



**UNIVERSITE CADI AYYAD  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE  
MARRAKECH**



**Maîtrise Es Sciences et Techniques d'Hydrogéologie**

**Mémoire de fin d'études**

**Etude dynamique et statistique des crues du Haut Atlas  
de Marrakech (Maroc),  
Cas des bassins versants du N'Fis, de la Ghiraya et de l'Ourika**

*Elaboré par :*

**Fniguire Fatima**

**Boukrim Siham**

*Encadrées par :*

**Mohamed El Mehdi SAIDI**

*Soutenu le 3 juillet 2007 devant le jury composé de :*

**Mr M'Bark AGOUSSINE**

**Mr Said EL KIHIL**

**Mr Mohamed El Mehdi SAIDI**

### *Remerciements*

*Au terme de ce stage de fin d'études, il nous est agréable d'exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés à le mener à terme, que ce soit au département des sciences de la terre de la Faculté de Sciences et Techniques de Marrakech ou à l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift.*

*Nous voudrions, en premier lieu, remercier nos professeurs, particulièrement notre encadrant Mr. M.E Saidi, pour leurs aides et assistance.*

*Nos remerciements vont également à notre encadrant à l'ABHT Mr. N.Limam, sans oublier le chef de la division des ressources en eau et les techniciens.*

*Nos chaleureux remerciements à nos familles pour leur soutien matériel et moral, ainsi qu'à nos amis pour leurs encouragements.*

## Sommaire

<b>Sommaire .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>5</b>
<b>Chapitre I : Situation géographique et analyse géomorphologique.....</b>	<b>6</b>
I- Le bassin versant de l'Ourika : .....	6
1- Situation géographique .....	6
2- La morphologie et les reliefs .....	6
3- Géologie générale et lithologie :.....	8
4- Le réseau hydrographique .....	9
5- Le climat global et le couvert végétal :.....	10
II- Le bassin versant de la Ghiraya: .....	11
1- Situation géographique .....	11
2- La morphologie.....	11
3- Géologie et lithologie du bassin versant :.....	13
4- Réseau hydrographique .....	14
5- Le climat global et la végétation : .....	15
III- Le bassin versant du N'fis: .....	16
1- Situation géographique .....	16
2- La morphologie et l'hypsométrie du bassin :.....	16
3- La géologie générale et lithologie : .....	17
4- Le réseau hydrographique .....	18
5- Le climat et la végétation : .....	19
IV- Comparaisons morphologiques : .....	20
<b>Chapitre II : Analyse des régimes pluviométriques et hydrologiques .....</b>	<b>21</b>
I- Régimes mensuels des débits: .....	21
II- Régimes mensuels des pluies:.....	22
III- Relation entre les pluies et les débits mensuels:.....	23
1- Bassin versant de l'Ourika: .....	23
2- Le bassin de la Ghiraya : .....	24
3- le bassin du N'fis:.....	25

<b>Chapitre III : Etude dynamique des crues et analyse des hydrogrammes.....</b>	<b>27</b>
I- Analyse des hydrogrammes des crues :.....	27
1- Le bassin versant de l'Ourika:.....	27
2- Le bassin versant de la Ghiraya:.....	29
3- Le bassin versant du N'fis:.....	31
Conclusion .....	33
II- Les temps de base et les temps de montée des crues: .....	34
a- Le bassin versant de l'Ourika .....	34
b- Le bassin versant de la Ghiraya .....	35
c- Le bassin versant du N'fis .....	36
Conclusion .....	36
III- Répartition mensuelle et saisonnière des crues : .....	37
a- Le bassin versant de l'Ourika .....	37
b- Le bassin versant de la Ghiraya .....	37
c- Le bassin versant du N'fis .....	38
IV- Vitesses de propagation des crues de l'oued N'Fis.....	39
<b>Chapitre IV : Analyse statistique des crues.....</b>	<b>42</b>
I- Ajustement de la loi de Gumbel :.....	42
1- Définitions .....	42
2- Ajustement de la loi .....	43
Conclusion .....	45
II- Ajustement d'autres lois mathématiques aux débits de crues.....	45
II- Estimation des probabilités des crues : .....	53
1- Bassin versant de l'Ourika:.....	53
2- Bassin versant de la Ghiraya: .....	53
3- L'oued N'fis .....	54
Conclusions.....	54
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>55</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>56</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

Dans l'histoire, le Maroc a connu des crues tristement mémorables par leurs effets destructifs et mortels. La crue de Sefrou le 25 septembre 1950 par exemple où la ville a été inondée avec une lame d'eau de 6 m de hauteur faisant une centaine de victimes; ou celle qui a ravagé la Vallée du Ziz le 5 novembre 1965 laissant 25000 habitants sans abri et qui a permis de déclencher un élan de solidarité sans précédent entre le peuple marocain tout entier et ses frères de Tafilalet et qui a accéléré la réalisation du Barrage Hassan Addakhil ; ou encore celle de la Moulouya survenue le 23 mai 1963 et qui était d'une telle violence qu'elle a emporté l'assise rive gauche du barrage Mohammed V (la crue avait un débit de pointe de 7200 m<sup>3</sup>/s et un volume de 570 millions de m<sup>3</sup> soit l'équivalent de la capacité de la retenue). Et enfin peut-on oublier la célèbre crue qui a touché les bassins versants du Haut Atlas de Marrakech le 17 août 1995. C'est à la suite de cette crue que l'attention a été attirée sur cette région avec la nécessité de bien étudier les phénomènes de crues en vue de la prévision et la protection.

Notre région d'étude est formée des bassins versants du N'Fis, de la Ghiraya et de l'Ourika. Elle couvre une superficie d'environ 2000 km<sup>2</sup> dans la rive gauche d'Oued Tensift. Cette région est convoitée pour ses atouts naturels et touristiques. Mais elle est vulnérable à d'importants risques naturels sous différents aspects : Les crues, l'érosion, glissement des terrains...etc. Ceci à cause du climat et de la géomorphologie de la région qui offrent un environnement propice aux pulsations brutales des cours d'eau et les processus d'érosion qui s'en suivent. Notre étude s'intéressera justement au risque des crues qui sont redoutables dans cette région.

L'organisation du travail sera articulée autour de quatre grands axes :

- Analyse géomorphologique des bassins versants en y traitant la forme, les pentes, la géologie, le réseau hydrographique et le couvert végétal.
- Analyse du régime pluviométrique et hydrologique des bassins versants.
- Caractérisation et étude dynamique des crues des oueds par l'analyse des hydrogrammes des crues et voir l'impact du milieu physique des bassins versants sur la forme de ces hydrogrammes.
- Analyse statistique des crues pour la prévision et la protection. Ceci par l'ajustement de certaines lois mathématiques en vue de calculer les débits des crues de certaines périodes de retour ainsi que les fréquences et les probabilités de certaines pointes de crues.

## Chapitre I : Situation géographique et analyse géomorphologique

### I- Le bassin versant de l'Ourika :

#### 1- Situation géographique

La vallée de l'Ourika est l'un des plus célèbres sites touristiques du Maroc, située à 35 Km de Marrakech. Le bassin versant de l'oued se trouve entièrement dans le Haut Atlas de Marrakech entre les bassins versants de la Ghiraya et du N'fis (fig.1). C'est un bassin montagneux situé entre les latitudes 31° et 31°21' Nord et les longitudes 7°30' et 7°60' Ouest. (Saidi M. E., Agoussine M. et Daoudi L., 2006,)

