**Université Sidi Mohammed Ben Abdellah**
**Faculté des Sciences et Techniques**
***www.fst-usmba.ac.ma***

**Année Universitaire : 2014-2015**

**Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux**

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

# Etude hydrologique dans le cadre du dimensionnement d'un barrage collinaire - cas du site Ardouz - Haut Atlas - Maroc

**Présenté par:**

**Omar SOUABNI**

**Encadré par:**

**- Abdelaziz Aitsliman, HYDROLEADER,**
**- Abderrahim Lahrach, FST - Fès**

**Soutenu le 25 Juin 2015 devant le jury composé de:**

- **Pr. A. Chaouni**
- **Pr. A. Dridri**
- **Pr. A. Lahrach**
- **Pr. L. Benaabidate**
- **Pr. M. Benabdelhadi**

**Stage effectué à : HYDROLEADER,**

Faculté des Sciences et Techniques - Fès
B.P. 2202 – Route d'Imouzzer – FES
212 (0) 535 60 29 53 Fax : 212 (0) 535 60 82 14

## REMERCIEMENT

Un simple mot de merci, n'est pas suffisant pour exprimer ma gratitude et ma reconnaissance envers les personnes qui ont consacré leurs temps, afin de m'aider à élaborer ce projet de fin d'études Master.

Je remercie le personnel du BET Hydroleader, et je concède un remerciement cordial et spécial à Monsieur l'ingénieur Abdelaziz AIT SLIMAN qui a veillé à la bonne marche du travail. Je remercie également professeur Abderrahim LAHRACH d'avoir encadré et accordé l'intérêt à ce travail.

Merci à vous, de prendre l'initiative et lire ce manuscrit…

# SOMMAIRE

**INTRODUCTION GENERALE** ..... **1**

**Chapitre 1-GENERALITES SUR LE BASSIN VERSANT DU TENSIFT** ..... **2**

I - Situation géographique ..... 2

II - Contexte climatique ..... 3

III - Cadre géologique ..... 3

IV - Couvert végétal ..... 4

V - Hydrologie ..... 5

**Chapitre 2 : METHODOLOGIE DE LA VALIDATION DES SITES DE BARRAGES** ..... **6**

INTRODUCTION ..... 6

I - Méthodologie du travail ..... 6

1 - Evaluation topographique ..... 8

2 - Evaluation hydrologique ..... 10

3 - L'observation in-situ ..... 11

4 - Classement prioritaire des sites ..... 12

CONCLUSION ..... 12

**Chapitre 3 : ETUDE HYDROLOGIQUE DU SITE ARDOUZ** ..... **13**

INTRODUCTION ..... 13

I- Caractéristiques géologiques et géomorphologiques du bassin versant d'Ardouz ..... 13

1 - Cadre géographique ..... 13

2 - Perspective géologique ..... 14

3-Paramètres géométriques ..... 14

3 - 1- Indice de compacité de Gravellius "Kc" ..... 14

3 - 2 - Rectangle équivalent ..... 15

3 - 3 - Coefficient d'allongement ..... 15

3 - 4 - Paramètres du relief ..... 15

a- Carte hypsométrique ..... 15

b- Courbe hypsométrique ..... 16

c- Altitude moyenne du bassin versant ..... 17

3- 5- La pente moyenne du bassin versant ..... 18

3- 6- Temps de concentration ..... 19

3- 7- Vitesse de ruissellement ..... 21

II-Caractéristiques climatiques ..... 21

1-La température ..... 21

2-L'évaporation ..... 22
3-La pluviométrie ..... 23
3-1-Pluie moyenne annuelle ..... 23
III-Caractéristiques de l'écoulement ..... 24
1-Module de l'écoulement ..... 24
2-Module de l'écoulement relatif ..... 24
3-Lame d'eau écoulée ..... 25
4-Coefficient de l'écoulement ..... 25
IV- Estimation des débits de crues ..... 25
1-les méthodes statistiques ..... 25
1-1-Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières annuelles (1998-2011) ..... 25
1-1-1-Paramètres statistiques de l'échantillon ..... 26
1-1-2-Vérification des hypothèses ..... 26
a- Hypothèse de stationnarité (test de Kendall) ..... 26
a- Hypothèse d'indépendance (test de Wald-Wolfowitz) ..... 27
b- Hypothèse d'homogénéité à l'échelle annuelle (test de wilcoxon) ..... 27
1-1-3-Ajustement des données aux lois statistiques ..... 28
a- Ajustement à la loi de Gumbel (méthode du maximum de vraisemblance) ..... 28
b- Ajustement à la loi de Gamma (méthode du maximum de vraisemblance) ..... 29
1-1-4-Estimation des quantiles ..... 31
1-2-Analyse fréquentielle des données du débit maximum journalier annuel (87-2011) ..... 32
1-2-1- Paramètres statistiques de l'échantillon ..... 32
1-2-2-Vérification des hypothèses ..... 33
1-2-3-Ajustement des données à la loi statistique ..... 33
1-3-Analyse fréquentielle des données du débit instantané maximum annuel (87-2011) ..... 35
1-3-1- Paramètres statistiques de l'échantillon ..... 35
1-3-2-Vérification des hypothèses ..... 35
1-3-3-Ajustement des données à la loi statistique ..... 36
2-Les méthodes empiriques ..... 37
2-1-Formule de Mallet-Gautier ..... 38
2-2-Formule de Fuller II ..... 38
2-3-Formule de Hazan–Lazarvic ..... 39
3-La méthode GRADEX ..... 41
3-1-Principe de la méthode GRADEX ..... 41
3-2-La méthodologie du GRADEX ..... 42

V-Transposition des données du bassin jaugé vers le bassin non jaugé ..... 44
1-Transposition des débits maximums annuels ..... 46
2-Transposition des pluies maximales journalières ..... 46
3-Transposition des débits de pointe obtenus par la méthode Gradex ..... 47
VI-Estimation de la crue de projet ..... 47
VII-Forme des hydrogrammes ..... 48
1-Forme type observée ..... 49
2-Forme type Triangulaire ..... 49
3-Forme type exponentielle ..... 49
4-Forme type USSCS (hydrogramme adimensionnel) ..... 50
VIII-Courbes << HAUTEUR – CAPACITE – SURFACE >> du barrage Ardouz ..... 53
CONCLUSION ..... 54
**CONCLUSION GENERALE ..... 55**
**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 57**
**ANNEXES ..... 59**

# LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte de situation géographique du bassin versant du Tensift ..... 2
Figure 2: Géologie du bassin versant de Tensift (SMAIJ, 2011) ..... 4
Figure 3: Répartition spatiale des stations hydro-météorologiques ..... 5
Figure 4: Sites prévus pour la conception des barrages dans la zone d'action de l'ABHT. ..... 7
Figure 5: profil topographique d'un barrage type ..... 8
Figure 6: Evolution du volume de la retenue en fonction de la hauteur du barrage ..... 9
Figure 7: Carte des isohyètes ..... 10
Figure 8: Carte de situation géographique du site Ardouz ..... 13
Figure 9: carte géologique du bassin versant Ardouz ..... 14
Figure 10: Hypsométrie du bassin versant du site Ardouz ..... 16
Figure 11: Histogramme des fréquences d'altitudes ..... 17
Figure 12: Courbe hypsométrique du bassin versant du site Ardouz ..... 17
Figure 13 : Vue 3D du bassin versant du site Ardouz ..... 18
Figure 14: Carte des pentes ..... 19
Figure 15: Température moyenne mensuelle en °C (74-2012) ..... 22
Figure 16: Evaporation totale mensuelle (84-2012) ..... 23
Figure 17: Répartition moyenne mensuelle des pluies ..... 24
Figure 18: Ajustement graphique de la série des pluies journalières maximales annuelles à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) ..... 29
Figure 19: Ajustement graphique de la série des pluies journalières maximales annuelles à la loi de Gamma (Maximum de vraisemblance) ..... 30
Figure 20: Résultats de comparaison graphique des ajustements aux lois statistiques ..... 30
Figure 21: Ajustement graphique de la série du débit journalier maximum annuel à la loi de Galton (Maximum de vraisemblance) ..... 34
Figure 22: Ajustement graphique de la série du débit instantané maximum annuel à la loi d'Inverse Gamma (Maximum de vraisemblance) ..... 36
Figure 23: Ajustement graphique de la série du débit instantané maximum annuel à la loi de Galton (Maximum de vraisemblance) ..... 36
Figure 24: Ajustements graphique des données de $P_{max}$ et $Q_{max}$ selon la méthode GRADEX ..... 44
Figure 25: Hydrogramme adimensionnel de la station Sidi Hssain ..... 51
Figure 26: Hydrogramme adimensionnel de la station Sidi Hssain ..... 51
Figure 27 : Hydrogramme de crue à ARDOUZ ..... 52
Figure 28: Profil topographique du barrage Ardouz ..... 53
Figure 29: Courbe de la surface en fonction de la Hauteur ..... 54
Figure 30: Courbe du volume en fonction de la hauteur ..... 54

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classement prioritaire des sites ..... 12
Tableau 2: Répartition de la surface totale par tranches d'altitudes ..... 16
Tableau 3: Temps de concentration calculé par différentes formules ..... 21
Tableau 4: Répartition de la température moyenne mensuelle (74-2012) ..... 21
Tableau 5: Répartition mensuelle de l'évaporation (84-2012) ..... 22
Tableau 6: Répartition mensuelle de la pluie ..... 24
Tableau 7: Statistiques descriptifs de l'échantillon ..... 26
Tableau 8: Résultats de comparaison numérique des ajustements aux lois statistiques ..... 31
Tableau 9: Quantiles estimés pour différentes périodes de retour T selon la loi Gamma ..... 32
Tableau 10: Statistiques descriptifs de l'échantillon ..... 32
Tableau 11: Résultat des hypothèses ..... 33
Tableau 12: Quantiles estimés pour différentes périodes de retour T selon la loi de Galton ..... 34
Tableau 13: Statistiques descriptifs de l'échantillon ..... 35
Tableau 14: Résultat des hypothèses ..... 35
Tableau 15: Quantiles estimés pour différentes périodes de retour T selon la loi de Galton ..... 37
Tableau 16: Formules régionales de Hazan-Lazarevic pour Q1000 ..... 40
Tableau 17: Débit de pointe pour les différentes périodes de retour ..... 41
Tableau 18: Résultat de l'ajustement des pluies max journalières (1998-2011) à la loi de Gumbel ..... 42
Tableau 19: Résultat de l'ajustement des débits max journaliers (1987-2011) à la loi de Gumbel ..... 42
Tableau 20: Extrapolation des débits par la méthode GRADEX ..... 43
Tableau 21: Transposition du débit maximum journalier annuel ..... 46
Tableau 22: Transposition du débit instantané maximum annuel ..... 46
Tableau 23: Résultat de transposition des pluies vers le bassin non jaugé ..... 47
Tableau 24: Transposition des QP extrapolés par la méthode Francou-Rodier et Débit spécifique ..... 47
Tableau 25: Crues retenues pour différentes périodes de retour ..... 48
Tableau 26: Tabulation de la forme adimensionnelle de l'hydrogramme USSCS ..... 50
Tableau 27: Débits de pointe et volumes de crues retenues ..... 52
Tableau 28: Caractéristiques et classification des sites selon leurs priorités ..... 60

# INTRODUCTION GENERALE

Depuis longtemps la population marocaine a vécu en parfaite symbiose avec le milieu hydrique, en tirant profit des saisons humides et en atténuant l'influence des périodes de sècheresse. Selon le gouvernement marocain, il existe actuellement au Maroc plus que 130 barrages qui offrent une capacité totale d'environ 17.2 milliards de $m^3$. Pourtant, le pays aura besoin, à l'horizon 2030, d'environ 5 milliards $m^3$ supplémentaires, ce qui incite et exige la rationalisation et la préservation des ressources à travers les stratégies des aménagements hydrauliques.

Le but de ce présent travail révèle une importance considérable, il fait partie d'un projet qui vise à étudier l'identification et la faisabilité sommaire de 190 sites de barrages et lacs collinaires éparpillés dans la zone du Tensift

Cette étude est divisée en trois chapitres : le premier donne une idée synoptique sur les caractéristiques générales du bassin du Tensift qui correspond à la zone d'étude, le deuxième est dénommé Méthodologie de la validation des sites de barrages, il correspond à l'étape de base, dont l'objectif est de savoir si les sites présagent des difficultés topographiques hydrologiques ou géologiques, afin de déterminer l'aspect de chaque site.

Le dernier chapitre est consacré au cœur de ce travail qui présente une étude hydrologique pour la réalisation d'un ouvrage hydrotechnique, dont l'objectif est de révéler :

- Les caractéristiques géographiques géologiques et géométriques du bassin versant Ardouz
- Les caractéristiques climatiques qui règnent sur le bassin versant
- L'aspect d'écoulement
- Les méthodes d'estimation des débits de crues qui s'interprètent comme :

- Méthodes probabilistes (ajustement des $P_{jmax}$, $Q_{jmax}$ et $Q_{inst}$ en plus de la méthode Gradex)
- Transformation pluie – débit (par les formules empiriques : Fuller II, Hazan-Lazarvic,…)
- Transposition de débit (par méthode de Francou-Rodier et Débit spécifique)

- L'hydrogramme relatif à la crue du projet qui est retenu pour le dimensionnement de l'ouvrage.

# Chapitre 1-GENERALITES SUR LE BASSIN VERSANT DU TENSIFT

## I - Situation géographique

Le bassin versant de Tensift s'étend sur une superficie de 18 210 km², un large domaine continental qui se situe au centre Ouest du Maroc entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 12' Ouest (Fig.1). En couvrant totalement la wilaya de Marrakech, et partiellement les provinces d'Essaouira, d'El Kelaâ des Sraghna et de Safi.

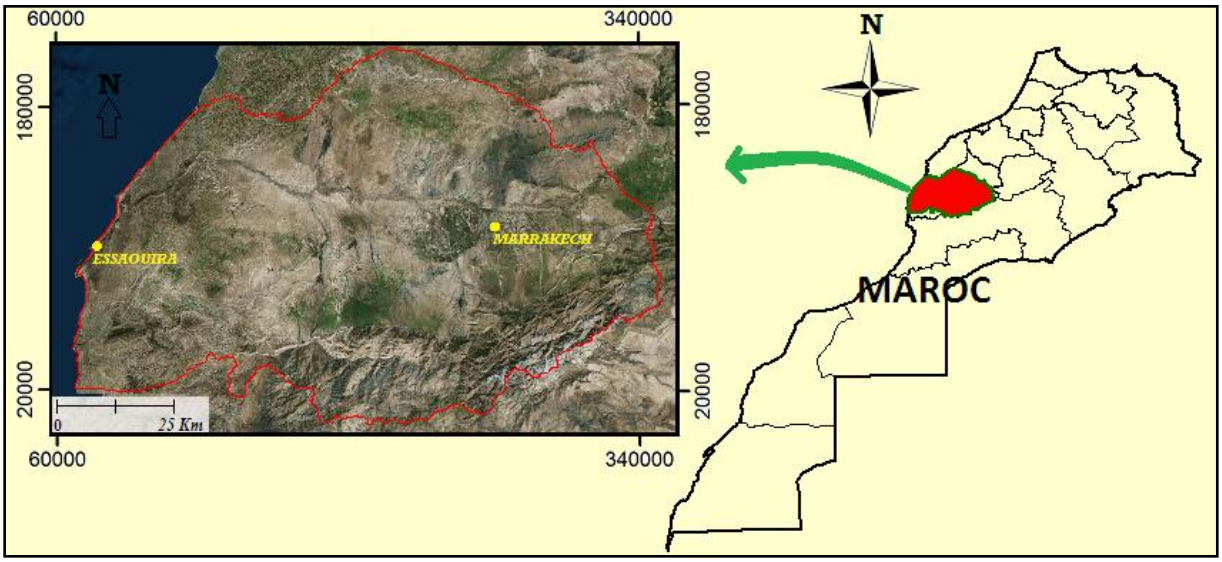


**Figure 1: Carte de situation géographique du bassin versant du Tensift**

Dans un contexte géographique, le bassin versant du Tensift est subdivisé en trois domaines distincts :

Le Haut Atlas, est formé d'une zone de montagnes qui représentent les plus hauts reliefs du Royaume et peuvent atteindre 4000 m (jbel Toubkal culmine à 4167 m). Cette série de montagnes constitue la zone de production des eaux qui se caractérise par une hydrologie de surface très active et des précipitations importantes.

La plaine du Haouz et le bassin de Mejjate, constituent une dépression d'une superficie de 6000 km² allongée d'Est en Ouest, avec une largeur de 40 km, et représente une zone de transit et de consommation des eaux.

Les Jbilet, sont formées de montagnes de faibles altitudes (inférieurs à 1000 m), qui émergent au nord de la plaine du Haouz.

## II - Contexte climatique

Le climat sur le bassin versant de Tensift est très diversifié d'une zone à l'autre, puisqu'il s'agit d'un climat semi aride dans la zone côtière, semi aride chaud dans les Jbilets et continental de type aride dans le Haouz et le Mejjate.

Généralement les précipitations sont faibles et dotées d'une grande variabilité spatio-temporelle. Elles peuvent atteindre 700 mm sur les sommets de l'Atlas.

Le climat sur le bassin de Tensift se caractérise par l'alternance de deux saisons : humide (d'Octobre à Avril) et sèche (de Mai à Septembre). L'évaporation moyenne annuelle est minimale pendant les mois les plus froids (Décembre et Janvier), tandis que la maximale intervient pendant les mois d'été.

## III - Cadre géologique

La géologie du bassin versant du Tensift (Fig.2) est très diversifiée, puisque les affleurements lithologiques montrent plusieurs variétés de faciès.

Au niveau du Haut Atlas il existe une dominance des roches éruptives et métamorphiques précambriennes notamment les granites, diorites, dolérites, andésites et rhyolites. Il existe aussi des formations schisteuses d'âge primaire avec des formations secondaires fortement colorées en rouge et largement dominées par des calcaires, des grès, des marnes et des argiles.

Généralement, les schistes sont largement répandus dans les Jbilets avec des faciès et de couleurs très variés. On y distingue des schistes sombres souvent lités, des schistes argileux et des schistes gréseux avec des bancs épais de grès ou de quartzites. Par ailleurs, d'autres formations moins étendues peuvent être distinguées notamment des conglomérats, des affleurements calcaires et siliceux, des roches éruptives comme les granites et les gabbros.

Dans la plaine, qui se présente sous forme d'une dépression, on trouve des formations détritiques issues du démantèlement et dissociation de la chaîne atlasique. Elles sont accumulées au Néogène et au Quaternaire récent, recouvrant ainsi les formations primaires secondaires et tertiaires diversifiées, notamment des grès rouges du Permo-Trias ainsi que des calcaires, marnes et grès du Crétacé et de l'Eocène. Le remplissage quaternaire est assuré par des épandages alluviaux caillouteux, limoneux ou sableux.

La majorité des formations géologiques qui affleurent dans le bassin versant de Tensift présentent un impact sur la répartition des écoulements superficiels. Cette influence se

manifeste par une favorisation de l'écoulement superficiel, ceci est dû à la présence des pentes fortes et l'abondance des formations géologiques imperméables.

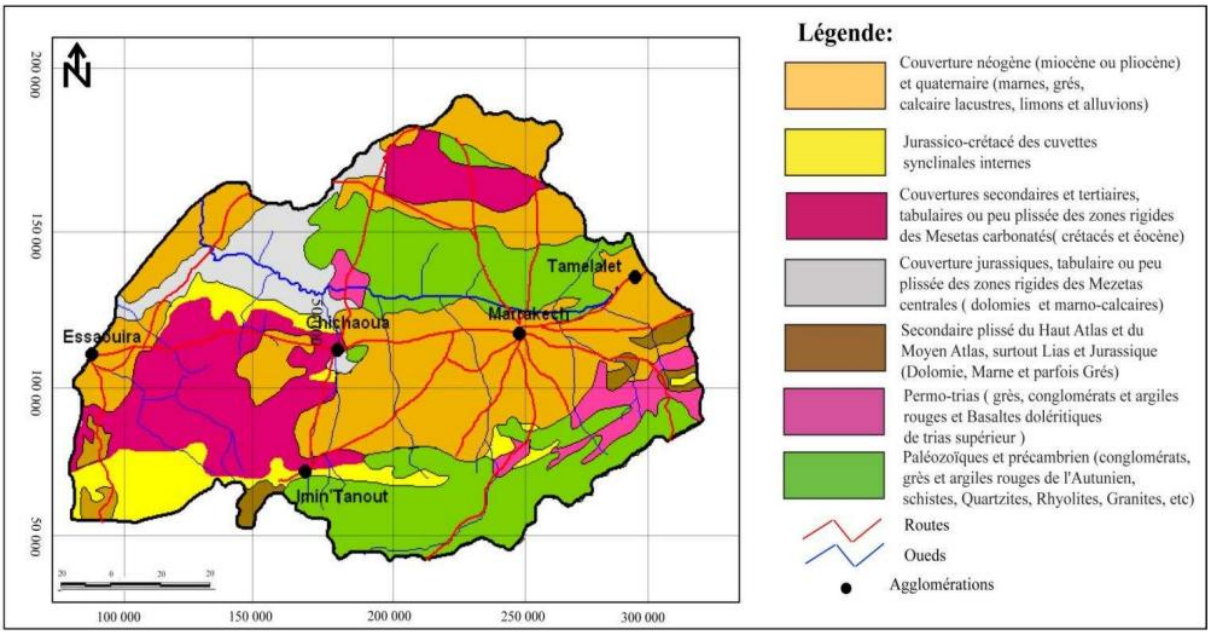


**Figure 2: Géologie du bassin versant de Tensift (SMAIJ, 2011)**

## IV - Couvert végétal

La végétation dans la région de Tensift est très diversifiée au point de vue variétés, une variation qui se fait selon l'altitude et la nature des terrains.

Le couvert végétal est considéré important autour des montagnes de l'Atlas et forme une ressource écologique d'ampleur. En plus, la conservation de la végétation dans la région à côté de l'oasis des palmiers de Marrakech, et les forêts d'Arganiers à Essaouira, est à prendre en considération.

Les forêts de chêne (Arganiers, Thuya, Genièvre rouge, etc.) s'étendent sur la chaîne de montagnes de l'Atlas jusqu' aux collines de Rhamna.

Les plantes agricoles regroupent une grande variété, y compris les céréales, l'olivier, l'abricotier, l'oranger, les rosiers, les pommiers et les plantes fourragères. Pour la province d'Al Haouz, un grand pourcentage de la zone cultivée totale est couvert avec des plantations des arbres fruitiers, alors que le reste est couvert par d'autres cultures.

## V - Hydrologie

La rivière du Tensift coule de l'est à l'ouest avec une longueur totale de 260 km et débouche dans l'océan Atlantique. La période de débit maximum s'observe de Mars à Avril et reste jusqu'au mois de Mai. Cette période est dotée d'un taux élevé de fonte de neige. Ce débit maximum varie d'une rivière à l'autre selon les saisons. Cependant, 80% du débit total s'enregistre dans la période entre Novembre et Mai. Par contre, le débit minimum s'observe de Juillet à Septembre qui reflète la saison sèche.

