



**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 pour la protection contre les  
inondations - Etude de cas : Le haut bassin de  
Todgha (commune Todgha Al Oulia), province de  
Tinghir**

**Présenté par:**

**OUBEZZA Aicha**

**Encadré par:**

- Mme. RAIS Naoual, FST, Fès
- M. SLIMANI Moulay Mhamed, ABH GZR, Errachidia

**Soutenu Le 21 Juin 2014 devant le jury composé de:**

- Mme. RAIS Naoual, FST, Fès
- M. BENAABIDATE Lahcen, FST, Fès
- M. JABRANE Raouf, FST, Fès
- M. EL GAROUANI Abdelkader, FST, Fès

**Stage effectué à : ABH GZR, Errachidia**



## Résumé

L'étude objet de mon travail de fin d'études a réalisé la partie hydrologique pour la protection contre les inondations du centre de Todgha Al Oulia. Ladite étude a déterminé les débits de pointe pour chaque fréquence. De ce fait, il y a lieu de proposer les solutions d'aménagement pour la protection de la population contre les inondations en se basant sur les débits retenus au niveau de mon étude hydrologique. L'étude hydrologique est l'étape la plus importante pour une étude de protection contre les inondations.

Le choix et la validation des débits de pointe déterminent le type d'aménagement pour la protection et leurs coûts de réalisation. Le bassin du haut Todgha est caractérisé par des orages et des crues torrentielles ce qui mettent en danger les touristes et la population de la vallée de Todgha.

Cette étude a permis d'avoir des débits de pointe allant de  $399,45\text{m}^3/\text{s}$  à  $870,77\text{m}^3/\text{s}$  pour les périodes de retour allant respectivement de 10 à 1000 ans pour le bassin versant de l'oued Todgha, et des débits de pointe allant de  $44,30\text{m}^3/\text{s}$  pour 10 ans à  $104,38\text{m}^3/\text{s}$  pour 1000 ans pour le bassin versant de l'oued Tizgui, mais aussi des débits de pointe allant de  $180,19\text{ m}^3/\text{s}$  pour 10 ans jusqu'à  $358,43\text{ m}^3/\text{s}$  pour la période de retour de 1000 ans pour le bassin de l'oued Azlag.

Le présent rapport, décrit plus en détails les deux premières phases de la protection contre les inondations du haut bassin de Todgha à savoir, le diagnostic de la situation existante et l'étude hydrologique.

### Mots clés:

Etude hydrologique, Todgha Al Oulia, Débit de pointe, période de retour, Oued Todgha, Oued Tizgui, Oued Azlag, Etude de la protection contre les inondations, crues torrentielles, orages.

# Dédicace

*A mes chers parents : Brahim Oubezza et Khadija Irja*

Pour l'amour sans frontières qu'ils ont pour moi  
Pour l'éducation exemplaire qu'ils m'ont inculquée  
Pour toutes les sacrifices qu'ils ont fait pour moi  
Et continuent toujours de faire ...

*A mes Chers Grands Parents*

*A mes chers frères et sœurs*

Qui m'ont entouré de leur affection  
Et m'ont scellé par leurs bénédictions

*A ceux qui me sont les plus chers : Amal, Nada et Mohamed Réda*

*A tous mes amis(es)*

*Je dédie ce travail*

A travers lequel je leur dis merci  
Merci pour leur soutien et leur encouragement  
Qu'ALLAH les garde



*Aicha*

# Remerciements

La rédaction de ce travail étant achevée, le moment est venu d'exprimer mes reconnaissances à tous ceux qui ont aidé, conseillé, encouragé depuis le début de ce travail jusqu'à sa fin :

**Mme. Rais Naoual**, professeur de Géochimie/minéralogie à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son encadrement au sein de FSTF, sa disponibilité à chaque fois que j'exprime le besoin, ainsi que pour tous ses conseils précieux.

**M. SLIMANI Moulay M'Hamed**, chef de division d'évaluation et de gestion des ressources en eau au sein de l'ABH GZR, pour son encadrement, son soutien constant et surtout une fois de plus pour sa totale disponibilité à chaque fois que j'exprime le besoin. Il s'est intéressé à mon travail et m'a fait bénéficier de ses connaissances à travers de nombreuses explications et discussions fructueuses et instructives, qu'il trouve, néanmoins, ici l'expression de ma profonde gratitude, en souhaitant que ce travail honore sa confiance.

**M.L.BENAABIDATE, M.R.JABRANE** et **M. A. El GAROUANI** qui m'ont fait l'honneur de participer au jury de soutenance, tout en apportant des remarques constructives sur le présent travail, qu'ils veuillent bien accepter mes chaleureux remerciements et qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma considération.

Mes remerciements s'adressent également à la direction de l'agence du bassin hydraulique de Guir-Ziz-Rhéris pour m'avoir donné l'opportunité de passer mon stage de fin d'étude au sein de la société.

Je tiens aussi à remercier vivement les enseignants du département de l'Environnement, dont je cite **M.A.LAHRACH**, chef du département.

Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, trouve ici l'expression de mes gratitude.

## Liste des abréviations

ABH GZG	: Agence du Bassin Hydraulique de Guir-Ziz-Rhéris
BV	: Bassin Versant
Cr	: Coefficient de ruissellement
DPH	: Domaine Public Hydraulique
HEC-RAS	: Hydrologic Engineering Centers River Analysis System
Ip	: Intensité pluviométrique
K <sub>G</sub>	: Indice de Gravélius
SIG	: Système d'Information Géographique
T <sub>c</sub>	: Temps de concentration
Q <sub>p</sub>	: Débit de pointe
WMS	: Watershed Modeling System

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique de Guir-Ziz-Rhéris-Maider et situation des bassins versants (Inspirée de ABH GZR 2009).....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 2</b> : Situation de la zone de l'étude.....	14
<b>Figure 3</b> : Température moyenne mensuelles à Todgha Al Oulia (Station Ait Bouijjane (1982-2008).....	19
<b>Figure 4</b> : Pluviométrie annuelle au niveau du haut bassin de Todgha (Station Ait Bouijjane 1962-2013) .....	19
<b>Figure 5</b> : Illustration et situation des aléas observés.....	25

<b>Figure 6</b> : Composantes principales de l'interface de WMS9.8.0 .....	30
<b>Figure 7</b> : Délimitation des bassins versants de la zone de l'étude (le haut Todgha et ses affluents) .....	31
<b>Figure 8</b> : Les différents paramètres des bassins versants .....	32
<b>Figure 9</b> : Caractéristiques des bassins versants étudiés .....	32
<b>Figure 10</b> : Diagramme de Gumbel.....	42
<b>Figure 11</b> : Hydrogramme typique des crues .....	46

## Liste des photos

<b>Photo 1:</b> Equipements et infrastructures touristiques des gorges de Todgha inondables de l'oued Todgha (hôtel « Yasmina ») (20 Mars 2014).....	23
<b>Photo 2 :</b> Vue générale de l'oued Ougni Tizgui en amont de la RR 703 : piste dans le lit et constructions sur les deux rives : (A) en rive droite, (B) en rive gauche (20 Mars 2014).....	23
<b>Photo 3 :</b> Empiètement sur oued Azlag(A) en amont et (B) en aval (20 Mars 2014) .....	23
<b>Photo 4 :</b> Vue panoramique de l'oued Todgha empiété par les terrains agricoles et les constructions (20 Mars 2014) .....	27
<b>Photo 5 :</b> Inondations de l'oued Todgha (28 Octobre 2006) .....	27

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques des deux stations hydro-climatologiques: Ait Bouijjane et Tamtattoucht .....	17
<b>Tableau 2</b> : Températures moyennes mensuelles et annuelles Ait Bouijjane (1982-2008).....	18
<b>Tableau 3</b> : Temps de concentration des bassins versants de la zone de l'étude .....	35
<b>Tableau 4</b> : Valeurs recommandées du coefficient de ruissellement en fonction de la pente et de la couverture du sol.....	37
<b>Tableau 5</b> : Série de $Q_{\max}$ observés à la station Ait Bouijjane (1976-2008) .....	41
<b>Tableau 6</b> : Récapitulatif des résultats .....	44

## Sommaire

Introduction.....	11
<i>Résumé</i> .....	12
<b>Chapitre I</b> .....	12
<i>Données générales de la zone de l'étude</i> .....	13



Introduction.....	13
<b>I. Caractéristiques générales de la zone de l'étude.....</b>	<b>14</b>
<b>I.1. Données géographiques .....</b>	<b>14</b>
<b>I.2. Réseau hydrographique .....</b>	<b>16</b>
<b>I.3. Géologie et géomorphologie .....</b>	<b>16</b>
<b>I.4. Caractéristiques climatologiques .....</b>	<b>17</b>
<b>I.4.1. Température .....</b>	<b>18</b>
<b>I.4.2. Précipitation.....</b>	<b>19</b>
<b>I.4.3. Vent.....</b>	<b>19</b>
<b>I.4.4. Evaporation .....</b>	<b>20</b>
<b>Chapitre II.....</b>	<b>21</b>
<b>Diagnostic de la situation existante : Problématique liée à l'inondation dans la zone de l'étude.....</b>	<b>21</b>
Introduction.....	21
<b>I. Problématique liée à l'inondation .....</b>	<b>21</b>
<b>I.1 Les gorges de Todgha.....</b>	<b>21</b>
<b>I.2 Douar Tizgui.....</b>	<b>21</b>
<b>I.3 Zone Azlag .....</b>	<b>22</b>
<b>II. Historique des crues de la zone de l'étude.....</b>	<b>27</b>
Conclusion.....	28
<b>Chapitre III.....</b>	<b>29</b>
<b>Etude hydrologique.....</b>	<b>29</b>
<b>I. Délimitation des bassins versants dans la zone d'étude .....</b>	<b>29</b>
<b>1. Définition du bassin versant .....</b>	<b>29</b>
<b>2. Délimitation des bassins versants.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1 Présentation du logiciel WMS (Watershed Modeling System) .....</b>	<b>30</b>
<b>II. Caractéristiques des bassins versants de la zone d'étude .....</b>	<b>32</b>
<b>III. Temps de concentration .....</b>	<b>33</b>
<b>III.1 Les formules utilisées pour le calcul de Tc .....</b>	<b>34</b>
<b>III.2 Résultats de calcul de Tc .....</b>	<b>35</b>
<b>IV. Etude de crue : Calcul du débit de pointe pour chaque période de retour T</b>	<b>35</b>
<b>a. Définitions .....</b>	<b>36</b>
<b>b. Objectif.....</b>	<b>36</b>
<b>1. Calcul des débits de pointe .....</b>	<b>36</b>

<b>1.1 Les méthodes utilisées pour le calcul des débits de pointe au niveau de la zone d'étude</b> .....	37
<b>a. Formule Rationnelle</b> .....	37
<i>a.1. L'intensité pluviométrique (<math>I_p</math>)</i> .....	37
<i>a.2. Le coefficient de ruissellement(<math>C_r</math>)</i> .....	37
<b>b. Formule de Fuller II</b> .....	38
<b>c. Transposition des débits de pointe des bassins jaugés vers les bassins étudiés : Méthode de Froncou Rodier</b> .....	38
<b>i. Les étapes à suivre pour le calcul du débit via la méthode de transposition</b> .....	38
<b>1.2 Application et résultats de calcul</b> .....	39
<b>a. Résultats de Rationnelle</b> .....	39
<b>b. Résultats de Fuller II</b> .....	39
<b>c. Résultats obtenus de la transposition à partir des bassins limitrophes</b> .....	40
<b>1.3 Débits retenus</b> .....	43
<b>2. Calcul des Volumes des crues et élaboration des hydrogrammes des crues</b> .....	45
<b>2.1 Définitions</b> .....	45
Conclusion .....	47
Conclusion générale.....	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	50
ANNEXES .....	51

# *Introduction*

---

Les crues sont, partout dans le monde, considérées comme des phénomènes naturels intervenants lors d'une augmentation de la hauteur de l'eau en écoulement d'un cours d'eau, qui provoque un débordement de son lit mineur et une inondation de zones plus ou moins éloignées des rives, dans une zone inondable, ce qui provoque des effets destructifs sur les plans naturels et socio-économiques. De ce fait, les crues sont au centre de la préoccupation des scientifiques qui interviennent par leurs études et travaux de recherches et ainsi des gouvernements qui interviennent à leur tour par la prise de décision en matière d'aménagements appropriés. De plus, d'autres acteurs peuvent intervenir par la sensibilisation des populations.