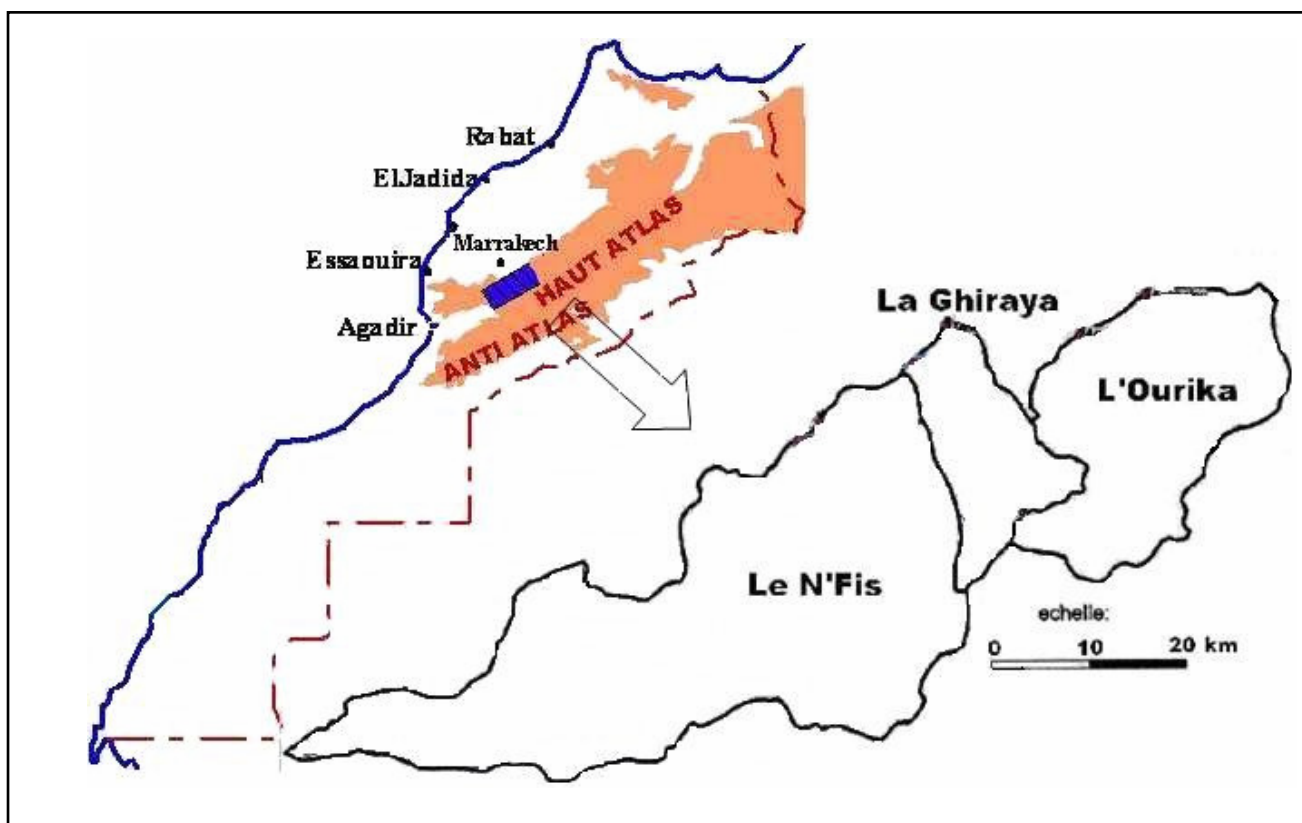


Fig.1 : Situation géographique des bassins versants du N'Fis, de la Ghiraya et de l'Ourika

#### 2- La morphologie et les reliefs

Le bassin versant de l'Ourika couvre une superficie de 503 Km<sup>2</sup> avec un périmètre de 104 Km. La figure 2 représente les tranches d'altitudes comprises entre 1070 m à l'exutoire et 4001 m au point culminant du bassin. L'altitude moyenne est d'environ 2550 m. Cette valeur est proche de la valeur de l'altitude médiane tirée de la figure 3, car la courbe hypsométrique est régulière. La pente moyenne du bassin versant est de l'ordre de 6,9 % selon l'agence de bassin hydraulique de Tensift.

Pour l'indice de compacité de Gravelius ( $K_c = 0,28 P / \sqrt{S}$ ), il est de l'ordre de 1,3. Il signifie que géométriquement, le bassin est trois fois plus long que large. C'est une compacité qui peut permettre un rassemblement rapide des eaux de ruissellement vers l'exutoire.

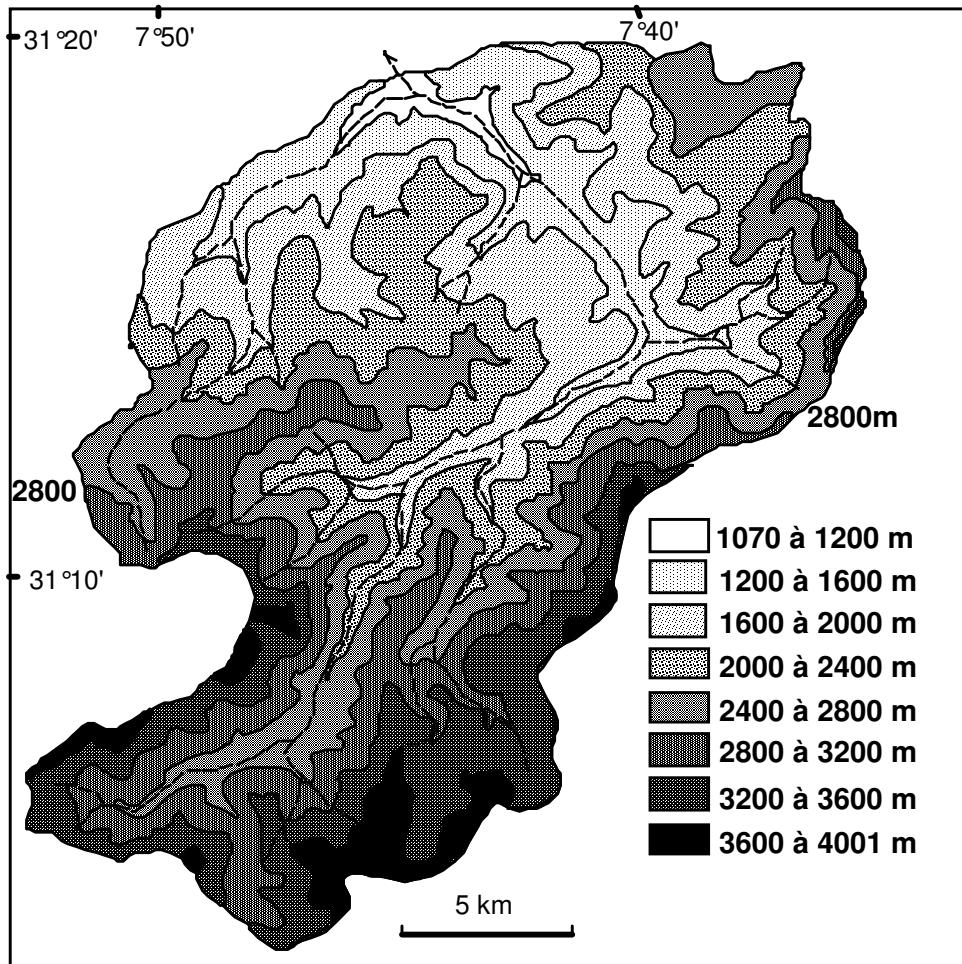
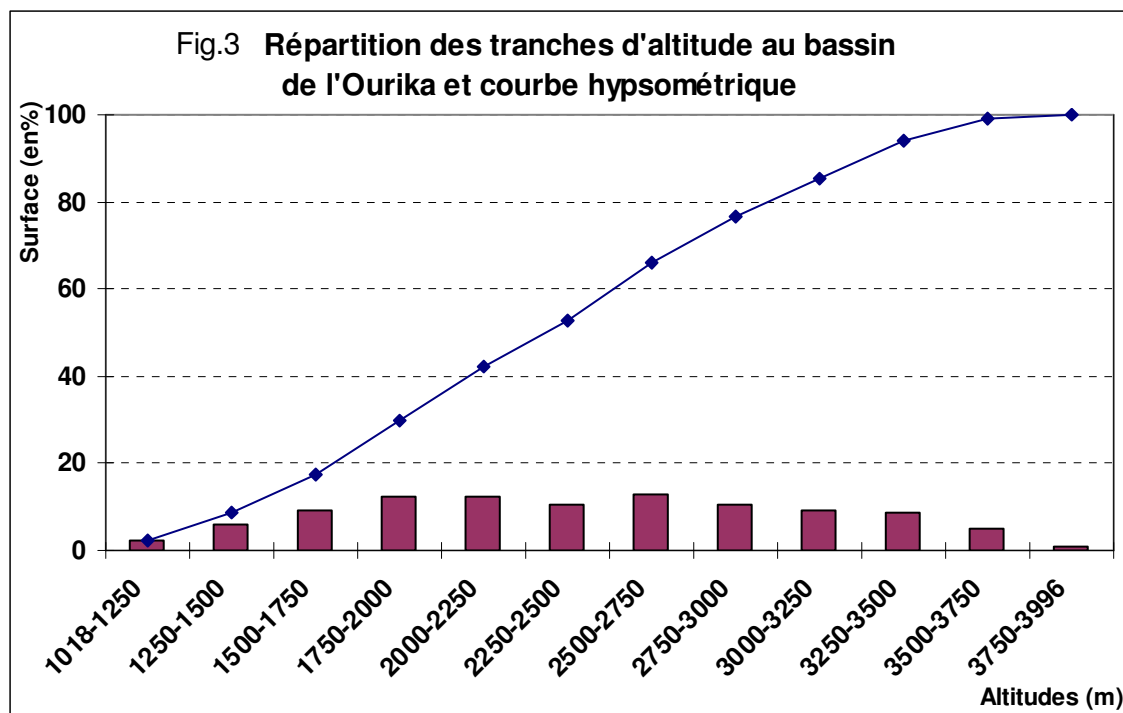