Les oueds les plus importants prennent tous naissance dans le Haut Atlas. Sur ce relief montagneux à structures géologiques hétérogènes, des ruissellements à caractère torrentiel interviennent et sont collectés par le réseau hydrographique du Tensift (Fig. 3) qui les évacue vers l'océan selon une bifurcation bien définie.

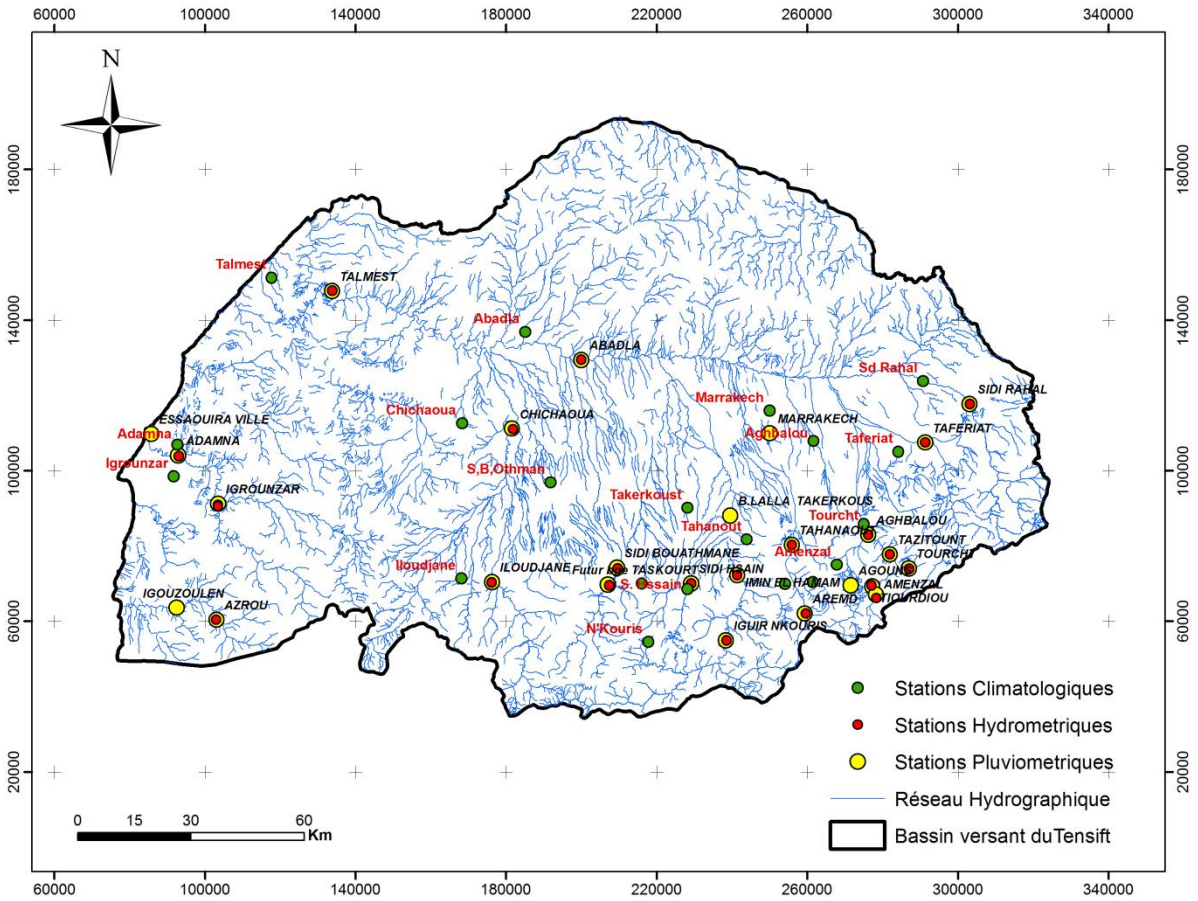


**Figure 3: Répartition spatiale des stations hydro-météorologiques**

# Chapitre 2 : METHODOLOGIE DE LA VALIDATION DES SITES DE BARRAGES

## INTRODUCTION

Un système d'information géographique (SIG) est un outil informatique qui permette d'analyser, gérer et présenter toutes les choses qui existent sur la surface terrestre. C'est un outil puissant qui offre plusieurs possibilités d'opérations sur les bases de données spatiales et géographiques. Le SIG permet aussi un processus de fabrication des cartes en fonction d'une localisation choisie et d'une échelle définie tout en faisant apparaître les informations souhaitées.

L'ensemble de ces capacités spécifiques font du SIG un outil unique, disponible à l'application dans plusieurs domaines telles que l'organisation du territoire, l'étude d'impact d'une construction, la gestion de réseaux,…etc.

Le SIG est implanté dans ce travail comme un axe principal qui contribue à l'élaboration du projet, ainsi il va servir à la localisation des sites de barrages, la délimitation des bassins versants et la présentation d'études sur le terrain qui reflète une phase cruciale afin de prendre la meilleure décision en fonction de l'analyse multicritère.

## I - Méthodologie du travail

L'identification des différents sites (Fig. 4) prévus pour la conception des barrages collinaires (la hauteur sur fondation ne dépasse pas 15 m), se fait selon une démarche précise. Cette dernière est basée sur des règles et des critères principaux du terrain permettant d'élaborer une base de données importante, puisque l'inventaire se fonde sur :

- Cartes topographiques à l'échelle 1/50.000;
- Photos aériennes disponibles;
- Documents des études existantes sur la zone (géologie, géotechnique, hydrologie, études de régularisation, .....etc.)

Le travail de prospection des sites de barrages se divise entre bureau et terrain, et nécessite sommairement une évaluation topographique et hydrologique avec une investigation géologique et géotechnique, afin de reconnaitre le site le plus apte à satisfaire les objectifs et déclarer sa faisabilité.

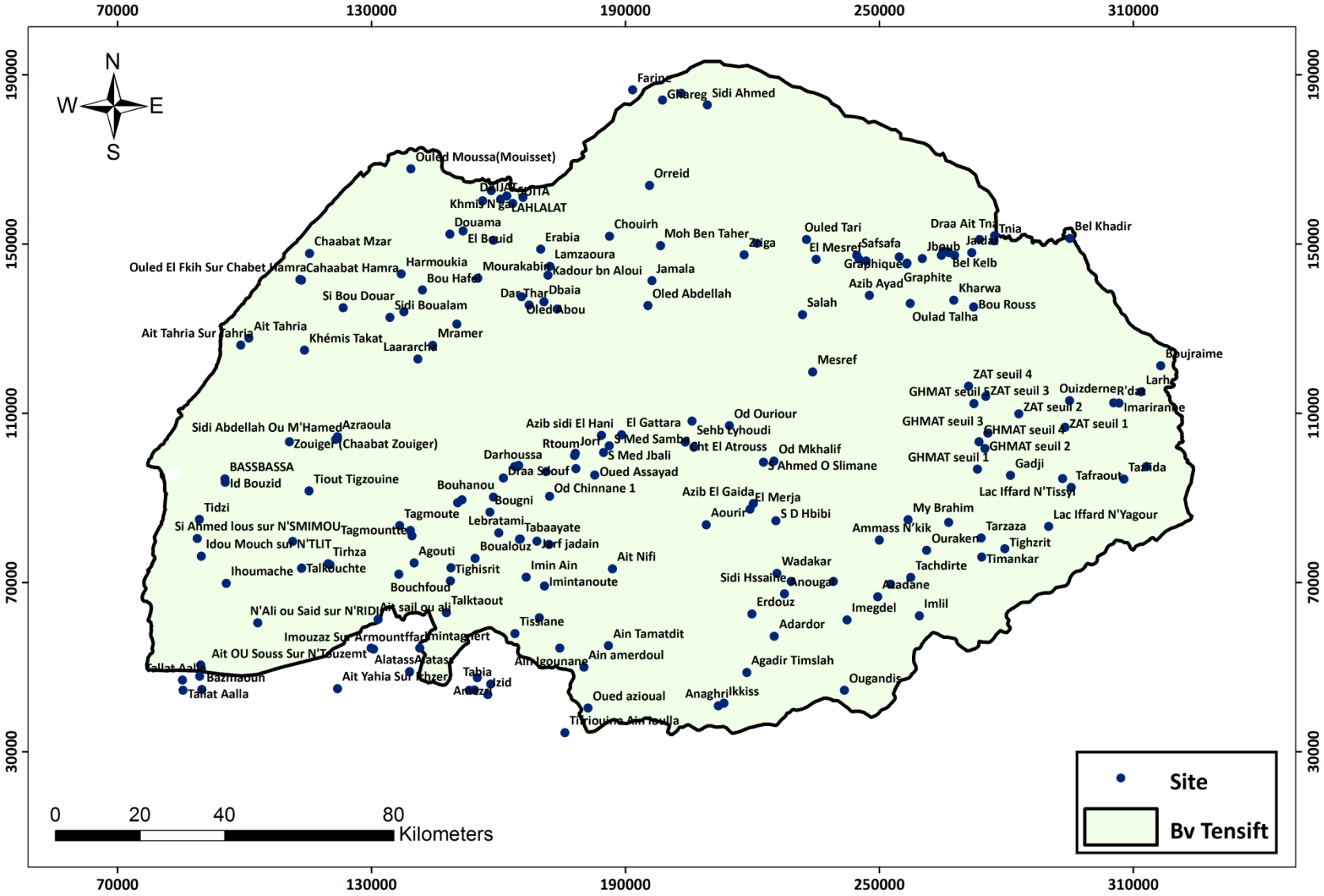


**Figure 4: Sites prévus pour la conception des barrages dans la zone d'action de l'ABHT.**

Le choix d'un site de barrage est basé sur plusieurs critères (MAALEL et HAFSIA, 2012), parmi ces points on distingue :

- Garantir la quantité d'eau qui sera piégée dans la retenue ;
- Géologie favorable pour l'emplacement du barrage et la retenue ;
- Un resserrement de la gorge liant les deux rives ;
- Choisir un emplacement d'accès facile pour éviter la création d'autres voies pour les engins et la main d'œuvre ;
- Un site convenable à l'emplacement des ouvrages annexes.

**1 - Evaluation topographique**

La topographie est un critère de base pour le choix d'un barrage, puisque elle permet de déterminer la position et l'altitude de n'importe quel point situé dans une zone donnée. Le but principal des études topographiques, est d'établir les données nécessaires à l'élaboration d'un jugement concernant l'aptitude topographique d'un site et le meilleur positionnement du barrage et ses ouvrages annexes.

Dans le cadre de ce travail, les évaluations topographiques vont se faire au moyen des applications du SIG sur un MNT d'une résolution 30m (Fig. 5), sachant que la hauteur maximale de la digue ; la longueur maximale correspondante et le volume de la retenue sont des éléments essentiels qui nécessitent une détermination, en mentionnant que le volume de la retenue reflète l'importance du réservoir en termes de stockage d'eau.

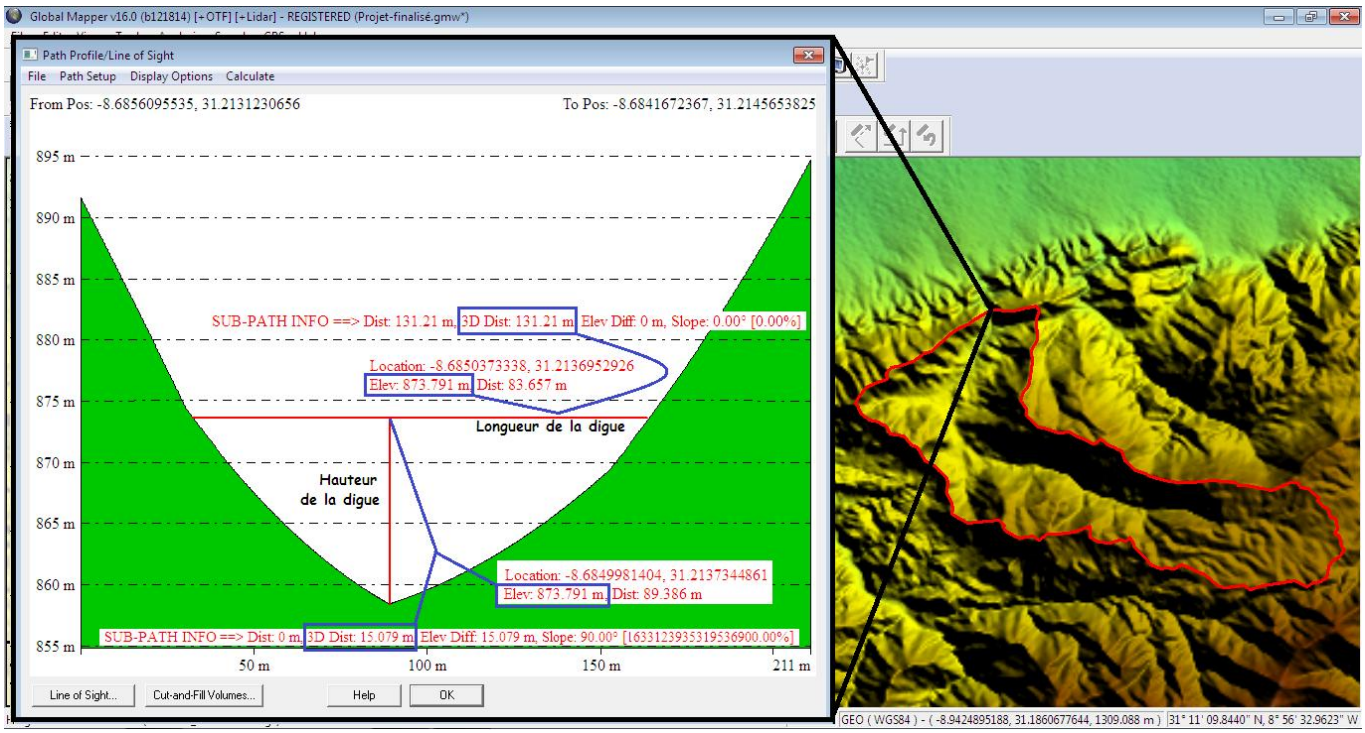


**Figure 5: profil topographique d'un barrage type**

La topographie d'un site ne sera validée que si elle a intervenu 3 aspects comme des paramètres d'identification d'état, qui se basent sur le resserrement de la vallée au droit de l'axe considéré ; l'importance du réservoir de stockage d'eau et la facilité d'accès au site. La détermination de la hauteur maximale de la digue (15m) dans un endroit étroit de la vallée, permet d'identifier la crête du barrage qui en tenant compte de son altitude, facilite la détermination de la surface correspondante au plan d'eau. L'ensemble de ces opérations favorise l'estimation du volume de la retenue qui doit être susceptible de répondre aux besoins envisagés. Outre, les outils SIG permettent la connaissance de ces deux critères : la hauteur de la digue et le volume maximal de la retenue, ce qui permet d'avoir une idée sur la répartition du volume d'eau stocké dans le barrage en fonction de l'évolution de sa hauteur et ainsi déduire des graphes représentatifs. En prenant comme exemple aléatoire un barrage avec une hauteur de 15m et un volume maximal de 1,5 $Mm^3$ qui augmente avec un pas de 100 000 $m^3$ pour chaque mètre de hauteur, cette évolution est illustrée dans la figure 6 :

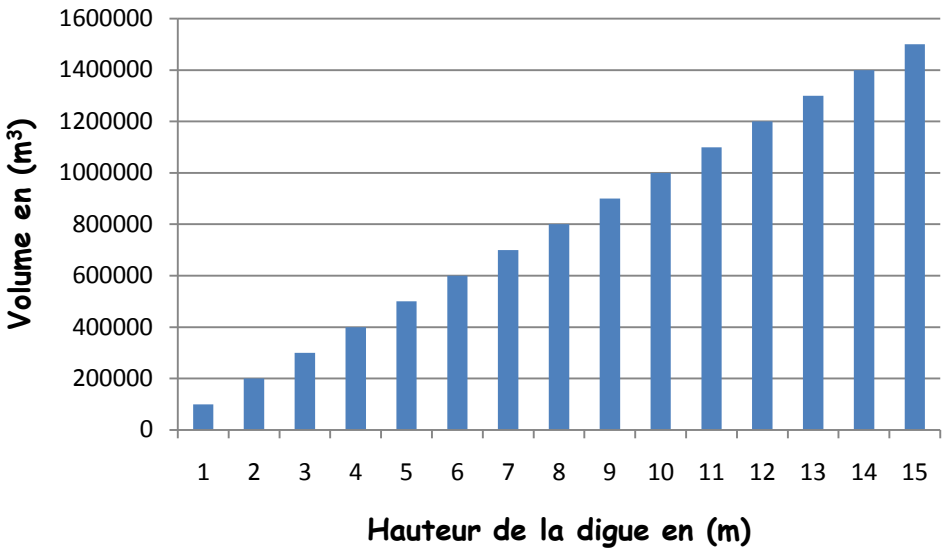


**Figure 6: Evolution du volume de la retenue en fonction de la hauteur du barrage**

Le lien établi entre la hauteur de la digue et le volume de la retenue permet compte tenu du taux des apports hydrologiques, de créer un critère de décision à propos de la hauteur optimale de la digue.

La pente et le taux des apports solides sont particulièrement importants, car il n'existe aucun intérêt d'implanter un barrage sur une vallée avec un cours d'eau de forte pente et un taux d'envasement élevé. En outre, la facilité d'accès au site est un critère crucial qui conditionne le coût de construction du barrage.

## 2 - Evaluation hydrologique

Pour améliorer la crédibilité des résultats nous ajoutons un critère complémentaire fonctionnant dans le cadre des évaluations hydrologiques. Un critère important qui va se contenter pendant cette phase de calculer les apports en eau et jouer un rôle sélectif pour les sites de barrages.

Cette opération de calcul des apports doit être précédée par la délimitation du bassin versant de chaque site, ainsi connaître la superficie correspondante. Il est en effet important dès ce stade, compte tenu du résultat des évaluations topographiques, de voir si les apports pourront être suffisants pour remplir la réserve.

Les bassins délimités vont servir non seulement pour savoir la superficie, mais en plus pour calculer la lame d'eau ruisselée à partir de la pluviométrie annuelle déduite à partir de la carte des isohyètes (Fig. 7).

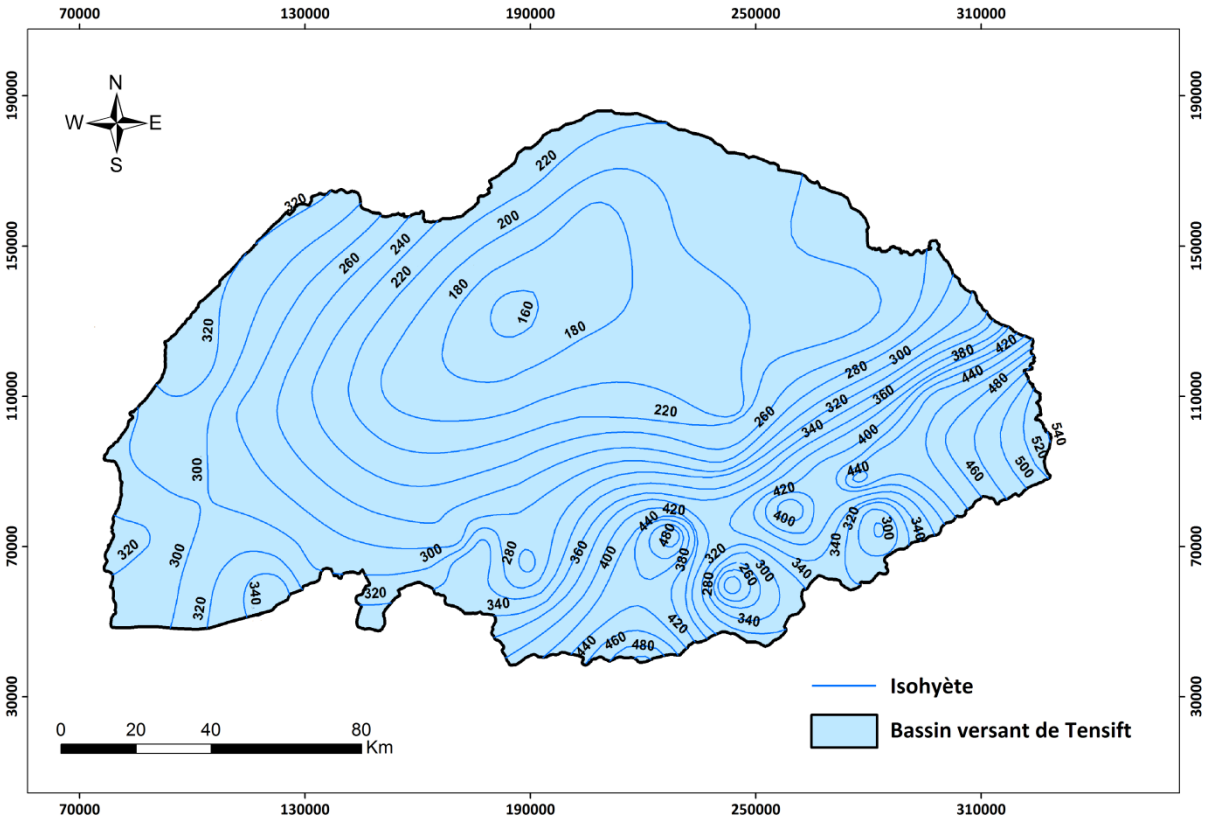


**Figure 7: Carte des isohyètes**

La pluviométrie annuelle se calcule à partir de la méthode des isohyètes :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{K} A_i \cdot P_i}{A}, \quad avec \quad P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

Avec :

Pmoy : précipitation moyenne sur le bassin versant du site,

A : surface totale du bassin,

Ai : surface d'une section de bassin située entre deux isohyètes i et i+1,

K : nombre total d'isohyètes,

Pi : moyenne des hauteurs h de précipitations sur une section du bassin.

Les apports moyens du bassin sont déterminés en appliquant la relation suivante :

$$L = Cr*P$$

Où :

L : Lame d'eau écoulée en mm

P : Pluie moyenne

Cr : Coefficient de ruissellement

D'où, le calcul de volume :

$$V = 1000*L*S$$

V : Volume des apports en $m^3$

S : Surface du bassin versant en $km^2$

**3 - L'observation in-situ**

Plusieurs investigations sont élaborées pour trouver les sites favorables à l'implantation d'un barrage, cette opération s'est basée sur des études et des constatations directes du terrain. Donc, afin de déclarer la validité d'un site de barrage il faut faire appel à une visite in situ permettant de collecter les informations difficilement explorées à partir du bureau, surtout pour les zones de faibles superficies où les cartes ne peuvent pas révéler grandes choses. L'observation directe permet compte tenu de l'affleurement d'examiner si la géologie générale présage des difficultés particulières. Ainsi, se prononcer à la fois sur l'étanchéité de la fondation et de la cuvette, sauf au cas de recharge des nappes où l'étanchéité n'est pas un critère de rejet.

Donc, en s'appuyant sur les informations collectées in situ et les études élaborées nous obtenons un critère synoptique et puissant permettant la décision en ce qui concerne la validation d'un site de barrage.

