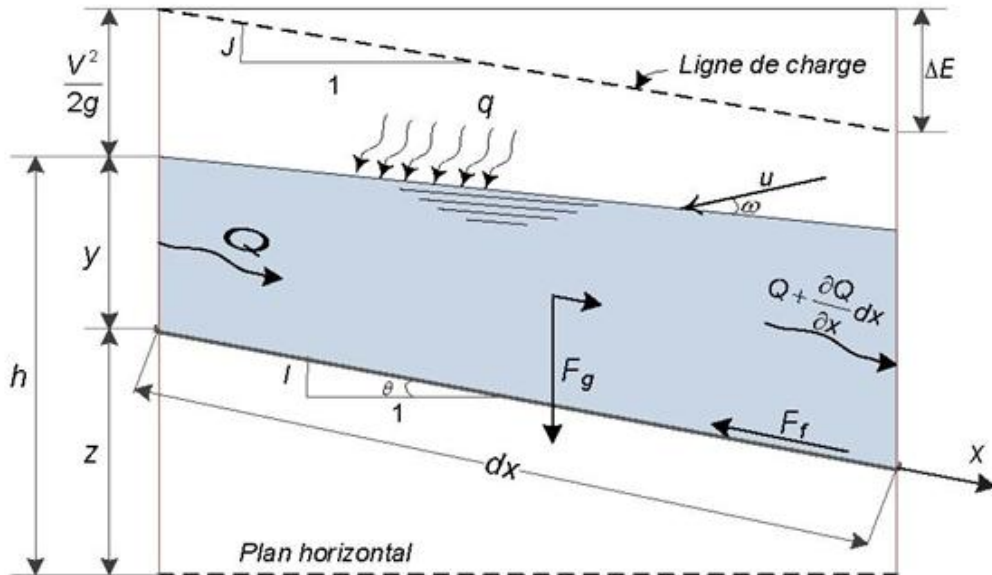
IV.7 DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA SIMULATION PAR HEC HMS

Le résultat de simulation effectués par HEC-HMS représentent résulte de la combinaison de plusieurs modèles mis en jeu (à titre d'exemple, un modèle pour la quantification des précipitations, un modèle pour le calcul de l'infiltration et la lame d'eau ruisselée ...). On remarque que HEC-HMS a bien reproduit ce débit de pointe de 888.5 m³/s.

CHAPITRE V

MODELISATION

HYDRAULIQUE



CHAPITRE V. MODÉLISATION HYDRAULIQUE PAR HEC-RAS

V.1 MODÉLISATION HYDRAULIQUE :

Les écoulements à surface libre dans le système de réseau hydrographique d'un bassin versant est un processus distribué où le débit, la vitesse et la profondeur varient en fonction de l'espace et du temps à travers le cours d'eau. L'estimation du débit ou la hauteur à une section locale importante du cours d'eau est souvent faite par un modèle distribué, basé sur les équations de Barré de Saint-Venant unidimensionnelle.

V.2. MODÉLISATION UNIDIMENSIONNELLE.

Le principe de ces modèles repose sur les équations de Barré de Saint – Venant traduisant les principes de base de la physique, appliqué généralement à un fluide incompressible, à savoir le principe de la conservation de la masse, et le principe de la conservation de la quantité de mouvement.

L'établissement de ces équations, nécessite des données concernant d'abord la topographie complète du lit du cours d'eau, où cette modélisation à une certaine spécificité qui est peut être différente à celle étudiée dans le cas des écoulements dans les canaux prismatiques.

La plupart des équations développées par la suite dérivent de deux relations fondamentales de la mécanique des milieux continus, à savoir l'équation de continuité ou principe de conservation de la masse, et l'équation du principe de la conservation de la quantité de mouvement ou relation fondamentale de la dynamique.

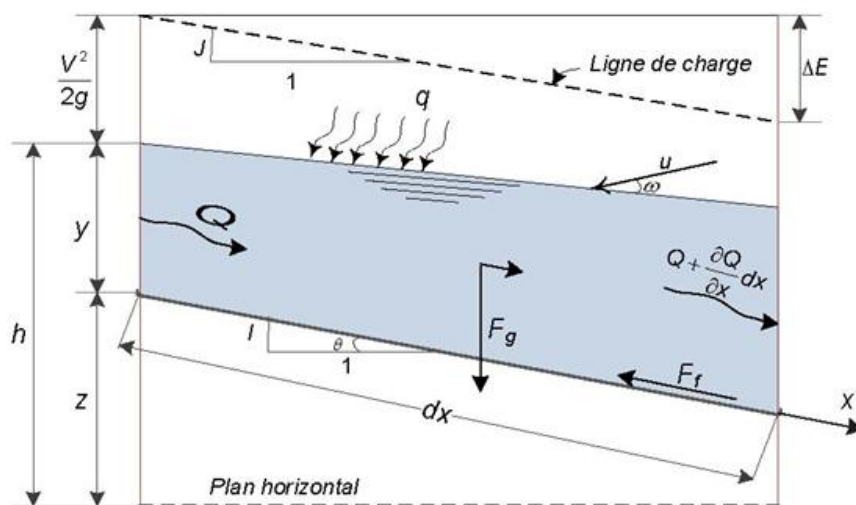


Figure 1: Élément de liquide en écoulement à surface libre (coupe longitudinale).

Les équations de Barré de Saint – Venant 1D reposent sur les hypothèses suivantes (Drouin, 1991) :

- l'écoulement à une direction privilégiée (écoulement 1D) correspond à l'axe principal ;
- les vitesses transversales sont négligeables de sorte que le niveau est horizontal dans la direction perpendiculaire à celle de l'écoulement ;
- l'écoulement varie graduellement le long du canal, la répartition de la pression est hydrostatique et varie verticalement, ainsi que l'accélération suivant la verticale est négligeable (Chow, 1959) ;
- La formule de Manning est applicable ;
- la courbure des lignes de courant doit rester faible.

V.2.1. Equation de continuité.

Elle stipule que le taux de variation de la masse d'un système matériel est égal à l'apport de masse au système considéré, si le volume et la surface de ce système sont respectivement et ,

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \rho d\Omega + \iint_{\Sigma} \rho (\vec{v} \cdot d\vec{\Sigma}) = 0 \quad (4.1)$$

on a : Ω est le vecteur de vitesse d'une particule fluide, la masse volumique de l'eau, le vecteur étant perpendiculaire à et orienté vers l'extérieur du système. $\vec{v} \cdot d\vec{\Sigma}$

Soit un élément de l'écoulement de l'eau dx du canal, Q le débit moyen entrant par la section transversale moyenne S et q le débit qui entre par la section latérale, la dimension de q est exprimée par la dimension du débit rapporté à l'unité de longueur.

Pour un accroissement de temps la quantité d'eau entrant par la section est , et la quantité d'eau sortant à travers la section S est la somme totale des quantités d'eau entrant est sortant par la section de contrôle totale est par conséquent :

$$\iint_{\Sigma} \rho (\vec{v} \cdot d\vec{\Sigma}) = -\rho(Q + qdx) + \rho(Q + dQ) = \rho(dQ - qdx) = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) \rho dx \quad (4.2)$$

Le volume d'eau dans cet élément est :

$$\iiint_{\Omega} \rho d\Omega = \rho S dx \quad (4.3)$$

Alors, l'accroissement de volume d'eau est :

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \rho d\Omega = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S dx) = \rho \frac{\partial S}{\partial t} dx \quad (4.4)$$

Finalement, et vue les deux termes obtenus, l'équation de continuité ou première équation de Barré de Saint – Venant s'écrit :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (4.5)$$

V.2.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement.

Elle énonce que le taux de variation de la quantité de mouvement d'un système matériel est égal à l'apport de quantité de mouvement au système considéré par application de forces extérieures, ainsi pour le volume de contrôle et de surface de contrôle, on a :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \iint_{\Sigma} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot d\vec{\Sigma}) \quad (4.6)$$

Le membre de gauche étant la somme des forces de volume agissant sur le fluide au sein du volume de contrôle , et des forces agissant sur la surface . Pour un régime permanent, ce bilan de forces devient :

$$\sum \vec{F}_{\text{ext}} = \iint_{\Sigma} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot d\vec{\Sigma}) = \vec{F}_{x+dx} - \vec{F}_x \quad (4.7)$$

V.2.2.1. Forces de gravité et de viscosité (frottement).

Le poids de la quantité d'eau correspondant au volume de contrôle , est Pour une pente de canal faible I , la force de gravité correspondante suivant l'axe x du sens de l'écoulement est exprimée par :

$$F_g = \rho g S dx \sin \theta \approx \rho g S dx \theta = \rho g S dx I \quad (4.9)$$

La force de viscosité est due spécialement à l'interaction par cisaillement entre l'eau en écoulement avec les parois et le fond du canal, elle est exprimée suivant l'axe x par , ou est la contrainte de cisaillement et $pRmR$ est le périmètre mouillé, exprimé par : $-\tau_0 p_m dx$

$$\tau_0 = \rho g R_h J = \rho g \left(\frac{S}{p_m} \right) J \quad (4.10)$$

R_h , est le rayon hydraulique, et J est la pente de frottement, la force de viscosité s'écrit :

$$F_f = -\rho g S J dx \quad (4.11)$$

V.2.2.2. Force de pression.

Les deux forces de pression qui agissent sur les deux extrémités de l'élément liquide en mouvement sont F_{p1} et F_{p2} , qui sont des forces hydrostatiques, dont la résultante suivant l'axe x permet d'avoir :

$$F_p = F_{p1} - F_{p2} \quad (4.12)$$

La pression hydrostatique au niveau est , par conséquent la force hydrostatique correspondante est où b est la largeur de canal qui correspond à ce niveau de profondeur. Alors, la force hydrostatique qui agit sur toute la section est :

$$F_{p1} = \int_0^y \rho g (y - w) b dw \quad (4.13)$$

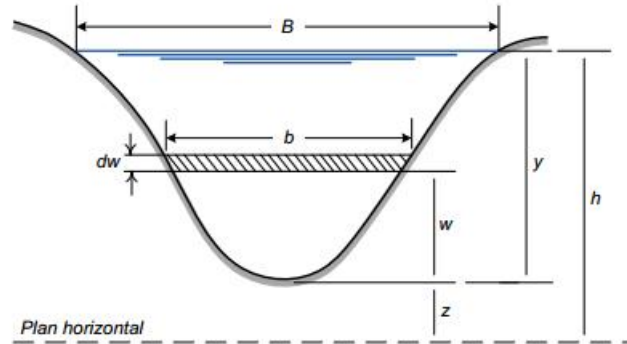


Figure 2: Élément de liquide en écoulement à surface libre (coupe transversale).