Depuis longtemps, le Maroc a connu des phénomènes hydrologiques extrêmes représentés par des crues et des inondations répétitives dans différentes régions (Sefrou en 1950, la vallée de Moulouya en 1963, la vallée de Ziz en 1965, la vallée du Haut Atlas de Marrakech en 1995, la région d'El Hajeb en 1997, la région de Settat et Mohammedia en 2002, Tan Tan, Nador, Al Hoceima et Khénifra en 2003, Tinghir et Merzouga en 2006 ...etc).

Le bassin de Todgha (situé dans la partie septentrionale de la ville de Tinghir, située dans le Sud-Est du Maroc) est parmi les bassins au Maroc menacé par le phénomène d'inondation. En effet, ledit bassin a connu un événement extrême en 2006 (crue torrentielle). De ce fait, l'objectif de mon étude est de réaliser l'étude hydrologique nécessaire à la protection contre les inondations dans le haut bassin de Todgha.

# ***Résumé***

---

L'étude objet de mon travail de fin d'études a réalisé la partie hydrologique pour la protection contre les inondations du centre de Todgha Al Oulia. Ladite étude a déterminé les débits de pointe pour chaque fréquence. De ce fait, il y a lieu de proposer les solutions d'aménagement pour la protection de la population contre les inondations en se basant sur les débits retenus au niveau de mon étude hydrologique. L'étude hydrologique est l'étape la plus importante pour une étude de protection contre les inondations.

Le choix et la validation des débits de pointe déterminent le type d'aménagement pour la protection et leurs coûts de réalisation. Le bassin du haut Todgha est caractérisé par des orages et des crues torrentielles ce qui mettent en danger les touristes et la population de la vallée de Todgha.

Cette étude a permis d'avoir des débits de pointe allant de 399,45m<sup>3</sup>/s à 870,77m<sup>3</sup>/s pour les périodes de retour allant respectivement de 10 à 1000 ans pour le bassin versant de l'oued Todgha, et des débits de pointe allant de 44,30m<sup>3</sup>/s pour 10 ans à 104,38m<sup>3</sup>/s pour 1000 ans pour le bassin versant de l'oued Tizgui, mais aussi des débits de pointe allant de 180,19 m<sup>3</sup>/s pour 10 ans jusqu'à 358,43 m<sup>3</sup>/s pour la période de retour de 1000 ans pour le bassin de l'oued Azlag.

Le présent rapport, décrit plus en détails les deux premières phases de la protection contre les inondations du haut bassin de Todgha à savoir, le diagnostic de la situation existante et l'étude hydrologique.

## **Mots clés:**

Etude hydrologique, Todgha Al Oulia, Débit de pointe, période de retour, Oued Todgha, Oued Tizgui, Oued Azlag, Etude de la protection contre les inondations, crues torrentielles, orages.

---

## ***Chapitre I***

---

# *Données générales de la zone de l'étude*

## **Introduction**

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la réalisation du Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme du **Master Sciences et Techniques en Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux**. Le sujet choisi pour cette étude est « **Etude hydrologique pour la protection contre les inondations-Etude de cas: Le haut bassin de Todgha (commune Todgha Al Oulia), province de Tinghir** ».

L'élaboration de l'étude de la protection contre les inondations nécessite la réalisation de quatre missions :

**Phase 1 : Diagnostic de la situation existante** : L'étude du terrain, la collecte de données, prise de photos, l'historique des inondations de la zone de l'étude, enquête des crues,

**Phase 2 : Etude hydrologique** : qui consiste au calcul des débits de pointe pour chaque période de retour,

**Phase 3 : Etude hydraulique** : *estimer le niveau de propagation des ondes des crues en se basant sur les levés topographiques et les débits de pointe.*

**Phase 4 : Solutions d'aménagement** : *proposer des solutions de protection contre les inondations en tenant compte le débit centennal(Q100).*

Dans le cadre de mon travail, je me suis focalisée sur les deux premières phases.

# **I. Caractéristiques générales de la zone de l'étude**

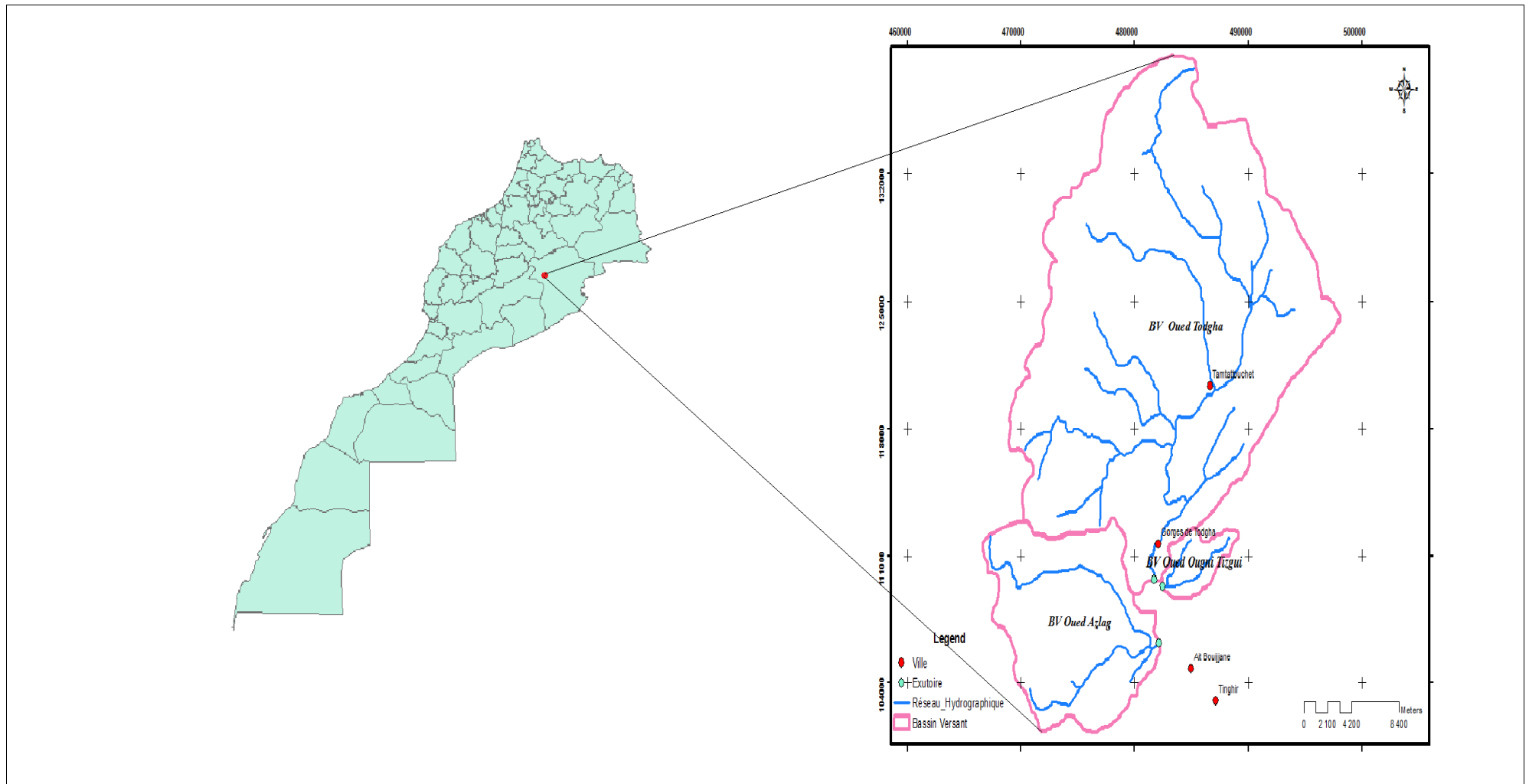
## **I.1. Données géographiques**

L'aire à protéger contre les inondations concerne le centre de Todgha Al Oulia (Fig.2) faisant partie de la province de Tinghir région Sous Massa-Draa.

Le centre de Todgha Al Oulia se situe dans la partie septentrionale de Tinghir et s'étend de la ville de Tinghir jusqu'aux gorges de Todgha. L'accès au secteur d'étude se fait à partir de la route régionale n°703 joignant Tinghir, Ait Hani et Tamtattoucht.

Le secteur d'étude est délimité :

- Au Nord : par la commune rurale Ait Hani,
- A l'Ouest : par la commune rurale Ouklim,
- Au Sud : Par la municipalité de Tinghir,
- A l'Est : Par la commune rurale Aghbalou N'Kerdous.



**Figure 2 : Situation géographique de la zone de l'étude (Inspiré des cartes topographiques et Arc GIS version 9.3)**

## I.2. Réseau hydrographique

L'oued Todgha est le cours d'eau le plus important qui intéresse la ville de Tinghir, aussi c'est le principal affluent de l'oued Rhéris. L'oued Todgha prend sa source au pied du haut atlas pour se perdre dans le désert de Sahara. Il présente une grande variation dans sa morphologie depuis son amont au niveau des gorges où il est encaissé, jusqu'à la plaine de Tinghir où ses berges deviennent à faible pente.

Les Oueds Todgha, Tizi N' Tizgui et Azlag constituent les plus importants cours d'eau du réseau hydrographique de la zone de l'étude. Ils drainent des bassins versants dont les superficies sont très variables.

L'oued Azlag est un affluent droit de l'oued Todgha. Leur confluence s'effectue au niveau du point ayant les coordonnées Lambert :

$$X = 482\ 489,79$$

$$Y = 106\ 326,53$$

## I.3. Géologie et géomorphologie

La connaissance de la géologie d'un bassin versant s'avère importante pour cerner l'influence des caractéristiques physiographiques. La géologie du substratum influe non seulement sur l'écoulement de l'eau souterraine mais également sur le ruissellement de surface

Le bassin versant de l'oued Todgha appartient au bassin du Rhéris. Du point de vue lithologique, les formations dans cette zone montrent la succession suivante :

### Le Trias

Il est représenté par :

- Une série pélitico-argileuse, débutant par des conglomérats polygéniques et dragées quartzo-feldspathiques, puis des grès rouges à intercalations argileuses,
- Une série de basaltes doléritiques, dans lesquels, sont parfois interstratifiés des niveaux de calcaires siliceux,
- Les basaltes sont recouverts par des argiles rouges, un peu violacées, plus au moins gréseuses et parfois gypsifères.

### Le Jurassique

Les différentes formations jurassiques sont constituées par des couches rouges exclusivement de grès calcaires et de marnes de couleur rouge ou verte et par l'alternance de niveaux de marnes, marno-calcaires et de bancs de calcaires et calcaires gréseux.