### 4 - Classement prioritaire des sites

La phase de prospection a réussi de déterminer des critères de priorité affectés à chaque site, ceci permettra de réaliser un classement sélectif favorisant et facilitant le choix du site convenable à satisfaire les besoins envisagés. L'idée de cette classification prioritaire a été inspirée d'un sujet de thèse (AIT SLIMANE, 2011)

L'ensemble des axes précédents aboutissent à l'obtention des idées majeures incontestables qui sont utilisées comme des outils de décision. Les deux critères : la capacité de la retenue (Mm3) et les apports en (Mm3), constituent la base de cette sélection prioritaire des sites, qui va être divisée en quatre catégories comme indiqué dans le tableau 1 :

**Tableau 1: Classement prioritaire des sites**

| | **Priorité 1** | **Priorité 2** | **Priorité 3** | **Priorité 4** |
|---|---|---|---|---|
| **Apports en (Mm3)** | >=1 | >=0.5 | >=0.05 | <0.05 |
| **Capacité de la retenue (Mm3)** | >1 | [0.5 - 1[ | [0.05 - 0.5 [ | <0.05 |

## CONCLUSION

L'objectif du chapitre précédent était d'étudier sommairement l'ensemble des sites prévus pour la conception des barrages et lacs collinaires. Un travail qui a demandé des évaluations globales centrées dans un cadre topographique, hydrologique et géologique, en procurant une perspective prioritaire et décisive sur les sites les plus appropriés. L'œuvre de ce travail sommaire ce résume dans le tableau (Annexes. Caractéristiques et classification des sites selon leurs priorités).

# Chapitre 3 : ETUDE HYDROLOGIQUE DU SITE ARDOUZ

## INTRODUCTION

Après l'élaboration de toute une étude représentative se manifestant dans un cadre synoptique et sélectif des sites de barrages, nous entamons la partie cruciale de l'étude approfondie qui vise d'après une perspective hydrologique à déclarer la faisabilité de ce genre d'ouvrages hydrotechniques. Dans ce chapitre nous avons opté pour travailler sur un site de la première priorité puisque la démarche reste la même pour l'ensemble des sites.

## I- Caractéristiques géologiques et géomorphologiques du bassin versant d'Ardouz

### 1 - Cadre géographique

Le site du barrage Ardouz se situe dans le versant nord du haut Atlas occidental, précisément dans la région d'Azegour, à environ 64 km à vol d'oiseau au sud-Ouest de Marrakech (Fig. 8). Le bassin versant correspondant à ce site s'étend sur une superficie de 54 km² avec un périmètre de 43 km et variant entre 1 750m et 3 500m d'altitude. Ce site figure sur la carte topographique d'Azegour au 50 000è relative à la feuille NH-29-XXII-2 aux points de coordonnées Lambert approximatives suivantes : X= 219902.95; Y= 62563.87.

**Figure 8: Carte de situation géographique du site Ardouz**

## 2 - Perspective géologique

En allant de l'amont vers l'avale du bassin versant, la nature géologique du socle se manifeste par des schistes et des calcaires d'âge Cambrien, avec des roches magmatiques intrusives d'âge Hercynien. Dans la partie avale il existe une couverture qui se présente sous forme de calcaires et marnes d'âge Crétacé Supérieur et Eocène. Ces différents faciès sont représentés sur la figure 9 qui est extraite de la carte géologique d'Amizmiz au 100 000è relative à la feuille NH-29-XXII-2.

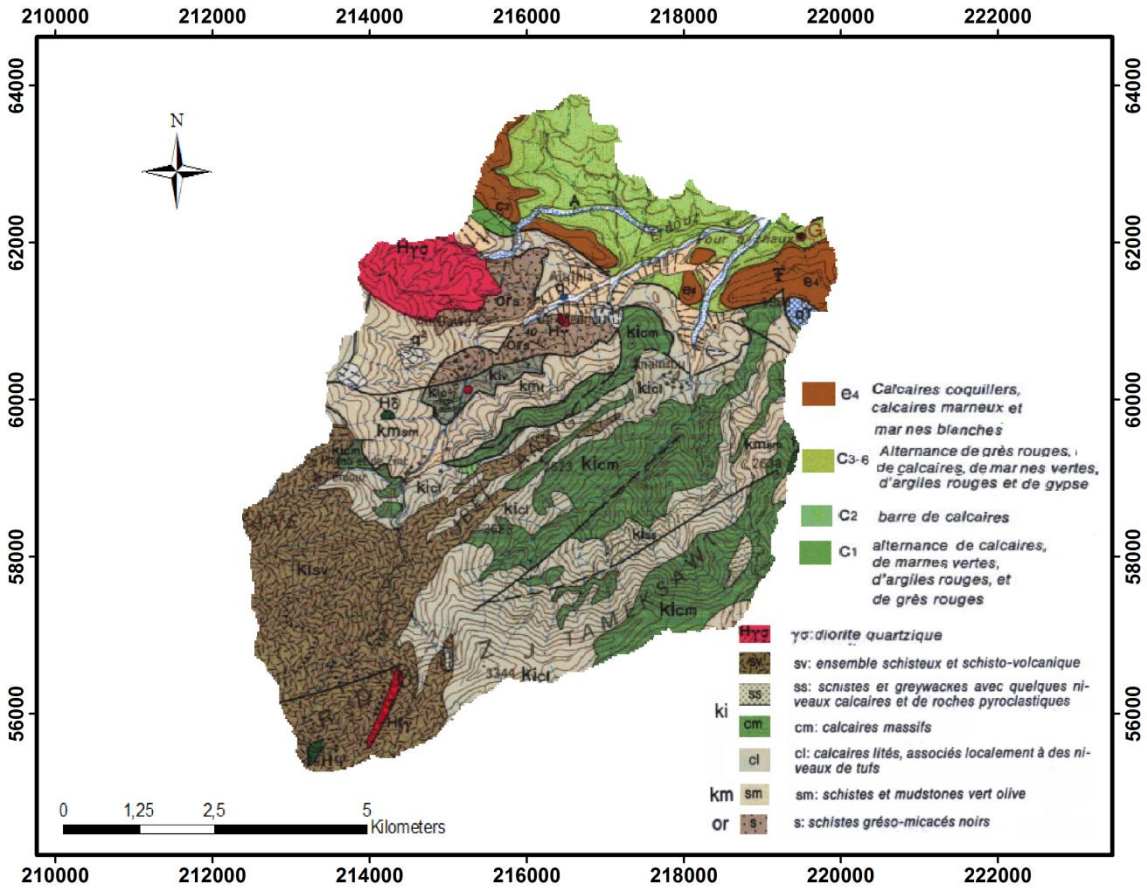


**Figure 9: carte géologique du bassin versant Ardouz**

## 3-Paramètres géométriques

### 3 - 1- Indice de compacité de Gravellius "Kc"

Cet indice exprime la forme du bassin versant, il est en fonction de la surface du bassin et de son périmètre.

$$\boxed{Kc = 0.28\frac{P}{\sqrt{S}}}$$

P: périmètre du bassin versant (Km)

S: superficie du bassin versant ($Km^2$)

Si : * Kc = 1 ; le bassin versant est ramassé.

* Kc > 1 ; le bassin est allongé.

**AN :** $\boxed{\mathbf{Kc = 1.64}}$

Le bassin versant du site Ardouz présente une forme allongée.

### 3 - 2 - Rectangle équivalent

On assimile notre bassin à un rectangle défini par sa longueur "L", sa largeur "l" est la même superficie du bassin versant "S".

$$l = \boxed{\frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} * [1 - \sqrt{1 - (\frac{1.12}{Kc})^2}]}$$

$$L = \boxed{\frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} * [1 + \sqrt{1 - (\frac{1.12}{Kc})^2}]}$$

**AN :** $\boxed{\mathbf{l = 2.9\ Km}}$

**AN :** $\boxed{\mathbf{L = 18.6\ Km}}$

### 3 - 3 - Coefficient d'allongement

Ce coefficient est obtenu par la relation :

$$\mathbf{Ca = \frac{L^2}{S}}$$

L : la longueur du thalweg principal (13 Km)

S : la superficie du bassin versant ($Km^2$)

**AN :** $\boxed{\mathbf{Ca = 3.13}}$

### 3 - 4 - Paramètres du relief

#### a- Carte hypsométrique

Plusieurs facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude, donc il important d'étudier l'hypsométrie d'un bassin versant en calculant l'air de chaque tranche d'altitude (Tab. 2). Ce qui permet par la suite de dessiner la carte hypsométrique (Fig. 10) et révéler la répartition des altitudes sur l'ensemble du bassin versant.

**Tableau 2: Répartition de la surface totale par tranches d'altitudes**

| Altitude (m) | Si (km2) | Si (%) | ∑Si(%) |
|---|---|---|---|
| 1631-1881 | 0.3 | 0.6 | 100 |
| 1881-2131 | 3 | 5.6 | 94.1 |
| 2131-2381 | 4.3 | 8 | 86.1 |
| 2381-2631 | 6 | 11.1 | 75 |
| 2631-2881 | 9.2 | 17 | 58 |
| 2881- 3131 | 9.1 | 16.9 | 41.1 |
| 3131-3381 | 10.6 | 19.6 | 21.5 |
| 3381-3564 | 11.6 | 21.5 | 0 |
| **Total** | **54** | **100** | |

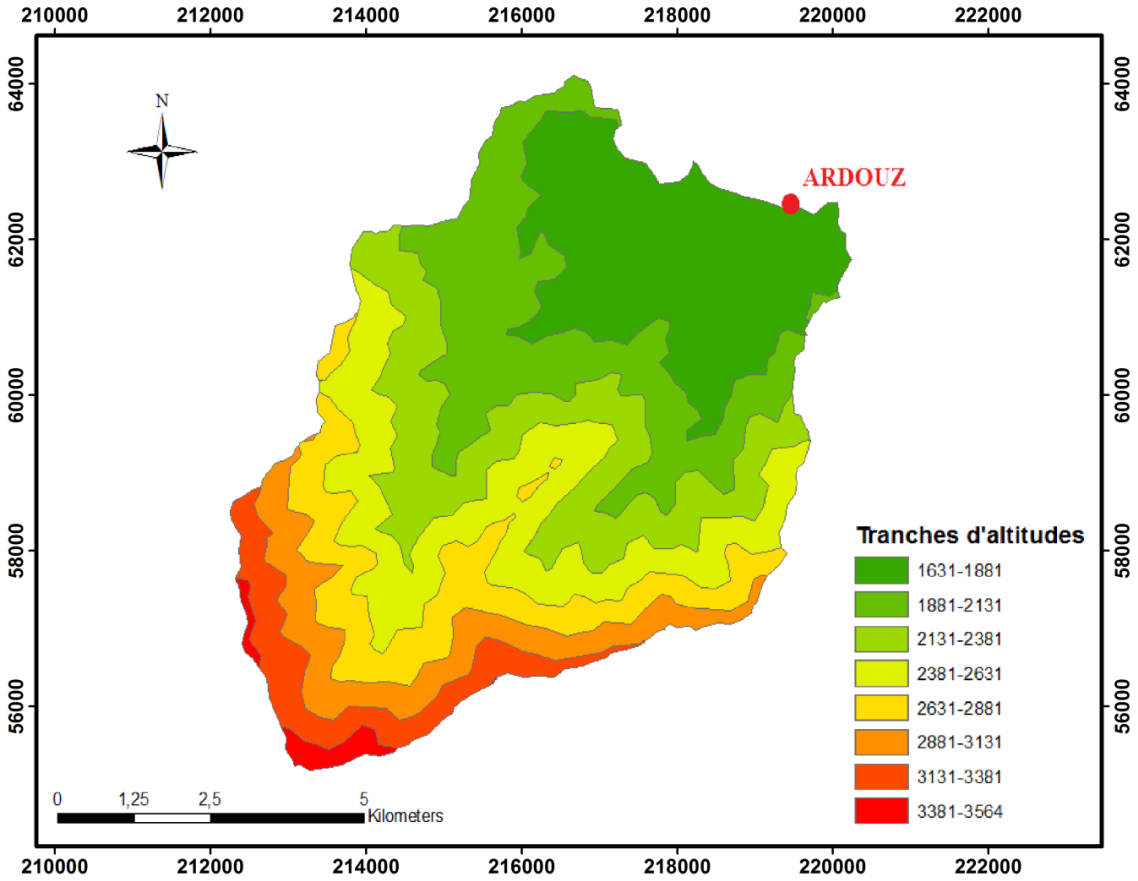


**Figure 10: Hypsométrie du bassin versant du site Ardouz**

### b- Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique permet de décrire l'évolution du relief à partir d'une classification des altitudes, cette opération vise à représenter les altitudes en fonction des pourcentages de la surface cumulée.

D'après l'histogramme des fréquences (Fig. 11) et la courbe hypsométrique (Fig. 12) nous constatons que les tranches d'altitudes les plus fréquentes sont celles des altitudes élevées supérieures à 2600 m. Ainsi, nous pouvons signaler que la superficie est faible par rapport au changement d'altitude initiale, ce qui est caractéristique des bassins abrupts.

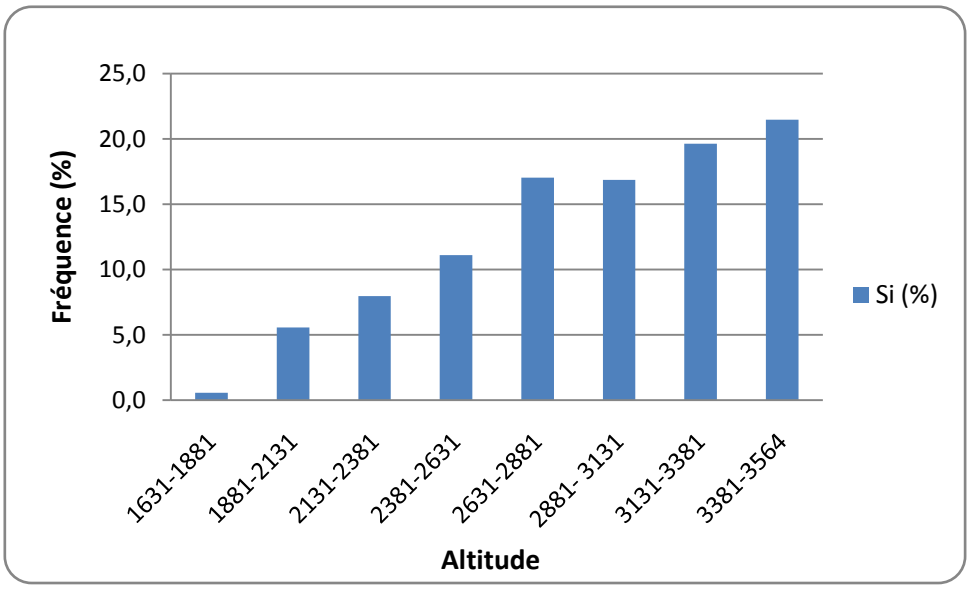


**Figure 11: Histogramme des fréquences d'altitudes**

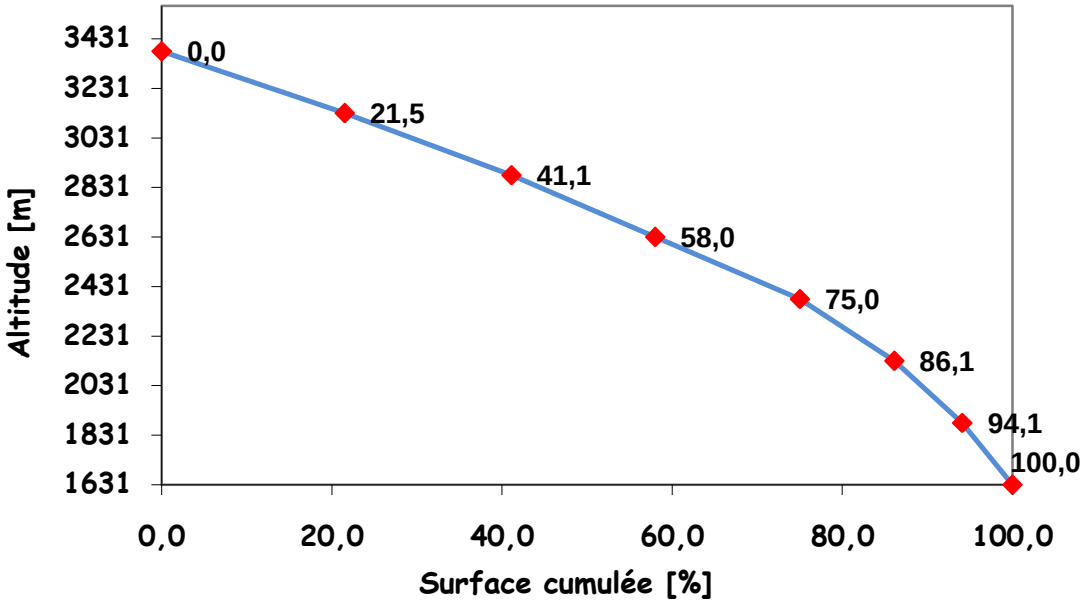


**Figure 12: Courbe hypsométrique du bassin versant du site Ardouz**

### c- Altitude moyenne du bassin versant

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

$$Hmoy = \frac{\sum Ai.Hi}{At}$$

Avec :

Hi : L'altitude moyenne entre deux courbes de niveau en m

Ai : L'aire comprise entre deux courbes de niveau en Km²

At : Surface totale du bassin en Km²

L'altitude moyenne pour le bassin versant du site Ardouz est **2940 m.**

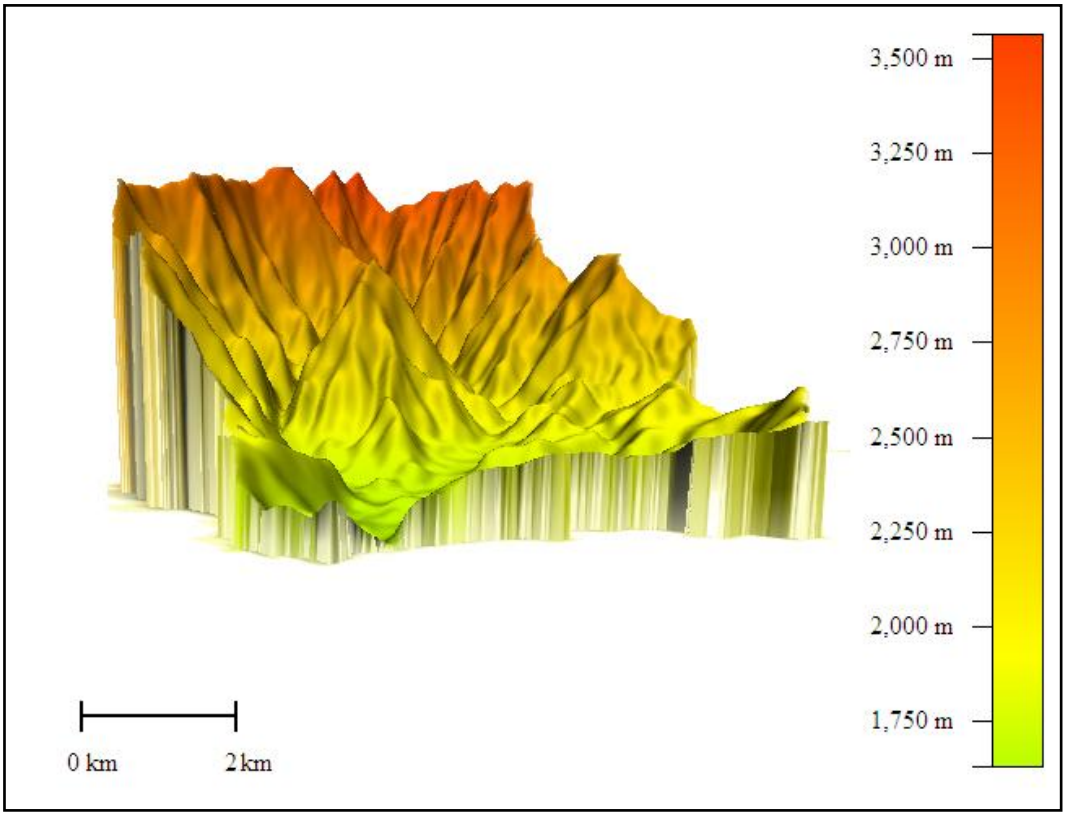


**Figure 13 : Vue 3D du bassin versant du site Ardouz**

### 3- 5- La pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne sur un bassin versant se calcul par la formule suivante :

$$\boldsymbol{Pmoy = \frac{\Delta H}{L} = \frac{Hmax - Hmin}{L}}$$

Avec :

Pmoy : La pente moyenne du bassin versant en (m/Km ou $^{0}/_{00}$)

ΔH : Différence d'élévation en (m)

L : La longueur du rectangle équivalent en (Km)

**AN:** **Pmoy = 104 m/Km**

La carte des pentes (Fig. 14) qui a été établie par le modèle numérique du terrain (MNT) correspondant au bassin versant Ardouz, montre une dominance des pourcentages élevés de pente, ce qui indique que le bassin est doté d'une pente très importante supérieur à 80 degré.

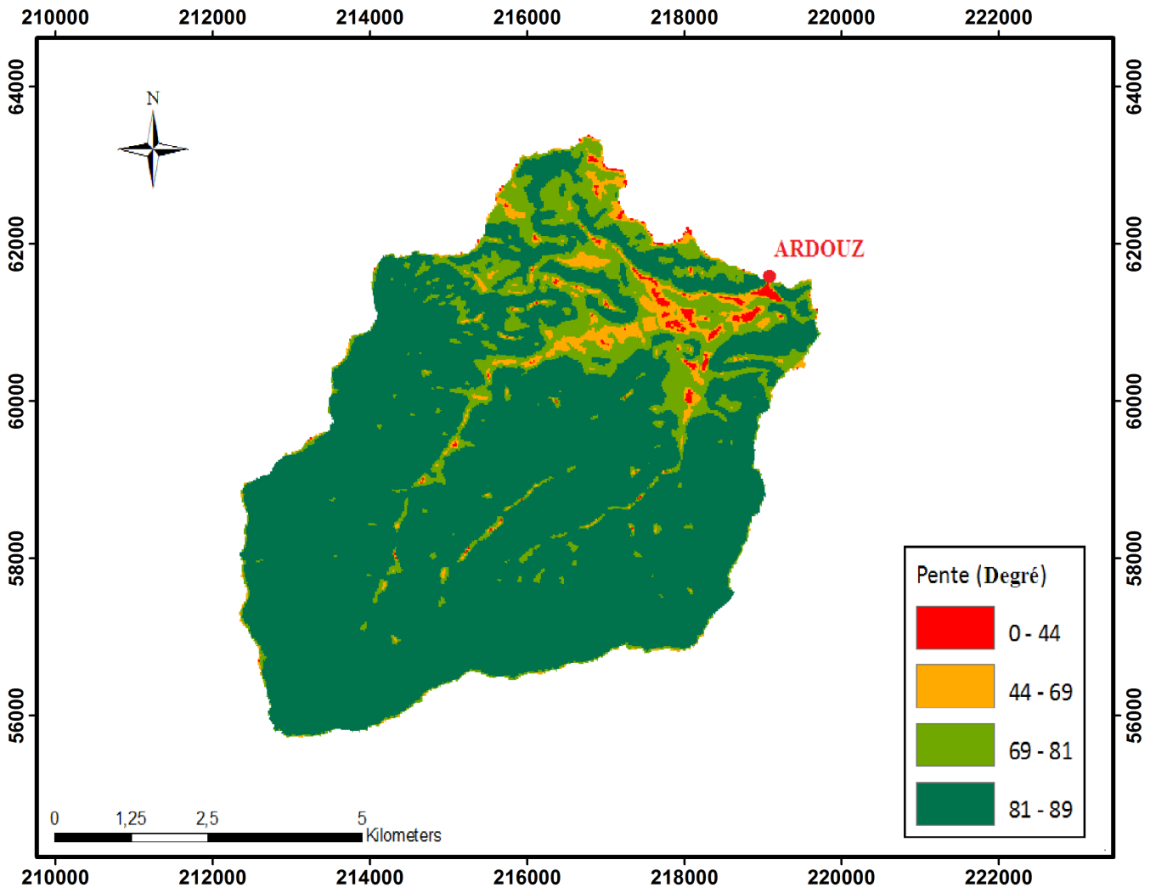


**Figure 14: Carte des pentes**

### 3- 6- Temps de concentration

Le temps de concentration $T_c$ (heures) reflète le temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis le point le plus éloigné du bassin jusqu'au point de calcul.