La force hydrostatique F_{p2} qui agit de l'autre coté sur l'élément de liquide est exprimée par :

$$F_{p2} = F_{p1} + \frac{\partial F_{p1}}{\partial x} dx = \int_0^y \rho g (y - w) b dw + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^y \rho g (y - w) b dw \right) dx \quad (4.14)$$

D'après la règle de différentiation de l'intégrale de Leibnitz (Abramowitz et al., 1964), l'expression est :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_0^y \rho g (y - w) b dw \right) = \int_0^y \rho g \frac{\partial y}{\partial x} b dw + \int_0^y \rho g (y - w) \frac{\partial b}{\partial x} dw \quad (4.15)$$

Or,

$$\int_0^y \rho g \frac{\partial y}{\partial x} b dw = \rho g \frac{\partial y}{\partial x} \int_0^y b dw = \rho g S \frac{\partial y}{\partial x} \quad (4.16)$$

Le terme peut être pris égal à zéro, puisque la variation de la largeur du canal n'a aucun lien avec le déplacement de l'écoulement, soit finalement l'expression de la force de pression résultante : $\partial b / \partial x$

$$F_p = -\rho g S \frac{\partial y}{\partial x} dx \quad (4.17)$$

$$\tau_w = -\rho \frac{1}{2} C_f |v_r| v_r \quad (4.18)$$

V.2.3. Formes simplifiées des équations de Saint-Venant.

V.2.3.1. Forme vectorielle.

Les équations forme le système d'équations de Barré de Saint-Venant d'un écoulement à surface libre non permanent unidimensionnelle. Dans le cas des crues, les apports latéraux sont pratiquement négligeables devant le débit de la crue qui est exceptionnel, alors le système d'équations précédant s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \\ \frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(I - J) = 0. \end{cases} \quad (4.19)$$

$$(4.20)$$

Ce système d'équations peut être écrit sous la forme vectorielle suivant :

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}(\vec{U})}{\partial x} = \vec{A}(\vec{U}) \quad (4.21)$$

Avec,

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} S \\ Q \end{pmatrix}, \quad \vec{F}(\vec{U}) = \begin{pmatrix} Q \\ \beta \frac{Q^2}{S} + gSy \end{pmatrix}, \quad \vec{A}(\vec{U}) = \begin{pmatrix} 0 \\ gS(I - J) \end{pmatrix}$$

, et

$$h = z + y \Rightarrow \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x}$$

Sachant que, l'équation de conservation de la quantité mouvement s'écrit : $\partial z / \partial x = -I$

$$\frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} + gJ = 0 \quad (4.22)$$

D'après la formule de Manning (Akan, 2006), l'expression de J s'écrit en fonction de Q , $pRmR$ et S :

$$J = \frac{n^2 v^2}{k_n^2 R_h^{4/3}} = \frac{n^2 Q^2}{k_n^2 S^2 R_h^{4/3}} = \frac{n^2 p_m^{4/3} Q^2}{k_n^2 S^{10/3}} = \left(\frac{Q}{K(y)} \right)^2 \quad (4.23)$$

dite la débitance du canal qui est fonction uniquement de la profondeur y , n est le coefficient de rugosité de Manning et . L'équation de conservation de la quantité mouvement s'écrit en fonction du débit Q :

$$K(y) = k_n S^{5/3} / n p_m^{2/3} k_n = 1.0 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{1}{S} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g \left(1 - \frac{Q^2}{K^2} \right) = 0 \quad (4.24)$$

V.2.3.2. *Forme non-conservative.*

Dans certaines méthodes de résolution des équations de Saint-Venant, il est nécessaire aussi de passer à la forme dite non-conservative (Chow et al., 1988). Pour une unité de largeur (c'est-à-dire), la surface et le débit , l'équation de continuité dans ce cas s'écrit :

$$B = 1 \text{ S} = 1 \cdot y = y \text{ Q} = v \cdot S = v \cdot 1 \cdot y$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} y = 0$$

Pour l'équation de conservation de la quantité de mouvement et pour, sa forme non-conservative de s'écrit : $\beta \approx 1$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(1 - J) = 0 \quad (4.25)$$

Qui peut être transformée comme :

$$J = 1 - \underbrace{\frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}}_{\substack{\text{Ecoulement permanent} \\ \text{graduellement varié}}} \quad \begin{array}{l} \text{Ecoulement} \\ \text{permanent} \\ \text{uniforme} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Ecoulement non permanent} \\ \text{graduellement varié} \end{array}$$

Alors le système d'équations non-conservative de Saint-Venant s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial t} + v \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} y = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(1 - J) = 0. \end{cases} \quad (4.26)$$

V.3. LES DIFFERENTS MODELES HYDRODYNAMIQUES

V.3.1. MODELES 1D

Les modèles classiquement utilisés sont unidimensionnels (aussi appelés modèles 1D ou filaires). L'écoulement est supposé suffisamment rectiligne pour que chaque section soit sensiblement perpendiculaire à un axe dit axe de l'écoulement et soit définie par la connaissance de son abscisse. Dans un modèle 1D, le lit mineur et le lit majeur actif coulent en même temps mais il est possible de différencier les coefficients de rugosité des deux lits. Parmi ces modèles, on distingue :

- les modèles à bief unique ;
- les modèles ramifiés qui permettent de considérer des affluents ;
- les modèles maillés qui autorisent la prise en compte de bras multiples.

A titre d'exemple, nous citons : *MIKE11*, *HEC RAS* ... Ces modèles simulent alors bien les propagations de crue sur de longues distances mais les impacts locaux ne peuvent pas être étudiés.

V.3.2. MODELES 2D

Les modèles bidimensionnels sont libérés de l'hypothèse d'écoulement axial. Ils permettent de simuler en plan les écoulements et de tenir compte finement des obstacles dans le lit majeur (sans avoir à faire une distinction entre un lit majeur actif et un lit majeur stockant). A titre d'exemple de modèles bidimensionnels nous citons : *DECAMETRE*, *FESWMS*, *TELEMAC-2D*, *MIKE 21*, *River 2D*, *HYDROSIM*, ...

V.3.3. MODELES 3D

Pour rendre compte de la réelle complexité des phénomènes naturels, le recours aux modèles 3D s'avère inévitable. Dans ce cas, les équations de Navier Stokes sont résolues sans tenir compte de l'hypothèse de pression hydrostatique. Les modélisations tridimensionnelles sont beaucoup moins répandues que les précédentes à cause des capacités des moyens informatiques qui ont été longtemps insuffisants pour résoudre les équations en 3D. Actuellement, les développements technologiques de l'informatique et les efforts consentis pour palier à ce problème permettent d'aller au-delà de cette restriction même si les temps de calcul restent toujours importants.

A titre d'exemple de modèles tridimensionnels : *TELEMAC 3D*

V.3.4 PRESENTATION DE QUELQUES LOGICIELS

Ci-dessous sont présentés quelques logiciels de modélisation hydrodynamique :

Tableau 1: comparaison entre les différents Logiciels (Yahiaoui)

Modélisation	Description	Equation	Nom du logiciel	Atouts	Limites
Modélisations 1D dites filaires	Onde cinématique	Barré Saint-Venant simplifié (BSV 1D)	LISFLOOD-FP (Bates et De Roo 2000)	Permet d'utiliser des données topographiques précises	Equations simplifiées
	SCM (Single Channel Method)	Barré Saint-Venant (BSV 1D)	Thalweg-Fluvia (CEMAGREF)		
	Modélisation 1D à casiers (pseudo 2D)	BSV 1D	LIDO (CETMEF)	Conçu pour les grandes plaines inondables	
	DCM (Divided Channel Method)	BSV 1D	HEC-RAS (USACE), Mike 11 (DHI)	Robustesse et fiabilité	Peu adapté aux reliefs complexes
	DCM + échange turbulent	BSV 1D	Mascaret (EDF), Mage5 (CEMAGREF)	Tient compte des échanges turbulents entre lits	
	EDM (Exchange Discharge Method)	BSV 1D	Axeriv (Université Louvain)	Tient compte des échanges turbulents et des transferts de masse entre lits	Peu diffusé, reste du domaine de la recherche
Modélisations 2D	/	BSV 2D	DECAMETRE Telemac 2D (LNH-EDF), Mike 21 (DHI), RUBAR (CEMAGREF)	Adapté aux reliefs et aux champs de vitesse complexes	Temps de calculs longs
Modélisations 3D	/	Navier-Stokes	Mike 3 (DHI)	Equations complètes	Temps de calculs très longs

V.3.5. LOGICIEL HEC-RAS.

HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Centre de l'U.S. Army Corps of Engineers USACE (2010a et 2010b). Il est présentement utilisé dans plusieurs firmes d'ingénierie et organismes gouvernementaux. HEC-RAS est doté d'interfaces conviviales d'édition et de paramétrage des simulations. Il peut traiter des cas complexes, et il est disponible en freeware.

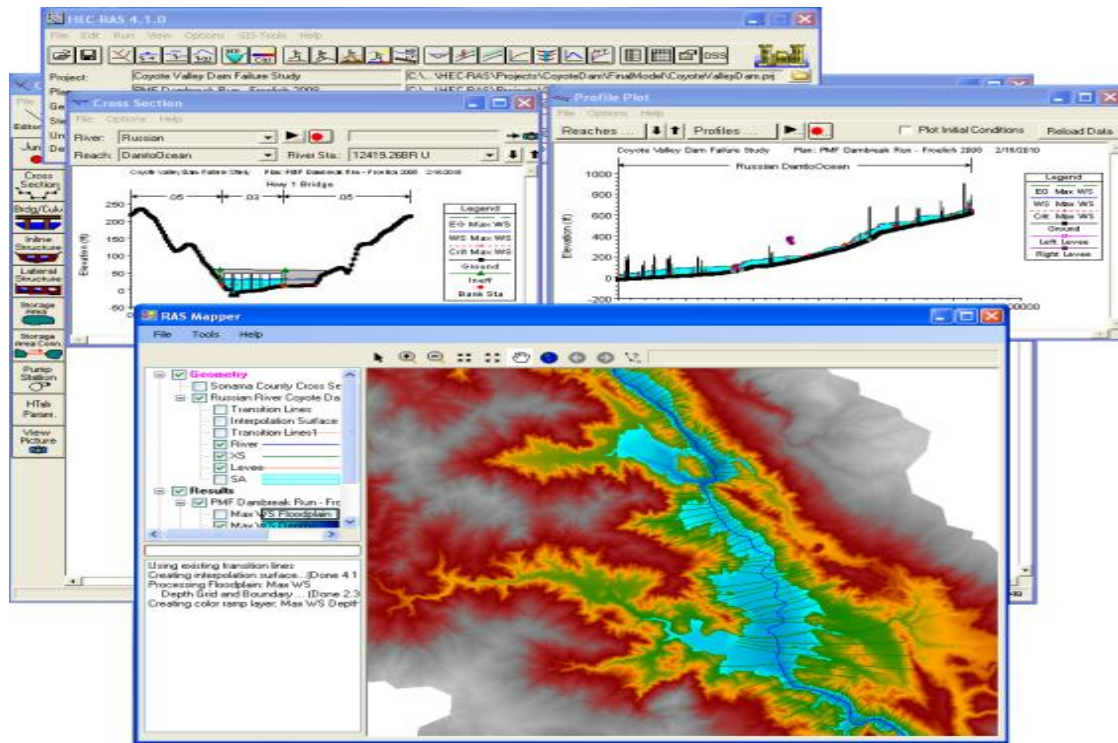


Figure 3: Logiciel HEC-RAS de Hydrologic Engineering Center.