Fig. 2 : La carte hypsométrique du bassin versant de l'Ourika (saidi 2003)



### 3- Géologie générale et lithologie :

Sur le plan géologique le bassin versant offre deux grands types de faciès :

- Une partie amont située à des altitudes supérieures à 2000 m constitués de roches magmatiques et métamorphiques qui constituent le socle de la chaîne atlasique. On y rencontre des roches plutoniques (notamment des granites et granodiorite), des roches volcaniques (andésites, rhyolites,...etc.) et des faciès métamorphiques (gneiss et migmatites).
- Une partie septentrionale: située à des altitudes inférieures à 2000 m, composée des dépôts permotriasiques et quaternaires plus tendres. La lithologie du permotrias est composée d'un faciès Nord sub-atlasique formé de conglomérats, grés et siltites ; et d'un faciès Sud du haut plateau, formé essentiellement de siltites argileuses et localement des grés massifs. (Fig.4).

La lithologie du bassin versant est donc dans l'ensemble assez imperméable. Selon les chiffres de l'agence de bassin hydraulique de Tensift, 6% des sols y sont perméables, 39% semi-perméables et 55% imperméables. Cette lithologie fait croître les risques d'inondations ; elle favorise une augmentation des eaux de ruissellement mobilisées par les cours d'eau principaux et le développement d'importantes crues.(selon l'ABHT)

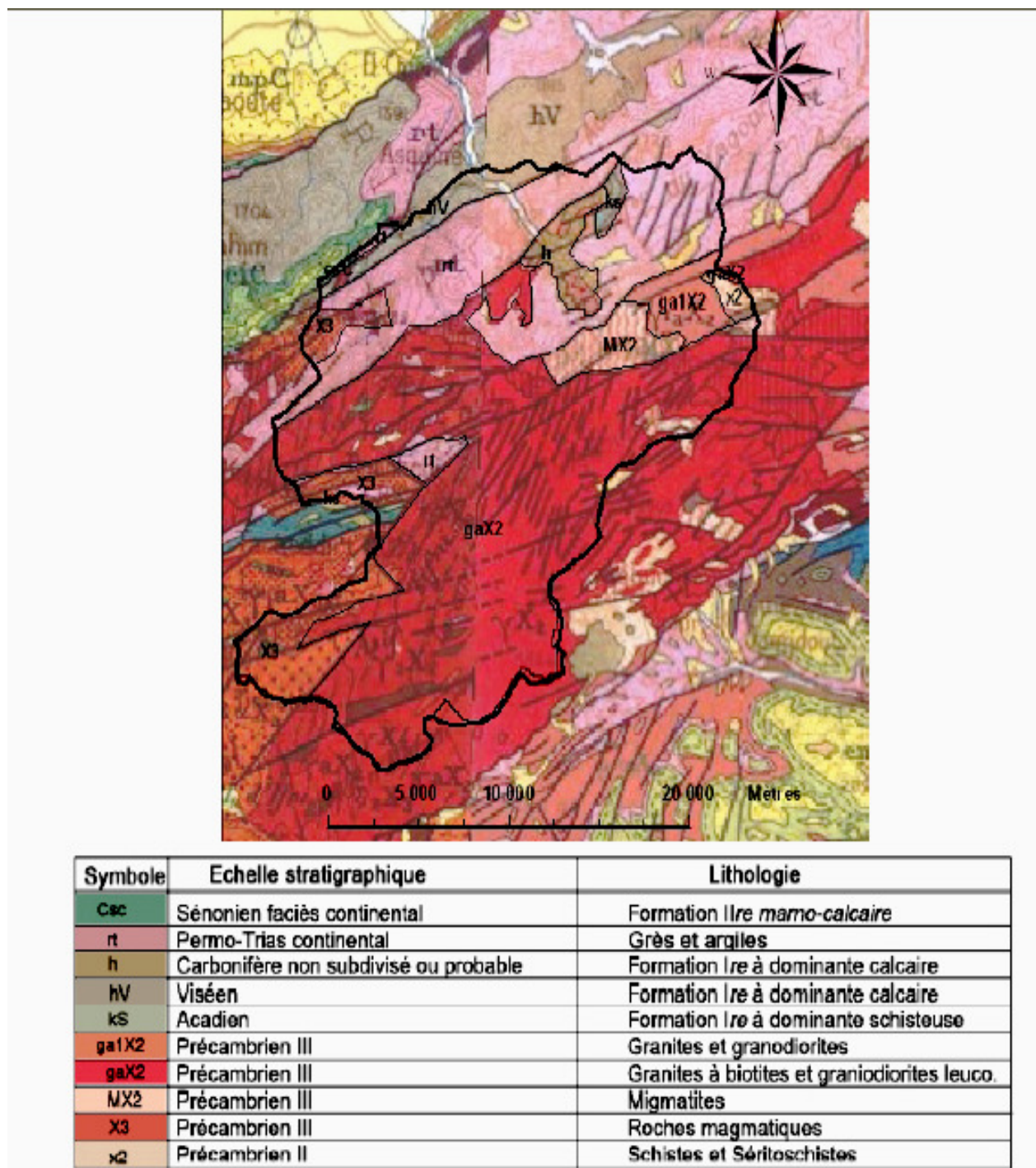


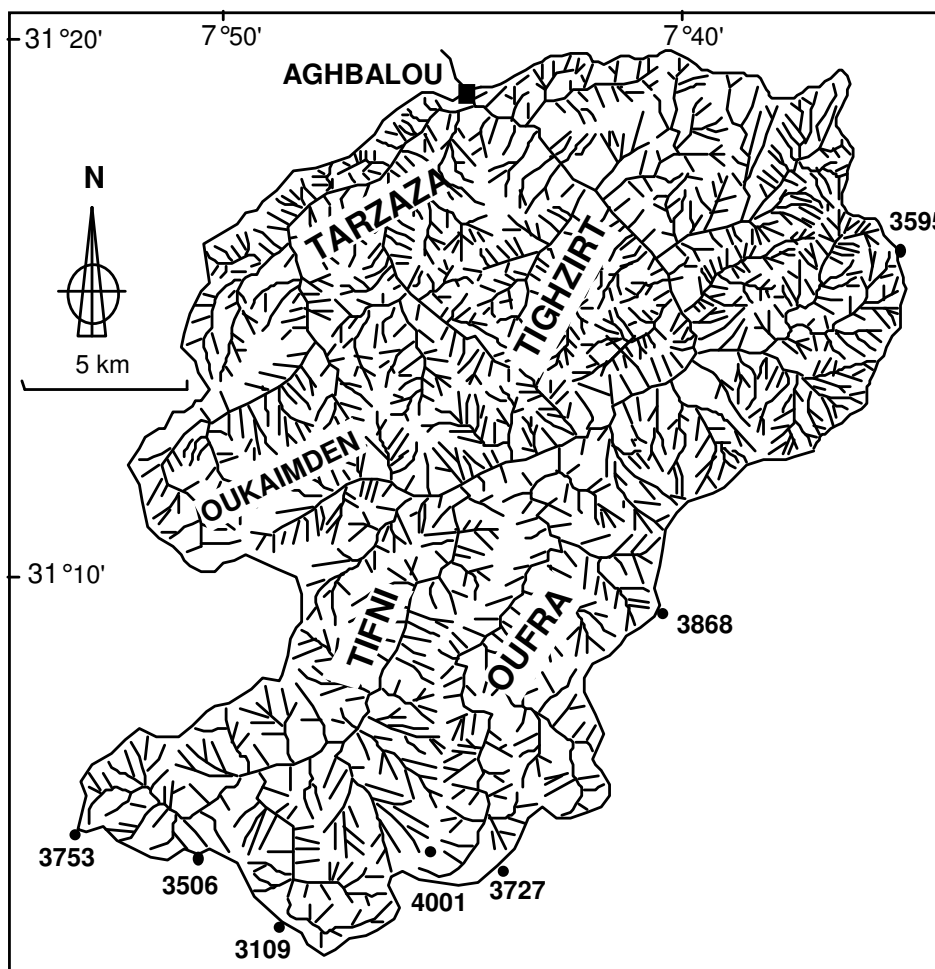
Fig.4: La carte géologique du bassin versant de l'Ourika  
(Extraite de carte géologique de Marrakech au 500 000è)

#### 4- Le réseau hydrographique

L'Oued Ourika est un affluent de oued Hadjer, lui-même affluent de Tensift sur sa rive gauche. La longueur de l'Ourika de ses sources à l'exutoire du bassin versant à Agbalou est de l'ordre de 45.5 Km (Fig.5).