### Le Crétacé

La série crétacée comprend de bas en haut :



- Des marnes blanches et argiles rouges à niveaux gypseux du Cénomaniens,
- Des bancs de calcaires décimétriques reposant directement et sans discordance apparente sur les argiles rouges à gypse,
- Au sommet de la série crétacée, des dépôts détritiques fins surmontent les calcaires turoniens.

A l'aval de la zone d'étude, il ya des marnes blanches et argiles rouges à niveaux gypseux du Cénomaniens d'où le coefficient d'infiltration est faible (présence de Oasis), aussi au sommet de la série crétacé, des dépôts détritiques fins surmontent les calcaires Turoniens.

### ✚ Le Tertiaire

Les seuls affleurements tertiaires bordent l'oued Todgha au Nord de Tinghir. Ils sont formés essentiellement de calcaires, de grès-calcaires plus au moins consolidés et de grès blancs ou violacés tendres et mal consolidés.

### ✚ Le Quaternaire

- Le Quaternaire ancien : Ces dépôts sont des encroûtements conglomératiques à éléments anguleux,
- Le Quaternaire moyen : Il constitue la majorité des encroûtements superficiels, il est formé de poudingues formant les falaises limitant la palmeraie
- Le Quaternaire récent : Il est formé d'éboulis de pentes et d'alluvions qui bordent le parcours des oueds Ziz, Rhéris, Todgha et Guir, et constitué essentiellement de limons sur lesquels se sont développés les sols de la palmeraie. (*Eléments de Géologie Marocaine de Michard ANDRE (1976)*).

Il ressort que le bassin versant de Todgha est formé essentiellement par des terrains perméables à semi-perméables qui occupent la presque totalité de la superficie du bassin, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface.

## I.4. Caractéristiques climatologiques

Au niveau de la zone d'étude, il y a deux stations hydro-climatologiques, celle de Ait Bouijjane, mise en service depuis 1960, située sur l'oued Todgha à l'aval de sa confluence avec oued Azlag, et celle de Tamtattoucht, mise en service en Avril 2004, située à l'amont des gorges à 20Km prés. Le tableau ci-après illustre les caractéristiques desdites stations.

**Tableau 1 : Caractéristiques des deux stations hydro-climatologiques: Ait Bouijjane et Tamtattoucht**

Bassin	Station hydro	Superficie	Affluent	Coordonnées Lambert

versant	métrique	(Km <sup>2</sup> )	ou Oued	N° IRE	X(m)	Y(m)	Altitude	D.M.S
							(m)	
Rhéris	Ait Bouijjane	651	Todgha	355/55	485 600	104 450	1300	15/10/60
Rhéris	Tamtattoucht	-	Todgha	-	486 600	119 900	-	01/04/04

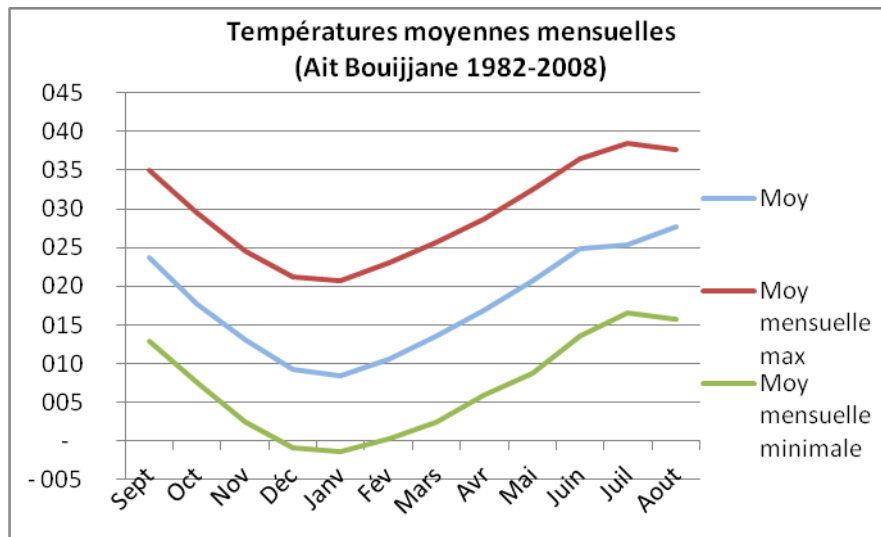
### I.4.1. Température

Les températures moyennes mensuelles (Fig.3) montrent que le mois d'Août est le plus chaud avec une valeur de 27,60°C, tandis que le mois de Janvier est le plus froid avec une valeur de 8,45°C. L'écart entre ces deux valeurs exprime une amplitude thermique annuelle de 19,15°C, qui traduit un important degré de continentalité du climat de la région. La température moyenne annuelle atteint 17,21°C tandis que les températures moyennes annuelles des maxima et minima atteignent respectivement 29,45°C et 7,03°C. Le mois de Juillet reste le plus chaud avec un maxima moyen de 38,45°C alors que le maxima moyen le plus bas est enregistré pendant le mois de Janvier (20,75), et c'est le mois Juillet qui enregistre le minima moyen le plus élevé avec une valeur de 16,64°C.

**Tableau 2 : Températures moyennes mensuelles et annuelles Ait Bouijjane (1982-2008)**

Mois	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.
T°M	34,91	29,49	24,49	21,29	20,75	23,07
T°m	12,92	7,67	2,51	-0,86	- 1,31	0,30
T°Moy	23,69	17,76	13,16	9,19	8,45	10,60

Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Année
25,67	28,63	32,56	36,54	38,45	37,58	<b>29,45</b>
2,51	5,98	8,78	13,55	16,64	15,68	<b>7,03</b>
13,61	16,95	20,72	24,91	25,38	27,60	<b>17,21</b>

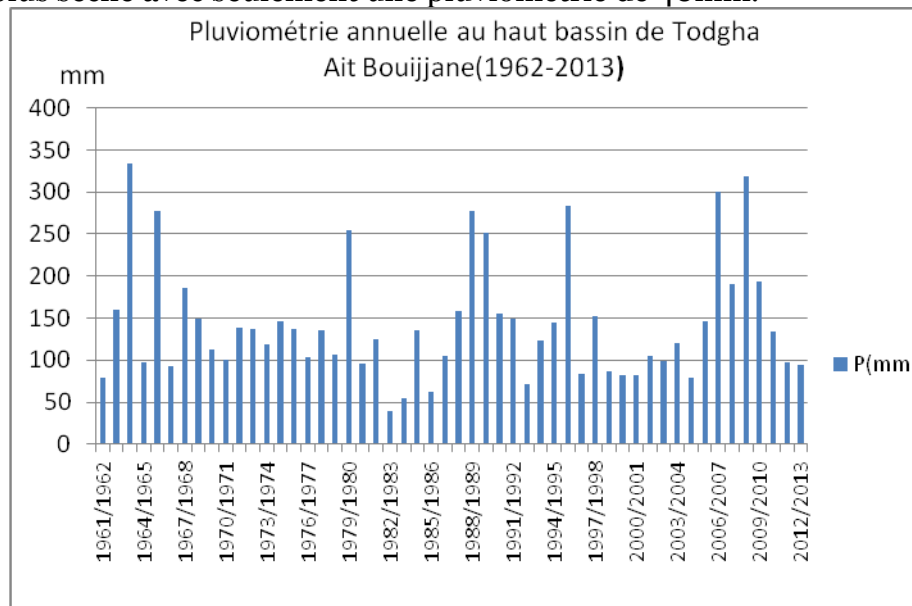


**Figure 2 : Température moyenne mensuelles à Todgha Al Oulia (Station Ait Bouijjane (1982-2008))**

### I.4.2. Précipitation

Au niveau du haut bassin de Todgha, le régime pluviométrique est très variable d'une année à l'autre, le module interannuel des précipitations est de 143,6mm à Ait Bouijjane et de 225mm à Tamtattoucht.

La pluviométrie est marquée par une forte irrégularité interannuelle (Fig.4), ce qui traduit l'appartenance de la zone de l'étude au climat présaharien. Au cours de la période allant de 1961 jusqu'à 2013, l'année hydrologique 1963-1964 a été la plus humide avec une pluviométrie de 334,7mm, tandis que l'année hydrologique 1982-1983 était la plus sèche avec seulement une pluviométrie de 40mm.



**Figure 3 : Pluviométrie annuelle au niveau du haut bassin de Todgha (Station Ait Bouijjane 1962-2013)**

### I.4.3. Vent

Les vents les plus violents ont lieu entre les mois d'Avril et Août. Les vitesses moyennes enregistrées au niveau d'Ait Boujjane et Tamtattoucht sont respectivement de l'ordre de 2,45m/s et de 2,28m/s.

#### **I.4.4. Evaporation**

L'évaporation annuelle varie de 2678 mm à Amouguer Taghia à 2928 mm à Ait Boujjane avec des valeurs extrêmes en Décembre et Juillet.

# **Chapitre II**

---

## **Diagnostic de la situation existante : Problématique liée à l'inondation dans la zone de l'étude**

### **Introduction**

Voir sa situation au pied du versant sud du Haut Atlas, la vallée de Todgha fait bénéficier des pluies venant de l'Ouest et de la fonte des neiges, aussi des torrents, violents parfois, se déversent et envahissent la vallée.

La vallée de Todgha est classée dans la typologie de vallée à grande fréquentation touristique et palmeraies importantes pour l'économie locale.

Les gorges de Todgha ont été classées 17<sup>ème</sup> sur les 391 sites inventoriés à l'échelle nationale où le degré du risque de vies humaines est très élevé, et il est estimé élever pour les constructions, l'infrastructure et l'économie. L'écoulement dans les gorges est très rapide, les vitesses sont comprises entre 4m/s et 7m/s et l'écoulement est en moyen légèrement torrentiel.

La vallée de Todgha connaît une grande activité touristique (nationale et internationale) surtout dans les gorges de Todgha. Au niveau desquelles l'oued de Todgha est rétréci avec des berges verticales. Son lit est utilisé comme chemin de transit entre la vallée de Todgha et les sites de montagne en plus hautes altitudes.

### **I. Problématique liée à l'inondation**

Les problèmes d'inondation de l'oued Todgha et ses affluents observés au niveau de centre de Todgha Al Oulia (Fig.5) sont détaillés dans ce qui suit :

#### **I.1 Les gorges de Todgha**

Cette zone connue pour ses atouts touristiques importants, est menacée par les inondations de l'oued Todgha. Au moment des crues, les inondations touchent les infrastructures touristiques situées sur la berge rive gauche ainsi que la route régionale 703 située en rive droite et qui coïncide avec le lit mineur de l'oued Todgha entre Tamtattoucht et les gorges de Todgha (Photo 1).

Des murs en maçonneries existants ont été réalisés dans le but de protéger les équipements touristiques sur la rive gauche.

#### **I.2 Douar Tizgui**

Le douar Tizgui est développé sur les berges de l'oued Ougni Tizgui qui est un affluent de l'oued Todgha. D'après les enquêtes, les eaux véhiculées par les crues inondent les constructions du douar de part et d'autre de l'oued et particulièrement la mosquée située en rive droite de l'oued ainsi qu'une école primaire située en rive gauche de l'oued (photo 2).

A l'aval du douar et avant sa confluence avec l'oued Todgha, le lit de l'oued Ougni Tizgui est rétréci à cause de l'empiètement de domaine public hydraulique par des terrasses agricoles au niveau de l'oasis qui est installée sur les rives cherchant les terres les plus fertiles et proches de la réserve hydrique (photos 2, 3 et 4), et c'est au niveau de cette zone que les inondations s'accroissent en périodes pluviales.