HEC-RAS résout les problèmes des écoulements à surface libre permanent ou non-permanent de calcul de ligne d'eau en graduellement varié.

Il résout l'équation de l'énergie unidimensionnelle, les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements à proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement. Pour les écoulements débordants, la section totale est divisée en sous-sections homogènes en terme de forme et de rugosité, et chaque débit partiel est calculé selon la *"Divided Channel Method"* à l'aide de la formule de Manning-Strickler.

V.3.6. Coefficient de Manning d'un lit composé.

Le coefficient de Manning (Chow, 1959) est une caractéristique de la nature des parois .

Tableau 2: Valeurs du coefficient "n" de Manning

Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,010	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,010	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,020	0,025	0,030
Pierres sèches	0,025	0,030	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisses	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Source : Goudjil et Kaci, 2009

V.3.7 Terminologie utilisée par HEC-RAS

HEC-RAS utilise le concept de Projet afin de réaliser une simulation du comportement hydraulique d'un cours d'eau. Tel que défini par HEC-RAS, un projet est un ensemble de fichiers permettant de simuler le comportement hydraulique d'un cours d'eau pour diverses conditions. La notion de Projet comprend également un ensemble d'autres termes qui lui sont associés et ceux-ci sont expliqués dans cette section. La figure suivante illustre la hiérarchie des fichiers d'un projet (HEC-RAS, 2009).

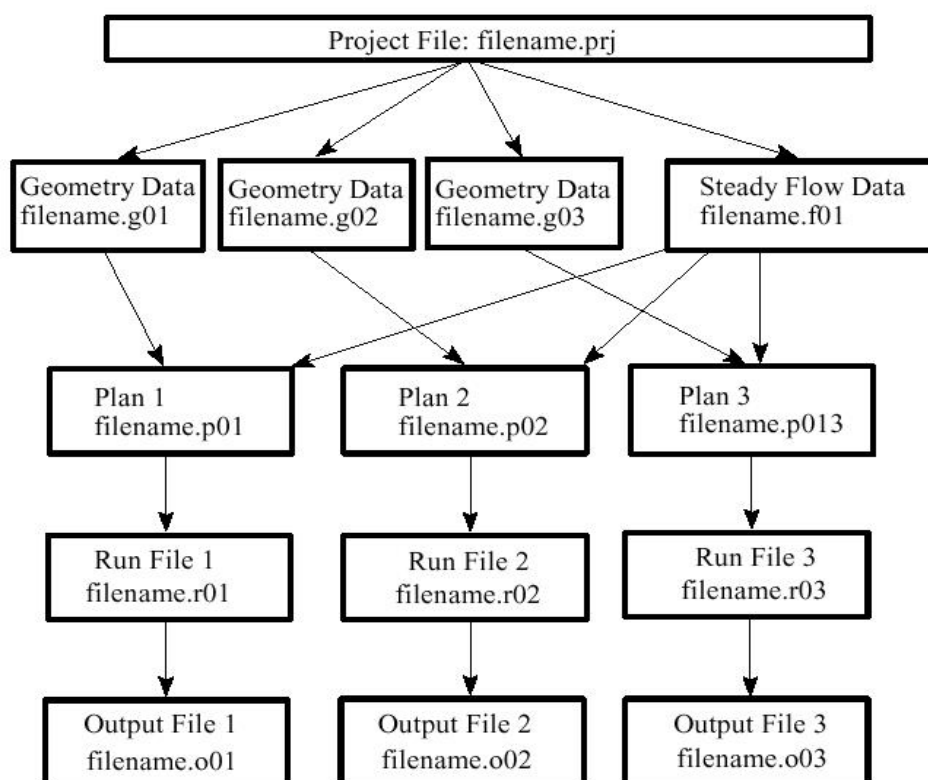


Figure 4 : Schéma des fichiers d'un projet (HEC-RAS, 2009)

Projet (Project) : Il comporte l'extension .PRJ.

Géométrie (Geometry) : Les fichiers peuvent ainsi comporter l'extension .G01 à G.99.

Débit (Flow) : Le fichier Débit est utilisé pour simuler les écoulements permanents. Il contient le nombre de Profile devant être calculés, les données de débit pour chacun d'eux et les conditions limites pour chaque tronçon. Un Profile désigne l'ensemble des niveaux d'eau calculés pour des conditions particulières de débit. De la même façon que précédemment, l'extension du fichier peut être de .F01 à .F99.

Plan (Plan) : Un fichier Plan contient un titre et une description du plan, de façon similaire aux informations d'un Projet.. Il y a un fichier .P** pour chaque Plan et ceux-ci peuvent comporter l'extension .P01 à .P99.

Simulation (Run) : Le fichier simulation contient toutes les données nécessaires à l'exécution d'une simulation, définie à l'intérieur d'un Plan. Son extension peut être .R01 à .R99. Par exemple, le fichier .R01 correspond au Plan .P01

Résultats (Output) : Tous les résultats d'une simulation sont contenus dans le fichier Output. Les fichiers de résultats possèdent l'extension. O01 à . O99 et leur numérotation est également associée à celle des fichiers Plan.

Tous les fichiers créés à l'intérieur d'un même projet comportent le même nom, soit celui défini au départ par l'utilisateur. Seule l'extension diffère et les différentes extensions des fichiers sont automatiquement créées par HEC-RAS et ne doivent pas être modifiées.

V.4 MODELISATION PAR HEC RAS SU BASSIN VERSANT

La protection de la vallée du M'Zab contre les inondations nécessite la connaissance, en plus des débits de crue, des hauteurs d'eau dans l'Oued M'Zab pendant les différentes périodes et plus particulièrement pendant les périodes de fortes crue.

La présente section est consacrée à la modélisation Hydrodynamique du tronçon situé dans la zone Ahbas, à l'aval immédiat de la digue d'El Atteuf (exutoire du bassin versant étudié)

les simulations numériques ont été exécutées pour une période de retour de 100 ans. La détermination des caractéristiques hydrauliques d'un écoulement à surface le long d'un cours d'eau, nécessite des conditions aux limites amont et aval, des données topographiques du cours d'eau et la définition précise des ouvrages tels que les ponts, les seuils, des vannes et tout ouvrage susceptible d'influencer l'écoulement.

L'utilisation du modèle hydraulique de HEC-RAS, impose de préciser les conditions aux limites amont et aval. Les conditions aux limites **amont** sont, en général, données par un **débit** entrant aux différents points amont du réseau hydrographique modélisé. Ces hydrogrammes résultent de l'étude hydrologique. Par contre les conditions aux limites **aval** prennent en général la forme d'une loi de tarage, donnant la loi du débit en fonction de la hauteur d'eau, mais il est très important de prendre garde à l'influence de

V.4.1 Modélisation du tronçon de l'Oued M'Zab

La modélisation du tronçon de l'Oued M'Zab débute par la définition de la géométrie de ce tronçon.

V.4.2 Définition de la géométrie du tronçon de l'Oued

La définition de la géométrie du tronçon est la première étape de la modélisation hydraulique. Elle consiste à reproduire le plus précisément possible la topographie de ce tronçon dans le logiciel utilisé et d'intégrer les ouvrages hydrauliques qui ont un rôle sur l'écoulement.

La définition physique du cours d'eau est fondamentale dans la modélisation puisque la topographie a un impact très important sur les lignes d'eau simulées et sur tous les calculs hydrauliques. Il faut donc être très vigilant pour prendre en compte tous les reliefs ayant un impact sur les écoulements simulés.

Dans le modèle HEC-RAS, la topographie du tronçon de l'Oued est définie par des profils en travers qui, dans le cadre d'une modélisation hydraulique doivent respecter six règles simples :

- Etre perpendiculaires aux écoulements
- Ne jamais se croiser
- Considérer toute la largeur du lit majeur
- Décrire le profil en long
- Permettre la modélisation des ouvrages hydrauliques
- Prendre en compte les contractions et les élargissements des écoulements

La construction du modèle nécessite une bonne connaissance du terrain et des écoulements. Les données topographiques nécessaires à la construction des profils en travers sont obtenues par des levés sur le terrain et à partir d'un MNT. Les profils en travers sont ensuite importés dans Hec-Ras. Ces profils ont été étendus afin de recouvrir l'intégralité des zones inondables. Une fois les profils en travers sont entrés dans le logiciel de modélisation, des retouches sont établies pour améliorer la précision des profils en travers. Puisque le nombre de profil est faible pour définir convenablement le tronçon de l'Oued, de nouveaux profils sont créés par des interpolations.

V. 4.3 Données de base

Dans tous modèles hydrauliques, il est nécessaire de connaître et de définir les conditions aux limites, c'est-à-dire les conditions hydrauliques du cours d'eau à l'amont et à l'aval des limites du modèle. Elles sont utilisées pour résoudre les équations qui permettent de réaliser les simulations et sont donc très importantes. Les conditions aux limites peuvent être définies par une hauteur d'eau ou par un débit constant ou variable au cours du temps.

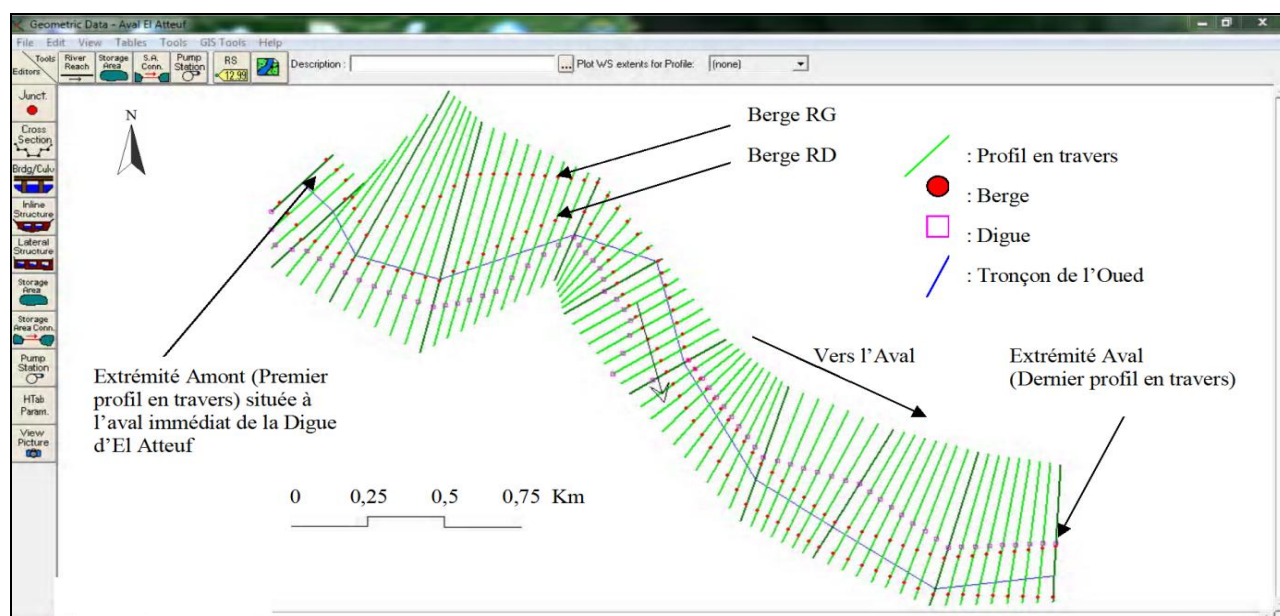


Figure 5 : Profils en travers construits et importés dans "HEC-RAS"

La définition des conditions aux limites dans le logiciel HEC-RAS (à une dimension) est très simple. Il suffit simplement de renseigner le premier profil en travers du tronçon par une condition limite amont et le dernier profil par la condition limite aval. La principale contrainte du logiciel HEC-RAS est **l'homogénéité** du paramètre hydraulique considéré pour définir les conditions aux limites. En effet, le paramètre hydraulique utilisé pour définir la condition limite sera considéré comme constant sur toute la largeur du profil en travers. Aux **extrémités** amont et aval du tronçon considéré de l'oued M'Zab, la hauteur normale des écoulements a été choisie comme condition.