Ce paramètre est déterminé par les formules empiriques qui sont présentées ci après (ALKHIBRA, 2010) :

**<u>Giandotti</u>**

$$Tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{(Hmoy - Hmin)}}$$

S : Superficie du bassin (Km²)

L : Longueur du thalweg principal (Km)

Hmoy : Altitude moyenne (m)

Hmin : Altitude minimale (m)

**Ventura**

$$Tc = 76.32 * \left(\sqrt{\frac{S}{100 * I}}\right)$$

S : Superficie du bassin (Km²)

I : Pente en m/m

**Kirpich**

$$Tc = \frac{1}{52} * \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0.77}$$

L : Longueur du thalweg principal (m)

I : Pente en m/m

**Van Te Chow**

$$Tc = 60 * 0.123 * \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0.64}$$

L : Longueur du thalweg principal (Km)

I : Pente en m/m

**Formule Californienne**

$$Tc = 60 * 0.1452 * \left(\frac{L}{I^{0.5}}\right)^{0.77}$$

L : Longueur du thalweg principal (Km)

I : Pente en m/m

**Formule de US Corps**

$$Tc = 16.682 * \left(\frac{L}{I^{0.25}}\right)^{0.77}$$

L : Longueur du thalweg principal (Km)

I : Pente en m/m

Le temps de concentration retenu pour le bassin est la moyenne des temps de concentration calculés par les formules empiriques (Tab. 3).

**Tableau 3: Temps de concentration calculé par différentes formules**

| | Giandotti | Ventura | Kirpich | Van Te Chow | Californienne | US corps | moyenne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Tc (heures)** | 1.9 | 2.8 | 1.4 | 1.6 | 1.6 | 4.0 | **2** |

### 3- 7- Vitesse de ruissellement

Sachant que : $$Vr = \frac{L}{Tc}$$

L : Longueur du thalweg principal (Km)

Tc : Temps de concentration (h).

**AN:** **Vr = 9.3 Km/h**

## II-Caractéristiques climatiques

Les données de la température et l'évaporation sont issues de la station du barrage Lalla Takerkoust, et les données de pluies sont extraites des documents de la station Sidi Hssain.

### 1-La température

Le tableau 4, résume les valeurs moyennes mensuelles de la température, étalée sur la période entre 1974 et 2012.

**Tableau 4: Répartition de la température moyenne mensuelle (74-2012)**

| MOIS | Sep | Oct | Nov | Dec | Janv | Fev | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Août |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Température en °C** | 23.91 | 23.04 | 18.6 | 15.26 | 12.29 | 13.87 | 16.4 | 17.62 | 20.62 | 25 | 28.74 | 27.68 |

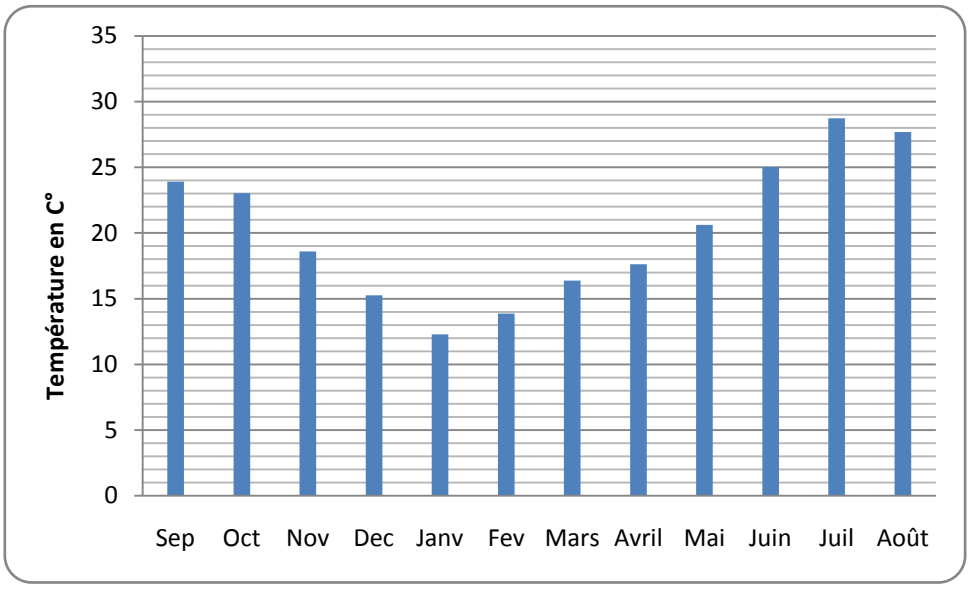


**Figure 15: Température moyenne mensuelle en °C (74-2012)**

La température varie entre 12 °C en janvier et 29 °C en juillet, avec une moyenne qui atteint 20 °C. La saison chaude s'étend de Mai à Octobre, et la période froide s'étend entre Novembre et Avril, mois pendant lesquels la température est inférieure à la moyenne.

**2-L'évaporation**

L'évaporation totale mensuelle mesurée par Bac Colorado dans la station du barrage Lalla Takerkoust pour la période entre 1984 et 2012, est donnée dans le tableau 5, dont le taux total mesuré est 1843 mm/an.

**Tableau 5: Répartition mensuelle de l'évaporation (84-2012)**

| MOIS | Sep | Oct | Nov | Dec | Janv | Fev | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Août |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Evaporation en mm** | 200.3 | 145 | 91.5 | 69.17 | 63.15 | 68.35 | 115 | 140.8 | 183.7 | 229 | 269.2 | 268.5 |
| **EV mens (%)** | 10.9 | 7.9 | 5 | 3.8 | 3.4 | 3.7 | 6.2 | 7.6 | 10 | 12.4 | 14.6 | 14.6 |

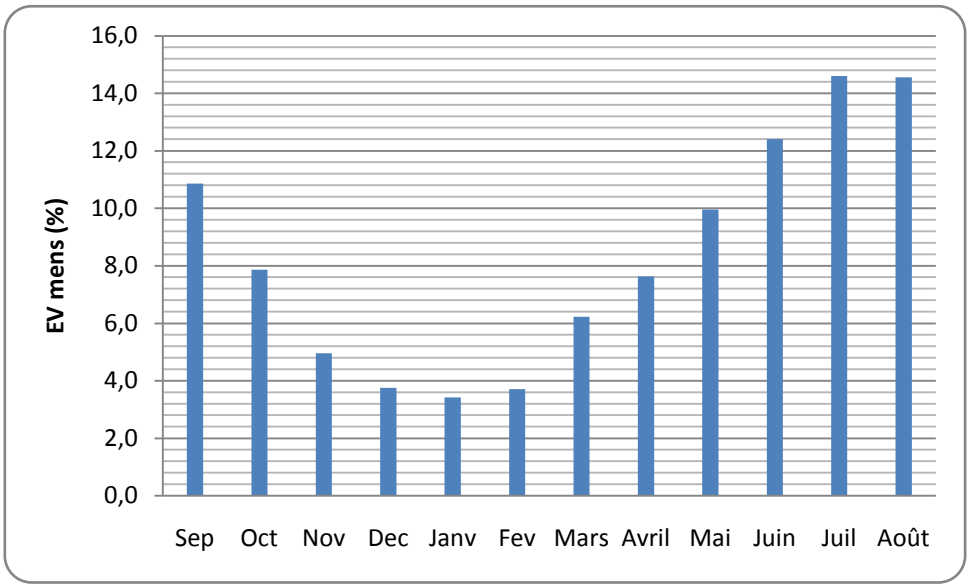


**Figure 16: Evaporation totale mensuelle (84-2012)**

Le graphique représentatif de l'évaporation prend presque la même allure avec l'évolution de la température. Ceci bien sur est dû à la relation exponentielle existante entre ces deux paramètres. L'évolution de l'évaporation adapte une valeur minimale de 63 mm enregistrée pendant la période froide, et une valeur maximale de 269 mm mesurée durant la période chaude. Le taux moyen de l'évaporation peut atteindre 154 mm.

### 3-La pluviométrie

En absence des données d'observations directes au niveau du bassin versant de site Ardouz, il s'est avéré nécessaire de considérer la station hydrométrique voisine "Sidi Hssaine" ; sachant que la pluie moyenne annuelle de la station est très proche de celle accordée au site, ce qui permet d'adopter la série de la station comme une base pour les calculs.

#### 3-1-Pluie moyenne annuelle

L'estimation de la pluie moyenne annuelle s'est réalisée en tenant compte de la carte des isohyètes de Tensift.

La constatation nous a permis de déduire que le bassin du site Ardouz et la station Sidi Hssaine se situent presque sur la même borne pluviométrique (environ 420 mm).

- **Répartition mensuelles des pluies moyennes**

La répartition mensuelle de la pluie moyenne interannuelle a été établie sur la base de la série des précipitations à la station Sidi Hssain pour la période allant de (1997/98 – 2010/11).

**Tableau 6: Répartition mensuelle de la pluie**

| MOIS | Sep | Oct | Nov | Dec | Janv | Fev | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Août |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Pluies mens (mm)** | 15.4 | 56.7 | 46.2 | 42.8 | 45.8 | 39.9 | 45.6 | 61.6 | 36.6 | 21.5 | 4.2 | 13 |
| **P mens (%)** | 3.7 | 13.6 | 11.1 | 10.2 | 11 | 9.6 | 10.9 | 14.7 | 8.8 | 5.1 | 1 | 3.1 |

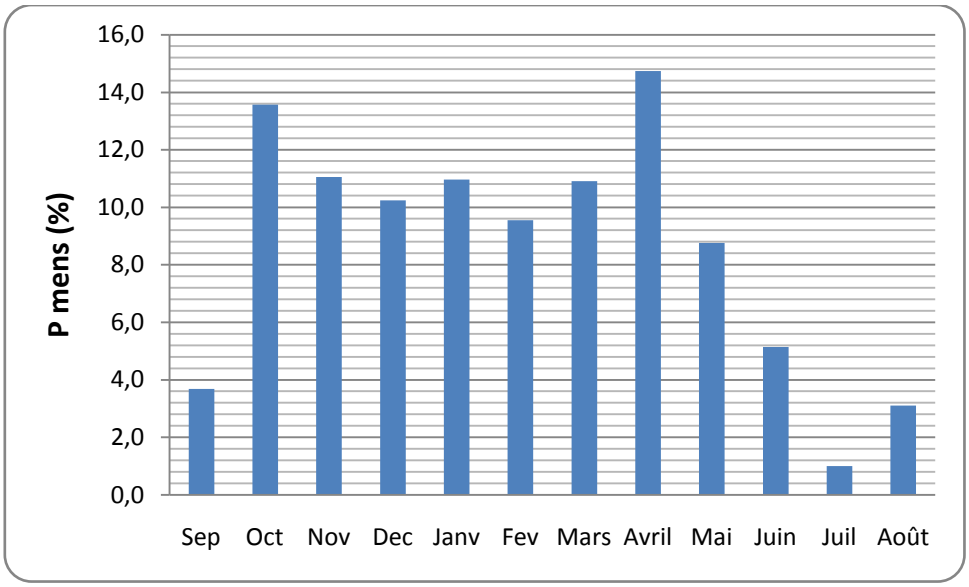


**Figure 17: Répartition moyenne mensuelle des pluies**

La période humide dure du mois d'octobre au mois de mai, alors que la période sèche s'étale du mois de juin au mois de septembre. Le mois d'avril est en général le plus arrosé, alors que les mois de juillet et août sont les plus secs.

## III-Caractéristiques de l'écoulement

### 1-Module de l'écoulement

Il est donné par : $M_e = Amoy / T$

Amoy : Apport moyen annuel ($m^3$).

T : Temps d'une année en secondes T = 31 536 000 s

**AN:** $\boxed{M_e = 73\ l/s}$

### 2-Module de l'écoulement relatif

On a : $M_{er} = M_e / S_{bv}$.

Me: Module de l'écoulement (l/s)

S : Superficie du bassin ($Km^2$).

**AN:** $\boxed{\mathbf{M_{er} = 1.4\ l/s/Km^2}}$

**3-Lame d'eau écoulée**

L e = Amoy/$S_{BV}$. **AN:** $\boxed{\mathbf{Le = 42.6\ mm}}$ .

**4-Coefficient de l'écoulement**

Il est donné par : Ce = Le / Pmoy **AN:** $\boxed{\mathbf{Ce = 0.1}}$

Les paramètres ci-dessus permettent d'estimer le taux d'écoulement, qui montre dans ce cas des estimations avec des valeurs faibles, ce qui témoigne que l'écoulement au niveau des oueds du bassin est temporaire.

## IV- Estimation des débits de crues

### 1-les méthodes statistiques

#### 1-1-Analyse fréquentielle des pluies maximales journalières annuelles (1998-2011)

Les pluies maximales journalières de rares fréquences sont des événements pluviométriques extrêmes de forte intensité se produisant sur un pas de temps court, et elles ont une faible occurrence à la fois dans le temps et dans l'espace. Ces événements extrêmes génèrent des inondations et des crues d'importants débits, contre lesquels il faut protéger l'ouvrage.

L'analyse fréquentielle, est une approche statistique utilisée en hydrologie pour une raison de prédiction. En se basant sur les calculs probabilistes utilisant l'historique des événements, nous pouvons prédire les fréquences d'apparition futures d'un certain phénomène hydrologique tel que les précipitations et les crues. Cette analyse permettra d'estimer les quantiles correspondant aux périodes de retour déterminées en visant d'accorder une signification physique aux caractéristiques naturelles étudiées.

L'ajustement des données sera effectué par le logiciel Hyfran plus, qui est un logiciel d'ajustement de lois statistiques.

### 1-1-1-Paramètres statistiques de l'échantillon

**Tableau 7: Statistiques descriptifs de l'échantillon**

| | |
|---|---|
| **Nombre de données** | 14 |
| **Pmin** | 21 |
| **Pmax** | 75 |
| **Pmoy** | 44.4 |
| **Ecart type** | 12.8 |
| **P médiane** | 41.8 |
| **Coefficient de variation** | 0.3 |
| **Coefficient d'asymétrie** | 0.8 |
| **Coefficient d'aplatissement** | 3.4 |

La valeur du coefficient d'asymétrie et d'aplatissement indique que la distribution est légèrement dissymétrique à gauche et moins aplatie que la normale.

### 1-1-2-Vérification des hypothèses

Parfois les conditions de prise des données se voient modifiées à cause de plusieurs actions, telles qu'un déplacement des stations de mesure ou un remplacement des instruments. C'est pour cela, il est indispensable de vérifier que les données ciblées sont **stationnaires** (caractéristiques statistiques ne varient pas dans le temps), **indépendantes** (aucune auto-corrélation entre les observations) et **homogènes** (proviennent de la même distribution). Cette vérification sera basée sur les tests de Kendall, de wald-Wolfowitz et de Wilcoxon. Les résultats de ces trois tests sont présentés par la valeur de la statistique et sa probabilité au dépassement exprimée par p-value ou valeur critique (la valeur limite à partir de laquelle on pourra rejeter $H_0$) que l'on compare ensuite avec le niveau de signification.

#### a- Hypothèse de stationnarité (test de Kendall)

**Hypothèses :**

H0 : *pas de tendance apparente dans les observations*

H1 : *présence de tendance dans les observations*

**Résultats :**

Valeur de la statistique : $|K| = 0.712$

p-value : $p = 0.477$

**Conclusion :**

*Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.*

### a- Hypothèse d'indépendance (test de Wald-Wolfowitz)

**Hypothèses :**

H0 : *les observations sont indépendantes*

H1 : *les observations sont dépendantes*

**Résultats :**

Valeur de la statistique : |U| = 0.457

p-value : p = 0.647

**Conclusion :**

*Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.*

### b- Hypothèse d'homogénéité à l'échelle annuelle (test de wilcoxon)

**Hypothèses :**

H0 : *les moyennes des deux sous échantillon sont égales*

H1 : *les moyennes des deux sous échantillons sont différentes*

**Résultats :**

Valeur de la statistique : |W| = 0.388

p-value : p = 0.698

**Conclusion :**

*Nous pouvons accepter H0 au niveau de signification de 5%.*

*On ne peut pas conclure que les moyennes des deux sous échantillons sont différentes.*

### 1-1-3-Ajustement des données aux lois statistiques

#### a- Ajustement à la loi de Gumbel (méthode du maximum de vraisemblance)

La distribution statistique de Gumbel est une loi double exponentielle qui dépend de 2 paramètres :

u (paramètre de position) et α (paramètre de distribution)

Soient :

X est une variable aléatoire appartenant à]-∞ ; +∞ [et suivant une loi de Gumbel

La fonction de densité de probabilité $f$(x) :

$$\boldsymbol{f(x) = \frac{1}{\alpha}\exp[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp(\frac{x-u}{\alpha})]}$$

Fonction de répartition F(x) :

$$\mathbf{F(x) = \exp[-\exp(\frac{x-u}{\alpha})]}$$

Nous avons obtenu comme résultats d'ajustement :

**Paramètres :** u = 38.3782 et α = 11.5913

La loi de Gumbel donne un ajustement satisfaisant (Fig. 18), cela est tiré d'après le test de ($\chi^2$ -KHI carré).

D'où : $\chi 2$ =3.86 et p ($\chi 2$) = 0.1454 > 0.05

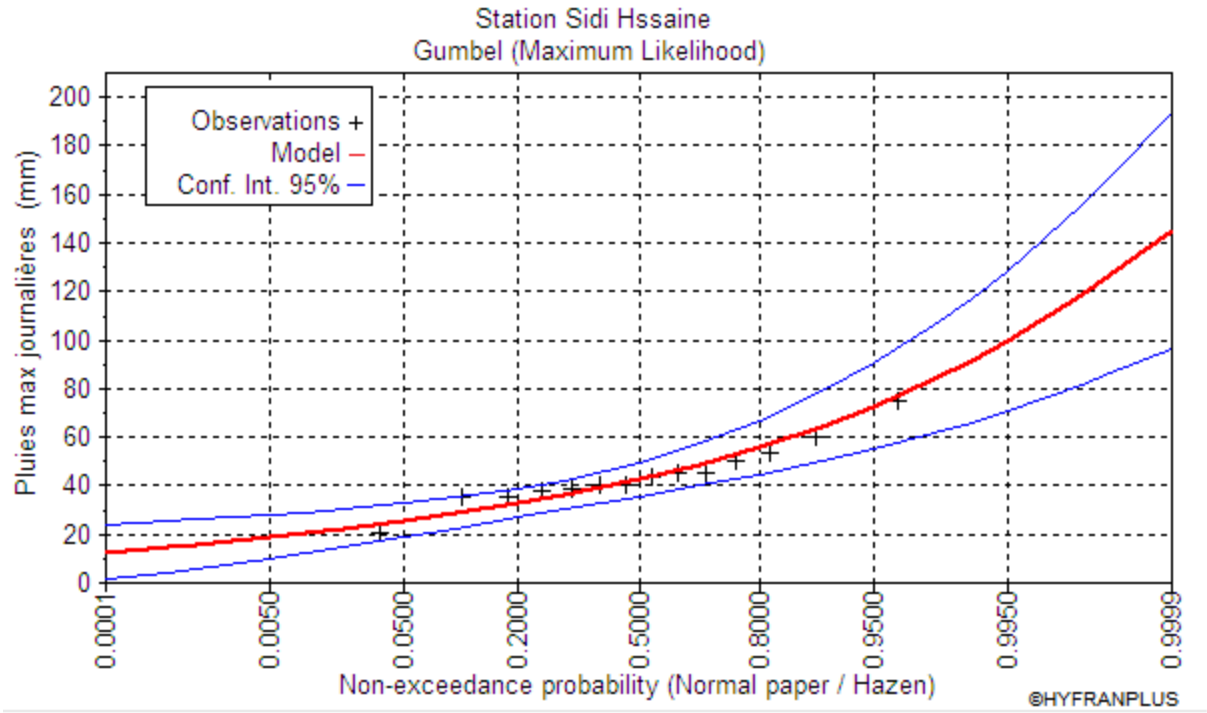


**Figure 18: Ajustement graphique de la série des pluies journalières maximales annuelles à la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance)**

### b- Ajustement à la loi de Gamma (méthode du maximum de vraisemblance)

En théorie des probabilités et en statistiques, une distribution Gamma ou loi Gamma est un type de loi de probabilité de variables aléatoires réelles positives, dont la distribution est paramétrée à l'aide d'un paramètre de forme α et un paramètre d'intensité λ. La fonction de densité de probabilité est exprimée par la formule suivante :

$$f(x) = \frac{\alpha^{\lambda}}{\tau(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-x}$$

Avec :

X >0

τ(λ) : La fonction Gamma

<u>Résultats de l'ajustement :</u>

**Paramètres :** α= 0.295535 et λ= 13.1281

$\chi 2 = 3.86$

p ($\chi 2$)= 0.1454 > 0.005

Donc l'ajustement à la loi de Gamma est satisfaisant (Fig. 19).