Le réseau hydrographique du bassin de l'Ourika est assez dense et bien ramifié (carte 4), et les principaux affluents du cours principal étant :

- Assif N'oufra: en rive droite qui prend naissance à une altitude de 3800 m.
- Assif N'Tifni: en rive droite appelé AKSOUAL à sa naissance à une altitude de 3800 m environ.
- Assif Tarzaza: en rive gauche dont la source est à 3600 m environ, oued très pentu ce qui explique ces crues violentes causant souvent des dégâts importants.(de l'ABHT)



Carte 5 : Le réseau hydrographique du bassin versant de l'Ourika (Saidi 2006)

### 5- Le climat global et le couvert végétal :

Le bassin versant de l'Ourika est assez bien arrosé par les eaux pluviales grâce à son exposition aux perturbations pluvieuses en provenance de l'océan atlantique.

La température moyenne fluctue, à l'échelle annuelle, entre 20.3°C et 15.9°C. La moyenne étant de 18°C.

A l'échelle mensuelle les mois de juin, juillet et août connaissent les plus hautes températures de l'année avec respectivement des valeurs moyennes de 21,1 °C, 26,9 °C et 26,6 °C.

Le climat est par ailleurs influencé par l'existence des vents secs et chauds. Le chergui souffle de l'Est, généralement en août et septembre. (Saidi M. E., Agoussine M. et Daoudi L., 2006).

A cause de terrains accidentés avec des reliefs imposants et des formations lithologiques cristallines qui affleurent sur une grande partie du bassin, la végétation est limitée à quelques secteurs sous forme des forêts, essentiellement du Chênes verts. On peut aussi citer l'existence des Vergers de pommiers et de noyers qui se trouvent le long de la vallée en colonisant les terrasses alluviales.

## ***II- Le bassin versant de la Ghiraya:***

### **1- Situation géographique**

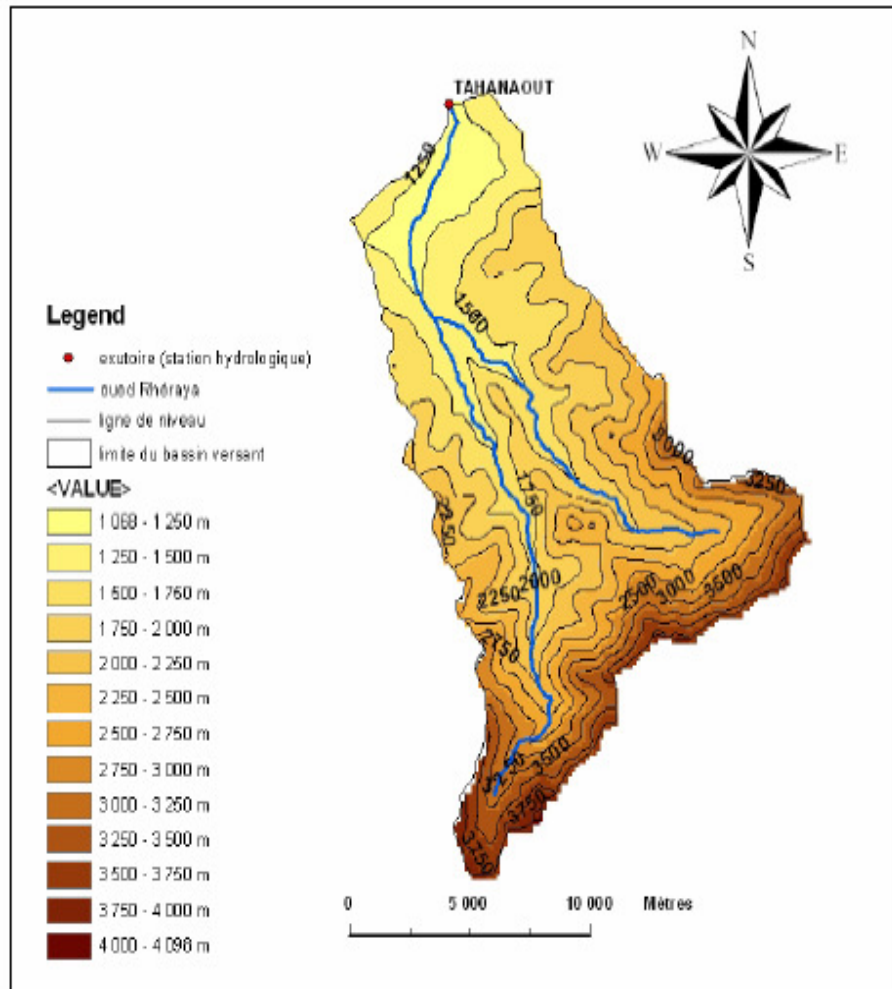
Le bassin versant de la Ghiraya est situé dans le Haut Atlas de Marrakech, entre les latitudes 30°10' et 30°20', et les longitudes 7°40' et 8° Ouest. Il est localisé à une quarantaine de kilomètres au sud de Marrakech, dans le massif de Toubkal. Il comprend une grande partie des plus hauts sommets de l'Afrique du Nord, en particulier le plus élevé d'entre eux, le Jbel Toubkal (4165 m). Son exutoire principal situé à quelques Kilomètres au Sud de la ville de Tahanaout.

Ce bassin versant est limité au Nord par la plaine de Haouz, au Sud par le bassin d'Assif Tifnout (Haut Souss), à l'Est par le bassin de l'Ourika et à l'Ouest par celui du N'fis.(selon Ouagga,2005).

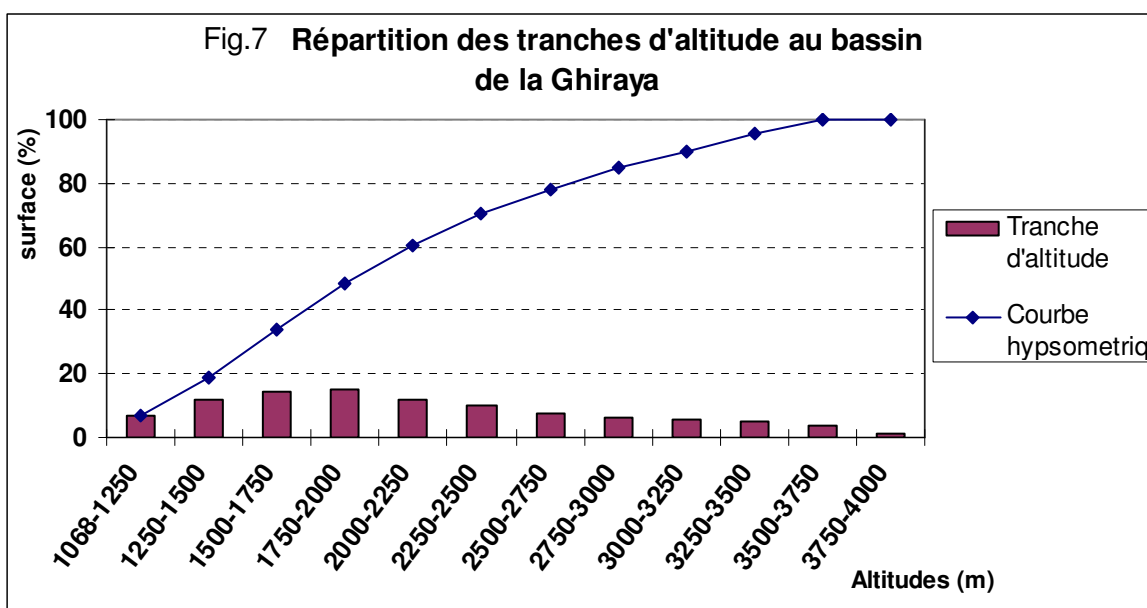
### **2- La morphologie**

Le sous bassin du Ghiraya couvre une surface de 225 Km<sup>2</sup>, avec un périmètre de 78 km. Les altitudes y varient entre 1068 et 4098 m avec une moyenne de 2154 m et une altitude médiane qui varie de 1750 à 2000 m (fig.6 et fig.7). On peut expliquer l'infériorité de l'altitude médiane par rapport à celle moyenne par l'abondance des terrains bas.