### **I.3 Zone Azlag**

Dans cette zone, les problèmes d'inondations s'accroissent à proximité de la confluence de l'oued Azlag et l'oued Todgha.

L'oued Azlag est caractérisé par un lit large et présente un relief accentué sur le long de son tracé jusqu'à sa confluence avec l'oued Todgha. Sur son parcours, il reçoit plusieurs chaâbas dont l'importance varie considérablement.

La pente importante de l'oued Todgha et l'instabilité des reliefs provoquent des écoulements violents et parfois chargés de rochers ce qui aggrave le danger en cas de crue, aussi la rapidité du mécanisme de génération des crues d'orages qui laisse de courts délais d'intervenir au moment réel, d'où l'importance du temps de concentration  $T_c$ .



**Photo 1: Equipements et infrastructures touristiques des gorges de Todgha inondables de l'oued Todgha (hôtel « Yasmina ») (20 Mars 2014)**



**Photo 2 : Vue générale de l'oued Ougni Tizgui en amont de la RR 703 : piste dans le lit et constructions sur les deux rives : (A) en rive droite, (B) en rive gauche (20 Mars 2014)**



**Photo 3 : Empiètement sur oued Azlag(A) en amont et (B) en aval (20 Mars 2014)**





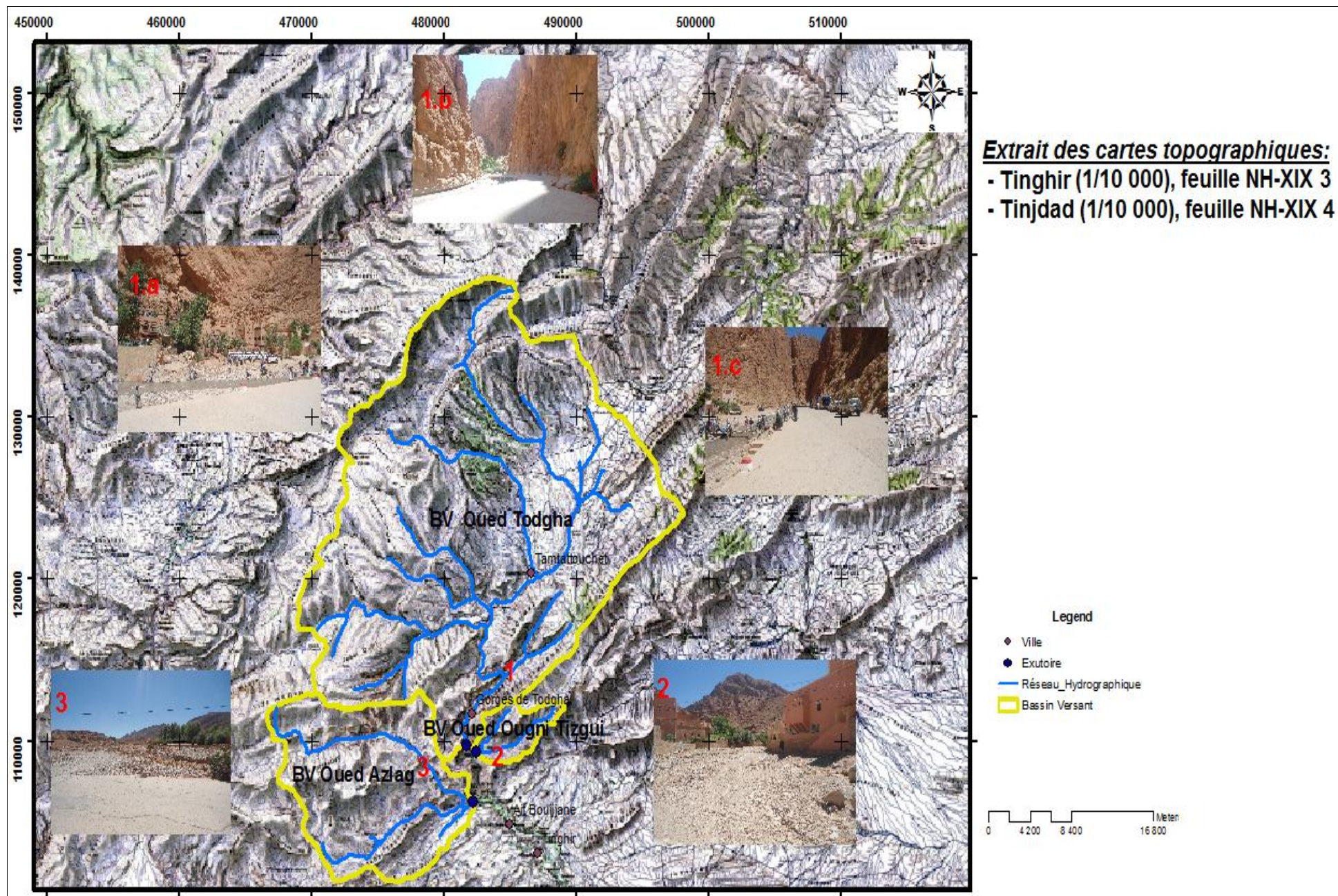


Figure 4 : Illustration et situation des aléas observés





Photo 4 :

Vue panoramique de l'oued Todgha empiété par les terrains agricoles et les constructions (20 Mars 2014)

## II. Historique des crues de la zone de l'étude

La vallée de Todgha a connu des inondations catastrophiques dont les plus marquantes sont celles des années 1965, 2006 et 2008. Pendant les derniers jours d'octobre 2006, de fortes précipitations ayant entraîné des inondations sans précédent dans la région (Photo 5). Le 28 octobre 2006, il a été enregistré 1444 m<sup>3</sup>/s comme débit maximal, et la charge de l'oued Todgha du même jour a atteint 38 Mm<sup>3</sup> dont la majorité a été perdue sans profit.

L'eau des inondations a envahit la vallée de Todgha en long et en large, causant la détérioration de l'infrastructure, agricole et économique, ainsi que des centaines de familles sans abri. Selon le personnel de l'hôtel « Yasmina », situé sur la rive droite de l'oued Todgha au niveau des gorges, lors des inondations de 28 octobre 2006 qui a duré quatre jours, l'eau a atteint environ 2,5 mètres de hauteur au niveau dudit hôtel et l'écoulement dans les gorges de Todgha était très rapide avec des vitesses comprises entre 4 et 7m/s, ce qui a détruit l'infrastructure ainsi que les touristes ont été isolés pendant plusieurs jours.

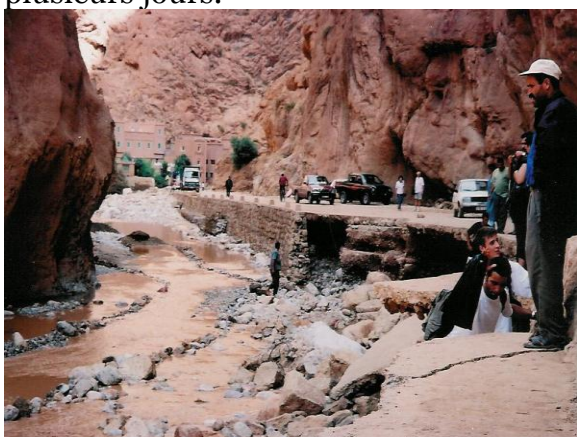


Photo 5 : Inondations de l'oued Todgha (28 Octobre 2006)



## Conclusion

Le présent chapitre représentait le point d'entrée au projet, il représente la première phase de l'étude de la protection contre les inondations, celle du diagnostic des bassins du haut Todgha objet de l'étude, cette phase a permis la mise en évidence des «zones risquées» présentant un danger sur la population ainsi que sur les terrasses agricoles, et auxquels des études hydrologiques et hydrauliques sont nécessaires pour enfin arriver à des solutions adéquates.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude hydrologique qui consiste à la détermination des débits de pointe pour chaque fréquence, en utilisant différentes formules appliquées en hydrologie.



---

## Chapitre III

---

# Etude hydrologique

L'étude hydrologique est une phase très importante dans l'étude de la protection contre les inondations.

L'étude hydrologique se déroule en trois principales phases, dont la délimitation des bassins versant est la première, suivie par la détermination des caractéristiques des bassins pour ensuite établir le calcul des débits de pointe pour chaque fréquence.

Le présent chapitre décrit chaque phase avec le détail nécessaire.

## I. Délimitation des bassins versants dans la zone d'étude

### 1. Définition du bassin versant

Le bassin versant représente, en principe, l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

Plus précisément, le bassin versant qui peut être considéré comme un "Système" est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, est donc défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est entièrement caractérisé par son exutoire, à partir duquel nous pouvons tracer le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite. (*Hydrologie Appliquée d'A.Musy (1998)*).

### 2. Délimitation des bassins versants

La délimitation des bassins versants a pour but la détermination des caractéristiques géométriques et topographiques. Cette délimitation s'effectue par deux principales méthodes :

- ✓ Méthodes classiques via des cartes topographiques,
- ✓ Méthodes récentes : en utilisant le SIG (Système d'Information Géographique) et d'autres modèles tels que WMS (Watershed Modeling System).

Dans mon étude, j'ai travaillé avec le modèle WMS9.0.8.

## 2.1 Présentation du logiciel WMS (Watershed Modeling System)

WMS (fig.6) est une plate-forme de prévision hydrologique et hydraulique constitue une base importante pour anticiper la connaissance de la genèse des crues, et par la suite une gestion optimale des retenues de barrages et l'évaluation des risques des inondations.

WMS comprend des outils puissants pour automatiser les processus de modélisation, telles que la délimitation des bassins versants, les calculs des paramètres géométriques et hydrologiques des bassins versants. WMS supporte la modélisation hydrologique avec HEC-1, HEC-HMS, et la modélisation hydraulique avec HEC-RAS, et présente une comptabilité complète avec le logiciel Arc GIS et Google Earth.

Chaque bassin devra être modélisé en vue de préparer le processus de suivi et de préciser l'ampleur des crues, en se basant sur les données (pluie- débit) des événements historiques les plus importants.