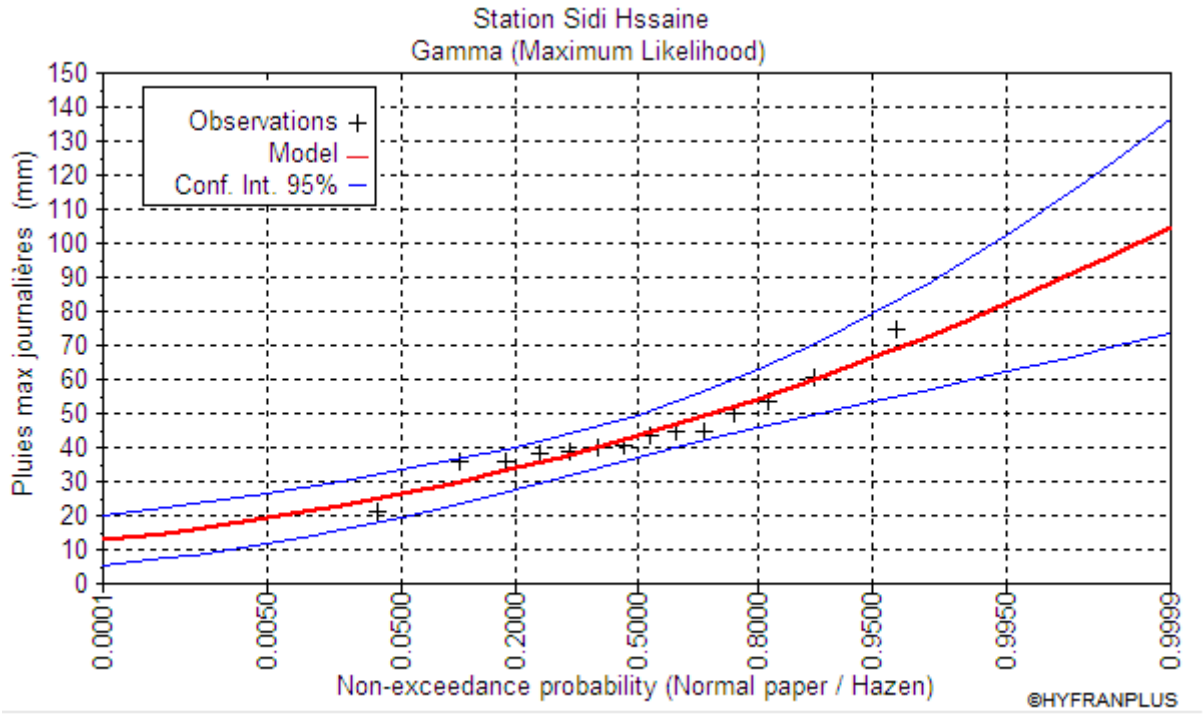


**Figure 19: Ajustement graphique de la série des pluies journalières maximales annuelles à la loi de Gamma (Maximum de vraisemblance)**

<u>Comparaison des ajustements :</u>

Le choix du meilleur ajustement se basera sur l'observation du graphique (Fig. 20) et les critères d'information Bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC).

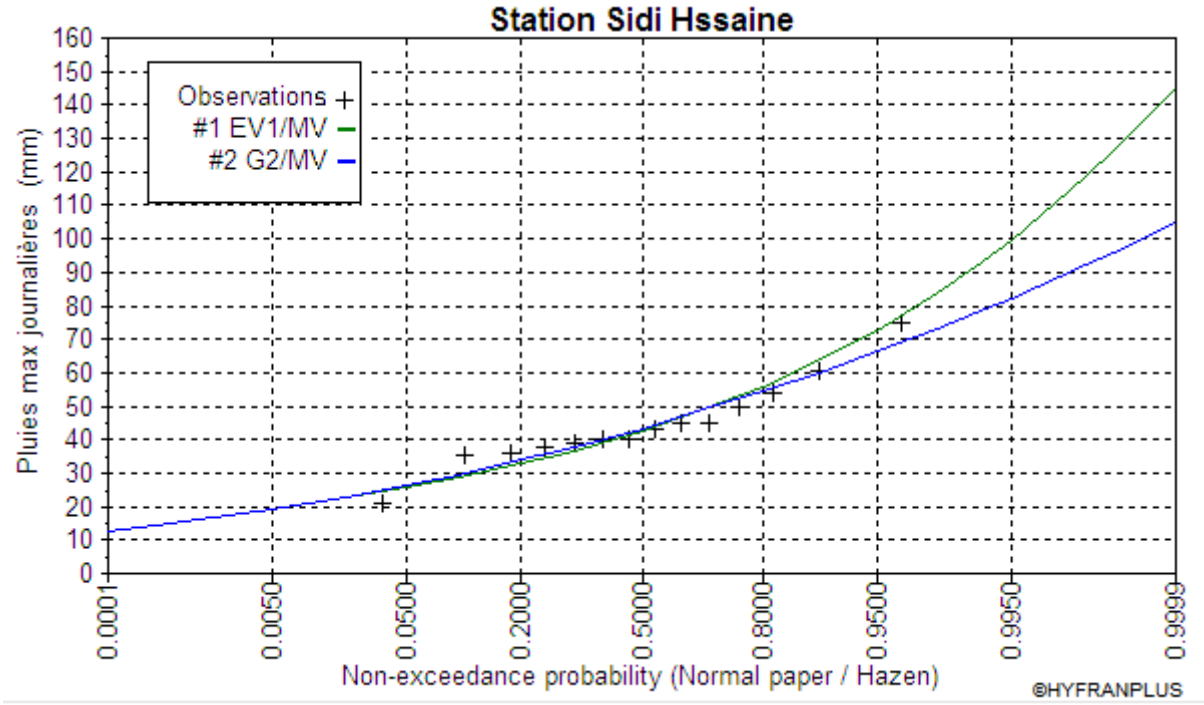


**Figure 20: Résultats de comparaison graphique des ajustements aux lois statistiques**

Ces deux critères (Tab. 8) permettent de classer les modèles statistiques pour choisir le modèle fréquentiel le plus représentatif de données, afin d'obtenir une estimation de quantiles. Le meilleur ajustement pour chacun des deux critères, correspond à la plus faible valeur de son coefficient.

Critère d'information Bayésien (BIC) ; $BIC = -2 \log (L) + 2 k \log(n)$

Où : L est la vraisemblance, K le nombre de paramètres et N la taille de l'échantillon.

Critère d'information d'Akaike (AIC) ; $AIC = -2 \log(L) + 2 k$

Où : L est la vraisemblance et K le nombre de paramètres.

**Tableau 8: Résultats de comparaison numérique des ajustements aux lois statistiques**

| Modèle | BIC | AIC |
|---|---|---|
| **Gamma (Maximum de vraisemblance)** | 114.462 | 113.183 |
| **Gumbel (Maximum de vraisemblance)** | 115.118 | 113.84 |

La loi Gamma présente les coefficients BIC et AIC les plus faibles. Aussi, la figure de comparaison des graphiques illustre également que la loi Gamma est le meilleur compromis pour l'ajustement de la variable pluies maximales journalières.

### 1-1-4-Estimation des quantiles

Le risque d'un événement extrême est toujours associé au concept d'une période de retour ou intervalle de récurrence que l'on dénote T. La notion du période de retour d'un événement reflète le temps statistique qu'il faut attendre pour observer le même événement, qui sera dépassé en moyenne toutes les T années. Par exemple, si nous disons que la pluie de hauteur 80 mm est une pluie de période de retour 10 ans (ou décennale), c'est que cette pluie s'est produite statistiquement à la fréquence d'une fois tous les dix ans.

Si nous étudions des grandeurs comme les précipitations, on cherche à déterminer par exemple la probabilité pour qu'une intensité i ne soit pas atteinte ou dépassée (i soit inférieure ou égale à une valeur $x_i$). Cette probabilité est exprimée lorsque i représente une variable aléatoire par la relation suivante :

$$F(x) = P(i \leq x_i)$$

Cette probabilité est dénommée fréquence de non-dépassement ou probabilité de non dépassement. La formule 1- F ($x_i$) présente l'événement contraire est appelée probabilité de dépassement ou fréquence d'apparition. Le temps de retour est définit alors comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement. Soit :

$$T = \frac{1}{1 - F(x_i)}$$

**Tableau 9: Quantiles estimés pour différentes périodes de retour T selon la loi Gamma**

| T (ans) | q | Pt (mm) |
|---|---|---|
| **5** | 0.8 | 54.3 |
| **10** | 0.9 | 60.7 |
| **20** | 0.95 | 66.3 |
| **50** | 0.98 | 73.1 |
| **100** | 0.99 | 77.8 |
| **200** | 0.995 | 82.3 |
| **500** | 0.998 | 88 |
| **1000** | 0.999 | 92.1 |
| **2000** | 0.9995 | 96.1 |
| **10000** | 0.9999 | 105 |

T = 1/ (1-q)

q = F(X) = probabilité de non dépassement

Pt : Pluie journalière maximale correspondante à la période de retour donnée.

### 1-2-Analyse fréquentielle des données du débit maximum journalier annuel (87-2011)

#### 1-2-1- Paramètres statistiques de l'échantillon

**Tableau 10: Statistiques descriptifs de l'échantillon**

| | |
|---|---|
| **Nombre de données** | 19 |
| **Pmin** | 0.2 |
| **Pmax** | 51 |
| **Pmoy** | 7.15 |
| **Ecart type** | 11.8 |
| **P médiane** | 3 |
| **Coefficient de variation** | 1.65 |
| **Coefficient d'asymétrie** | 3.18 |
| **Coefficient d'aplatissement** | 10.1 |

La valeur du coefficient d'asymétrie et d'aplatissement indique que la distribution est dissymétrique à gauche et moins aplatie que la normale.

### 1-2-2-Vérification des hypothèses

**Tableau 11: Résultat des hypothèses**

| | Test de stationnarité (**kendall**) | Test d'indépendance (**Wald-Wolfwitz**) | Test d'homogénéité (**Wilcoxon**) |
|---|---|---|---|
| **Statistics value** | \|K\| = 1.47 | \|U\| = 0.430 | \|W\| = 1.42 |
| **p-value** | p = 0.142 | p = 0.668 | p = 0.156 |

La valeur p est supérieure au taux de signification 0.05, donc les données sont stationnaires indépendantes est homogènes.

### 1-2-3-Ajustement des données à la loi statistique

D'après le test de plusieurs lois statistiques, la loi de Galton (log normal) apparait la plus adéquate à l'ajustement des données du débit max journalier correspondant à la station du Sidi Hssain. (Fig. 21).

La loi de Galton (Maximum de vraisemblance) est une loi de probabilité dont la fonction de densité de probabilité est :

$$\boldsymbol{f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{[lnx - \mu]^2}{2\sigma^2}\right)}$$

Pour x > 0, les paramètres μ et σ sont l'espérance et l'écart type du logarithme de la valeur (puisque par défintion, le logarithme de la variable est distribué selon une loi normale d'espérance μ et d′écart type σ).

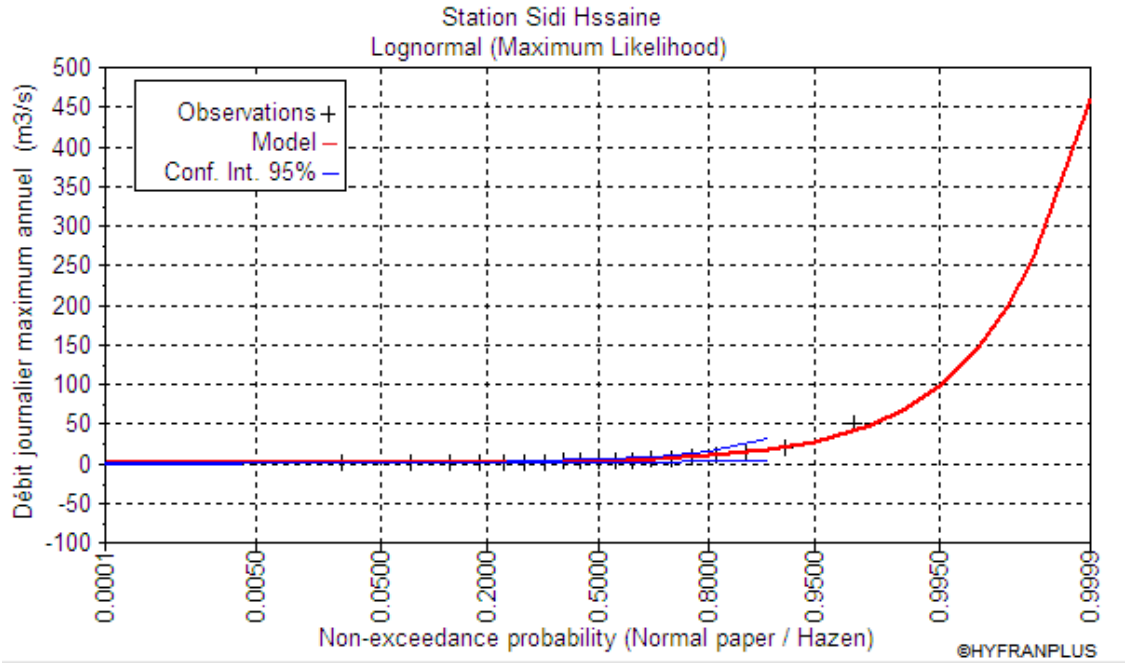


**Figure 21: Ajustement graphique de la série du débit journalier maximum annuel à la loi de Galton (Maximum de vraisemblance)**

**Paramètres :**

$\mu = 1.105$

$\sigma = 1.352$

**Test de KHI carré :**

$\chi 2 = 4.05$

$p(\chi 2) = 0.256 > 0.05$

**Quantiles :**

**Tableau 12: Quantiles estimés pour différentes périodes de retour T selon la loi de Galton**

| T (ans) | q | Qt [m3/s] |
|---|---|---|
| 5 | 0.8 | 9.42 |
| 10 | 0.9 | 17.1 |
| 20 | 0.95 | 27.9 |
| 50 | 0.98 | 48.5 |
| 100 | 0.99 | 70.1 |
| 200 | 0.995 | 98.3 |
| 500 | 0.998 | 148 |
| 1000 | 0.999 | 197 |
| 2000 | 0.9995 | 258 |
| 10000 | 0.9999 | 461 |

T = 1/ (1-q)

q = F(X) = probabilité de non dépassement

Qt : Débit journalier maximum correspondant à la période de retour donnée.

### 1-3-Analyse fréquentielle des données du débit instantané maximum annuel (87-2011)

#### 1-3-1- Paramètres statistiques de l'échantillon

**Tableau 13: Statistiques descriptifs de l'échantillon**

| | |
|---|---|
| **Nombre de données** | 23 |
| **Qmin** | 0.6 |
| **Qmax** | 280 |
| **Qmoy** | 34.9 |
| **Ecart type** | 74.3 |
| **P médiane** | 6 |
| **Coefficient de variation** | 2.13 |
| **Coefficient d'asymétrie** | 2.94 |
| **Coefficient d'aplatissement** | 8.23 |

La valeur du coefficient d'asymétrie et d'aplatissement indique que la distribution est dissymétrique à gauche et moins aplatie que la normale.

#### 1-3-2-Vérification des hypothèses

**Tableau 14: Résultat des hypothèses**

| | Test de stationnarité (**kendall**) | Test d'indépendance (**Wald-Wolfwitz**) | Test d'homogénéité (**Wilcoxon**) |
|---|---|---|---|
| **Statistics value** | \|K\| = 0.555 | \|U\| = 0.635 | \|W\| = 0.033 |
| **p-value** | p = 0.579 | p = 0.525 | p = 0.973 |

La valeur p est supérieure au taux de signification 0.05, donc les données sont stationnaires indépendantes est homogènes.

### 1-3-3-Ajustement des données à la loi statistique

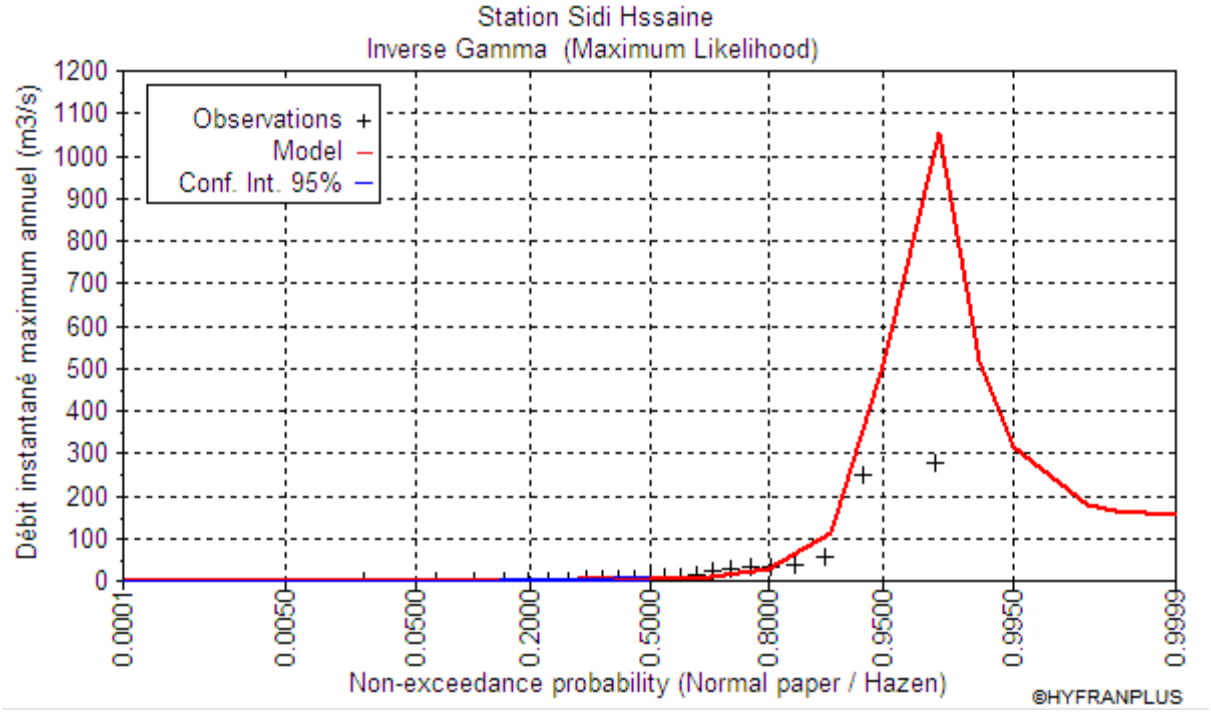


**Figure 22: Ajustement graphique de la série du débit instantané maximum annuel à la loi d'Inverse Gamma (Maximum de vraisemblance)**

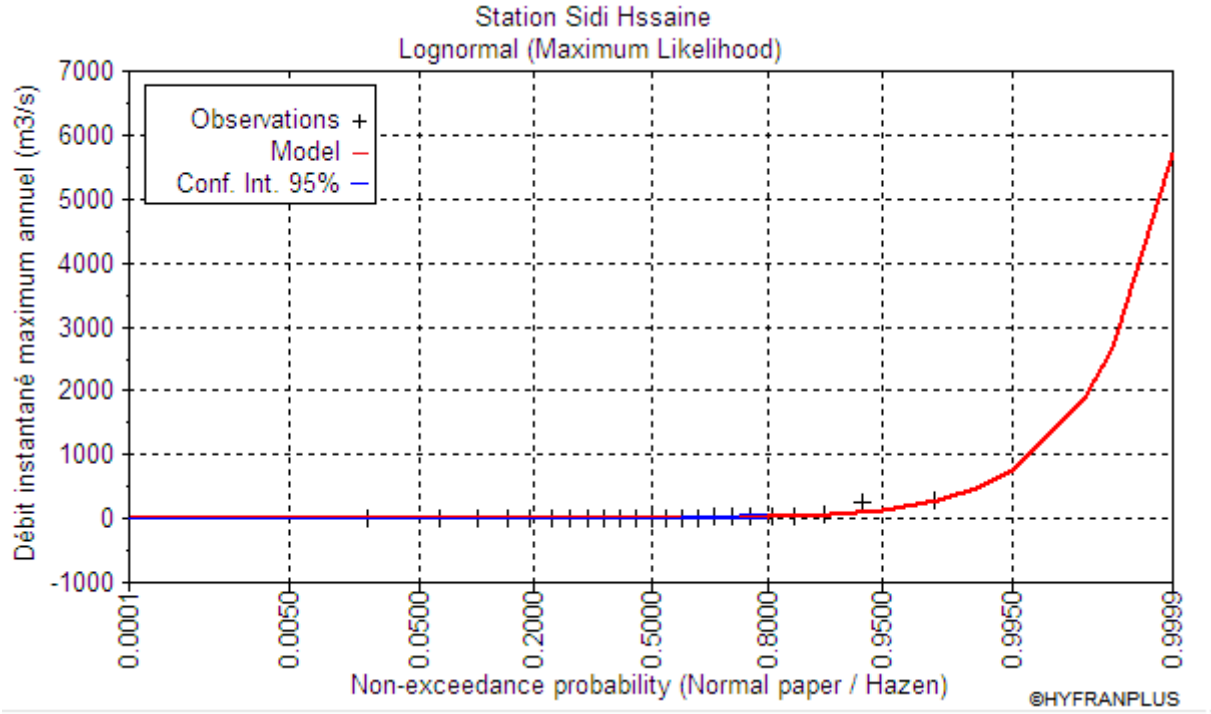


**Figure 23: Ajustement graphique de la série du débit instantané maximum annuel à la loi de Galton (Maximum de vraisemblance)**

D'après le fait de tester plusieurs lois statistiques sur le logiciel Hyfran, la loi de Galton (log normal) apparait la plus adéquate à l'ajustement des données du débit instantané maximum annuel correspondant à la station du Sidi Hssain.

**Paramètres :**

$\mu = 2.041$

$\sigma = 1.777$

**Test de KHI carré :**

$\chi 2 = 6.52$

$p(\chi 2) = 0.163 > 0.05$

**Quantiles :**

**Tableau 15: Quantiles estimés pour différentes périodes de retour T selon la loi de Galton**

| T (ans) | q | Qt [m3/s] |
|---|---|---|
| 5 | 0.8 | 34.4 |
| 10 | 0.9 | 75.2 |
| 20 | 0.95 | 143 |
| 50 | 0.98 | 297 |
| 100 | 0.99 | 482 |
| 200 | 0.995 | 751 |
| 500 | 0.998 | 1280 |
| 1000 | 0.999 | 1870 |
| 2000 | 0.9995 | 2670 |
| 10000 | 0.9999 | 5730 |

$T = 1/(1-q)$

q = F(X) = probabilité de non dépassement

Qt : Débit journalier maximum correspondant à la période de retour donnée.

**2-Les méthodes empiriques**

Les caractéristiques du bassin contrôlé par la station Sidi Hssain sont :

$S = 54\ km^2$

$L = 18.6\ km$

Pluviométrie annuelle égale à 421 mm

Il existe plusieurs méthodes régionales pour le calcul des débits de pointe relatifs à chaque période de retour. Ces formules sont extraites d'un rapport de recherche (BOBEE et al, 2001) :

### 2-1-Formule de Mallet-Gautier

$$\boldsymbol{Q_T = 2 * K * \left[\log(1 + a.Pan) * \frac{A}{L^{0.5}}\right] * \sqrt{(1 + 4.\log(T) - \log(A))}}$$

Avec :

$Q_T$ : Débit de pointe [m3/s] pour la période de retour

K : Coefficient qui varie de 0.5 à 6

(0.5 Pour les grands bassins versant et 6 pour les petits bassins versants de fortes pentes). Au Maroc, on prend K = 2

a : Coefficient entre 20 et 30 (au Maroc, on prend a = 20)

L : Longueur du plus long talweg (Km)

A : Superficie du bassin versant (Km²)

T : Période de retour

Pan : Pluie moyenne annuelle (m)

La hauteur moyenne annuelle de pluie en mm relative à la station Sidi Hssain, a été extraite des données communiquées par l'agence du bassin hydraulique du Tensift, elle égale 417 mm.