La pente moyenne du bassin versant est de l'ordre de 7,2 %. Elle est proche de celle du bassin de l'Ourika mais l'indice de compacité est ici plus grand ( $Kc = 1,46$ ). Cet indice confère au bassin une forme allongée et des temps de concentration des eaux de ruissellement plus grands.



Carte 6 : La carte hypsométrique du bassin versant de la Ghiraya (Juillerat 2004)



### **3- Géologie et lithologie du bassin versant :**

Sur la carte géologique du bassin de la Ghiraya (fig.8) Trois zones se distinguent :

La zone sub-atlasique qui couvre le tiers nord du bassin et qui est composée d'un socle rigide précambrien et Paléozoïque grésoschisteux et calcaire. Le socle est apparent dans les gorges de Moulay Brahim au nord du bassin où se trouve l'exutoire. Sur ce socle, une importante couverture mésozoïque au faciès détritique rouge fait de conglomérats, grès et siltstones du Trias est encore présente. C'est la roche tendre dans laquelle est creusée le bassin d'Asni actuel. Au nord et au sud du bassin d'Asni, un faciès carbonaté et marneux plus dur constitue les plateaux de Kik et Tihallatine.

Cette zone sub-atlasique constitue le promontoire du versant nord du Haut Atlas, c'est la première barrière dominant la plaine du Haouz. C'est une formation présente au sein de la plupart des bassins versants atlasiques.

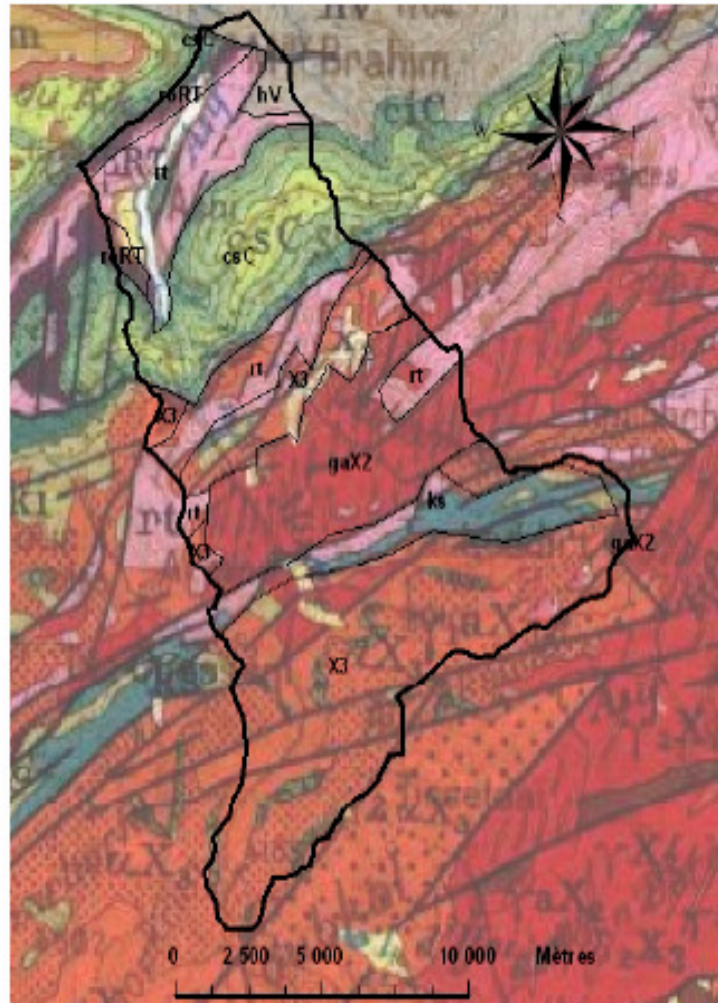
Plus au sud, le horst de Ghiraya est composé de matériaux rocheux primaires et permotriasiques. Il constitue un bloc élevé par rapport à la zone sub-atlasique et incliné vers l'ouest. Les matériaux permotriasiques peuvent être observés au niveau des deux branches du Y que forme ce bassin : les vallées d'Imlil et d'Imennane. Ces vallées sont constituées de dépôts (des basaltes doléritiques) reposant sur une surface anté-permotriasique fossilisée (conglomérats et grès).

Plus au sud dans ces Vallées, les matériaux primaires précambriens constitués surtout de granites et de laves (andésites) sont visibles. Enfin, le bloc le plus élevé est la zone axiale qui forme les hauts sommets du bassin. (Chaponniere 2005)

Dans l'ensemble, les faciès rencontrés correspondent à des calcaires et marnes de l'éocène reposant sur une barre de calcaire Turonien, et des bancs gypseuses métriques sont très fréquents au dessous du Turonien.

L'épaisseur de l'ensemble de la série Eo-crétacé dépasse 200 m pour passer ensuite aux argiles Permo-Triasiques.

Les roches dominantes sont les schistes compacts durs. Cette lithologie globale laisse supposer que les sols sont peu perméables (L'ABHT chiffre les sols perméable à 26%, 15% de sols semi-perméables et 59% de sols imperméables).



Symbole	Echelle stratigraphique	Lithologie
csC	Sénonien faciès continental	Formations II marno-calcaire
roRT	Trias	Basaltes doléritiques
rt	Permo-Trias continental	Grès et argiles
hV	Viséen	Formations I à dominante calcaire
ks	Acadien	Formations I à dominante schisteuse
gaX2	Précambrien III	Granites à biot. et granodiorites leuco.
X3	Précambrien III	Roches magmatiques

Fig.8: La carte géologique du bassin versant de la Ghiraya (Chaponniere 2005)

#### 4- Réseau hydrographique

L'oued Ghiraya est constitué par la confluence d'Assif Imennane et Assif N'Ait Mizaine qui prend naissance dans le Hautes Atlas à environ 3600 m d'altitude.

Le réseau hydrographique (Fig.9) montre une ramification plus dense vers l'amont.



La distribution spatiale de ces formations est du essentiellement à l'effet de l'exposition, à l'altitude et à la nature du sol.

### **III- Le bassin versant du N'fis:**

#### **1- Situation géographique**

Le bassin versant du N'fis est le plus étendu du Haut Atlas de Marrakech. Il est localisé entre 30,5 et 31,22° Nord et entre les longitudes 7°,55 et 8°,40 Ouest.

Il se divise en trois sections :

- Une section « aval » entre le Haouz et les cuvettes des Goundafa ;
- Une section « moyenne » comprenant les cuvettes des Goundafa, correspondant plus moins au synclinal permo-triasique dit du N'fis ;
- Une section « amont » qui abandonne le synclinal et se dirige vers l'Ouest à travers le massif cambrien schisteux et calcaire jusqu'au massif granitique du Tichka.

(El wahidi, 2004).

#### **2- La morphologie et l'hypsométrie du bassin :**

Le bassin versant du N'fis couvre une superficie de 1270 Km<sup>2</sup> avec un périmètre de 200 Km. Il présente une topographie très accidentée (55% du bassin a une pente supérieure à 50% (de l'ABHT) De point de vue répartition altitudinale (Fig.10), l'altitude moyenne est de 2300 m et l'altitude médiane (correspondant sur la courbe hypsométrique au point d'abscisse 50% de la surface totale) varie entre 2000 m et 2250 m (fig.11). Elle coïncide avec la valeur de l'altitude médiane, ce qui témoigne d'une certaine régularité hypsométrique.

Le coefficient de compacité est ici de l'ordre de 1.57. C'est le bassin le plus allongé des trois. Les temps de concentration des eaux seraient donc plus importants.