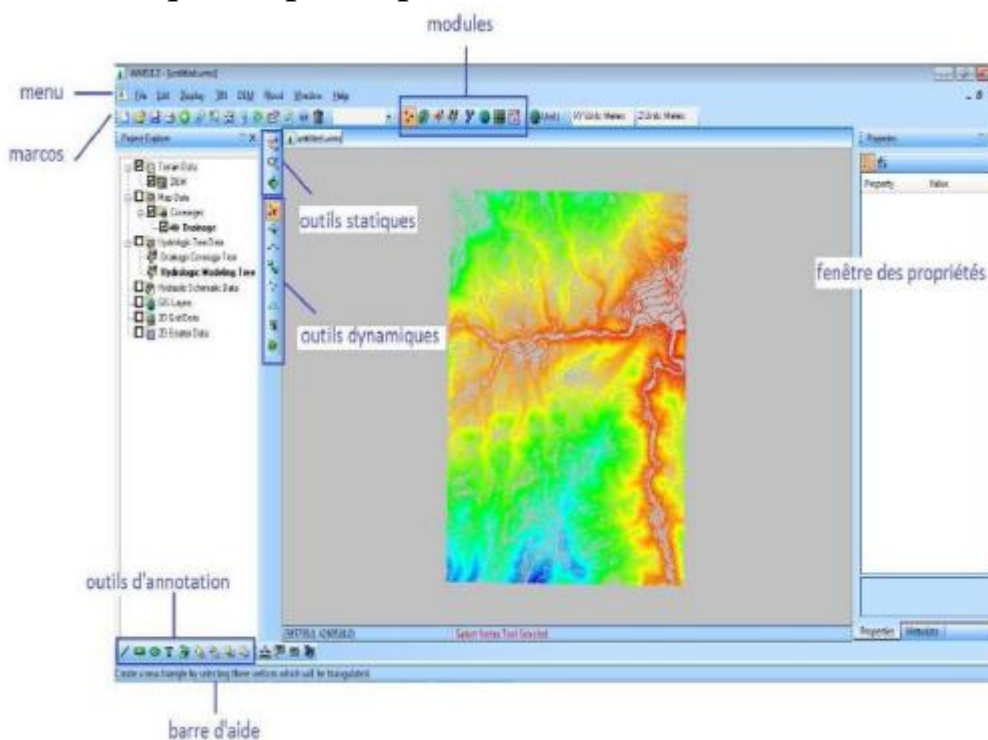
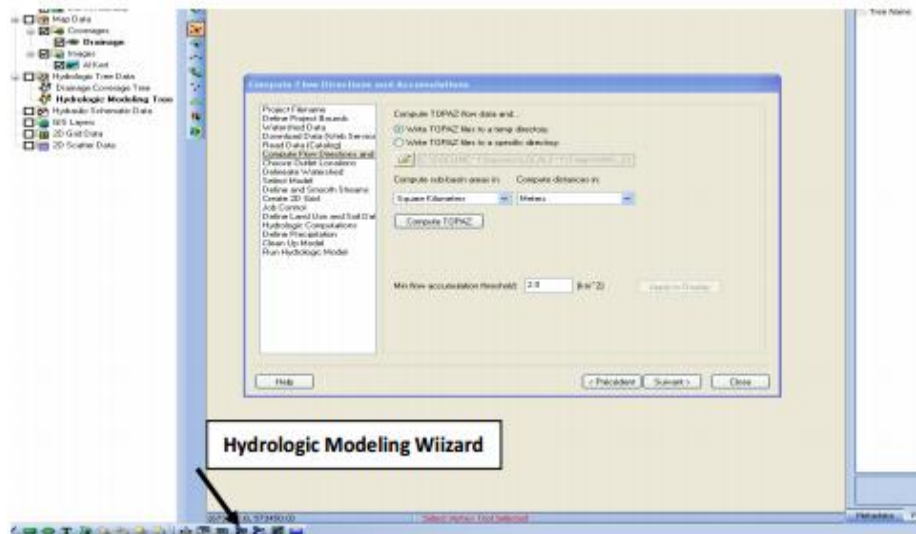


Figure 5 : Composantes principales de l'interface de WMS9.8.0

Pour délimiter les bassins versants à l'aide du logiciel WMS, on suit les étapes suivantes :

- On clique sur l'icône Hydrologic Modeling Wizard,
- On choisit le chemin du projet,
- On clique sur suivant puis, on détermine les unités,
- On clique sur compute TOPAZ



WMS trace le réseau hydrographique, pour choisir le niveau d'affichage des affluents on change la min flow accumulation ; un clique droit sur le DEM trimmé on choisit display option et on active DEM data puis on entre une valeur à min flow accumulation. Pour créer un exutoire dans WMS, on choisit d'abord le module Drainage puis on choisit l'outil *create Outlet Point* et on localise l'exutoire. Après la création des exutoires, on clique sur l'icône Hydrologic Modeling Wizard, on choisit Delineate Watershed puis close; A l'aide du logiciel WMS 9.0.8, j'ai délimité les trois bassins versants étudiés : bassin versant de l'oued Todgha, bassin versant de l'oued Azlag et le bassin versant de l'oued Ougni Tizgui (fig.7).



Figure 6 : Délimitation des bassins versants de la zone de l'étude (le haut Todgha et ses affluents)

## II. Caractéristiques des bassins versants de la zone d'étude

Après la délimitation des bassins versants, WMS calcule les paramètres physiques des bassins (la superficie, le périmètre, la pente, la longueur du cours d'eau principal...), en cliquant sur **display option**, l'option **Drainage Data** s'active et on coche les paramètres qu'on veut afficher (fig.8 et 9).

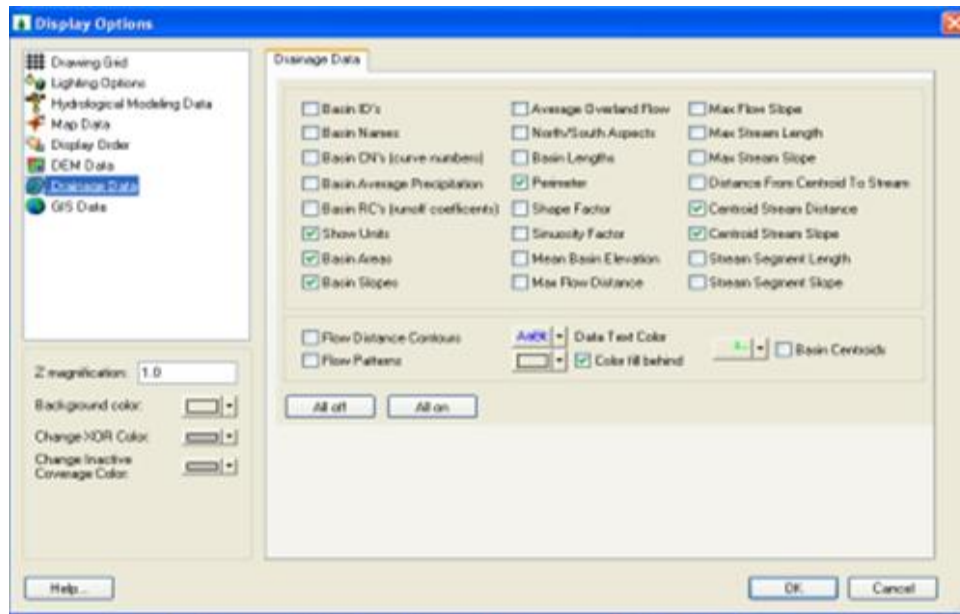


Figure 7 : Les différents paramètres des bassins versants

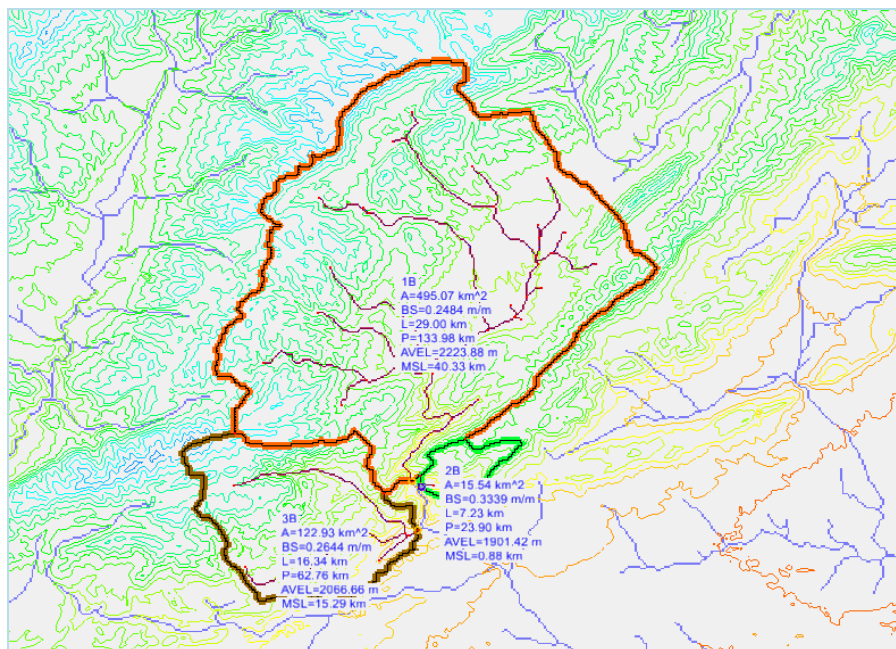


Figure 8 : Caractéristiques des bassins versants étudiés





Les principales caractéristiques d'un bassin versant sont composées de :

- **La superficie**
- **La pente**
- **Le périmètre**
- **Dénivelée** : Différence de niveau, d'altitude entre deux points précis.
- **La longueur** : C'est la longueur du bassin versant, calculée à partir de la distance séparant l'exutoire du point le plus éloigné appartenant au périmètre du bassin versant.
- **Indice de compacité de Gravélius  $K_G$**  : C'est un indice qui sert à qualifier la forme du bassin en le comparant à un cercle de même surface pour lequel  $K_G$  est égal à 1.  $K_G$  donne une idée générale concernant l'influence de la forme d'un bassin donné sur la durée de déclenchement des crues : plus  $K_G$  tend vers 1, plus sa forme est ramassée, et plus le temps nécessaire pour rassembler l'eau de tout le bassin versant est court. Sa formule est la suivante:  $K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$

Où,  $K_G$  : Indice de Gravélius sans dimensions  
P : Périmètre du bassin versant en Km  
A : Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>

Le tableau ci-après résume les caractéristiques des trois bassins versants que nous avons délimité au niveau du haut bassin de Todgha (commune Todgha Al Oulia-province Tinghir):

Caractéristiques des bassins versants du Haut Todgha						
Bassins Versants	Surface (Km <sup>2</sup> )	Longueur (Km)	Pente (%)	Périmètre (Km)	Dénivelée (m)	Indice de compacité
BV d'oued Todgha	491,81	44,53	3,14	107,23	1400	1,35
BV d'oued N' Tizgui	15,3	7,76	10,08	19,01	783	1,36
BV d'oued Azlag	118,32	23,54	5,10	54,37	1200	1,40

On admet que si  $K_G=1,2$ , cela signifie que le bassin versant est deux fois plus long que large, et connaissant que les  $K_G$  calculés sont de l'ordre de: 1,4 on peut conclure que les bassins étudiés sont quatre fois plus longs que larges. D'un autre coté, sachant que, plus l'indice de compacité tend vers la valeur 1, plus la forme du bassin versant est ramassée, et par conséquent le temps de concentration est court.

### III. Temps de concentration

La détermination des paramètres caractéristiques des bassins versants permet le calcul du temps de concentration.



Le temps de concentration  $T_c$  désigne le temps écoulé avant qu'une particule d'eau tombant au point le plus éloigné du bassin versant arrive à l'exutoire. On l'assimile à la durée de temps entre la fin de la pluie et la fin du ruissellement.

Le temps de concentration est influencé par des caractéristiques morphologiques dont on cite :

- La taille
- La forme du bassin versant
- Le relief du bassin versant

A ces caractéristiques s'ajoutent le type du sol et la nature du couvert végétal.