-Régime hydraulique : Le choix du régime permanent

Le régime hydraulique est déterminant sur les résultats d'une simulation. Le choix du régime hydraulique dépend surtout de l'usage des résultats et des applications des simulations.

-Il existe deux grands types de simulations : les simulations en régime permanent et celles en régime transitoire. Le régime permanent ne dépend pas du temps, c'est-à-dire que les différentes variables

hydrauliques sont constantes (hauteur d'eau, vitesse...). Par contre, le régime **transitoire** dépend du temps. A chaque pas de temps, un calcul hydraulique est effectué pour simuler un écoulement. Ce type de régime est très intéressant pour observer les phénomènes d'écèlement des crues. Mais l'utilisation du régime transitoire est assez lourde et instable ce qui limite son utilisation à des modèles de petite taille ou de résolution peu précise (**exemple : rupture de barrage ou de digue**) (Marant, 2009).

- **Le Débit de projet**

À l'aval immédiat de la digue El Atteuf, le débit à considérer est montré dans le Tableau suivant. Ce débit est obtenu par l'application du modèle HEC-HMS. Après avoir construit le modèle hydraulique, défini les conditions aux limites, le régime d'écoulement et les données de base, les simulations peuvent débuter.

V.4.4 DONNEES D'ENTREE

Les données nécessaires pour réaliser la simulation sont :

- Le débit
- La forme du cours d'eau
- Les sections en travers
- Les longueurs entre les sections en travers
- Les coefficients de contraction et d'expansion
- Les coefficients de rugosité
- Les dimensions et le nombre de dalots à mettre en place au niveau de chaque gué submersible
- Les limites du lit mineur

- **La forme du cours d'eau**

Nous avons d'abord tracé le cours d'eau à l'aide d'une image placée en arrière plan, qui a été importée à partir du logiciel SIG

- **Les sections en travers**

Le modèle de calcul utilisé, nécessite les coordonnées (Y, Z) des différents points délimitant la section considérée (X).

- **La longueur entre les sections en travers**

Nous avons également mesuré à l'aide du logiciel utilisé les longueurs entre les centres des sections ainsi qu'entre leurs extrémités afin de les injecter au module de calcul HEC RAS

- **Les coefficients de contraction et d'expansion**

Le code HEC-RAS recommande d'utiliser les valeurs suivantes du coefficient de contraction :

- S'il n'y a pas de transition, C est nul.
- Pour une **transition** graduelle, on a 0.1 pour le coefficient de contraction et 0.3 pour le coefficient d'expansion.
- Au **niveau d'un pont**, on a 0.3 pour le coefficient de contraction et 0.5 pour le coefficient d'expansion.
- Pour une **brusque variation**, on a 0.5 pour le coefficient de contraction et 0.8 pour le coefficient d'expansion.

Les coefficients de rugosité

les différents coefficients de Manning suivant :

Béton : $n=0.0125$,

Lit de l'oued : $n=0.045$,

Endiguement : $n=0.033$

- ***Les dimensions et le nombre de dalots à mettre en place au niveau de chaque gué submersible***

Afin de maintenir une possibilité de desserte de certains quartiers isolés, Ces passages seront réalisés grâce à des dalots sur lesquels sera placée la route. Le nombre de dalots dans chaque gué est quant à lui présenté plus bas.

- ***Les limites du lit mineur***

Le module de calcul HEC RAS exige également les abscisses (X) des limites (largeur) de chaque section en travers.

V.5. SIMULATION PAR HEC-RAS

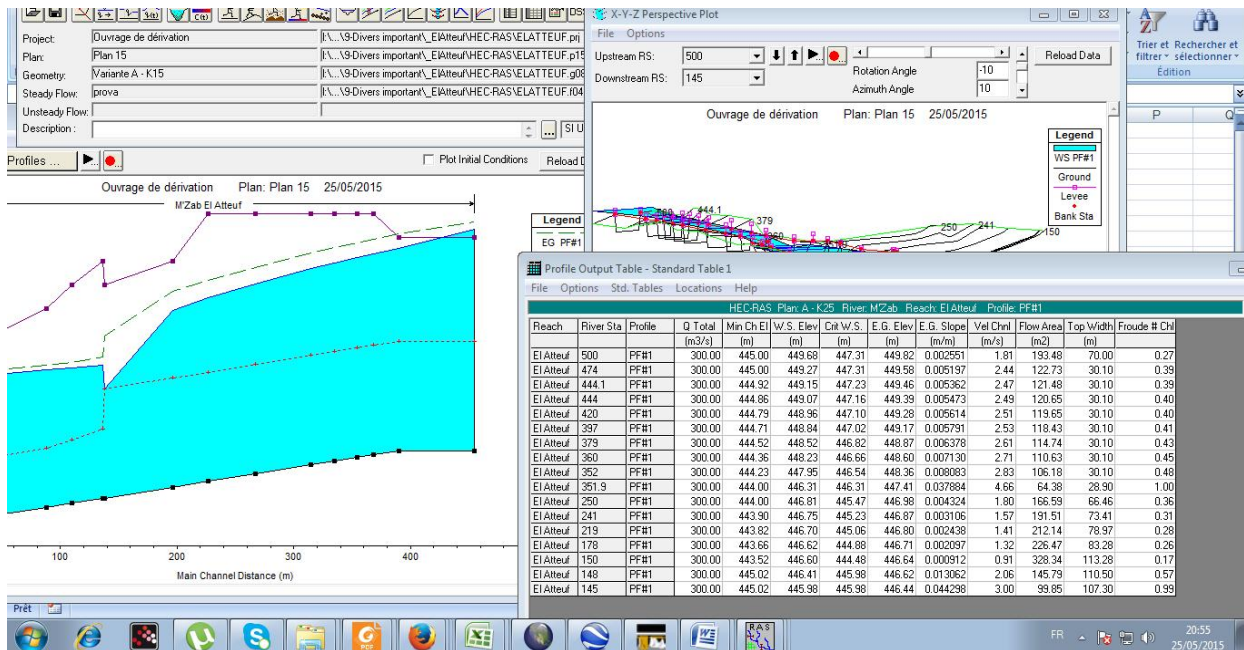


Figure 6 : simulation avec un débit de 300 m³/s

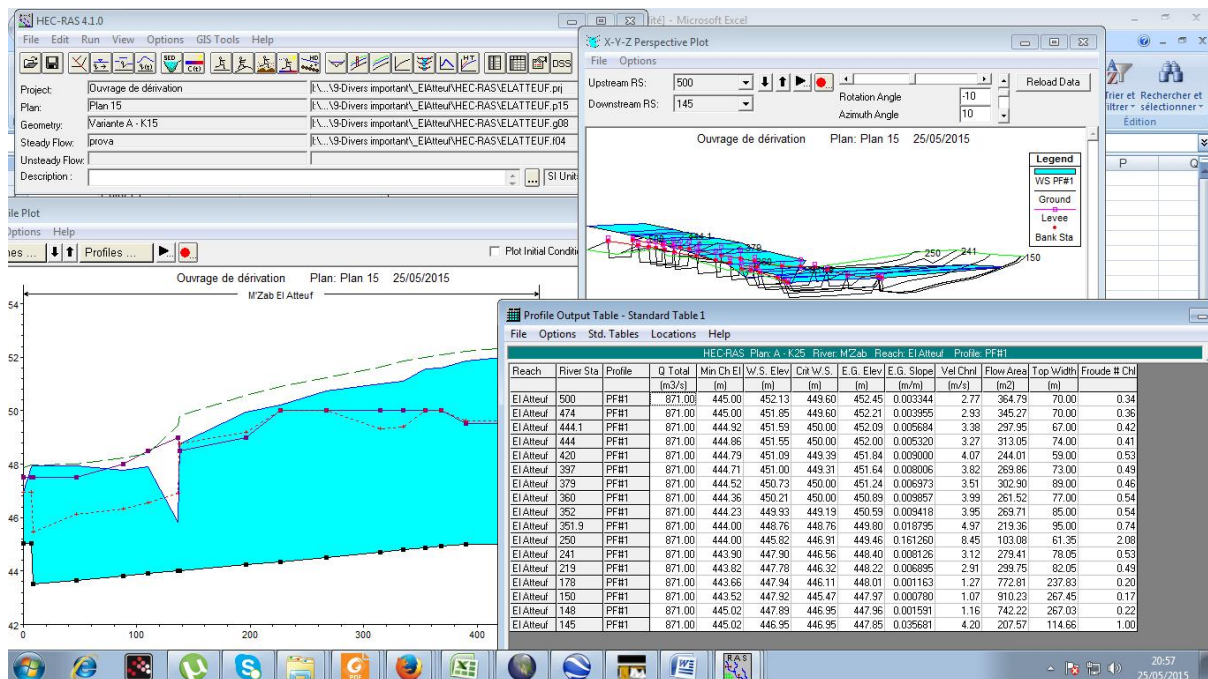


Figure 7 : simulation avec un débit de 888.5 m³/s

La figure suivante permet de visualiser le profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de profondeur critique. Nous constatons que la ligne d'eau dépasse la cote du terrain naturel ce qui engendre une inondation des berges.