La formule de Mallet Gautier est d'une application délicate surtout à cause de l'incertitude qui pèse sur la valeur des coefficients **a** et **K**. C'est pour cela, dans des cas douteux il faut faire appel à une comparaison des résultats avec ceux déterminés par d'autres formules.

### 2-2-Formule de Fuller II

Cette formule est généralement utilisée pour l'estimation des crues originaires des bassins versants de superficies supérieures à 10 km². Elle s'exprime comme suit :

$$\boldsymbol{Q_T = (1 + a.\log(T)) * \left[A^{0.8} + \left(\frac{8}{3} * A^{0.5}\right)\right] * \frac{4}{3} * \frac{N}{100}}$$

$Q_T$ : Débit maximal pour la période de retour T en [m3/s]

A : Superficie du bassin versant en (km²)

T : Période de retour

a : Coefficient qui varie entre 0.7 à 3.5 :

0.7 < a < 0.8 : Pour les grands bassins versants et pour les régions bien arrosées

0.8 < a < 2 : Pour les régions arides

3 < a < 3.5 : Pour les oueds sahariens

(On prend a = 0.8)

N : Coefficient régional qui varie de 80 à 100 :

N = 80 pour la plaine

N = 85 pour les régions accidentées

N = 100 en montagne

(On prend N = 100)

**2-3-Formule de Hazan–Lazarvic**

$$\boldsymbol{Q\ (1000) = K1 * S^{K2}}$$

Où :

Q(1000) : Débit de pointe en [m3/s] de récurrence 1000 ans

S : Superficie du bassin versant en km²

Les valeurs des paramètres K1 et K2 dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie moyenne annuelle. Elles sont données dans le tableau 16 :

**Tableau 16: Formules régionales de Hazan-Lazarevic pour Q1000**

| Zone géographique | QP (T= 1000) en [m3/s] | Pluviométrie en [mm/an] |
|---|---|---|
| Rif central | $\mathbf{Q = 15.55\ A^{0.776}}$ | 1000-1300 |
| Rif occidental | $\mathbf{Q = 9.78\ A^{0.793}}$ | 800-1000 |
| Rif oriental | $\mathbf{Q = 7.58\ A^{0.838}}$ | 600-800 |
| Haut Atlas Saharien | $\mathbf{Q = 9.38\ A^{0.742}}$ | 200-400 |
| Moyen Atlas | $\mathbf{Q = 19.94\ A^{0.636}}$ | 700-900 |
| Moyen Atlas karst | $\mathbf{Q = 13.47\ A^{0.587}}$ | 400-700 |

En se basant sur la géographie et la pluviométrie de la zone d'étude, nous prenons les coefficients qui s'en approchent le plus :

K1 = 9.38

K2 = 0.742

La transposition des débits des crues milléniales aux débits de récurrence T se fera par la formule de Fuller I qui s'écrit comme suit :

$$\mathbf{Q_T = Q(1000)*(1+a*log(T)) / (1+a*log(1000))}$$

$Q_T$ : Débit de pointe en $m^3/s$ de récurrence T

a : Coefficient qui varie entre 0.7 à 3.5 :

0.7 < a < 0.8 : Pour les grands bassins versants et pour les régions bien arrosées

0.8 < a < 2 : Pour les régions arides

3 < a < 3.5 : Pour les oueds sahariens

(On prend a = 0.8)

Les calculs effectués par les différentes formules empiriques sont consignés dans le tableau 17 :

**Tableau 17: Débit de pointe pour les différentes périodes de retour**

| | $Q_{10}$ | $Q_{20}$ | $Q_{50}$ | $Q_{100}$ | $Q_{1000}$ | $Q_{10000}$ [m3/s] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Mallet Gautier** | 88 | 103 | 120 | 132 | 164 | 191 |
| **Fuller II** | 105 | 120 | 138 | 152 | 199 | 246 |
| **Hazan-Lazarvic** | 96 | 109 | 126 | 138 | 181 | 224 |

## 3-La méthode GRADEX

### 3-1-Principe de la méthode GRADEX

La méthode du GRADEX (GUILLOT et DUBAN, 1968), est une approche hydro-pluviométrique simplifiée qui permet d'estimer les débits de crues extrêmes pour des fréquences d'apparition rares à très rares (temps de retour au-delà de 100 ans). Elle s'applique à des bassins versants de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés recevant des pluies uniformes au niveau spatial.

Cette méthode est basée sur une idée axiale, selon laquelle l'extrapolation des valeurs de débits ne peut se faire raisonnablement que de façon parallèle à la courbe des précipitations, puisque nous ne pouvons pas avoir une quantité d'eau ruisselée supérieure à celle tombée comme pluie.

La méthode Gradex se base sur une procédure de calcul qui suit l'approche suivante :

- ✓ Déterminer le rang r
- ✓ Calculer la probabilité de non dépassement F(x) par la formule de Hazen

$$F(x) = \frac{(r - 0.5)}{n}$$

n = taille de l'échantillon

Sachant que : $T = \frac{1}{1-F(x)}$

- ✓ Calculer la variable réduite de Gumble

$$u = -ln(-ln(F(x)))$$

- ✓ Déterminer le paramètre de position **a** et le paramètre d'échelle **b** par la méthode des moments

$$b = \sigma \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

$$a = \mu - b.0.57721$$

σ:écart type

μ : moyenne

- ✓ Calculer le débit :

$$Q = bU + a$$

### 3-2-La méthodologie du GRADEX

Les pluies maximales journalières de la station Sidi Hssain ont été ajustées selon la loi de Gumbel. Le résultat de cet ajustement et ses paramètres sont donnés dans le tableau 18 :

**Tableau 18: Résultat de l'ajustement des pluies max journalières (1998-2011) à la loi de Gumbel**

| **Période de retour T [an] =** | **10** | **20** | **50** | **100** | **500** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Probabilité de non dépassement de P =** | 0.9 | 0.95 | 0.98 | 0.99 | 0.998 |
| **variable réduite de Gumbel =** | 2.25 | 2.97 | 3.9 | 4.6 | 6.21 |
| **Pmoy [mm] pour période de retour T =** | 61 | 68 | 77 | 84 | 100 |
| **Paramètre de position a** = | 38.7 | | | | |
| **Paramètre d'échelle b** = | **9.9** | | | | |

La même procédure d'ajustement doit être appliquée sur les données du débit maximum journalier annuel (Tab. 19), afin de trouver le point pivot qui correspond au débit à partir duquel commence l'extrapolation.

**Tableau 19: Résultat de l'ajustement des débits max journaliers (1987-2011) à la loi de Gumbel**

| **Période de retour T[an] =** | **10** | **20** | **50** | **100** | **500** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Probabilité de non dépassement de Qm =** | 0.9 | 0.95 | 0.98 | 0.99 | 0.998 |
| **Variable réduite de Gumbel =** | 2.25 | 2.97 | 3.9 | 4.6 | 6.21 |
| **Qmoy [mm] pour période de retour T =** | 47 | 62 | 81 | 96 | 130 |
| **Qmoy [m3/s] pour période de retour T =** | 29 | 39 | 51 | 60 | 81 |
| **Paramètre de position a** = | -0.6 | | | | |
| **Paramètre d'échelle b** = | **21** | | | | |

L'extrapolation de la fonction de répartition des débits se fait par une droite de pente égale au Gradex de pluie, et au-delà du débit décennal (T = 10 ans) qui correspond à la fréquence au non dépassement 0.9.

L'unité du débit est convertie à l'unité de pluie en utilisant la surface du bassin versant, cette opération permet d'exprimer les deux variables par la même unité ce qui rende leur association et traitement plus adéquat.

Le passage du débit moyen journalier extrapolé $Q_{moy}$ au débit de pointe $Q_p$ se fait par l'intermédiaire du coefficient de pointe $C_p$, c'est une opération que se réalise selon le rapport suivant :

$$\mathbf{Q_p = C_p \times Q_{moy}}$$

Le choix du coefficient de pointe dépend de l'analyse du débit instantané maximum $Q_{inst}$ et débit journalier maximum $Q_{moy}$.

Généralement, le coefficient de pointe est obtenu par le rapport suivant :

$$\mathbf{C_p = Q_{inst} / Q_{moy}}$$

La série des débits des crues (1987 – 2011) à la zone d'étude conduit à un coefficient de pointe moyen égale à **3**.

Le résultat d'extrapolation des débits par la méthode GRADEX est exprimé dans le tableau 20.

Point pivot = 10 ans

Coefficient de pointe = 3

Coefficient a et b de la droite d'extrapolation des débits :

**b** (pluie) =9.9 et **a**= 24.2

**Tableau 20: Extrapolation des débits par la méthode GRADEX**

| Temps de retour | Fréquence empirique selon Hazen | Variable réduite de Gumbel u | Précipitations estimées | Débits moyen estimés | Débits moyen extrapolés | Débits moyen extrapolés | Débits de pointe extrapolés |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [ans] | [-] | [-] | [mm/24h] | [mm/24h] | [mm/24h] | [m3/s] | [m3/s] |
| **10** | 0.9 | 2.25 | 61.1 | 46.6 | 46.6 | 56.6 | 170 |
| **20** | 0.95 | 2.97 | 68.2 | 61.7 | 53.8 | 65.3 | 196 |
| **50** | 0.98 | 3.9 | 77.5 | 81.2 | 63 | 76.6 | 230 |
| **100** | 0.99 | 4.6 | 84.4 | 95.9 | 70 | 85 | 255 |
| **1000** | 0.999 | 6.9 | 107.4 | 144.3 | 92.9 | 112.9 | 339 |
| **10000** | 0.9999 | 9.2 | 130.3 | 192.6 | 115.8 | 140.8 | 422 |

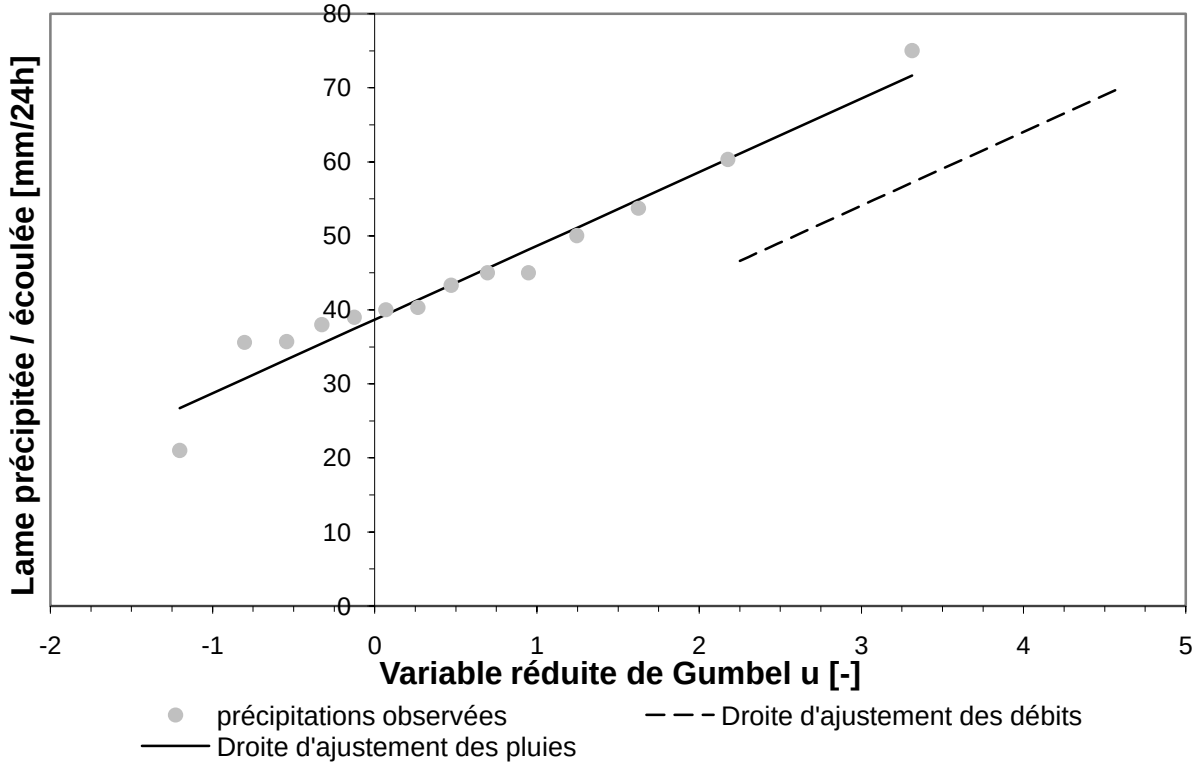


**Figure 24: Ajustements graphique des données de $P_{max}$ et $Q_{max}$ selon la méthode GRADEX**

## V-Transposition des données du bassin jaugé vers le bassin non jaugé

Pour mieux apprécier les débits de pointes probables sur un bassin versant du barrage, il faut également faire appel à une analogie avec d'autres bassins versants similaires et limitrophes. Cette similitude se manifeste surtout au niveau de la morphologie et le régime pluviométrique.

La transposition des débits des crues obtenus par ajustement vers le bassin versant de la zone d'étude se fait par la formule de Francou-Rodier (FRANCOU et RODIER, 1969) et la méthode des débits spécifiques.

<u>Francou-Rodier</u>

Au départ, on procède au calcule du paramètre K (coefficient de Francou-Rodier), connaissant le débit de crue $Q_A$ [m3/s] calculé pour une période de retour T, grâce à une étude statistique appliquée aux données observées dans le bassin jaugé de superficie $S_A$(Km²).

$$K_T = 10 * \left(1 - \frac{ln\left(\frac{Q_A}{10^6}\right)}{ln\left(\frac{S_A}{10^8}\right)}\right)$$

Puis utiliser la valeur de K pour calculer le débit de crue dans le bassin non jaugé de superficie $S_B$ (Km²).

$$\boldsymbol{Q_P = 10^6 * \left(\frac{S_B}{10^8}\right)^{1-\frac{K_T}{10}}}$$

$Q_P$ = Débit de pointe [m3/s] au bassin cible

Les valeurs du coefficient K et les débits de crues ainsi déterminés sont donnés dans le tableau suivant :

$S_A$ : Superficie du bassin jaugé = 105 Km²

$S_B$ : Superficie du bassin cible = 54 Km²

<u>Débits spécifiques</u>

La méthode des débits spécifiques permet l'extrapolation du débit d'un bassin connue à un bassin non jaugé, dans des conditions comparable de climat, morphologie, lithologie et couvert végétal. L'équation utilisée prend la forme suivante (ENVIRONNEMENT CANADA, 1987) :

$$\boldsymbol{Q_P = Q_C * \frac{A}{A_C}}$$

Avec :

$Q_P$ : Débit au bassin versant non jaugé [m3/s]

A : Superficie du bassin versant non jaugé (Km²)

$A_C$ : Superficie du bassin versant connu (Km²)

$Q_C$ : Débit du bassin versant connu [m3/s]

## 1-Transposition des débits maximums annuels

**Tableau 21: Transposition du débit maximum journalier annuel**

| T (ans) | $Q_{jour}$ en [m3/s] selon Gamma | Francou-Rodier | | Débit spécifique |
|---|---|---|---|---|
| | | $K_T$ | $Q_T$ [m3/s] | $Q_T$ [m3/s] |
| **10** | 17 | 2 | **10** | **9** |
| **20** | 28 | 2.4 | **17** | **14** |
| **50** | 49 | 2.8 | **30** | **25** |
| **100** | 70 | 3.1 | **44** | **36** |
| **1000** | 197 | 3.8 | **130** | **101** |
| **10000** | 461 | 4.4 | **318** | **237** |

**Tableau 22: Transposition du débit instantané maximum annuel**

| T (ans) | $Q_{inst}$ en [m3/s] selon Galton | Francou-Rodier | | Débit spécifique |
|---|---|---|---|---|
| | | $K_T$ | $Q_T$ [m3/s] | $Q_T$ [m3/s] |
| **10** | 75 | 3.1 | **47** | **39** |
| **20** | 143 | 3.6 | **93** | **74** |
| **50** | 297 | 4.1 | **201** | **153** |
| **100** | 482 | 4.5 | **333** | **248** |
| **1000** | 1870 | 5.4 | **1381** | **962** |
| **10000** | 5730 | 6.3 | **4465** | **2947** |

## 2-Transposition des pluies maximales journalières

Les mêmes méthodes de transposition et la même procédure a été appliquée sur les données de pluies journalières maximales ajustées par la loi de Gamma (Maximum de vraisemblance), ce qui permet d'aboutir aux résultats indiqués dans le tableau 23 :

**Tableau 23: Résultat de transposition des pluies vers le bassin non jaugé**

| T (ans) | $P_T$ en (mm) selon Gamma | Francou-Rodier | | Débit spécifique |
|---|---|---|---|---|
| | | $K_T$ | $P_T$ (mm) | $P_T$ (mm) |
| **10** | 61 | 3 | **38** | **31** |
| **20** | 66 | 3 | **41** | **34** |
| **50** | 73 | 3.1 | **46** | **38** |
| **100** | 78 | 3.1 | **49** | **40** |
| **1000** | 92 | 3.2 | **59** | **47** |
| **10000** | 105 | 3.3 | **67** | **54** |

### 3-Transposition des débits de pointe obtenus par la méthode Gradex

La même procédure de transposition sera effectuée sur les données issues de la méthode GRADEX (Tab. 24), puisque elles sont typiques du bassin versant contrôlé par la station Sidi Hssain, et les méthodes de transposition vont permettre un calage des débits de pointe sur Ardouz qui est un bassin versant non jaugé.

**Tableau 24: Transposition des QP extrapolés par la méthode Francou-Rodier et Débit spécifique**

| T (ans) | Débit de pointe selon GRADEX [m3/s] | Francou-Rodier | | Débit spécifique |
|---|---|---|---|---|
| | | $K_T$ | $Q_T$ [m3/s] | $Q_T$ [m3/s] |
| **10** | 170 | 3.7 | **112** | **87** |
| **20** | 196 | 3.8 | **130** | **101** |
| **50** | 230 | 3.9 | **153** | **118** |
| **100** | 255 | 4 | **171** | **131** |
| **1000** | 339 | 4.2 | **230** | **174** |
| **10000** | 422 | 4.4 | **290** | **217** |

## VI-Estimation de la crue de projet

La crue de projet est une appellation utilisée pour décrire une crue d'un débit de pointe maximale et d'une faible fréquence d'occurrence. Elle est prise en compte pour déterminer les Plus Hautes Eaux (PHE) et dimensionner l'évacuateur de crues.

Le choix de la crue de projet est un critère qui dépend des conditions économiques et prend en considération les conséquences que pourraient entrainer un dépassement de cette crue.

C'est-à-dire lorsque les conséquences d'une défaillance d'un ouvrage sont moins graves, on se base plutôt sur une analyse qui diminue le coût par le fait de choisir un niveau de protection moins élevé. En revanche, si les études déduisent que la défaillance de l'ouvrage peut entrainer des pertes en vies humaines et des dommages matériels très importants, on doit s'en prémunir avec le niveau maximum de sécurité en prenant en compte les conditions de crue les plus sévères et probablement possibles au site de l'aménagement.

Donc, l'estimation de la crue de projet est un acte contrôlé par l'influence de l'aléa intrinsèque au barrage sur l'enjeu avoisinant. La période de retour minimale décidée pour une crue est comprise entre 100 ans et 10 000 ans, mais lorsque le barrage intéresse la sécurité publique, la période de retour ne devra en aucun cas être inférieure à 1 000 ans.

Pour le site d'Ardouz nous avons opté pour une période de retour millénaire, puisque il s'agit d'un choix répondu au Maroc. Ainsi, ce débit millénial qui correspond à la crue de projet, et qui serve à dimensionner les évacuateurs de crue, a été choisi dans notre cas d'après les résultats de la méthode Gradex, par ce que c'est la méthode la plus fiable en raison de la détermination des débits de pointe de périodes de retour extrêmes. En plus, c'est le Gradex qui nous a donné les valeurs les plus élevées par rapport aux autres procédés, sauf pour l'analyse fréquentielle des débits instantanés qui donne des valeurs élevées mais elles surestiment la crue du projet.

$$\mathbf{Q_{1\,000} = 230\ m^3/s}$$

Et donc, les débits de pointe retenus pour les différentes périodes de retour, sont ceux obtenus par transposition de la méthode Gradex avec le coefficient de Francou-Rodier. Le résultat est indiqué dans le tableau 25 :

**Tableau 25: Crues retenues pour différentes périodes de retour**

| | T 10 | T 20 | T 50 | T 100 | T 1000 | T 10 000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Q [m³/s]** | 112 | 130 | 153 | 171 | 230 | 290 |

## VII-Forme des hydrogrammes

L'hydrogramme de crue est une représentation de la crue, il nous donne les caractéristiques principales de la crue :

- La forme de la crue
- Le volume de la crue

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

Les hydrogrammes peuvent adopter plusieurs formes :

**1-Forme type observée**

La forme adimensionnelle en Q/Qp et t/tp de la plus forte crue observée, (ou une combinaison des plus fortes observées).

Avec :

Q : Débit à l'instant t en [m³/s]

Qp : Débit de pointe de la crue [m³/s]

t : Instant (h)

tp : Temps de pointe (t à Q = Qp) (h)

**2-Forme type Triangulaire**

Forme triangulaire avec : tb= 3 tp ou tb= 2 tp.

Avec :

tb: Temps de base (h)

tp: Temps de pointe (ou de montée) (h)

**3-Forme type exponentielle**

La forme exponentielle s'exprime comme suit :

$$\frac{Q}{Q_p} = (t/t_P)^4 . e^{(4 - \frac{4t}{t_P})}$$

Avec :

Q : Débit à l'instant t [m³/s]

Qp: Débit de pointe de la crue [m³/s]

t : Temps (h)

tp: Temps de pointe (t à Q = Qp) (h)

**4-Forme type USSCS (hydrogramme adimensionnel)**

**Tableau 26: Tabulation de la forme adimensionnelle de l'hydrogramme USSCS**

| $t_b/t_p$ | $q_b/q_p$ | $t_b/t_p$ | $q_b/q_p$ |
|---|---|---|---|
| 0.00 | 0.000 | 2.50 | 0.155 |
| 0.10 | 0.015 | 2.60 | 0.130 |
| 0.20 | 0.075 | 2.70 | 0.114 |
| 0.30 | 0.160 | 2.80 | 0.098 |
| 0.40 | 0.280 | 2.90 | 0.087 |
| 0.50 | 0.430 | 3.00 | 0.075 |
| 0.60 | 0.600 | 3.10 | 0.067 |
| 0.70 | 0.770 | 3.20 | 0.059 |
| 0.80 | 0.890 | 3.30 | 0.052 |
| 0.90 | 0.970 | 3.40 | 0.044 |
| 1.00 | 1.000 | 3.50 | 0.036 |
| 1.10 | 0.980 | 3.60 | 0.032 |
| 1.20 | 0.920 | 3.70 | 0.029 |
| 1.30 | 0.840 | 3.80 | 0.025 |
| 1.40 | 0.750 | 3.90 | 0.022 |
| 1.50 | 0.660 | 4.00 | 0.018 |
| 1.60 | 0.560 | 4.10 | 0.016 |
| 1.70 | 0.490 | 4.20 | 0.014 |
| 1.80 | 0.420 | 4.30 | 0.013 |
| 1.90 | 0.370 | 4.40 | 0.011 |
| 2.00 | 0.320 | 4.50 | 0.009 |
| 2.10 | 0.320 | 4.60 | 0.008 |
| 2.10 | 0.280 | 4.70 | 0.007 |
| 2.20 | 0.240 | 4.80 | 0.006 |
| 2.30 | 0.210 | 4.90 | 0.005 |
| 2.40 | 0.180 | 5.00 | 0.004 |

La superposition des différentes formes d'hydogrammes de crue avec les hydrogrammes adimensionnels permettra l'adoption de la forme la plus vraisemblable.