### III.1 Les formules utilisées pour le calcul de $T_c$

Le temps de concentration  $T_c$  dépend des caractéristiques des bassins versants. De ce fait, il est calculé par différentes formules empiriques dont on cite :

○ **Giandotti**  $T_c = 60 * (4 * S^{0,5} + 1,5 * L) / (0,8 * H^{0,5})$

Où :

$T_c$  : Temps de concentration en mn

S : Superficie du BV en Km<sup>2</sup>

L : Longueur du BV en Km

H : Dénivelée en m

○ **Turrazza / Passini**  $T_c = 60 * 0,108 * (L * S)^{0,333} * I^{-0,5}$

Où

$T_c$  : Temps de concentration en mn

L : Longueur du BV en Km

S : Superficie du BV en Km<sup>2</sup>

I : Pente en m/m

○ **Kirpich**  $T_c = L^{0,77} * I^{-0,385} / 52$

Où

$T_c$  : Temps de concentration en mn

L : Longueur du BV en m

I : Pente en m/m

○ **Formule Espagnole**  $T_c = 18 * (L/1000)^{0,77} * I^{-0,1925}$

Où

$T_c$  : Temps de concentration en mn

L : Longueur du BV en m

I : Pente en m/m

○ **Van Te Show**  $T_c = 60 * 0,123 * (L * I^{-0,5} / 1000)^{0,64}$

Où

$T_c$  : Temps de concentration en mn

L : Longueur du BV en m



I : Pente en m/m

- **Formule Californienne**  $T_c = 60 * 0,1452 * (L * I^{-0,5} / 1000)^{0,77}$

Où

$T_c$  : Temps de concentration en mn

L : Longueur du BV en m

I : Pente en m/m

- **Formule de US Corps**  $T_c = 16,682 * (L * I^{-0,25} / 1000)^{0,77}$

Où

$T_c$  : Temps de concentration en mn

L : Longueur du BV en m

I : Pente en m/m

### III.2 Résultats de calcul de $T_c$

Les temps de concentration des bassins versants étudiés calculés par différentes formules empiriques, sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 3 : Temps de concentration des bassins versants de la zone de l'étude**

BV	Temps de concentration (h)								Valeur de $T_c$ retenue (h)
	Giando tti	Turrazz a/ Passini	Ventura	Kirpich	Formule Espagno le	Van Te Chow	Formule Californ ienne	Formule de US Corps	
BV oued Todgha	5,19	16,98	15,92	4,61	10,86	4,23	10,24	10,07	4,68
BV oued n°Tizgui	1,22	1,67	1,57	0,77	2,26	0,95	1,70	2,09	0,98
BV oued Azlag	2,84	6,71	6,13	2,34	6,06	2,41	5,20	5,61	2,53

La valeur retenue du temps de concentration des bassins versants de la zone de l'étude est la moyenne des temps de concentration des valeurs comparables et assez voisines. De ce fait, les temps de concentration retenus pour les bassins de la présente étude sont la moyenne des temps de concentration des trois formules : Giandotti, Kirpich et Van Te Chow.

## IV. Etude de crue : Calcul du débit de pointe pour chaque période de retour T



## a. Définitions

- Le **débit** du cours d'eau, noté **Q** et exprimé en  $m^3/s$  ou  $l/s$ , représentant le volume total d'eau s'écoulant à travers une section droite du cours d'eau pendant l'unité de temps considérée (Vitesse\* Section= Débit).

**Le débit de pointe** d'un hydrogramme d'une averse est défini comme étant le débit maximal instantané de l'hydrogramme.

- **Période de retour (T)** : " Période de retour, synonyme période de récurrence : Moyenne à long terme du temps ou du nombre d'années séparant un événement de grandeur donnée d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure. Exemple : pointe de crue "*Glossaire International d'Hydrologie (1992)*.

Définition statistique du période de retour : Soit un évènement particulier, par exemple que le débit d'une rivière dépasse une valeur donnée au cours d'une année donnée. Si  $p$  est la probabilité que l'évènement donné se produise au cours d'une année donnée, le temps de retour attaché à cet évènement est défini comme l'inverse de cette probabilité :  $T=1/p$ .

## b. Objectif

L'objectif de l'étude de crue est de trouver les valeurs des débits de pointe (débits de projet) selon les fréquences de la crue (période de retour).

L'estimation des débits de pointe est basée sur l'application de plusieurs méthodes, dans le présent travail on va travailler avec deux principales méthodes à savoir :

- Méthodes empiriques : formule Rationnelle et formule de Fuller II,
- Transposition des débits de pointe des bassins jaugés vers les bassins étudiés : Méthode de Froncou Rodier.

### 1. Calcul des débits de pointe

Les méthodes choisies pour déterminer les débits de pointe et leurs fréquences dépendent des facteurs suivants :

- L'objectif poursuivi
- Les données disponibles : Citons par exemple, les données hydrologiques recueillies depuis longtemps permettent une application rationnelle des méthodes statistiques, alors que dans le cas des données à courts termes, l'application de ces techniques n'est plus possibles ;
- La superficie et les caractéristiques du bassin versant : Ces paramètres influencent la façon avec laquelle se présente le ruissellement et par conséquent le débit de pointe ;
- L'importance du projet et la période de temps utilisé pour les analyses ;
- Les caractéristiques hydro-climatologiques de la zone de l'étude.



## 1.1 Les méthodes utilisées pour le calcul des débits de pointe au niveau de la zone d'étude

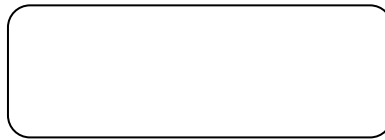
Dans la présente étude, j'ai calculé le débit de pointe par les méthodes citées précédemment (La formule Rationnelle, Fuller II, transposition de Francou Rodier).

### a. Formule Rationnelle

C'est un modèle empirique de transformation de pluie en débit, il est applicable pour les bassins versants de petites dimensions (< 25Km<sup>2</sup>). Son principe suppose que toute la superficie du bassin versant participe à l'écoulement.

La formule rationnelle s'exprime comme suit :

$$Q_T = \frac{C_r * I_p(T_c, T) * S}{3,6}$$



Où,

$Q_T$  : Débit de pointe en m<sup>3</sup>/s pour la période de retour T

$C_r$  : Coefficient de ruissellement, compris entre 0 et 1

$I_p$  : Intensité de la pluie en mm/h

$T_c$  : Temps de concentration en mn

T : Période de retour en ans

S: Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>

#### a.1. L'intensité pluviométrique ( $I_p$ )

Elle est calculée par la formule de Montana :  $I_p = 60 * a * t^{-b}$ , a et b sont des paramètres régionaux d'ajustement dépendant du lieu de la station pluviométrique, ainsi que de la période de retour T de l'averse (ils dépendent de la fréquence de la pluie) et t : Temps en heures et pris égal au temps de concentration. Pour la fréquence décennale les paramètres a et b sont déterminés par la Direction de la Météorologie Nationale, tel que : a =2,96 et b =0,58.

#### a.2. Le coefficient de ruissellement( $C_r$ )

C'est un indice pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler, il est très souvent utilisé en hydrologie de surface et choisi en fonction du type du sol, de sa couverture végétale et de la pente moyenne du bassin versant. Le tableau 4 indique quelques valeurs expérimentales de ce coefficient.

**Tableau 4 : Valeurs recommandées du coefficient de ruissellement en fonction de la pente et de la couverture du sol**

Nature de la couverture	Petits bassins de 0 à 10 ha				Bassins moyens de 10 à 1500 ha			
	Présentant une pente de							
végétale	Moins de 5%	De 5 à 10%	De 10 à 30%	Plus de 30%	Moins de 5%	De 5 à 10%	De 10 à 30%	Plus de 30%
Plates formes et chaussées de routes	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95



Terrain dénudé ou à végétation non couvrante, terrains déjà entachés par l'érosion, Labours frais	0,70	0,75	0,80	0,85	0,30	0,36	0,42	0,50
Cultures couvrantes, Céréales hautes, Terrains de parcours, Petite brousse clairsemée	0,75	0,80	0,85	0,90	0,52	0,60	0,72	0,80
Prairie, Brousses denses, Savane à sous-bois	0,80	0,85	0,90	0,95	0,70	0,75	0,80	0,85
Foret ordinaire en futaie, sous-bois touffus	0,30	0,50	0,60	0,70	0,13	0,20	0,25	0,30
Grande foret primaire	0,20	0,25	0,30	0,40	0,15	0,18	0,22	0,25

(Hydraulique routière, BCEOM, 1997, page 115)

Pour bassin versant de l'oued Todgha Cr est pris égal à 0,3, et pour le bassin versant de l'oued Ougni Tizgui Cr est pris égal à 0,42, alors que Cr du bassin versant de l'oued Azlag est 0,36.

### **b. Formule de Fuller II**

L'expression de la formule de Fuller II est la suivante :

$$QT = (1 + a * \log(T)) * \left( S^{0,5} + \frac{8}{3} * S^{0,5} \right) * \frac{4}{3} * N/100$$

Où,

**Q<sub>T</sub>** : Débit de pointe en m<sup>3</sup>/s pour la période de retour T

**a** : Coefficient pris égal à 0,8

**T** : Période de retour en ans

**S** : Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>

**N** : Coefficient régional égal à 80 en plaine, 85 en région accidentée et 100 en régions montagneuses (Dans notre cas, les trois bassins versants étudiés appartiennent aux régions accidentées c.-à-d. N=85).

### **c. Transposition des débits de pointe des bassins jaugés vers les bassins étudiés : Méthode de Froncou Rodier**

Afin de pouvoir mieux apprécier les débits de pointes probables sur les bassins versants étudiés obtenus par les formules empiriques usuelles, l'estimation des débits est également faite par analogie avec d'autres bassins versants similaires et limitrophes. Les critères de similitude sont les suivants :

- ✚ Les bassins versants (le bassin limitrophe jaugé et le bassin étudié) doivent avoir le même ordre de superficie
- ✚ Homogénéisation des conditions hydro-climatologiques.

Cette méthode est applicable surtout dans le cas où le bassin versant étudié n'est pas jaugé (absence d'une station hydrométrique).

### **i. Les étapes à suivre pour le calcul du débit via la méthode de transposition**



La méthode de transposition à partir des bassins limitrophes s'effectue en quatre principales étapes dont on cite :

1. Déterminer le bassin versant limitrophe
2. Disposer d'une série représentative observée au niveau du bassin jaugé
3. Effectuer l'ajustement statistique des débits max observés au niveau de la station et calculer le débit de pointe pour chaque période de retour
4. Transposer les débits de pointe pour chaque période de retour vers le bassin étudié en se basant sur la formule de Francou-Rodier communément utilisée au Maroc et dont la formule est sous la forme suivante :

$$Q_p = 10^6 \left( \frac{S}{10^8} \right)^{1 - \frac{K}{10}}$$

Où,

$Q_p$  : Débit de pointe  $m^3/s$  au bassin cible

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

$K$  : Paramètre de Francou-Rodier

Le paramètre  $K$  est déterminé grâce à la surface active du bassin d'origine ( $S'$ ) en  $km^2$ , selon la formule suivante :

$$K = 10 \cdot \frac{\text{Log}(S'/100Q'_p)}{\text{Log}(S'/10^8)}$$

Les valeurs du coefficient  $K$  ainsi déterminées permettent de transposer les débits des crues aux bassins actifs cibles.

## 1.2 Application et résultats de calcul

### a. Résultats de Rationnelle

Les résultats obtenus par l'application de la formule **Rationnelle** dans le calcul des débits sont représentés dans le tableau suivant:

	Cr	Ip (mm/h)	Rationnelle Q10 (m3/s)
<b>BV oued Todgha</b>	0,30	<b>72,58</b>	<b>826,24</b>
<b>BV d'oued Tizgui</b>	0,42	<b>179,80</b>	<b>89,15</b>
<b>BV d'oued Azlag</b>	0,36	<b>103,64</b>	<b>340,62</b>

### b. Résultats de Fuller II

Le tableau suivant récapitule les débits calculés suivant la méthode de **Fuller II** :

<b>Fuller II</b>
------------------



Bassin versant	Superficie (Km <sup>2</sup> )	T 5	T 10	T 20	T 50	T 100	T 1000
BV oued Todgha	491,81	356,09	411,09	466,09	538,80	593,80	776,50
BV oued Tizgui	15,30	34,10	39,37	44,63	51,60	56,86	74,36
BV oued Azlag	118,32	131,74	152,09	172,43	199,33	219,68	287,27

### c .Résultats obtenus de la transposition à partir des bassins limitrophes

Dans notre cas, nous avons travaillé à partir de la station d'Ait Bouijjane, la station hydrologique la plus proche de la zone de l'étude et celle qui dispose d'un historique suffisant pour faire l'objet d'ajustements statistiques.