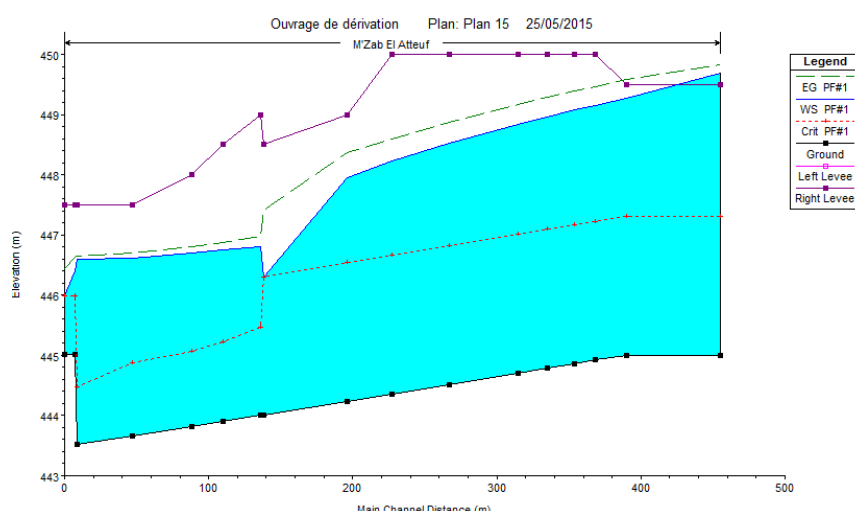


Figure 8 : Profil en long de la ligne d'eau et de la ligne de profondeur critique

La figure ci-dessus montre des niveaux d'eau élevés. Les hauteurs d'eau varient de 2,50 m à 5.00 m au-dessus du fond. Une surélévation du plan d'eau est due essentiellement à la diminution de la largeur de l'oued

HEC-RAS Plan: A - K25 River: MZab Reach: El Atteuf Profile: PF#1												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Ch
El Atteuf	500	PF#1	300.00	445.00	449.68	447.31	449.82	0.002551	1.81	193.48	70.00	0.27
El Atteuf	474	PF#1	300.00	445.00	449.27	447.31	449.58	0.005197	2.44	122.73	30.10	0.39
El Atteuf	444.1	PF#1	300.00	444.92	449.15	447.23	449.46	0.005362	2.47	121.48	30.10	0.39
El Atteuf	444	PF#1	300.00	444.86	449.07	447.16	449.39	0.005473	2.49	120.65	30.10	0.40
El Atteuf	420	PF#1	300.00	444.79	448.96	447.10	449.28	0.005614	2.51	119.65	30.10	0.40
El Atteuf	397	PF#1	300.00	444.71	448.84	447.02	449.17	0.005791	2.53	118.43	30.10	0.41
El Atteuf	379	PF#1	300.00	444.52	448.52	446.82	448.87	0.006378	2.61	114.74	30.10	0.43
El Atteuf	360	PF#1	300.00	444.36	448.23	446.66	448.60	0.007130	2.71	110.63	30.10	0.45
El Atteuf	352	PF#1	300.00	444.23	447.95	446.54	448.36	0.008083	2.83	106.18	30.10	0.48
El Atteuf	351.9	PF#1	300.00	444.00	446.31	446.31	447.41	0.037884	4.66	64.38	28.90	1.00
El Atteuf	250	PF#1	300.00	444.00	446.81	445.47	446.98	0.004324	1.80	166.59	66.46	0.36
El Atteuf	241	PF#1	300.00	443.90	446.75	445.23	446.87	0.003106	1.57	191.51	73.41	0.31
El Atteuf	219	PF#1	300.00	443.82	446.70	445.06	446.80	0.002438	1.41	212.14	78.97	0.26
El Atteuf	178	PF#1	300.00	443.66	446.62	444.88	446.71	0.002097	1.32	226.47	83.28	0.26
El Atteuf	150	PF#1	300.00	443.52	446.60	444.48	446.64	0.000912	0.91	328.34	113.28	0.17
El Atteuf	148	PF#1	300.00	445.02	446.41	445.98	446.62	0.013062	2.06	145.79	110.50	0.57
El Atteuf	145	PF#1	300.00	445.02	445.98	445.98	446.44	0.044298	3.00	99.85	107.30	0.99

Figure 9 : table détaillée et régime d'écoulement Nombre de Froude

Le nombre de Froude est inférieur à 1 dans tous les points du tronçon. Donc le régime critique n'est pas atteint.

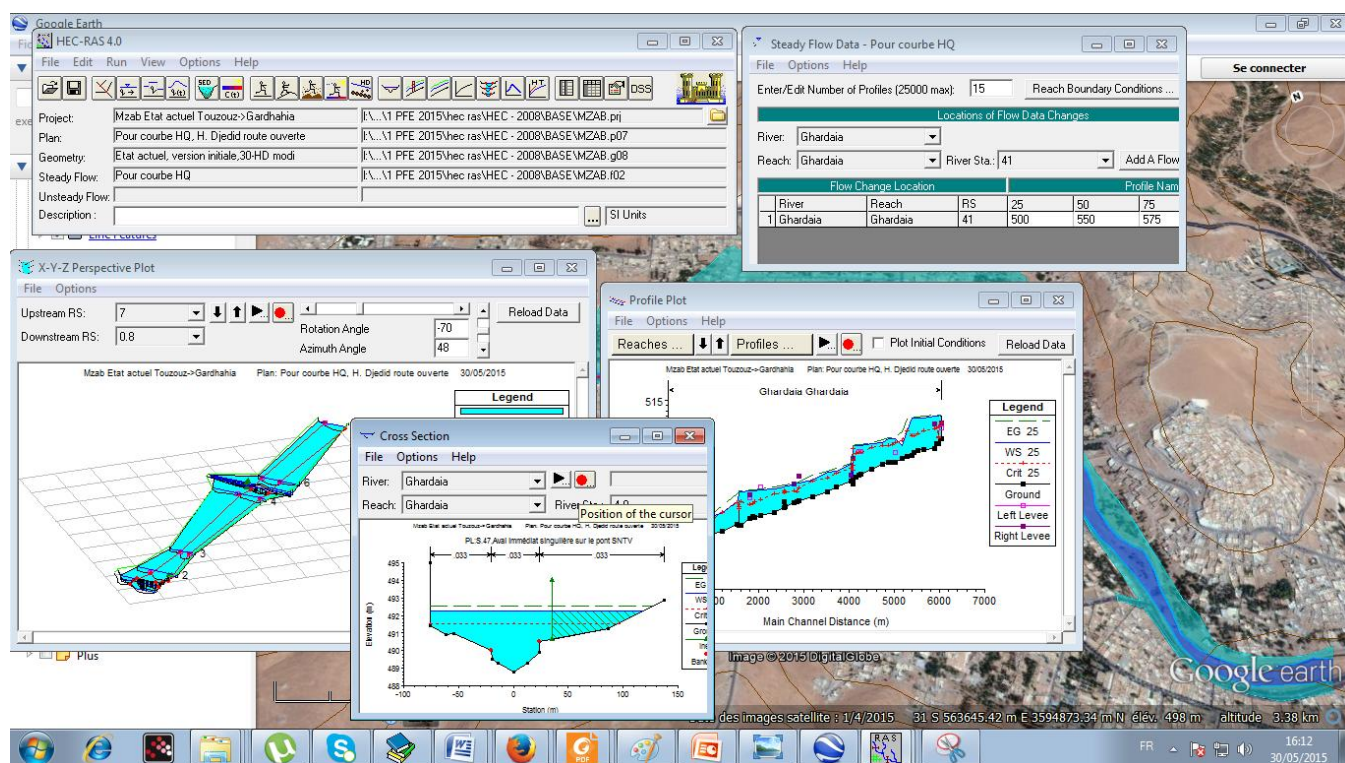


Figure 10 : affichage de résultats par HEC-RAS

V.6. AVANTAGES

HEC RAS a des mérites, notamment son soutien par le US Army Corps of Engineers, les améliorations en cours, et son acceptation par de nombreux organismes gouvernementaux et des entreprises privées. Il est disponible en téléchargement gratuit à partir du site Web de HEC.

Diverses entreprises privées sont enregistrés comme «fournisseurs» officiels et offrent des prestations de conseil et d'ajouter sur le logiciel. Certaines distribuent également le logiciel dans les pays qui ne sont pas autorisés à accéder à des sites Web de l'US Army. Toutefois, le téléchargement direct de HEC comprend une documentation complète, et les scientifiques et les ingénieurs versés dans l'analyse hydraulique doit avoir peu de difficulté en utilisant le logiciel.

V.7 INCONVÉNIENTS

Les utilisateurs peuvent trouver des problèmes d'instabilité numériques lors des analyses instables, en particulier dans les rivières et les ruisseaux raide et / ou très dynamique. Il est souvent possible d'utiliser HEC RAS pour surmonter les problèmes d'instabilité sur les problèmes de la rivière. HEC RAS est un modèle hydrodynamique dimensions 1 et ne sera donc pas bien fonctionner dans des environnements nécessitant la modélisation multidimensionnelle. Cependant, il ya des fonctions intégrées qui peuvent être utilisés pour rapprocher l'hydraulique multidimensionnels.

V.8 DISCUSSION DU RESULTAT HEC RAS

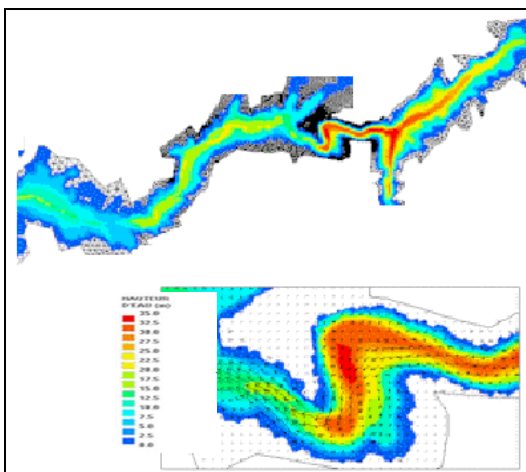
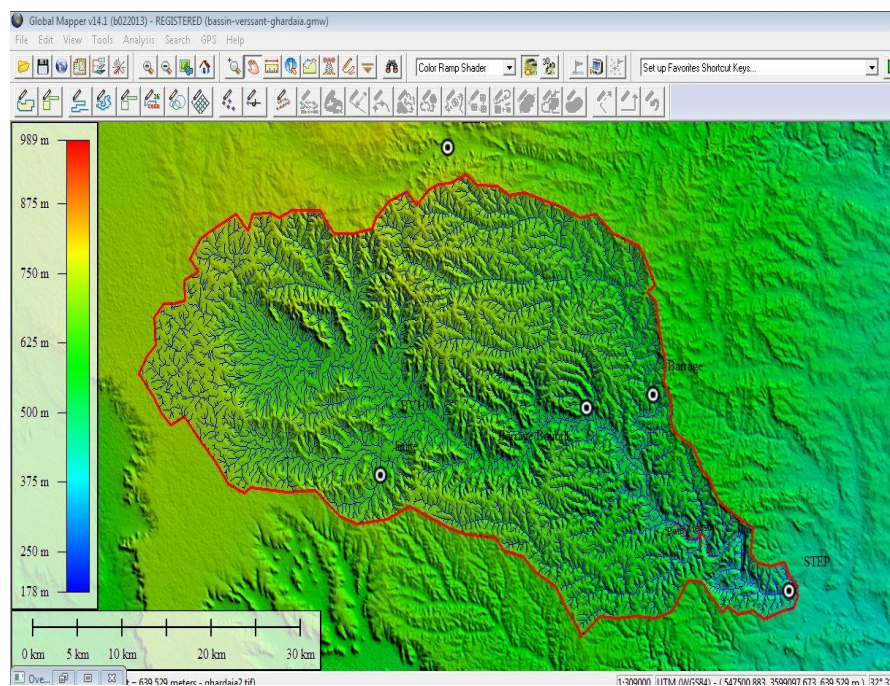
Suite au débit maximal obtenu par la simulation par le logiciel HEC HMS qui est de 888.5 m³/s ce dernier est introduit avec les données géométrique de l'oued sur le logiciel HEC-RAS.