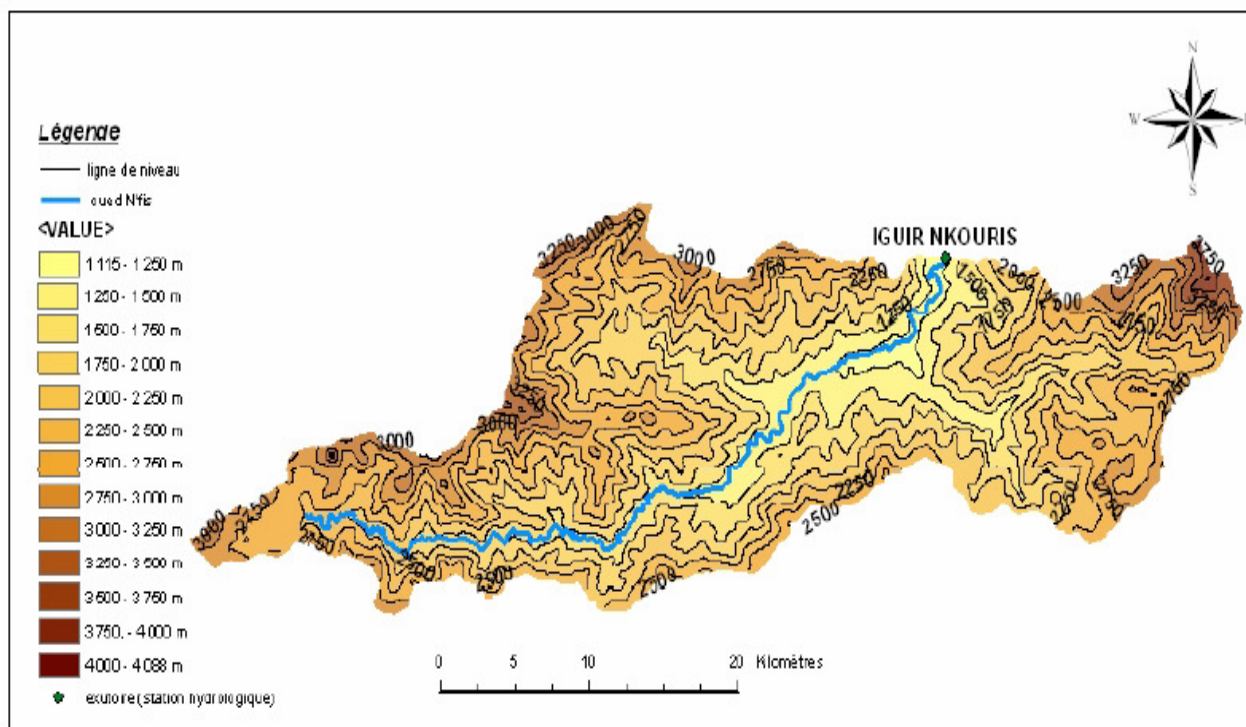
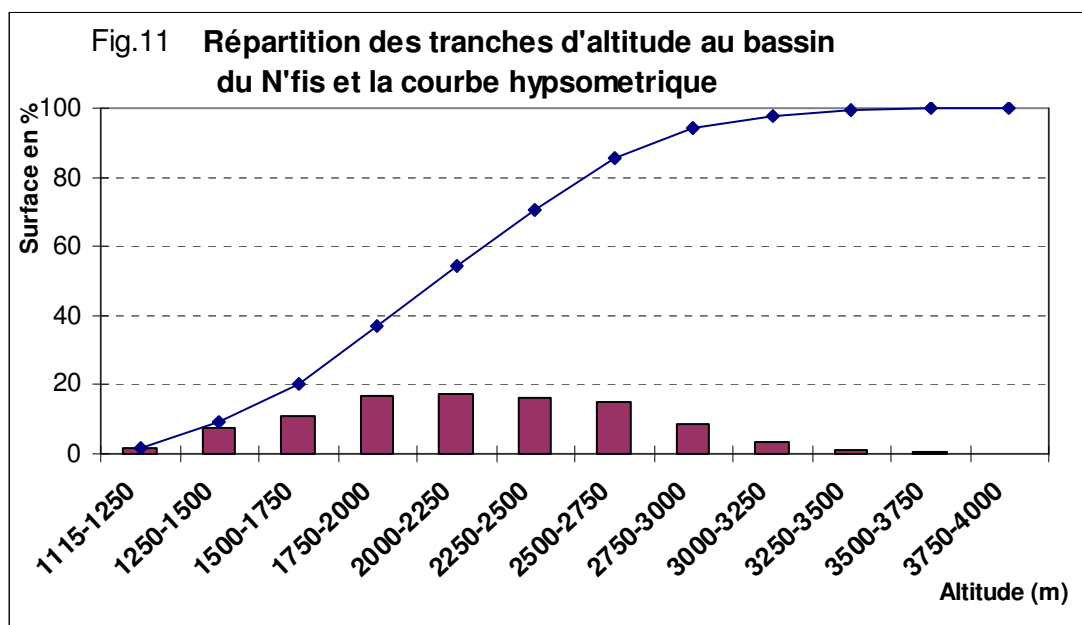


Fig.10: La carte hypsométrique du bassin versant du N'fis (Juillerat. 2004)



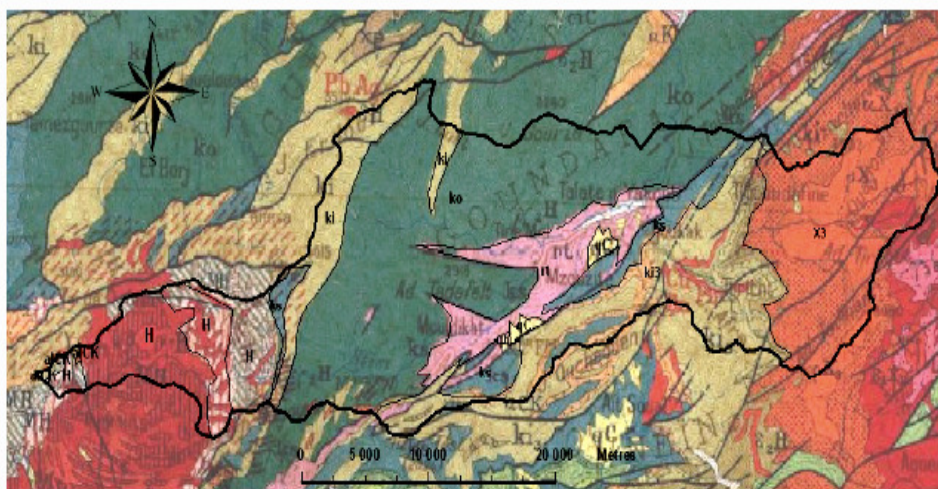
### 3- La géologie générale et lithologie :

La partie montagneuse du bassin du N'fis est constituée essentiellement par une masse importante de schistes d'âge primaire et de calcaires. On note au milieu de ce secteur de grandes cuvettes Permo-triasiques (Talat N'yaakoub, Tagoundaft, ...etc.) caractérisées par une dominance de grés et

d'argiles. Les hauts massifs granitiques sont situés au SW (massif de Tichka) ; suivis en haut vers la source du N'fis par les formations calcaires très dures.

On peut dire que le bassin versant du N'fis est essentiellement schisteux. Le reste est reparti entre les grès Permo-triasiques au niveau des cuvettes, des calcaires et le granite qui domine le plateau de Tichka (carte 9); (El wahidi, 2004).

Comme pour l'Ourika et la Ghiraya, les terrains imperméables sont les plus dominants ici avec une répartition de 20% de sols perméables, 9% de sols semi-perméables et 71% de sols imperméables toujours selon l'ABHT.



Symbole	Echelle stratigraphique	Lithologie
qC	Quaternaire moyen et ancien	Formation de plaine IV et III
r1	Permo-Trias continental	Grès et argiles
H	Orogénie hercynienne	Roches magmatiques
alCK	Orogénie hercynienne	Tufs
ko	Cambro-Ordovicien	Formations   à dominantes schisteuse
ks	Acadien	Formations   à dominantes schisteuse
ki3	Cambrien inférieur à moyen	Formations   à dominantes calcaire
ki	Cambrien inférieur	Formations   à dominantes schisteuse
X3	Precambrien III	Roches magmatiques

Fig.12 : La carte géologique du bassin versant du N'fis (Juillerat 2004).