Le tableau ci-dessous présente la série des débits maximaux observés au niveau de la station Ait Bouijjane pendant la période allant de 1976 jusqu'à 2008.





**Tableau 5 : Série de  $Q_{\max}$  observés à la station Ait Bouijjane (1976-2008)**

Année	Q de pointe (m <sup>3</sup> /s)
76-77	75,00
77-78	273,00
78-79	18,40
79-80	465,00
80-81	38,40
81-82	3,13
85-86	42,10
86-87	290,00
87-88	129,00
88-89	463,00

Année	Q de pointe (m <sup>3</sup> /s)
<u>89-90</u>	502,00
<u>90-91</u>	38,00
<u>91-92</u>	265,00
<u>92-93</u>	0,91
<u>93-94</u>	306,00
<u>94-95</u>	372,00
<u>95-96</u>	80,10
<u>96-97</u>	135,00
<u>97-98</u>	414,00
<u>98-99</u>	31,50

Année	Q de pointe (m <sup>3</sup> /s)
<u>99-2000</u>	248,00
<u>2000-2001</u>	147,00
<u>2001-2002</u>	142,00
<u>2002-2003</u>	319,00
<u>2003-2004</u>	282,00
<u>2004-2005</u>	425,00
<u>2005-2006</u>	243,00
<u>2006-2007</u>	711,00
<u>2007-2008</u>	46,70

Pour bien ajuster les phénomènes extrêmes, dont les débits de pointe font partie, on utilise la **loi de Gumbel** fréquemment utilisée en hydrologie.

### Démarche et résultats

**Etape 1 :** Préparation de la série de données des débits de pointe

- Trier les valeurs des débits de pointe dans l'ordre croissant
- Attribuer un rang à chaque valeur du débit de pointe

**Etape 2 :** Calcul de la fréquence empirique  $F(x)$  pour chaque rang en utilisant la formule suivante :

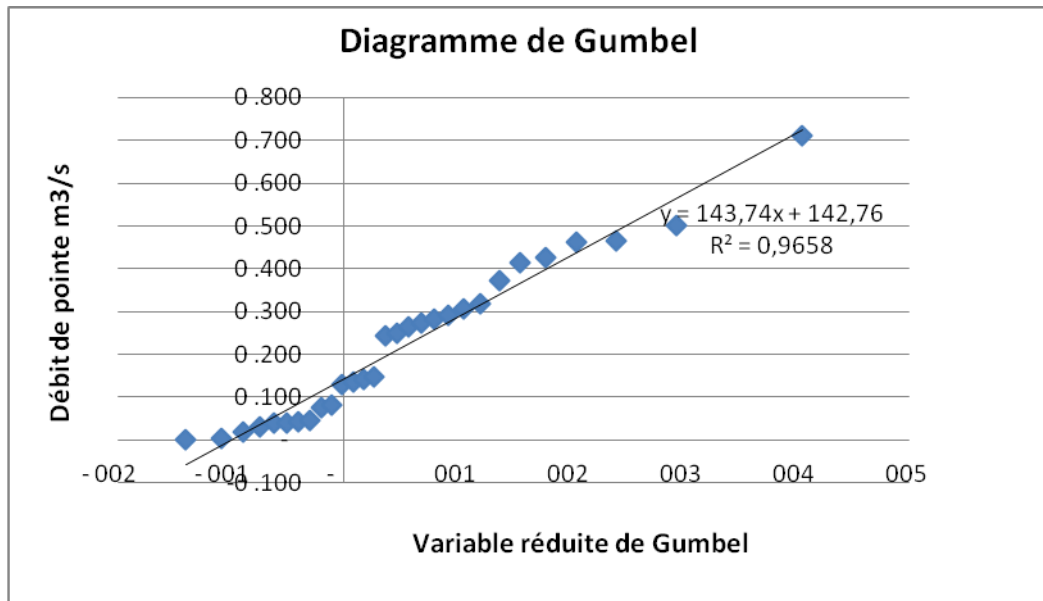
$$F(x) = \frac{r - 0,5}{n}$$



Où,  $r$  : Rang dans la série de données classée par valeurs croissantes  
 $n$  : Taille de l'échantillon, dans notre cas,  $n=29$

**Etape 3 :** Calcul de la variable réduite ( $u$ ) du Gumbel tel que :  $u = -\ln(-\ln(F(x)))$

**Etape 4 :** Représentation graphique des couples ( $u_i, x_i$ ) de la série à ajuster (fig.10)



**Figure 9 : Diagramme de Gumbel**

**Etape 5 :** Avec un **ajustement de type graphique** (à l'œil), on obtient à l'aide de la courbe de tendance, la valeur des deux paramètres a et b,  $a = 142,76$  et  $b = 143,74$ .

**Etape 6 :** Utilisation du modèle statistique pour estimer les débits de pointe de différents temps de retour T. Par exemple pour  $T=5$ ans, on suit les étapes suivantes :

- ✚ Calcul de la fréquence de non-dépassement d'après la relation :  $F(x) = 1 - \frac{1}{T}$   
 $F = 0,8$
- ✚ Calcul de la variable réduite de Gumbel correspondante d'après la relation  $u = -\ln(-\ln(F(x)))$ ,  $u = 1,50$
- ✚ Calcul du quantile correspondant d'après la relation linéaire (avec a et b sont fournis par l'étape 5 précédente) :  $Q'_{5ans} = 142,76 + 143,74 * 1,50 = 358,36 m^3/s$ .

De la même manière, on procède pour les autres temps de retour, et on obtient :

Période de retour T (ans)	5	10	20	50	100	1000
Fréquence de non dépassement de Qp	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
Variable réduite de Gumbel (u)	1,50	2,25	2,97	3,90	4,60	6,91
$Q'_{max}$ (m3/s) pour T	358,36	466,23	569,70	703,64	804,00	1 135,63

Une fois l'ajustement statistique à partir de la station d'Ait Bouijjane des débits max observés est effectué, on calcule le débit de pointe pour chaque période de retour, ensuite



on procède à transposer les débits de pointe de la station d'Ait Bouijjane pour chaque période de retour vers les bassins de Todgha, Tizgui et Azlag en utilisant la formule de Francou-Rodier.

Les valeurs des débits des crues pour les bassins de référence, ainsi que les paramètres de Francou-Rodier sont donnés dans le tableau suivant :

Bassins Versants	Superficie [km <sup>2</sup> ]	Transposition à partir des données relatives à la station Ait Bouijjane					
		S'= 655	S'= 655	S'= 655	S'= 655	S'= 655	S'= 655
		Q'= 358,36	Q'= 466,2	Q'= 569,7	Q'= 703,6	Q'= 804	Q'= 1135,63
		K= 3,353	K= 3,573	K= 3,741	K= 3,918	K= 4,030	K= 4,319
		T 5	T 10	T 20	T 50	T 100	T 1000
BV d'oued Todgha	491,81	<b>296,21</b>	<b>387,82</b>	<b>476,17</b>	<b>591,10</b>	<b>677,58</b>	<b>965,04</b>
BV d'oued Tizgui	15,3	<b>29,50</b>	<b>41,69</b>	<b>54,26</b>	<b>71,63</b>	<b>85,35</b>	<b>134,40</b>
BV d'oued Azlag	118,32	<b>114,90</b>	<b>155,23</b>	<b>195,22</b>	<b>248,52</b>	<b>289,45</b>	<b>429,59</b>

### 1.3 Débits retenus

Après analyse et examen approfondi des différentes approches adoptées, il en ressort que :

- La transposition des débits à partir de la station Ait Bouijjane aboutit à des débits très proches de la réalité, puisqu'au niveau de cette station est jaugé régulièrement l'oued Todgha objet de la présente étude. Ainsi nous retenons tout débit comparable à celui calculé suivant cette approche.
- Pour les bassins versants étudiés ; bassin versant de l'oued Todgha, bassin versant de l'oued Ougni Tizgui et celui de l'oued Azlag ; le débit retenu est la moyenne des débits calculés suivant : Fuller II et la transposition de Francou-Rodier à partir des données relatives à la station Ait Bouijjane, car l'ensemble des approches étudiées aboutissent à des débits comparables entre elles ainsi nous retenons leurs moyennes et aussi car les débits calculés par la méthode Rationnelle sont surestimés.

Les tableaux suivants récapitulent les débits retenus pour chaque bassin versant et pour différentes périodes de retour :

Bassin Versant	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Rationnelle	Fuller II	Francou-Rodier	Q 10 retenu (m <sup>3</sup> /s)
BV oued Todgha	491,81	826,24	411,09	387,82	<b>399,45</b>
BV oued Tizgui	15,3	89,15	39,37	41,69	<b>40,53</b>



<b>BV oued Azlag</b>	118,32	340,62	152,09	155,23	<b>153,66</b>
----------------------	--------	--------	--------	--------	---------------

Bassin Versant	Superficie (Km2)	Fuller II	Francou-Rodier	Q 20 retenu (m3/s)
BV oued Todgha	491,81	466,09	476,17	<b>471,13</b>
BV oued Tizgui	15,3	44,63	54,26	<b>49,45</b>
<b>BV oued Azlag</b>	<b>118,32</b>	<b>172,43</b>	<b>195,22</b>	<b>183,83</b>

Bassin Versant	Superficie (Km2)	Fuller II	Francou-Rodier	Q 50 retenu (m3/s)
BV oued Todgha	491,81	538,80	591,10	<b>564,95</b>
BV oued Tizgui	15,3	51,60	71,63	<b>61,61</b>
<b>BV oued Azlag</b>	<b>118,32</b>	<b>199,33</b>	<b>248,52</b>	<b>223,93</b>

Bassin Versant	Superficie (Km2)	Fuller II	Francou-Rodier	Q 100 retenu (m3/s)
BV oued Todgha	491,81	593,80	677,58	<b>635,69</b>
BV oued Tizgui	15,3	56,86	85,35	<b>71,11</b>
<b>BV oued Azlag</b>	<b>118,32</b>	<b>219,68</b>	<b>289,45</b>	<b>254,56</b>

Bassin Versant	Superficie (Km2)	Fuller II	Francou-Rodier	Q 1000 retenu (m3/s)
BV oued Todgha	491,81	776,50	965,04	<b>870,77</b>
BV oued Tizgui	15,3	74,36	134,40	<b>104,38</b>
<b>BV oued Azlag</b>	<b>118,32</b>	<b>287,27</b>	<b>429,59</b>	<b>358,43</b>

**Tableau 6 : Récapitulatif des résultats**

Bassin Versant	Superficie (Km2)	Tc (h)	Q 10 (m3/s)	Q 20 (m3/s)	Q 50 (m3/s)	Q 100 (m3/s)	Q 1000 (m3/s)
----------------	------------------	--------	-------------	-------------	-------------	--------------	---------------



BV oued Todgha	491,81	4,68	399,45	471,13	564,95	635,69	870,77
BV oued Tizgui	15,3	0,98	40,53	49,45	61,61	71,11	104,38
BV oued Azlag	118,32	2,53	153,66	183,83	223,93	254,56	358,43

## 2. Calcul des Volumes des crues et élaboration des hydrogrammes des crues

### 2.1 Définitions

✚ **Volume :** En physique, le volume d'un objet mesure " l'extension dans l'espace " qu'il possède dans les trois directions en même temps, de même que l'aire d'une figure dans le plan mesure " l'extension " qu'elle possède dans les deux directions en même temps.