L'utilisation du régime **permanent** se justifie parfaitement pour répondre aux objectifs de la modélisation hydrodynamique dans l'Oued M'Zab. Le débit utilisé dans les simulations sera le débit centennal, observé sur le tronçon étudié. L'injection de ce débit constant permettra de simuler la pointe de la crue et de produire ainsi des cartes d'inondation. Dans le modèle HEC-RAS, l'utilisation du régime permanent est très simple et surtout très rapide puisque le logiciel fournit un seul résultat à chaque point.

Le résultat de simulation ainsi obtenu par HEC-RS servira comme données de base pour l'élaboration d la cartographie des zones inondables

CHAPITRE VI

CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES



CHAPITRE VI : CARTOGRAPHIE DES ZONE INONDABLES

VI.1 INTRODUCTION

La cartographie constitue un outil permettant aux autorités de prendre en compte la composante "risque d'inondation" correspond aux zones à risque. elle représente le caractère inondable du sol pour une probabilité donnée. elle caractérise la présence ou non d'enjeux sensibles aux inondations.

les zones cartographiées (*aléa d'inondation et zones inondables*) ne représentent pas forcément des zones qui ont déjà été inondées, mais bien des zones qui pourraient être inondées. Donc, ce n'est pas parce que, de mémoire d'homme, une parcelle n'a jamais été inondée qu'elle ne peut pas être renseignée comme inondable.

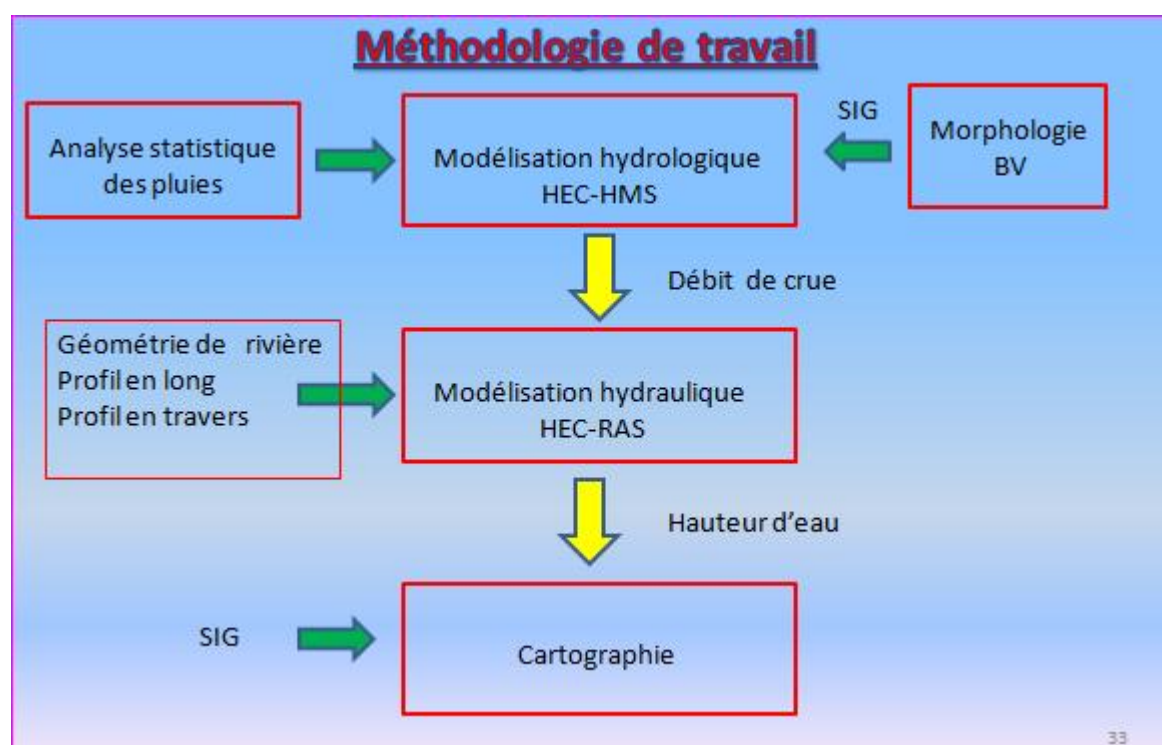


Figure 84 : la méthode générale d'élaboration des cartographie

Deux types d'inondation sont pris en compte : le débordement de cours d'eau et le ruissellement.

La **valeur de l'aléa d'inondation** résulte de la combinaison de deux facteurs :

- la *réurrence* (période de retour ou occurrence) de l'inondation ou de la pluie à l'origine du ruissellement;
- son *importance* (profondeur de submersion ou débit de pointe). Cette valeur peut être : très faible, faible, moyenne ou élevée.

Pour chaque scénario, la carte des **zones inondables** donne la valeur de profondeur de submersion (débordement) selon 4 classes de hauteur d'eau (de 0 à 30 cm, de 30 à 130 cm, plus de 30 cm, indéterminée) et la valeur de débit de pointe (ruissellement) selon 3 classes : faible, moyen, élevé.

Pour chaque scénario, la carte des **risques d'inondation** présente l'emprise des zones inondables propre à ce scénario ainsi que les **récepteurs de risques** (ou enjeux) identifiés au sein de cette emprise. Ces enjeux sont d'ordre humain, économique, environnemental et/ou patrimonial.

la cartographie des zones inondables par la crue catastrophique d'octobre 2008 de la ville Ghardaïa en utilisant la technique des systèmes d'information géographique et la télédétection afin de proposer des aménagements adéquats pour lutter contre la crue.

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes sources d'informations utilisées, les moyens de travail ainsi que la méthodologie adoptée pour atteindre notre objectif.

IV-2 DONNÉES UTILISÉES

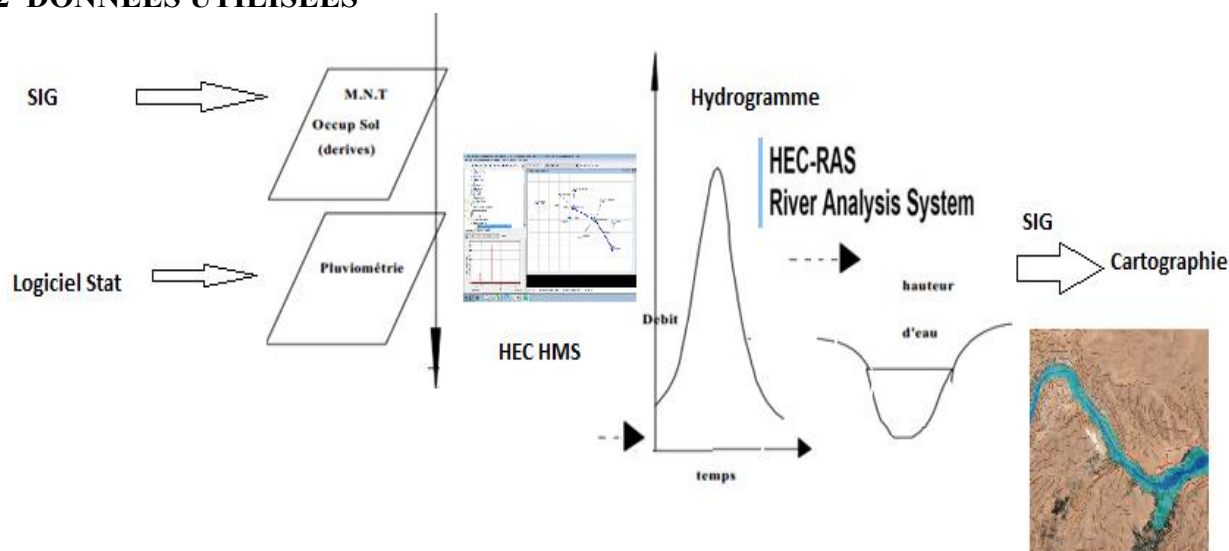


Figure 80 : Diagramme d'élaboration des cartes

IV-2-1 Images satellitaires

Nous avons utilisés des images à différentes résolutions spatiales issues des systèmes spatiaux (ALSAT-1 et autres internationaux).

Par ailleurs, une animation générée à partir de la combinaison d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) avec des images spatiales à haute résolution, a permis le survol des régions sinistrées et l'identification des principaux impacts de ces inondations avec une excellente perception visuelle. La méthode adoptée pour cartographier les impacts est fondée sur l'analyse des différents paysages qui composent la vallée du M'Zab, à partir des images spatiales prises après les inondations.

VI-2-2 Données topographiques

On a utilisé une carte géographique d'une échelle de 1/200 000, éditée et publiée par l'Institut Géographique National en 1960.

Le modèle numérique du terrain comme un outil de la télédétection active (RADAR), nous permet de donner pour chaque point ses trois coordonnées X, Y et Z.

VI.2.3 Données auxiliaires

Autre données nous permet de bien élaborer notre travail comme les limites administratives, la localisation des digues de rétention, données statistiques...

VI.4. CARTOGRAPHIE DE LA ZONE INONDÉE

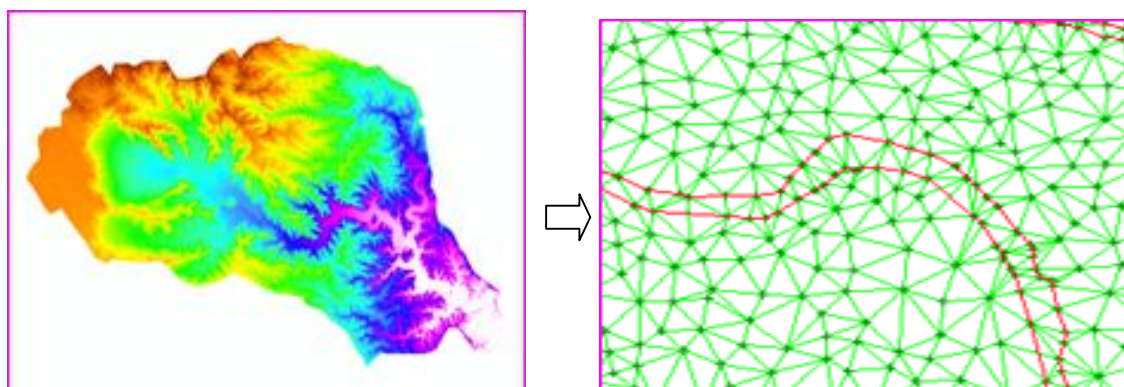


Figure 84 : Triangulation du MNT

La triangulation du modèle numérique de terrain est nécessaire pour la cartographie des zones inondables. La hauteur de crue déterminée par HEC RAS + MNT donne l'altitude d'inondation au niveau de l'Oued Mzab, l'intersection du plan d'inondation avec le niveau du terrain naturel forme un plan horizontal qui représente la zone inondable. Il est à noter que si la hauteur de crue augmente la surface inondable augmente.