#### 4- Le réseau hydrographique

L'oued N'fis constitue le principal affluent rive gauche de Tensift. Sur la rive droite du N'fis se jettent les affluents suivant : Azzeden, Imigdal et l'Agoundis, alors que sur sa rive gauche, on trouve deux affluents importants :

- Ougdemt : affluent le plus important qui prend sa source dans les sommets calcaires géorgiens (Tizi N'oumslama) ;
- Oued Amezmiz : qui rejoint le N'fis au niveau du barrage Lalla Takerkoust.

(El wahidi, 2004).

Le réseau hydrographique est très ramifié et bien hiérarchisé. C'est un caractère des bassins versants en zone montagneuse (fig.13).

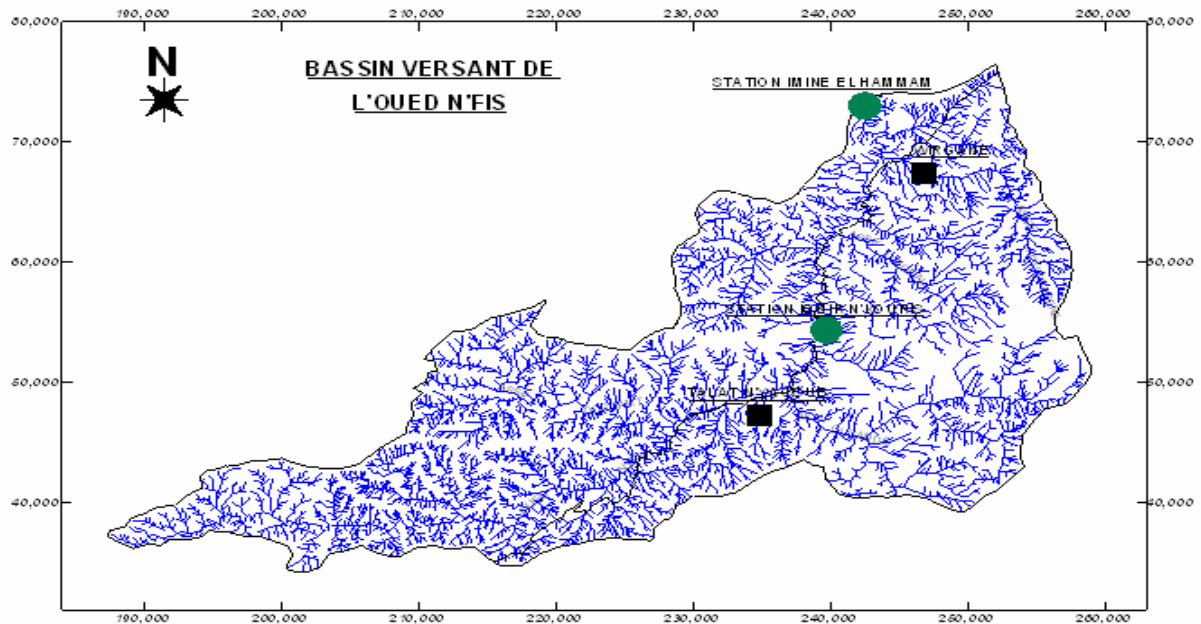


Fig.13 : Réseau hydrographique du bassin versant du N'fis (ABHT).

### 5- Le climat et la végétation :

Le bassin versant du N'fis à une pluviométrie moyenne de 426.4 mm par an, et les précipitations maximales annuelles atteignent 700 mm dans les hautes montagnes. De point de vue température, les mesures prises au barrage de Lalla Takerkoust montrent une température moyenne de 18,6 °C, avec une température maximale absolue de 46°C et une température minimale absolue de -7.5°C. Les mois les plus froids sont décembre et janvier et les plus chauds sont ceux de juillet et août.

La végétation du bassin est influencée essentiellement par la température et l'altitude. Selon El wahidi, 2004. Les hautes températures du piémont assure les conditions favorables au développement des espèces steppiques herbacées (Jujubier, Doun...etc.).

- Le froid des hautes altitudes favorise le développement des espèces herbacés (Bulplévrés épineux...etc.) ;
- Des espèces à végétation ligneuse et arborée.

#### IV- Comparaisons morphologiques :

Le rectangle équivalent est établi à partir de la longueur et la largeur des bassins versants pour pouvoir comparer ces bassins entre eux du point de vue morphologique.

Les dimensions du rectangle sont calculées à partir de la surface et l'indice de compacité du bassin.

Sa longueur est donnée par  $L = Kc\sqrt{S} / 1.12 (1 + \sqrt{1 - (1.12/Kc)^2})$ ,

sa largeur est:  $l = Kc\sqrt{S} / 1.12(1 - \sqrt{1 - (1.12/Kc)^2})$ .

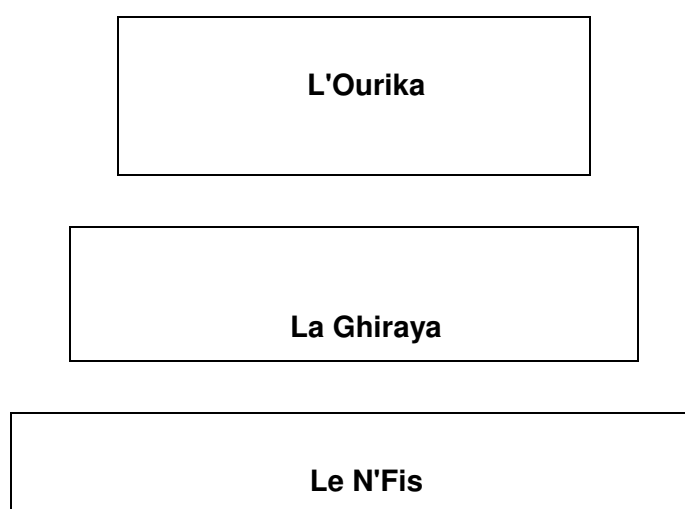


Fig.14 Allures des rectangles équivalents des bassins versants de l'Ourika, de la Ghiraya et du N'Fis

Le rectangle équivalent du N'fis est le plus allongé que l'Ourika et la Ghiraya (figure 14).

Ceci, confirme les valeurs des indices de compacité de ces bassins versants qui sont successivement: 1.57, 1.3 et 1.46.

Ces indices indiquent que le N'fis est cinq à six fois long que large. La Ghiraya est quatre à cinq fois long et la longueur du bassin de l'Ourika est équivalente à trois fois sa largeur.

Le rassemblement des eaux de ruissellement sera donc plus rapide sur le bassin de l'Ourika. Ceci aura un impact sur l'importance hydrologique de ce bassin versant

## Chapitre II : Analyse des régimes pluviométriques et hydrologiques

### I- Régimes mensuels des débits:

Les débits moyens mensuels sont obtenus en faisant la moyenne arithmétique des débits journaliers de chaque mois.

La moyenne sur la période d'observation étalée de 1970-71 à 2003-04 d'un mois donné donne le débit moyen mensuel interannuel de ce mois.

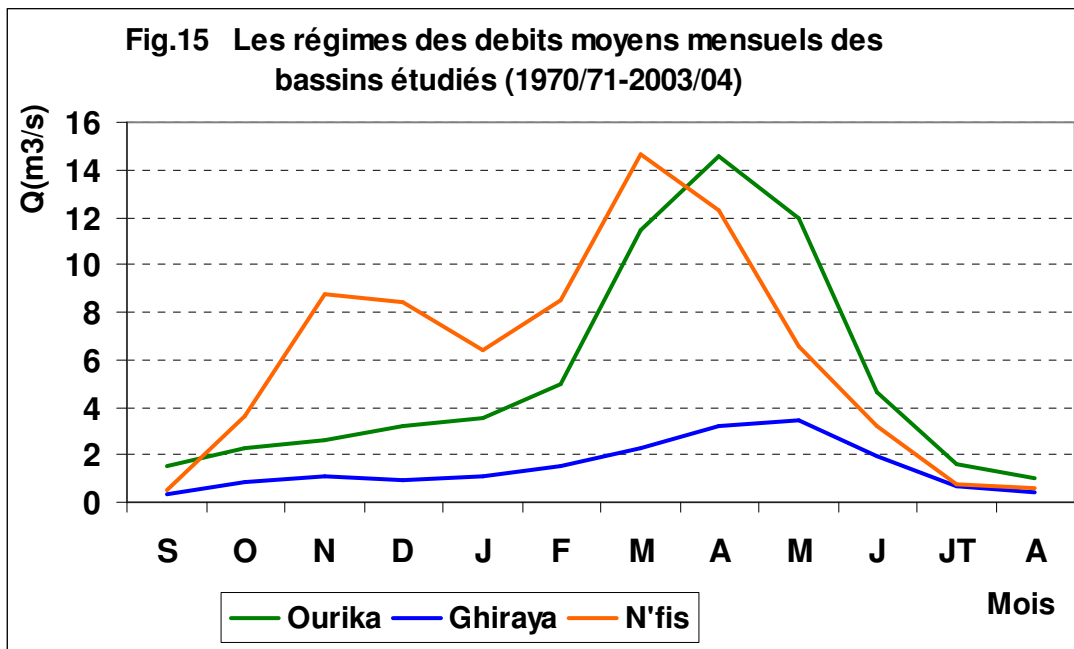
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Ourika	1,49	2,27	2,59	3,22	3,55	4,95	11,46	14,56	11,98	4,67	1,58	1,01
Ghiraya	0,335	0,822	1,055	0,905	1,061	1,479	2,249	3,216	3,423	1,952	0,661	0,404
N'fis	0,541	3,659	8,741	8,410	6,393	8,545	14,647	12,281	6,541	3,197	0,741	0,560