Le volume se mesure en mètre cube dans le système international. On utilise fréquemment le litre, notamment pour des liquides. (*Glossaire International d'Hydrologie (1992).*)

✚ **L'hydrogramme :** C'est le graphique de la variation temporelle du débit mesuré dans une section d'un cours d'eau. On utilise des hydrogrammes soit pour étudier un point d'un bassin versant (hydrogramme de précipitation), soit pour une section d'un cours d'eau (hydrogramme de ruissellement).

On distingue sur un hydrogramme :

- La partie montante (d'augmentation du débit), dite courbe de concentration. La durée correspondante est appelée temps de montée ;
- La pointe, ou pic, de l'hydrogramme ;
- La partie à décroissance rapide, dite courbe de décrue. La durée totale couvrant la concentration et la décrue est appelée temps de base de l'hydrogramme ;
- La branche finale, à décroissance plus lente, dite courbe de tarissement.

L'élaboration des hydrogrammes des crues repose, au-delà de l'évaluation du débit de pointe, sur le choix du temps de montée et le temps de base du bassin versant.

Etant donnée l'absence de toute mesure instantanée des débits sur les bassins versants objet de la présente étude, on retiendra pour le calcul des volumes des crues un hydrogramme triangulaire caractérisé par :

- Un débit de pointe  $Q_p$
- Un temps de montée pris égal au temps de concentration
- Un temps de descente pris égal à 2 fois le temps de montée



- La durée totale (temps de base) est égale à trois fois le temps de concentration (Fig.11)

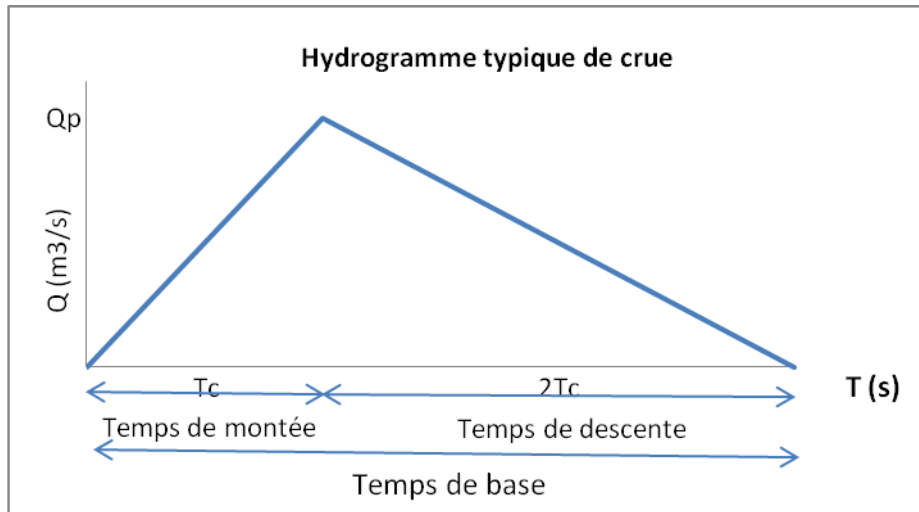


Figure 10 : Hydrogramme typique des crues



Le volume de la crue est calculé par la formule suivante :

$$V = \frac{3}{2} Q_p * T_c$$

Où :

V : Volume de la crue en Mm<sup>3</sup>

Q<sub>p</sub> : Débit de pointe pour chaque période de retour en m<sup>3</sup>/s

T<sub>c</sub> : Temps de concentration en second

Dans le tableau suivant sont donnés les débits des crues retenus en m<sup>3</sup>/s auxquels aboutissent différentes méthodes ainsi que les volumes des crues en Mm<sup>3</sup> :

Bassins versants		BV oued Todgha	BV oued Tizgui	BV oued Azlag
Superficie (Km <sup>2</sup> )		491,81	15,3	118,32
Temps de concentration (h)		4,68	0,98	2,53
Débits retenus m <sup>3</sup> /s	Q 10 (m <sup>3</sup> /s)	399,45	44,30	180,19
	V(Mm <sup>3</sup> )	<b>10,09</b>	<b>0,23</b>	<b>2,46</b>
	Q 20 (m <sup>3</sup> /s)	471,13	49,45	183,83
	V(Mm <sup>3</sup> )	<b>11,90</b>	<b>0,26</b>	<b>2,51</b>
	Q 50 (m <sup>3</sup> /s)	564,95	61,61	223,93
	V(Mm <sup>3</sup> )	<b>14,27</b>	<b>0,33</b>	<b>3,06</b>
	Q 100 (m <sup>3</sup> /s)	635,69	71,11	254,56
	V(Mm <sup>3</sup> )	<b>16,06</b>	<b>0,38</b>	<b>3,48</b>
	Q 1000 (m <sup>3</sup> /s)	870,77	104,38	358,43
	V(Mm <sup>3</sup> )	<b>22,00</b>	<b>0,55</b>	<b>4,90</b>

## Conclusion

L'étude hydrologique réalisée au niveau des bassin du haut Todgha a permis de déterminer les débits de pointe desdits bassins pour chaque période de retour. Les débits de pointe



calculés allant de 399,45 m<sup>3</sup>/s pour 10 ans à 870,77 m<sup>3</sup>/s pour 1000 ans avec un volume d'eau de 22,00 Mm<sup>3</sup> pour 1000 ans. Débit représentant un éventuel risque menaçant la vallée de Todgha et en particulier, la zone objet de la présente étude, du faite qu'elle est exposée aux effets additifs de l'oued Azlag et l'oued Tizgui.

L'étude hydrologique est l'étape la plus importante pour une étude de protection contre les inondations.

Le choix et la validation des débits de pointe déterminent le type d'aménagement pour la protection et leurs coûts de réalisation. Le bassin du haut Todgha est caractérisé par des orages et des crues torrentielles ce qui mettent en danger les touristes et la population de la vallée de Todgha.

L'étude objet de mon travail de fin d'études a réalisé la partie hydrologique pour la protection contre les inondations du centre de Todgha Al Oulia. Ladite étude a déterminé les débits de pointe pour chaque fréquence. De ce fait, il y a lieu de proposer les solutions d'aménagements pour la protection de la population contre les inondations en se basant sur les débits retenus au niveau de mon étude hydrologique.





## Conclusion générale

Le présent travail réalisé dans le cadre du projet de fin d'études, au sein de l'agence du bassin hydraulique de Guir-Ziz-Rhéris, m'a permis d'appliquer les différentes informations et disciplines acquises au cours de mes études universitaires, en effet je me suis appliquée à la valorisation de l'information, la description, l'analyse et l'interprétation des données, le travail sur le terrain ainsi que la corrélation entre les différentes données.

Mon stage qui a duré environ quatre mois, a pour objectif la réalisation de l'étude hydrologique de la protection contre les inondations du haut bassin de Todgha.

En ce qui concerne le développement du projet, je me suis arrêtée sur la compréhension du contexte hydro-climatologique du haut bassin de Todgha, ensuite j'ai effectué une visite au terrain pour le diagnostic de la situation existante, pour ensuite entamer l'étude hydrologique pour déterminer les débits de pointe pour chaque fréquence, pour ceci, j'ai utilisé le logiciel WMS9.8.0 dans la délimitation des bassins versants du haut Todgha ainsi que pour la détermination des caractéristiques desdits bassins, pour ensuite appliquer différentes formules et loi d'ajustement statistique.

L'étude hydrologique complétée par l'étude hydraulique constituent une base importante pour anticiper des mesures qui pourront être techniques « structurelles », via la réalisation d'ouvrages de protection (barrages, endiguements, évacuation des crues, entretien du lit des rivières, reboisement des massifs dégradés...), comme elles pourront également faire appel, parallèlement, à d'autres types d'actions dites « non structurelles » telles que extension et amélioration des réseaux d'annonce de crue, réglementation et maîtrise de l'occupation des sols en zones inondables, cartes d'aléas et affichage du risque, mise en place de plans et de moyens de secours, renforcement du cadre institutionnel...



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Agence du Bassin Hydraulique GZR** (Octobre 2010) : Ressources en eau dans les bassins de Ziz et Rhéris, Rapport interne, p.33

**ABH GZR** (2010) : Etude hydrologique et hydraulique pour l'instruction du dossier réglementaire de délimitation du domaine public hydraulique au niveau des centres Todgha Azlag dans la zone d'action de l'agence du bassin Hydraulique Guir-Ziz-Rhéris, mission I : Collecte et préparation de données. Rapport interne, 40 p.

**ABH GZR** (2011) : Etude de protection contre les inondations du centre d'Oulad Ali dans la province d'Errachidia, mission I. Rapport interne, 36 p.

**ABH GZR** (2013) : Etude hydrologique et hydraulique pour l'instruction du dossier réglementaire de délimitation du domaine public hydraulique au niveau des centres Todgha Azlag dans la zone d'action de l'agence du bassin Hydraulique Guir-Ziz-Rhéris, mission III : Modélisation hydraulique des écoulements. Rapport interne, p.35.

**Cartes Topographiques** du Maroc au 1/100 000 ; feuilles : Tinghir, Tinjdad. Division de la Cartographie, Rabat

**Direction Régionale Hydraulique Guir-Ziz-Rhéris** (Mars 2006) : Atlas des zones inondables. Rapport interne, 123 p.

**DRPE/DHM (Octobre 2011)** : Manuel du guide simplifiée d'utilisation du logiciel Watershed Modeling System, 35 p.

**HILALI M.** (2010) : Cours d'hydroclimatologie. FST Errachidia.

**Glossaire International d'Hydrologie** (1992).

**Loi N° 10-95 sur l'eau** au Maroc, Exposé des motifs, 20 Septembre 1995

**MICHARD A.** (1976) : Eléments de Géologie Marocaine, Edition du service géologie du Maroc en 1976, ISSN 0374-9789. 424 p.

**MUSY A.** (2005) : Cours d'hydrologie générale, Section SIE et GC 4ème semestre.166 p.

**MUSY A., HIGY C.** (1998) : Hydrologie appliquée, Edition \*H\*G\*A\*, Bucarest, ISBN : 973-98530-8-0.369 p.

**OURAHOU M.** (Mars 2010) : Rapport de l'étude hydrologique des bassins versants

**REMENIERAS G.** (1976) : Hydrologie de l'ingénieur, Edition 2, ISSN 0399-4198. 456 p.



---

# ANNEXES



---

## **Annexe 1 : Température moyenne mensuelle (1982-2008)**



---

## Annexe 2 : Pluies mensuelles (1961-2013)

## Annexe 3 : Photos prises dans les zones risquées



Oued Ougni Tizgui : matériaux de charriage importants (15/11/2013) (ABH GZR)



Vue générale de l'oued Ougni Tizgui en amont de la RR703: piste dans le lit et constructions les 2 rives (15/11/2013) (ABH GZR)



Vue générale de l'oued Azlag en aval de RR703: constructions sur RD et terrasse agricoles en RG (15/11/13) (ABH GZR)



Impressionnantes gorges de Todgha (20/03/2014)





**Oued Azlag en amont de la RR703 RD:  
Quelques constructions sont implantées  
à des altitudes relativement hautes par  
rapport au lit de l'oued (15/11/2013) (ABH GZR).**

**Station météorologique d'Ait Boujjane  
(20/03/2014)**



**Le bief de l'oued Azlag occupé par l'agriculture de la RG qui est protégée par gabionnage et remblai (15/11/2013) (ABH GZR)**



**Protection des constructions et les terrasses agricoles par des murs en  
maçonnerie au niveau de l'oued Azlag (15/11/2013) (ABH GZR)**



**Digue de protection (20/03/2014)**



**Mur de protection contre l'érosion  
(20/03/2014)**