Pour définir l'hydrogramme type de crues de la station Sidi Hssain, nous avons adimensionnalisé la crue majeure observée pendant l'année 2011, qui se caractérise par un

débit de pointe de 250 $m^3/s$ et un temps de montée d'une heure. Ainsi, nous avons superposé l'hydrogramme obtenu avec les hydrogrammes adimensionnels type (Fig. 24).

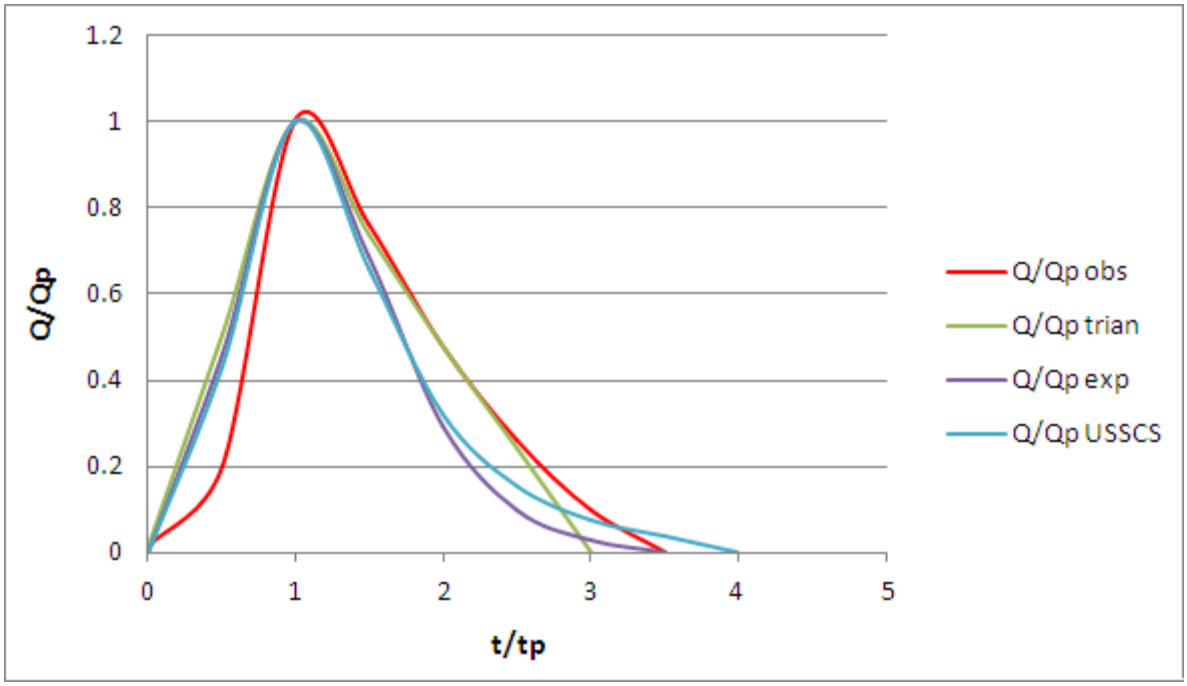


**Figure 25: Hydrogramme adimensionnel de la station Sidi Hssain**

La figure de l'hydrogramme adimensionnel ci-dessus présente une difficulté au niveau de l'assimilation de la forme de crue. Ceci est dû à la forme courbée avec laquelle débute l'hydrogramme de crue observée. Donc, nous avons opté pour une négligence de la première valeur du débit instantané enregistré, ce qui permet d'aboutir à un résultat plus simple représenté dans la figure 26 :

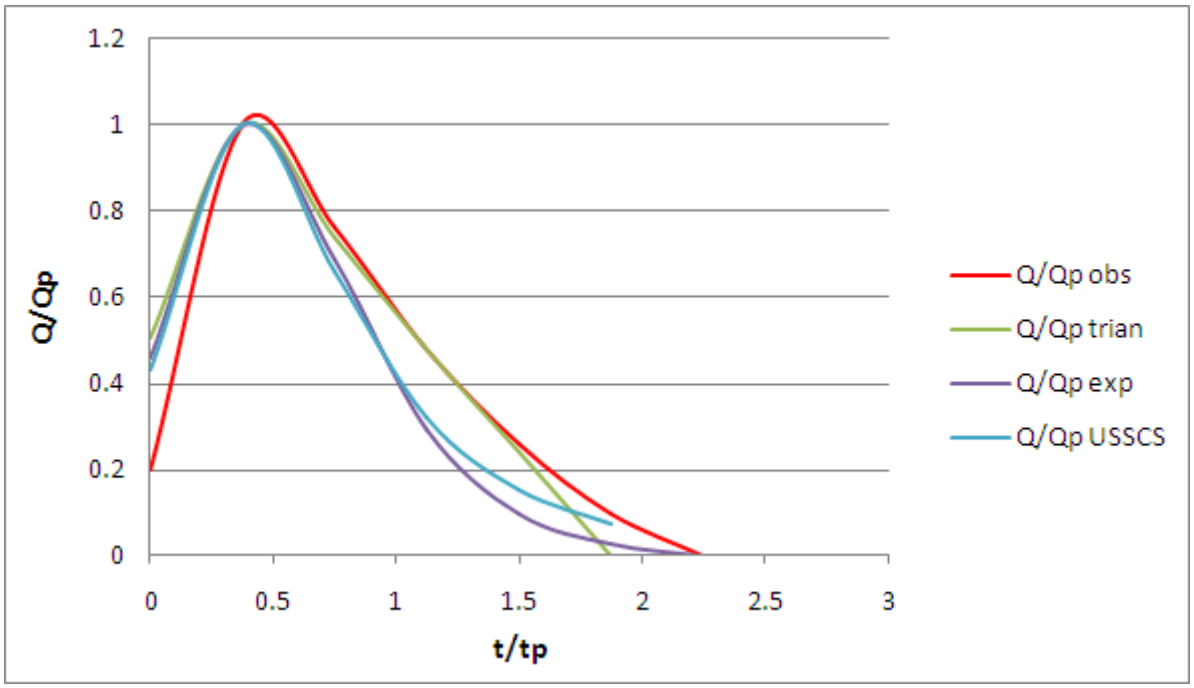


**Figure 26: Hydrogramme adimensionnel de la station Sidi Hssain**

Il ressort que la forme de l'hydrogramme triangulaire (Fig. 27), représente bien la forme de crue à la station Sidi Hssain. Donc c'est cette forme d'hydrogramme qu'on va adopter pour le site du barrage Ardouz et pour l'estimation des volumes de crues.

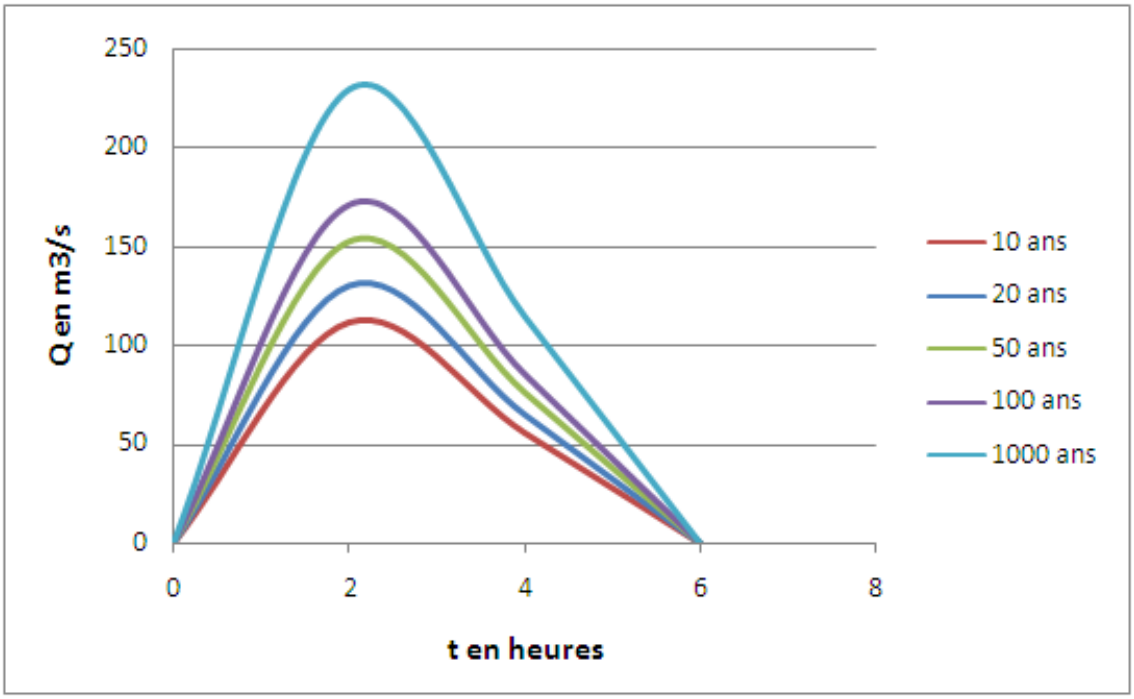


**Figure 27 : Hydrogramme de crue à ARDOUZ**

L'hydrogramme triangulaire se caractérise par :

- Un débit de pointe ;
- Un temps de montée pris égale au temps de concentration ;
- Un temps de descente pris égale à 2 fois le temps de montée.

Ainsi, le temps de base est égal à trois fois le temps de concentration et le volume de crue est calculé par la formule suivante :

$$\boldsymbol{V = Qp * \frac{3\,Tc}{2}} \quad \text{(Tc en seconde)}$$

Les débits des crues et leurs volumes ainsi calculés sont données dans le tableau 27 :

**Tableau 27: Débits de pointe et volumes de crues retenues**

| | **CRUES RETENUES** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **T** 10 | **T** 20 | **T** 50 | **T** 100 | **T** 1000 | **T** 10 000 |
| **Q** [$m^3/s$] | **112** | **130** | **153** | **171** | **230** | **290** |
| **V** [$Mm^3$] | **1.2** | **1.4** | **1.7** | **1.8** | **2.5** | **3.1** |

L'hydrogramme de crue relatif au site du barrage Ardouz, a été réalisé pour différente période de retour. Cependant, seul l'hydrogramme millénial qui sera retenu car c'est la crue de référence réglementaire en terme de dimensionnement du barrage Ardouz.

## VIII-Courbes << HAUTEUR – CAPACITE – SURFACE >> du barrage Ardouz

La côte minimale relevée est de 1638 m et la côte maximale est de 1652 m, ce qui révèle une hauteur de 15 m. le profil topographique approximatif du barrage Ardouz est représenté dans la figure 28 :

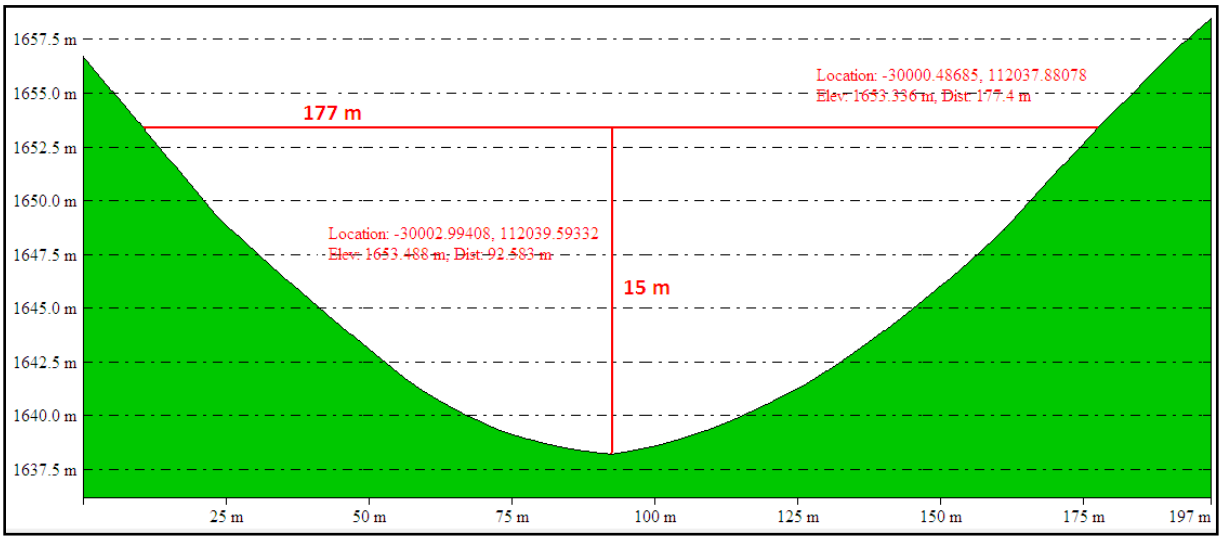


**Figure 28: Profil topographique du barrage Ardouz**

L'approximation des données (Hauteur, volume, surface) a été faite par l'utilisation du logiciel Global Mapper en exploitant le modèle numérique de la zone d'étude. Une opération qui a aboutit aux résultats présentés dans les figures 29 et 30 :

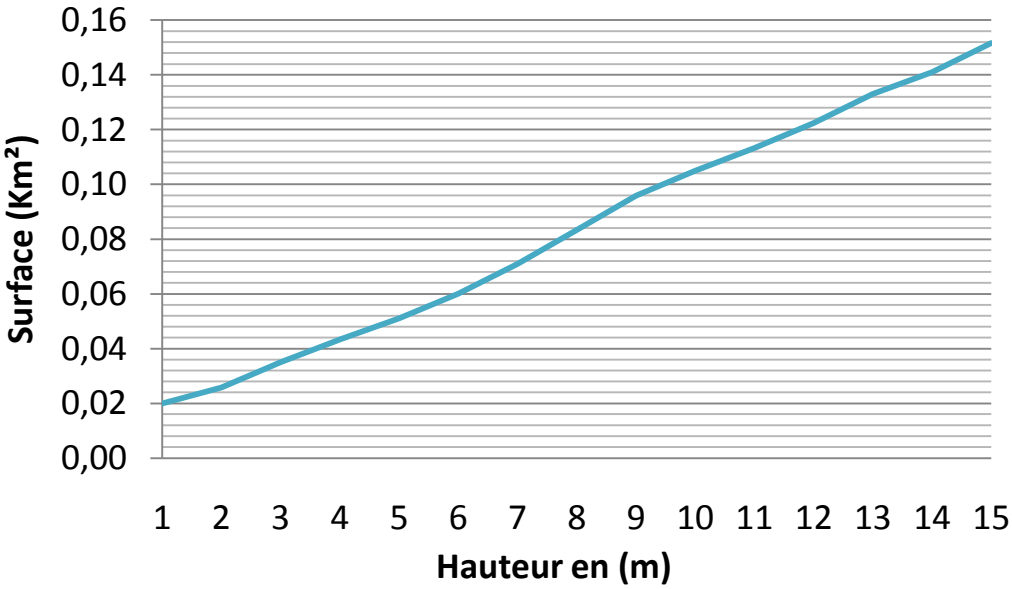

**Figure 29: Courbe de la surface en fonction de la Hauteur**

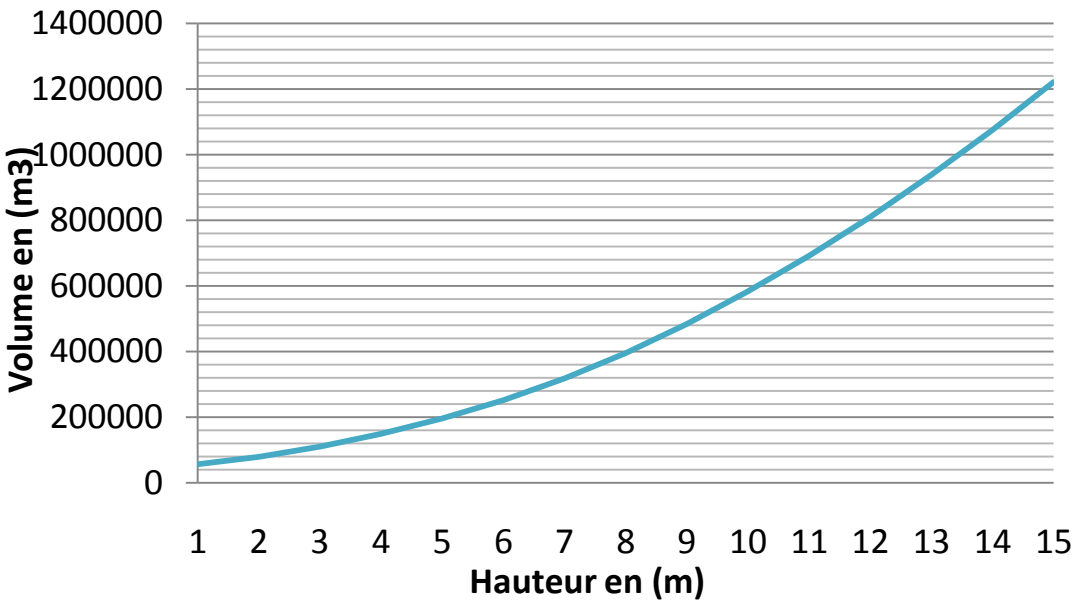


**Figure 30: Courbe du volume en fonction de la hauteur**

La hauteur du barrage, le volume de sa retenue et la surface du plan d'eau qui occupe, montre une relation exponentielle, puisque ils sont des critères attachés entre eux et varient essentiellement selon les conditions topographiques et les nécessitées de stockage d'eau. Ceci est expliqué d'après l'idée : qu'un taux des apports hydrologiques élevé nécessite un volume de stockage élevé et c'est la chose qui ne peut pas se réaliser que si les conditions topographiques permettent d'augmenter la hauteur du barrage.

## CONCLUSION

Les quelques pages qui précèdent, sont l'œuvre d'une étude hydrologique réalisée pour le bassin versant du site Ardouz. Une étude qui vise à déceler le comportement hydrologique du site ainsi construire les informations nécessaires au dimensionnement de l'ouvrage.

En effet, les évaluations hydrologiques accomplies, s'est fondées sur une procédure complète qui examine les caractéristiques géomorphologiques du bassin, ainsi que les données météorologiques locales et régionales.

# CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant du site Ardouz s'étend sur une superficie de 54 Km², avec une altitude qui varie entre 1631 et 3564 dont l'altitude moyenne est de l'ordre de 2940. Ça dépend à l'indice de Gravellius qui égale à 1.64 le bassin versant est doté d'une forme allongée, et il se caractérise par une dominance des altitudes élevées (> à 2600 m) et des degrés élevés de pente (> à 80°). Le temps de concentration du bassin est de l'ordre de 2h. En allant de l'amont vers l'aval le bassin versant d'Ardouz montre des formations géologiques de nature étanche.

Les caractéristiques climatiques sont extraites des stations les plus proches. La station climatologique du barrage Lalla Takerkoust révèle une température moyenne de l'ordre de 20°C (74-2012), et un taux moyen d'évaporation de l'ordre de 1843 mm/an (84-2012).

Le site se situe sur la même borne pluviométrique avec la station sidi HSSAIN, qui adopte 420 mm comme une valeur de précipitation moyenne (98-2011).

L'estimation des débits de crues s'est fondée sur trois méthodes :

Méthodes des analyses statistiques, où nous avons ajusté les pluies maximales journalières (98-2011) relatives à la station Sidi Hssain au meilleur compromis qu'est la loi Gamma, et même opération a été entamé pour les données du débit maximum journalier annuel (87-2011) et débit instantané maximum annuel (87-2011) dont l'ajustement se fait par la loi de Galton. Et pour mieux améliorer la crédibilité des résultats nous avons ajouté le calcul par la méthode Gradex.

Les résultats des méthodes probabilistes sont des quantiles estimés pour différentes périodes de retour, mais ils sont relatifs au bassin versant jaugé par la station Sidi Hssain, et dans notre cas le bassin versant d'Ardouz n'est pas jaugé. Donc, nous avons fait appel à une transposition des données du bassin jaugé vers le bassin non jaugé par la méthode de Francou-rodier et Débit spécifique. En plus nous avons estimé les débits de crues par la méthode de transposition pluie débit qui se présente par les formules de Mallet Gautier, FULLER II et HAZAN LAZARVIC.

Dans notre cas, les crues que nous avons retenu pour les différentes périodes de retour sont celles obtenues par la transposition du GRADEX. Car c'est la méthode qui nous a donné les valeurs les plus élevées sauf pour le débit instantané qui surestime la crue.

Ce résultat permet d'estimer la crue de projet relative à la crue milléniale qu'est de l'ordre de 230 m3/s et qui va servir à dimensionner les évacuateurs de crue.

La réalisation du barrage Ardouz est envisageable, avec une hauteur de 15m, une longueur 177m. La retenue du barrage accueille 1 $Mm^3$/an pour un volume de stockage de 3 $Mm^3$. ce volume subit une augmentation de presque 200 000 m3 pour chaque mètre de hauteur

Nous nous permettons de dire que la réalisation du barrage Ardouz est considérée comme une offre intéressante pour la région puisque elle va renforcer le système d'irrigation des périmètres agricoles et développer les compétences économiques de la population.

Les informations descriptives obtenues et les calculs hydrologiques effectués dans ce présent travail, vont servir par la suite non seulement à la description des caractéristiques de l'ouvrage mais en plus au dimensionnement de ses ouvrages annexes : Les évacuateurs de crues (évacuer les crues), les vidanges de fonds (vider le barrage) et les digues de col (bloquer l'eau dans les basses Terres).

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AIT SLIMAN, Abdelaziz (2011). Outils d'analyse spatiale pour la gestion et la planification de l'alimentation en eau potable de la plaine de Berrechid (province de Settat). Thèse de doctorat : Ressources en eau et Géomatique. Marrakech : Faculté des sciences Semelalia de Marrakech, 195p.

AL KHIBRA Etudes et Conseils (2010). Etude de conception et établissement des plans d'exécution du lac collinaire koudiat tamalout. Marché n°41/2009. Note hydrologique. Rapport définitif, 23p.

BELIVEAU, Julie (2006). Analyse fréquentielle multivariée de la pointe, du volume et de la durée de la crue. Mémoire de ès sciences, statistique. Québec : Faculté des sciences et de génie de Québec, 60p.

BET Hydroleader (2012). Etude technique de construction d'un barrage collinaire à Bou tyous, à la CR Ternata, province de Zagora : Mission 1 : Etude hydrologique et géologique. Marché n°28/BP/2012. Rapport provisoire, 45p.

BET INGEMA (2008). Etude de protection contre les inondations de six localités dans la zone d'action de l'ABHT : Mission 1 : Diagnostic de la situation actuelle. 1239-1140-08b. Version définitive, 136p.