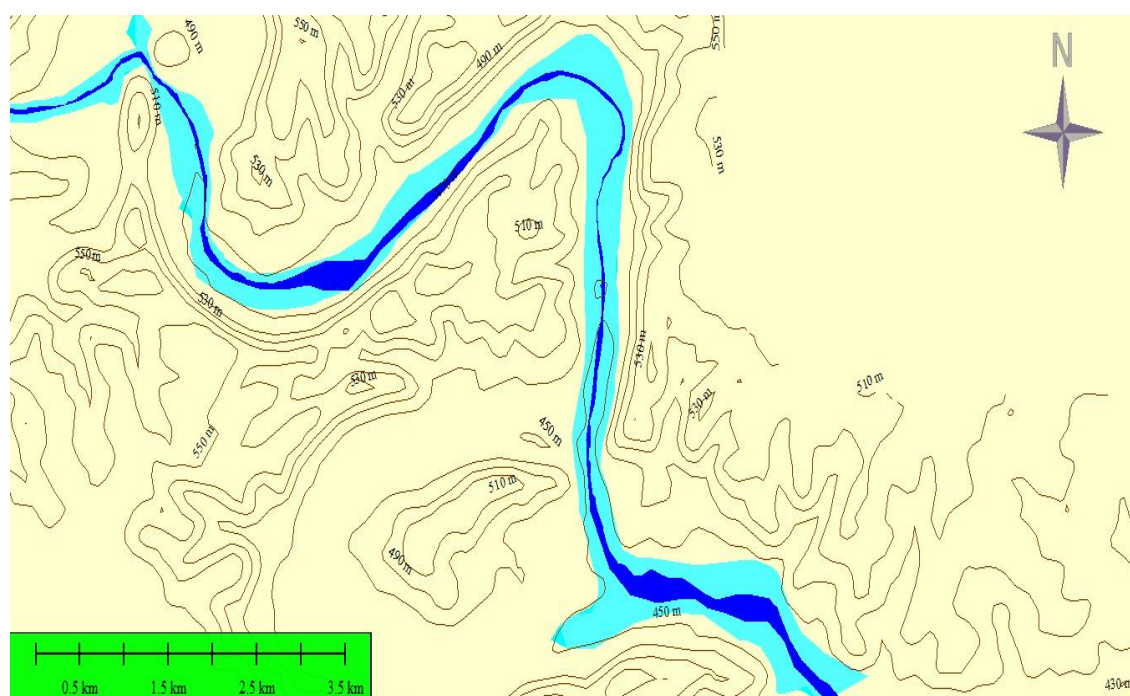


Figure 85 : cartographie des zones inondable

Légende

- Zone inondée, débordement , $Q_{\max} = 888.5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Pas d'inondation, $Q_{\max} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

La figure 85 représente la cartographie des zones inondables dans le cas d'une crue. Si le débit max de crue est inférieur ou égale $300 \text{ m}^3/\text{s}$ il n'y aura pas d'inondation, si le débit maximal dépasse le $300 \text{ m}^3/\text{s}$, il y aura un débordement.



Légende

- Zone inondée, débordement , $Q_{\max} = 888.5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Pas d'inondation, $Q_{\max} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Figure 86 : Simulation de la zone inondé d'El atteuf



Figure 87: Simulation de la zone inondé d'El Atteuf et Bounoura

Légende

- Zone inondée, débordement , $Q_{\max} = 888.5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Pas d'inondation, $Q_{\max} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

VI.5 DISCUSION DE RESULAT DE CARTOGRAPHIE

D'après les résultats de la simulation hydraulique sur HEC-RAS, et suite à la détermination de la hauteur maximale d'eau atteint lors du crue, nous avons aboutit à la cartographie par le bais de la MNT et le TIN , la cartographie obtenue permet le calage du modèle hydraulique en le comparant à la cartographie établis par l'agence spatiale algérienne lors de la crue du 1^{er} octobre 2008.

VI.6 Plan O.R.S.E.C. Inondation.

L'ensemble des concepts actuels s'accordent sur de fait que, quel que soit la cause de l'inondation, la prévention peut adopter deux approches fondamentales, d'une part, elles peuvent être accomplies par des moyens de contrôle permanent, construit ou non, imaginés et mis en œuvre avant la crue, d'autre part elles peuvent être obtenue par l'emploi de mesures temporaires, préparées à l'avance mais appliquées lors du sinistre. Elle comporte l'acquisition des données, leurs traitements et l'analyse l'estimation, la prévision, la prévention des crues et la préparation de règle de contrôle (DGPC, 2010).

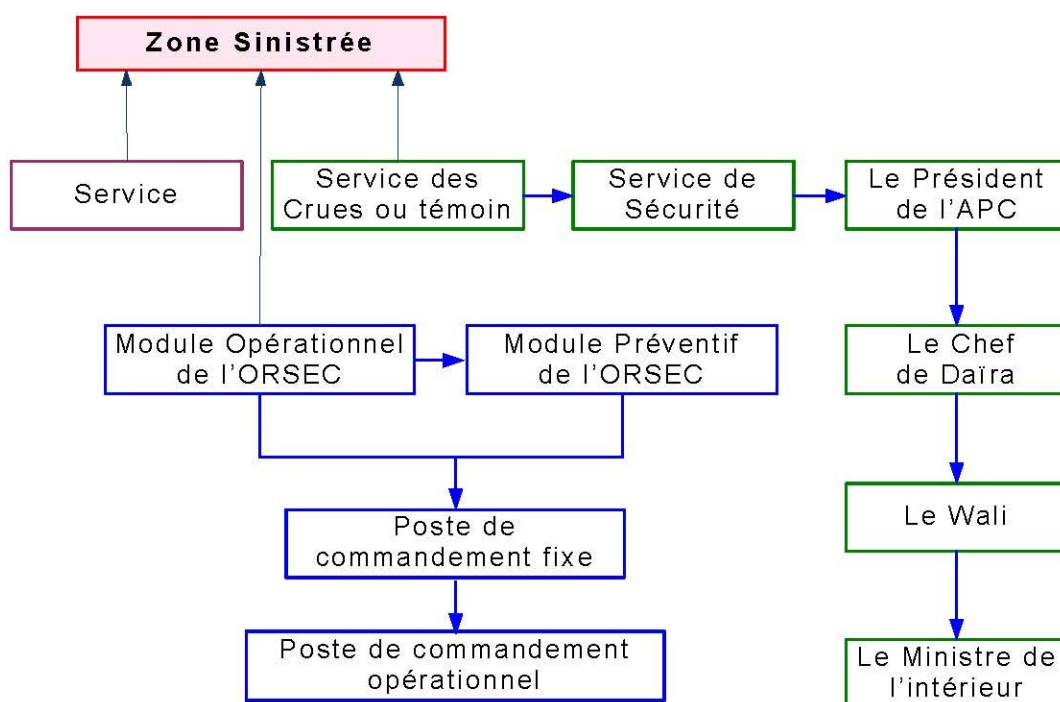


Figure 88: Schématisation des gestions des catastrophes par le plan ORSEC.

Un Plan O.R.S.E.C. (**OR**ganisation des **SE**Cours) n'est déclenché que lorsque l'événement exige de mobiliser toutes les forces vives de la wilaya (organismes publics, parapublics ou privés) ou lorsque le renfort de moyens interdépartementaux, régionaux ou nationaux est nécessaire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'inondation représente un risque majeur pour les personnes et les biens. Malgré les outils techniques disponibles, la lutte contre les inondations est toujours très complexe du fait de la rareté, de la rapidité et l'ampleur des phénomènes. La synthèse des risques liés aux inondations est basée sur trois principaux concepts : **hydrologique**, **hydrodynamique** et **cartographique**.

L'étude **hydrologique** par le modèle **HEC-HMS** permet d'alimenter le modèle hydraulique par les conditions aux limites amont à l'aide d'hydrogrammes synthétiques mono-fréquence et permet aussi d'alimenter le coté socio-économique pour donner une mesure équivalente à la vulnérabilité.

La composante **hydraulique** conduit à faire une simulation nécessaire afin de déterminer l'aléa. Cette simulation unidimensionnelle ou l'écoulement à surface libre est décomposée en écoulement dans le chenal principal dans les plaines d'inondation actives. Le choix du logiciel **HEC-RAS** pour effectuer cette simulation hydraulique est conditionné par la nature des données topographiques, car cette composante sert d'entrée du modèle hydraulique comme condition à la limite, et comme une composante cartographique nécessaire à la représentation spatiale de l'aléa.

La méthode Modèle 1D, Méthode simple de calcul aboutissant à la détermination facile de l'extension de la submersion en des points caractéristiques du l'Oued. Elle est particulièrement bien adaptée le long du tronçon de l'oued dans lesquels l'écoulement progresse selon une direction déterminée. Elle apporte des réponses face au risque de d'inondation dans le cas de crue. Cette methode reste sujet de développement et de recherche.

La **cartographie** du risque d'inondation est nécessaire à la mise en place **d'un système d'aide à la gestion** pour que les aménagements préconisés puissent être testés et analysés dans le contexte global du bassin versant. En matière d'aménagement, le ralentissement dynamique consiste à utiliser autant de solutions qui visent à ralentir l'eau mais uniquement aux périodes les plus critiques, c'est-à-dire pendant les événements de crues eux-mêmes soit limités à quelques heures ou quelques jours. La démarche utilisée dans cette étude pour la cartographie des zones inondables s'articule sur :

- Le classement des zones inondables par voie d'utilisation de photographie, MNT et enquêtes sur terrain.
- L'analyse des données historiques relatives aux crues et évaluation des fréquences d'occurrence de ces événements.
- L'étude des caractéristiques, hydro-climatologiques et topographiques, du bassin versant ,
- L'utilisation des outils informatiques de modélisation et de cartographie définissant les degrés du risque.

A travers ces résultats, il apparaît clairement que les simulations effectuées par les différents modèles sont encourageantes comparés avec des études antérieures et les cartographies établies par l'Agence Spatiale Algériennes (ASAL) lors de l'inondation de 2008 à Ghardaïa. Le choix d'utilisation du HEC-RAS réside dans l'utilisation d'une modélisation de l'écoulement à surface libre en débordement du chenal vers la plaine d'inondation active. Dans une étude comparative (Horritt et al., 2002) entre HEC-RAS, TELEMAC-2D et LISFLOOD-FP appliqués sur une longueur de 60 km de la rivière Severn au Royaume-Uni, a montré que HEC-RAS donne des résultats très fiables par rapport à TELEMAC-2D et LISFLOOD-FP.

Sur le plan comparatif, on peut souligner que ces résultats concluants peuvent être améliorés, s'il est possible d'utiliser ces modèles, sur d'autres bassins versant des zones similaires afin de les généralisés et de vérifier sa fiabilité.

RECOMMANDATION

Pour mieux cerner les problèmes hydro-climatologiques, il est souhaitable d'installer des stations météorologiques, sur l'ensemble du bassin, permettant ainsi de mieux préciser les paramètres climatiques (*températures, précipitations, humidité, débit des crues, etc. ...*).