BOBEE, B., GINGRAS, H., LEMONIER, M., OUARDA, T (2001). Synthèse des méthodes simples de régionalisation. No R-600. Québec : INRS-Eau, 65p.

EL HAMDANI, Majda (2013). Etude hydrologique du bassin versant de l'oued Mikkès. Mémoire de Master sciences et techniques, hydrologie de surface et qualité des eaux. Fès : Faculté des Sciences et Techniques de Fès, 79p.

ENVIRONNEMENT CANADA (1987). Analyses de la Fréquence des Crues au Nouveau Brunswick. Publication d'Environnement Canada (Ministère des Affaires Municipales et de l'Environnement du Nouveau-Brunswick / Direction de la planification des ressources en eau). 59p.

FRANCOU, J et J. A. RODIER (1969). Essai de classification des crues maximales. AIHS Publication (Les crues et leur évaluation, Vol. I). No 84. p. 518-527.

GUILLOT, P. et DUBAN, D (1968). Estimation de valeurs extrêmes de crues à partir des précipitations. Mélanges M. PARDE, Grenoble, p.283-283.

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT (1992). Hydrologie du bassin du Tensift. N°33630. 29, 242p.

KOUIDER, Aziz (2003). Analyse fréquentielle locale des crues au Québec. Mémoire de Maîtrise ès sciences. Université du Québec INRS – ETE, 264p.

LE DELLIOU, Patrick (2008). Grands barrages Petits barrages. Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages, n°20, 4-6p.

MAALEL, Khalifa., HAFSIA Zouheir (2012). Génie civil : ouvrages hydrauliques. Tunis : Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis. Publications ENIT 3ème année, cours, 213p.

SMAIJ, Zakaria (2011). Typologie de la qualité des ressources en eaux du bassin de Tensift Al-Haouz et cadre juridique de protection et de préservation, Mémoire de Master sciences et techniques, eau et environnement. Marrakech : Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech,96p.

# ANNEXES

**Tableau 28: Caractéristiques et classification des sites selon leurs priorités**

| | | Nom_du_site | Province | X | Y | BV (km²) | Coef-Ruissel (CR) | P_anl (mm) | Volume_Retenue ($Mm^3$) | apports ($Mm^3$) | Hauteur_axe (m) | Lougueur_Axe (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **P1** | **Apports >= 1 et Volume> 1 $Mm^3$** | **S Ahmed O Slimane** | Chichaoua | 222653.060 | 98434.292 | 62.7 | 0.15 | 245.2 | 1.16 | 2.31 | 13 | 225 |
| | | **Oued Assayad** | Chichaoua | 182790.945 | 95369.887 | 115.9 | 0.10 | 232.8 | 2.33 | 2.70 | 11 | 224 |
| | | **Od Ameznos** | Chichaoua | 165069.102 | 80268.008 | 416.3 | 0.10 | 257.3 | 3.02 | 10.71 | 15 | 274 |
| | | **Ain Tamatdit** | Chichaoua | 186015.610 | 55035.176 | 58.0 | 0.15 | 313.0 | 2.63 | 2.72 | 15 | 125 |
| | | **Ardouz** | Chichaoua | 219902.951 | 62563.872 | 54.0 | 0.15 | 423.0 | 1.22 | 3.43 | 15 | 177 |
| | | **Imintanoute** | Chichaoua | 170907.453 | 69183.409 | 143.6 | 0.15 | 309.0 | 1.33 | 6.65 | 15 | 129 |
| | | **Tidzi** | Essaouira | 89326.374 | 84901.786 | 192.9 | 0.10 | 307.9 | 1.73 | 5.94 | 15 | 132 |
| | | **Bou Hafel** | Essaouira | 142033.491 | 139154.358 | 62.8 | 0.10 | 246.0 | 1.05 | 1.54 | 15 | 320 |
| | | **Si Bou Douar** | Essaouira | 123302.761 | 134937.811 | 72.1 | 0.10 | 283.7 | 1.84 | 2.05 | 15 | 240 |
| | | **Ait Tahria Sur Tahria** | Essaouira | 99111.437 | 126119.203 | 787.7 | 0.10 | 320.0 | 4.02 | 25.21 | 15 | 292 |
| | | **N'Ali ou Said sur N'RIDI** | Essaouira | 103119.171 | 60452.592 | 304.3 | 0.10 | 317.6 | 1.93 | 9.66 | 15 | 285 |
| | | **Idou Mouch sur N'TLIT** | Essaouira | 89769.571 | 76222.843 | 84.0 | 0.10 | 316.5 | 1.49 | 2.66 | 15 | 350 |
| | | **Dbaia** | Youssoufia | 170759.478 | 136344.817 | 94.0 | 0.10 | 178.0 | 1.43 | 1.67 | 15 | 190 |
| | | **Lamzaoura** | Youssoufia | 172157.828 | 144760.917 | 60.1 | 0.10 | 188.8 | 4.46 | 1.14 | 15 | 343 |
| | | **Kadour bn Aloui** | Youssoufia | 171710.044 | 142627.769 | 69.3 | 0.10 | 185.6 | 4.10 | 1.29 | 15 | 328 |
| | | **Larh** | Al Haouz | 311884.715 | 115044.446 | 69.0 | 0.15 | 453.3 | 2.34 | 4.69 | 15 | 103 |
| | | **R'dat** | Al Haouz | 305409.036 | 112468.895 | 526.2 | 0.15 | 440.9 | 8.13 | 34.80 | 11 | 118 |
| | | **Imariranne** | Al Haouz | 306690.210 | 112433.565 | 55.7 | 0.15 | 446.1 | 2.44 | 3.72 | 14 | 167 |
| | | **Tirhza** | Essaouira | 119781.863 | 74395.291 | 170.8 | 0.10 | 305.8 | 1.10 | 5.22 | 15 | 114 |
| | | **Zriga** | Marrakech | 218107.392 | 147480.792 | 57.3 | 0.20 | 182.1 | 2.60 | 2.09 | 13 | 486 |
| | | **Oued Elmekhez** | Marrakech | 221118.137 | 150164.189 | 30.5 | 0.20 | 186.4 | 2.39 | 1.14 | 10 | 364 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Bou Rouss** | Rehamna | 272291.025 | 135132.220 | 128.7 | 0.20 | 214.0 | 2.13 | 5.51 | 10 | 406 |
| | | **Chouirh** | Youssoufia | 186238.594 | 151867.017 | 692.4 | 0.20 | 180.1 | 1.03 | 24.94 | 15 | 131 |
| | | **Orreid** | Youssoufia | 195713.159 | 163862.079 | 587.2 | 0.20 | 192.1 | 2.08 | 22.55 | 9 | 348 |
| | | **Sidi Ahmed** | Youssoufia | 209379.669 | 182888.328 | 55.2 | 0.10 | 213.8 | 2.22 | 1.18 | 15 | 365 |
| | | **Laararcha** | Essaouira | 140950.000 | 122850.000 | 160.0 | 0.10 | 225.0 | 1.11 | 3.60 | 15 | 185 |
| **P2** | **Volume entre 0.5 et 1 Mm3 et apports >= 0.5Mm$^3$** | **Od Boulaarougue** | Chichaoua | 206210.486 | 102009.181 | 103.1 | 0.15 | 238.1 | 0.59 | 3.68 | 7 | 304 |
| | | **Od Mkhalif** | Chichaoua | 225116.421 | 98671.345 | 56.2 | 0.15 | 241.0 | 0.92 | 2.03 | 15 | 260 |
| | | **S D Hbibi** | Chichaoua | 225563.765 | 84613.666 | 20.3 | 0.15 | 325.5 | 0.95 | 0.99 | 12 | 219 |
| | | **Azib sidi El Hani** | Chichaoua | 184332.850 | 104778.046 | 286.6 | 0.10 | 208.4 | 0.85 | 5.97 | 15 | 247 |
| | | **S Med Jbali** | Chichaoua | 184855.524 | 100697.760 | 286.9 | 0.10 | 218.3 | 0.52 | 6.26 | 11 | 230 |
| | | **Lebratami** | Chichaoua | 160119.464 | 81732.207 | 20.8 | 0.10 | 251.4 | 0.50 | 0.52 | 7 | 182 |
| | | **Sidi Boulaknad** | Chichaoua | 164766.727 | 97685.892 | 26.5 | 0.10 | 219.0 | 0.50 | 0.58 | 8 | 304 |
| | | **Anougal** | Al Haouz | 227631.848 | 67296.901 | 89.4 | 0.15 | 428.9 | 0.62 | 5.75 | 15 | 115 |
| | | **Mramer** | Essaouira | 144492.425 | 126086.326 | 1359.5 | 0.10 | 220.1 | 0.66 | 29.92 | 11 | 163 |
| | | **Agadir Timslah** | Al Haouz | 218689.688 | 48705.415 | 92.6 | 0.15 | 420.0 | 0.64 | 5.84 | 15 | 101 |
| | | **Imlil** | Al Haouz | 259519.691 | 62127.864 | 35.1 | 0.15 | 357.1 | 0.70 | 1.88 | 15 | 99 |
| | | **Chaabat Mzar** | Essaouira | 115370.558 | 147803.498 | 24.0 | 0.10 | 313.5 | 0.75 | 0.75 | 15 | 145 |
| | | **Imouzaz Sur Armountffar** | Essaouira | 130479.015 | 54230.122 | 154.9 | 0.10 | 324.0 | 0.89 | 5.02 | 15 | 230 |
| | | **Tamda Ifrane Sur N'Tirmza** | Essaouira | 120193.037 | 74151.658 | 164.4 | 0.10 | 305.8 | 0.68 | 5.03 | 15 | 132 |
| | | **N'Takoucht Sur Timkilouine** | Essaouira | 113520.795 | 73381.273 | 53.1 | 0.10 | 313.2 | 0.59 | 1.66 | 15 | 143 |
| | | **Ouled El Fkih Sur Chabet Hamra** | Essaouira | 113069.352 | 141650.995 | 16.4 | 0.10 | 312.7 | 0.72 | 0.51 | 15 | 163 |
| | | **Sidi Abdellah Ou M'Hamed** | Essaouira | 121544.380 | 103827.752 | 176.5 | 0.10 | 263.8 | 0.58 | 4.66 | 9 | 210 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **KhÚmis Takat** | Essaouira | 114159.699 | 124917.499 | 20.0 | 0.10 | 296.4 | 0.55 | 0.59 | 15 | 223 |
| | | **El Harar sur M'Rameur** | Essaouira | 150170.114 | 131071.022 | 1410.5 | 0.10 | 213.2 | 0.51 | 30.08 | 10 | 141 |
| | | **Si Ahmed lous sur N'SMIMOU** | Essaouira | 88805.098 | 80418.329 | 114.1 | 0.10 | 314.5 | 0.59 | 3.59 | 15 | 157 |
| | | **Bakkaouat sur MARZOUK** | Essaouira | 137706.567 | 134022.920 | 37.5 | 0.10 | 247.3 | 0.76 | 0.93 | 15 | 207 |
| | | **Mourakabin** | Safi | 155160.723 | 141931.313 | 186.3 | 0.10 | 219.9 | 0.63 | 4.10 | 10 | 184 |
| | | **El Bouib** | Safi | 151665.832 | 153146.902 | 24.7 | 0.10 | 252.3 | 0.58 | 0.62 | 11 | 166 |
| | | **Douama** | Safi | 148508.601 | 152349.770 | 40.7 | 0.10 | 257.7 | 0.77 | 1.05 | 13 | 286 |
| | | **Oled Abdellah** | Youssoufia | 195338.506 | 135446.520 | 23.8 | 0.20 | 165.0 | 0.67 | 0.78 | 10 | 239 |
| | | **Ghareg** | Youssoufia | 198761.450 | 184027.368 | 26.6 | 0.10 | 225.4 | 0.50 | 0.60 | 7 | 191 |
| | | **Jboub** | Rehamna | 260188.176 | 146583.177 | 17.9 | 0.20 | 215.7 | 0.70 | 0.77 | 6 | 142 |
| | | **Ouled Moussa(Mouisset)** | Safi | 139325.470 | 167768.860 | 142.8 | 0.10 | 303.5 | 0.87 | 4.33 | 15 | 158 |
| | | **Id Bouzid** | Essaouira | 95442.624 | 93700.830 | 31.0 | 0.10 | 300.0 | 0.95 | 0.93 | 13 | 233 |
| **P3** | **Volume entre 0.05 et 0.5 Mm3 et apports >= 0.05Mm$^3$** | **Od Ouriour** | Chichaoua | 214561.621 | 107068.191 | 13.6 | 0.15 | 215.3 | 0.43 | 0.44 | 10 | 157 |
| | | **Draa Sdouf** | Chichaoua | 161178.815 | 94658.928 | 8.2 | 0.10 | 224.2 | 0.18 | 0.18 | 7 | 114 |
| | | **Sidi Med Ghazi** | Chichaoua | 178348.960 | 96906.400 | 34.7 | 0.10 | 221.9 | 0.47 | 0.77 | 8 | 187 |
| | | **Med Oumoussa** | Chichaoua | 169661.610 | 61654.799 | 61.3 | 0.15 | 320.0 | 0.33 | 2.94 | 15 | 99 |
| | | **Ait Nifi** | Chichaoua | 186934.915 | 73233.857 | 67.5 | 0.15 | 286.1 | 0.26 | 2.90 | 11 | 140 |
| | | **Anaghri** | Al Haouz | 212000.000 | 40850.000 | 9.2 | 0.15 | 452.4 | 0.19 | 0.62 | 15 | 104 |
| | | **Ikkiss** | Al Haouz | 213323.708 | 41450.503 | 6.8 | 0.15 | 450.5 | 0.29 | 0.46 | 15 | 130 |
| | | **Timankar** | Al Haouz | 274254.573 | 76033.258 | 22.5 | 0.15 | 327.7 | 0.27 | 1.11 | 15 | 77 |
| | | **Boujraime** | Al Haouz | 316536.438 | 121235.208 | 12.4 | 0.15 | 433.1 | 0.33 | 0.81 | 15 | 152 |
| | | **Tafraout** | Al Haouz | 295347.107 | 92440.650 | 10.0 | 0.15 | 451.6 | 0.25 | 0.68 | 15 | 94 |
| | | **Gadji** | Al Haouz | 281016.315 | 95313.022 | 69.0 | 0.15 | 418.6 | 0.23 | 4.33 | 15 | 210 |
| | | **Tarzaza** | Al Haouz | 274094.867 | 80501.706 | 25.9 | 0.15 | 374.5 | 0.17 | 1.46 | 15 | 130 |
| | | **Sidi Hssaine** | Al Haouz | 229214.681 | 70233.764 | 103.4 | 0.15 | 416.4 | 0.19 | 6.46 | 15 | 92 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **P3** | **Volume entre 0.05 et 0.5 Mm3 et apports >= 0.05Mm3** | **Azadane** | Al Haouz | 249616.852 | 66642.398 | 67.0 | 0.15 | 352.2 | 0.26 | 3.54 | 15 | 112 |
| | | **Imegdel** | Al Haouz | 242404.245 | 61158.478 | 70.8 | 0.15 | 289.7 | 0.28 | 3.08 | 15 | 97 |
| | | **Tachdirte** | Al Haouz | 257434.917 | 71172.578 | 77.2 | 0.15 | 401.1 | 0.15 | 4.65 | 15 | 112 |
| | | **Ougandis** | Al Haouz | 241741.670 | 44484.672 | 89.3 | 0.15 | 331.9 | 0.23 | 4.44 | 15 | 111 |
| | | **Tiout Tigzouine** | Essaouira | 115277.104 | 91634.886 | 556.1 | 0.10 | 284.9 | 0.39 | 15.85 | 10 | 146 |
| | | **Amassine Sur Oujjanda** | Essaouira | 111382.399 | 79720.354 | 322.8 | 0.10 | 302.3 | 0.29 | 9.76 | 15 | 111 |
| | | **Oled Fatmi** | Safi | 158846.440 | 150862.483 | 7.9 | 0.10 | 230.0 | 0.11 | 0.18 | 6 | 143 |
| | | **Dar Thar** | Youssoufia | 167252.056 | 135572.595 | 6.2 | 0.10 | 184.3 | 0.14 | 0.11 | 7 | 140 |
| | | **Oled Abou** | Youssoufia | 165493.065 | 137550.050 | 23.8 | 0.10 | 190.4 | 0.41 | 0.45 | 15 | 221 |
| | | **Erabia** | Youssoufia | 169980.509 | 148789.097 | 11.6 | 0.10 | 200.1 | 0.16 | 0.23 | 10 | 243 |
| | | **Assif Iferdane** | Al Haouz | 313172.256 | 97424.627 | 105.0 | 0.15 | 507.3 | 0.42 | 7.99 | 15 | 211 |
| | | **Jarf jadain** | Chichaoua | 169127.301 | 79748.902 | 15.0 | 0.10 | 264.6 | 0.33 | 0.40 | 9 | 123 |
| | | **Rtoum** | Chichaoua | 178000.000 | 100000.000 | 8.0 | 0.10 | 216.4 | 0.15 | 0.17 | 7 | 193 |
| | | **Id Bouzid sur Tassouka** | Essaouira | 89642.751 | 50489.290 | 114.8 | 0.10 | 301.1 | 0.10 | 3.46 | 5 | 183 |
| | | **Tallat Aalla** | Essaouira | 85340.043 | 46922.200 | 5.9 | 0.10 | 302.2 | 0.46 | 0.18 | 9 | 172 |
| | | **LAHLALAT** | Safi | 161975.204 | 161393.669 | 5.5 | 0.10 | 246.1 | 0.12 | 0.14 | 9 | 142 |
| | | **OULED BRIK** | Safi | 165828.770 | 161042.150 | 2.1 | 0.10 | 232.5 | 0.06 | 0.05 | 5 | 87 |
| | | **Safsafa** | Marrakech | 244714.096 | 147363.533 | 2.6 | 0.20 | 205.8 | 0.10 | 0.11 | 9 | 111 |
| | | **Salah** | Marrakech | 231883.342 | 133331.343 | 158.8 | 0.20 | 190.1 | 0.17 | 6.04 | 4 | 148 |
| | | **Azib Ayad** | Marrakech | 247674.003 | 137856.859 | 11.2 | 0.20 | 202.5 | 0.46 | 0.45 | 7 | 225 |
| | | **Moh Ben Taher** | Youssoufia | 198334.814 | 149654.317 | 12.7 | 0.20 | 169.7 | 0.47 | 0.43 | 7 | 166 |
| | | **Farine** | Youssoufia | 191723.174 | 186447.331 | 6.8 | 0.10 | 234.0 | 0.16 | 0.16 | 5 | 195 |
| | | **Chaabat Abandonne** | Rehamna | 254746.969 | 146956.035 | 2.4 | 0.20 | 212.7 | 0.10 | 0.10 | 7 | 105 |
| | | **Graphite** | Rehamna | 256523.075 | 145282.012 | 1.9 | 0.20 | 212.7 | 0.06 | 0.08 | 5 | 92 |
| | | **Guelb El Atrouss** | Rehamna | 264712.980 | 147349.524 | 1.5 | 0.20 | 218.2 | 0.12 | 0.07 | 15 | 218 |
| | | **Bel Fouj** | Rehamna | 273731.446 | 151100.913 | 1.2 | 0.20 | 222.3 | 0.34 | 0.05 | 15 | 212 |
| | | **Draa Ait Tna** | Rehamna | 277253.813 | 151993.405 | 4.1 | 0.20 | 223.8 | 0.36 | 0.18 | 15 | 181 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Chaabat Ouled Alyet** | Marrakech | 246896.403 | 146004.218 | 1.9 | 0.20 | 206.4 | 0.41 | 0.08 | 15 | 208 |
| | | **Bel Kelb** | Rehamna | 266182.310 | 148205.442 | 4.0 | 0.20 | 219.3 | 0.41 | 0.18 | 11 | 207 |
| | | **kodiat rabougua** | Youssoufia | 173868.619 | 134630.994 | 16.2 | 0.10 | 171.3 | 0.23 | 0.28 | 10 | 196 |
| | | **Khmis NEga** | Safi | 158319.420 | 162636.340 | 10.6 | 0.10 | 255.3 | 0.25 | 0.26 | 12 | 142 |
| | | **Ouled Salem** | Safi | 156260.000 | 160200.000 | 5.7 | 0.10 | 257.2 | 0.49 | 0.15 | 15 | 126 |
| | | **DAIJAT** | Safi | 160550.000 | 160600.000 | 5.5 | 0.10 | 247.7 | 0.16 | 0.14 | 15 | 139 |
| | | **Ihoumache** | Essaouira | 95700.000 | 69800.000 | 6.0 | 0.10 | 301.8 | 0.21 | 0.18 | 15 | 107 |
| | | **Sidi Boualam** | Essaouira | 134392.453 | 132676.191 | 11.5 | 0.10 | 253.0 | 0.29 | 0.29 | 14 | 133 |
| | | **Wadakar** | Al Haouz | 225823.467 | 72149.949 | 146.0 | 0.15 | 460.3 | 0.17 | 10.08 | 15 | 91 |
| | | **Bel Khadir** | El Kelaa des Sraghnas | 295042.965 | 151348.731 | 4.7 | 0.20 | 244.6 | 0.27 | 0.23 | 15 | 235 |
| | | **Oulad Talha** | Rehamna | 257300.340 | 135945.969 | 7.6 | 0.20 | 209.0 | 0.30 | 0.32 | 6 | 215 |

NB : la priorité 4 n’était pas prise en considération, à cause de la faiblesse du taux des apports en eau et le volume de la retenue.

**Université Sidi Mohammed Ben Abdellah**
**Faculté des Sciences et Techniques**
***www.fst-usmba.ac.ma***

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Nom et prénom: Omar SOUABNI**

**Année Universitaire : 2014/2015**

**Titre: Etude hydrologique dans le cadre du dimensionnement d'un barrage collinaire - cas du site Ardouz - Haut Atlas – Maroc**

## Résumé

Ce présent travail révèle une étude consacrée à la validation des sites de mobilisation par barrages et lacs collinaires. La méthodologie de la validation des sites de barrages est basée sur un aperçu topographique hydrologique et géologique, dans le but de classifier les sites de barrages en 4 priorités, selon la capacité de stockage et le taux des apports en eau.

L'étude hydrologique à porté essentiellement dans ce travail sur le site du barrage Ardouz, situé dans le Haut Atlas dont l'altitude est comprise entre 1631 et 3564 m. Le bassin versant d'Ardouz s'étend sur une superficie de 54 Km² en accueillant un taux d'apport en eau de l'ordre de 3 $Mm^3$ pour une capacité de stockage de 1$Mm^3$ et une hauteur de 15 m.

La phase de l'estimation des débits de crues a été établi selon les méthodes statistiques empiriques et Gradex, ce qui a permis après la transposition par coefficient Fancou-Rodier et débit spécifique de déduire une crue de projet de l'ordre 230$m^3$/s, relative au dimensionnement du barrage.

**Mots clés: Barrage collinaire, hydrologie, crue de projet, apport en eau, capacité de stockage.**

Faculté des Sciences et Techniques - Fès
B.P. 2202 – Route d'Imouzzer – FES
212 (0) 535 60 29 53 Fax : 212 (0) 535 60 82 14