Il est souhaitable de :

- Etablir un système d'alerte dans le cas d'une crue catastrophique.
- Faire des études sur la modélisation hydraulique et l'établissement d'une interface entre les différents logiciels à savoir la modélisation hydrologique, hydraulique et le SIG
- Utiliser ces modèles, sur le plan comparatif, pour d'autres bassins versant au niveau des zones similaires afin de les généraliser et de vérifier leur fiabilité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ACHOUR M. (2003) : Etude hydrogéologique de la nappe phréatique de la vallée de Metlili. doc. ANRH. Secteur de Ghardaïa, Algérie.
2. ACHOUR M. (2005) : Inventaire des forages d'eau et enquête sur les débits extraits de la nappe albiennne. Wilaya de Ghardaïa. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. DRS. Ouargla ; Algérie.
3. Actes de l'atelier scientifique et technique sur « L'Outil spatial au service du développement » Palais de la Culture Moufidi Zakaria Alger, 28- 29 mars 2009
4. Ambroise, B., 1998. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : Modélisation systémique et dynamique, Revue des sciences de l'eau, n°12/1, p. 123-153.
5. ANRH (2003) : Note relative à l'étude de la nappe phréatique de la vallée du M'zab. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.DRS. Ouargla; Algérie.
6. BABA SY M. (2005) : Recharge et paléorecharge du Système Aquifère du Sahara Septentrional. Thèse Doct, Univ, Tunis El Manar, 271p.
7. Benaouedj . Contribution à l'étude des inondations dans la vallée du M'Zab (Wilaya de Ghardaïa) Univ Blida 2011
8. BENMIA KOUIDER , Evaluation de la performance des barrages de protection contres les crues cas de la vile d'el Ghazaouat, université de Tlemcen, Thèse Magistère, 2012,
9. BENSAHA H. (2009) : Gestion de périmètres de mise en valeur agricole, cas de la chebka du M'zab, thèse de magister, ITAS, UKM, Ouargla, 125p.
10. BONNARD & GARDEL (BG).(2002) :.Etude d'assainissement et de protection contre les crues de la vallée de l'oued M'Zab ,Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA 2002 .
11. Bonnard et Gardel (BG), 1996. Etude hydrologique de l'Oued M'Zab. Editeur : R. Kerbachi, R. Jourmard, M. Boughedaoui, T. Goger. 194pages.
12. Bousdira, K., 2007. Contribution à la connaissance de la biodiversité du palmier dattier pour une meilleur gestion et une valorisation de la biomasse : caractérisation morphologique et biochimique des dattes des cultivars les plus connus de la région du M'Zab, classification et évaluation de la qualité. Mémoire de Magister. Université de Boumerdes Algérie.
13. BRL ingénierie (1998a) : Etude du Plan directeur général de développement des régions sahariennes – Connaissances d'Ensemble. Rapport, ANRH, Alger, Algérie.
14. CIEH, ORSTOM, LCT-CEMAGREF-ENGREF., 1996. Crues et apports : Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n°54, 231p.
15. Clarke, R.T., 1973. A review of some mathematical models used in hydrology with observations on their calibration and use, Journal of hydrology, vol.19, p.1-20.
16. Colloque international, usages écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en Méditerranée :
17. DGPC (Direction Générale De La Protection Civile) «Algérie », Bureau des risques naturels, 2007. Les inondations en Algérie, 21p, disponible sur le site de la Direction Générale de la Protection Civile,
18. DUBIEF J. (1953) : Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie ; Service des Etudes Scientifiques ; Alger, Algérie. 451p.
19. DUBIEF J. (1963) : Le climat du Sahara. Institut des recherches sahariennes. Mémoire hors série, tome 1 et 2. Alger, 275p.
20. HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modelling System), 2000. Technical Reference Manual. USA
21. Henine, H., 2004. Interfaçage entre un modèle hydrologique / modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG. Mémoire de Magister. ENP Algérie.
22. Medejerab, A., 2009. Les inondations catastrophiques du mois d'octobre 2008 à Ghardaïa, Geographia Technica, Numéro spécial, p.311-316.
23. MERABET Abbés (2006) : «Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations», Mémoire de Magister, Université de Djilali Liabes-Sidi Bel Abbés.

- 24. Mettas Y. (2010) :** Application des techniques de la géomatique à la gestion des risques naturels, cas d'inondation de la ville de Ghardaïa. Mem. Ing. Univ. Djelfa, Algérie.
- 25. MRE. 2012 , Actes de l'Atelier** « Utilisation des technologies spatiales au service du secteur de l'eau », Atelier technique, Alger, 22 novembre 2012
- 26. Sabrou.** Contribution à l'étude de calibrage et de protection contre les crues de la vallée du M'Zab (W. Ghardaïa) Univ Blida 2011
- 27. OSS (2002) :** Système Aquifère du Sahara Septentrional : De la concertation à la gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière. Projet SASS. Rapport interne. Tunis, Tunisie. 58p.
- 28. OSS (2003a et b) :** Système Aquifère du Sahara Septentrional, Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie, 229p.
- 29. Touaibia, B. (2000).** Erosion – Transport solide impact sur les inondations torrentielles. Cours de perfectionnement. Vibo. Valantia. Italie du 25 au 30 juin 2000.
- 30. Yahiaoui A., B. Touaibia (2010).** Analyse statistique et comparative des débits maxima instantanés annuels QIXA du bassin versant de l'oued Mekerra dans l'ouest Algérien. 6th World FRIEND Conference. Fez – Morocco. Monday October 25th – Friday October 29th,
- 31. Yahiaoui, A., Touaibia, B., Bouvier, C. & Dechemi, N. (2011).** Modélisation du régime de crue en Débit – durée – Fréquence du bassin de l'oued Mekerra dans l'Ouest Algérien.

Webographie:

- <http://www.sciences.univ>
- <http://algerie.el-annabi.com/wilaya/ghardaia.htm>
- www.siarl.fr/diagnostics.htm
- <http://www.protectioncivile.dz>
- http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_CPD-74B_.pdf
- <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>
- http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/_date_05/2015
- <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre11/chapitre11.html>

إن الأخطار الناتجة عن الفيضانات يصعب توقعها في كثير من الأحيان، غير انه يمكن تحديد الأماكن المعرضة لخطر الفيضانات على رقعة جغرافية معينة. هذه الدراسة تهدف إلى النمذجة الهيدرولوجية والنمذجة الهيدروديناميكية. النتائج المتحصل عليها من هاته المحكاة لفترة معينة على شكل مخطط استخدام الأراضي، تحدد أماكن خطر الفيضانات.

النمذجة والمحاكاة للنتائج يؤدي إلى إنشاء رسم خرائط لمناطق الفيضانات للوقاية والحماية ضد مخاطر الفيضانات بواسطة مخطط (ORSEC).

الكلمات المفتاحية : غرداية ، وادي مزاب ، خطر ، الفيضانات ، المحكاة الهيدرولوجية، المحكاة الهيدروليكية، خرنط الفيضانات ، النظام المعلوماتي الجغرافي.

Résumé

L'inondation est un risque prévisible dans son intensité, mais il est difficile de connaître le moment où elle se manifestera. Cette étude conduit à la modélisation hydrologique et la modélisation hydrodynamique. Les résultats obtenus pour une période de retour donnée sous forme d'occupation du sol, constitue l'aléa des inondations relativement à ces hydrogrammes.

La modélisation et la simulation des données du bassin versant conduisent à l'établissement de la cartographie des zones inondables, elle sera très utile dans le sens de mettre en œuvre un plan de prévention et protection contre le risque des inondations (ORSEC).

Mots clés : Ghardaïa, Aléa, Vulnérabilité, Risque, Inondations, Crue, Modèle hydrologique, Modèle Hydraulique, Pluies-débit, Cartographie, SIG, HEC-HMS, HEC-RAS.

Abstract

Flood is a foreseeable risk in its intensity, but it is difficult to know the moment when it will appear. This study led to the hydrological modeling and hydrodynamic modeling. The results for a given return period in the form of land use, the hazard is relatively hydrograph these floods.

Modeling and simulation data of the watershed leading to the establishment of the mapping of flood areas, it will be very useful in the direction of implementing a prevention plan and protection against flood risk plan (ORSEC).

Key words: Ghardaia, Alea, Vulnerability, Hazard, Flood, Flooding, Hydrology Modeling, Hydraulic Modeling, Cartography, GIS, HEC-HMS, HEC-RAS.

LISTE D'ABREVIATION

1D :	Unidimensionnelle;
2D:	Bidimensionnelle;
3D:	Trois dimensions.
ABH	agence du bassin hydraulique
ANRH :	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
ASAL	Agence Spatiale Algérienne
BG	Bonnard et Gardel
BV:	Bassin versant;
CN:	Ccurve number;
Cr	Coefficient de ruissèlement
DEM:	Digital elevation model;
DONESOL :	Base de données nationale des informations spatiales pédologiques.
DGPC	Direction Générale De La Protection Civile d'Alger .
ESP	Ensemble streamflow prediction
ESRI :	Environmental Systems Research Institute.
ETE	Eau, Terre et Environnement
ETP:	Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm).
ETR :	la quantité d'eau réellement évaporée
GES	Gaz à effet de serre
GEV	Loi Généralisée des Valeurs extrêmes, Generalized <i>Extreme</i> Value
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GSSHA:	Gridded surface subsurface hydrologic analysis;
HEC GeoRAS	Hydrologic Engineering Center Geospatial River Analyss Sytem
HEC RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System .
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System
IRMS	Integrated Reservoir Management System
masl	Meters above sea level
MCG	Modèle climatique global
MNE:	Modèle Numérique d'élévation.
MNS:	modèle numérique de surface.
MNT	Modèle Numérique de Terrain.
ORSEC	Plan d'organisation de secours
P	Pluviométrie en mm.
SAD	Système d'aide à la décision
SASS	Système de l'aquifère du Sahara septentrionale
SBV:	Sous bassin versant;
SCS CN:	Soil conservation service curve number;
SCS UH:	Soil conservation service unit hydrograph;
SGBD :	Système de gestion de base de données.
SIG	Système d'information géographique
SRTM:	Shuttle radar mopography mission;
SWMM:	Storm water management model;
T :	Température moyenne mensuelle (°C).
Tb:	Temps de base;
Tc	Temps de concentration
TIFF:	Tagged Image File.
TIN:	Triangular irregular netwok
Tlag:	Temps de réponse;
Tm:	Temps de montée;
Tr:	Temps de réponse;
USACE	US Army Corps of Engineers
UTM	Universal transverse Mercador
WGS84	World Geodetic System 1984
WMS:	Watershed Modeling System.
ASAL	Agence Spatiale Algérienne
DREW	Direction des ressources en eaux de la wilaya

GLOSSAIRE

Courbe hypsométrique : représentation graphique de l'altitude en fonction de la superficie;

Hydrogramme: représentation graphique du débit en fonction du temps;

Hyétogramme: représentation graphique de la précipitation en fonction du temps;

Lit majeur : zone de quelques mètres à plusieurs kilomètres située de part et d'autre du lit mineur. Le lit majeur est délimité par l'étendue des crues exceptionnelles;

Lit mineur : il s'agit du lit habituel du cours d'eau en période d'étiage et pour les crues très fréquentes (période de retour inférieure à un an);

Période de retour : Inverse de la probabilité d'occurrence de la crue. Une crue, de période de retour de 100 ans, a une probabilité de 1/100 de se produire chaque année.

Oued: terme d'origine arabe désignant un cours d'eau temporaire dans les régions arides ou semi-arides. Son écoulement dépend des précipitations et il peut rester à sec pendant de très longues périodes.

LISTE DES LOGICIELS UTILISES:

Modélisation

- Google earth
- HEC-HMS
- HEC-RAS

Statistique

- Hydrolab