Tableau 1: les débits moyens mensuels interannuels en m<sup>3</sup>/s des trois bassins (1970/71-2003/04).

La figure 15 illustre la variation des débits mensuels pour les trois bassins versants étudiés.

Pour N'fis, le régime pluviométrique est caractérisée par un premier pic en novembre et second pic plus important en avril et mai. Le premier maximum de novembre est complètement d'origine pluvial alors que celui du printemps (avril et mai) est un écoulement qui résulte de la combinaison des pluies et de la fonte des neiges. C'est un régime mixte de type pluvio-nival.

Concernant l'Ourika et la Ghiraya, on constate que leurs débits maximums ont lieu uniquement au printemps. C'est un régime simple avec un seul pic. Ce maximum est également provoqué à la fois par les pluies printanières que par la fonte des neiges hivernales. Les sont par ailleurs plus faibles pour la Ghiraya. C'est un bassin assez petit et sa surface de réception est assez restreinte (225 km).



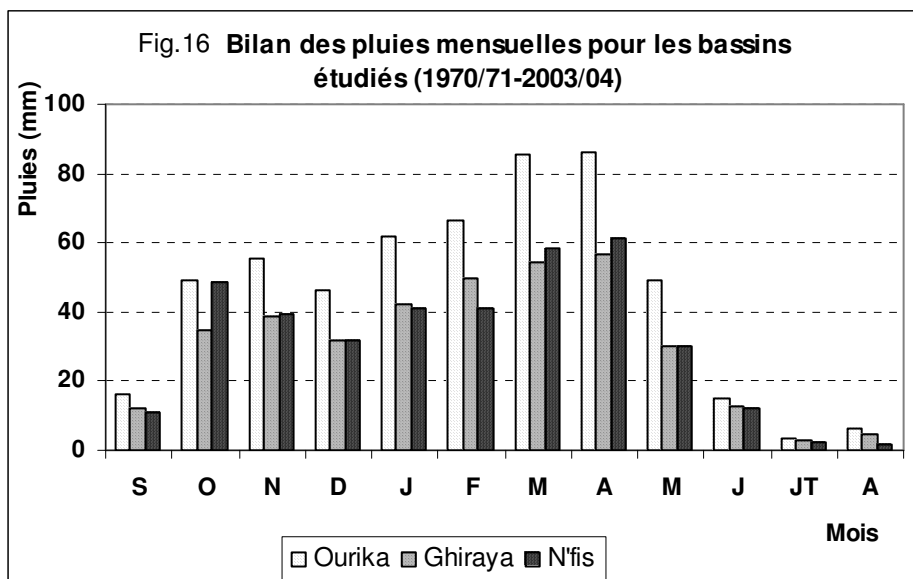
## II- Régimes mensuels des pluies:

Par manque de stations pluviométriques couvrant la totalité des bassins versants et une longue période, on s'est basé que sur les stations des exutoires qui disposent de données satisfaisantes couvrant une assez longue période. Il s'agit d'Aghbalou pour le bassin de l'Ourika, Tahannaout pour la bassin de la Ghiraya et Imin El Hammam pour le bassin du N'Fis.

Les données disponibles sont résumées dans le tableau suivant :

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
<b>Ourika</b>	16,21	48,97	55,35	46,45	61,72	66,36	85,61	86,31	49,32	14,86	3,59	6,49
<b>Ghiraya</b>	12,2	34,7	38,9	31,8	42,1	49,5	54,5	56,8	30,2	12,8	3	4,5
<b>N'fis</b>	11,21	48,75	39,09	32,02	41,22	40,84	58,26	61,18	30,16	12,32	2,15	1,89

Tableau 2: les pluies mensuelles interannuelles sur les trois bassins (1970/71-2003/04)



On remarque que les précipitations mensuelles de l'Ourika sont les plus importantes, suivies par celles du N'fis et de la Ghiraya. Les trois bassins connaissent cependant leur maximum de précipitations pendant le printemps et une grande sécheresse en été malgré les orages fréquents en cette saison.

Un autre pic pluviométrique est visible pour les trois bassins au mois de novembre. C'est un mois qui connaît plus de situations atmosphériques favorables à un temps pluvieux.

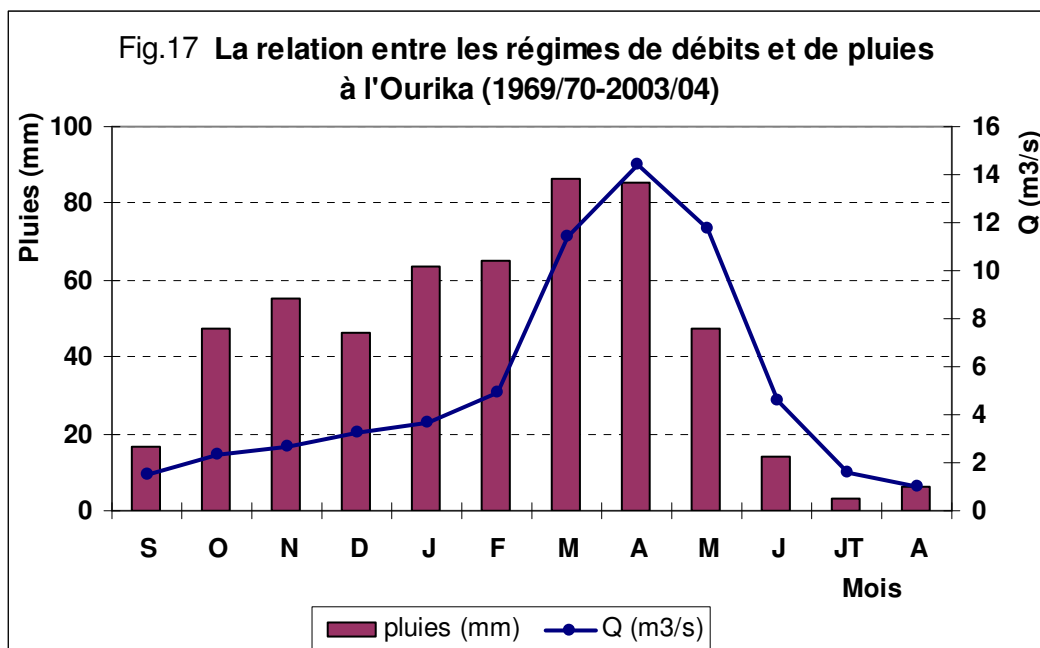
Les grands reliefs du bassin de l'Ourika et la bonne exposition de la plupart de ses versants aux perturbations en provenance de l'océan atlantique lui a permis de jouir d'une plus grande pluviosité.

### III- Relation entre les pluies et les débits mensuels:

#### 1- Bassin versant de l'Ourika:

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
<b>pluies (mm)</b>	16,66	47,36	55,39	46,26	63,56	65,18	86,27	85,56	47,21	14,31	3,20	6,46
<b>Q (m3/s)</b>	1,466	2,303	2,638	3,213	3,69	4,947	11,39	14,41	11,761	4,589	1,558	0,99

Tableau 3: les pluies et les débits moyens mensuels interannuels à l'Ourika (1969/70-2003/04).



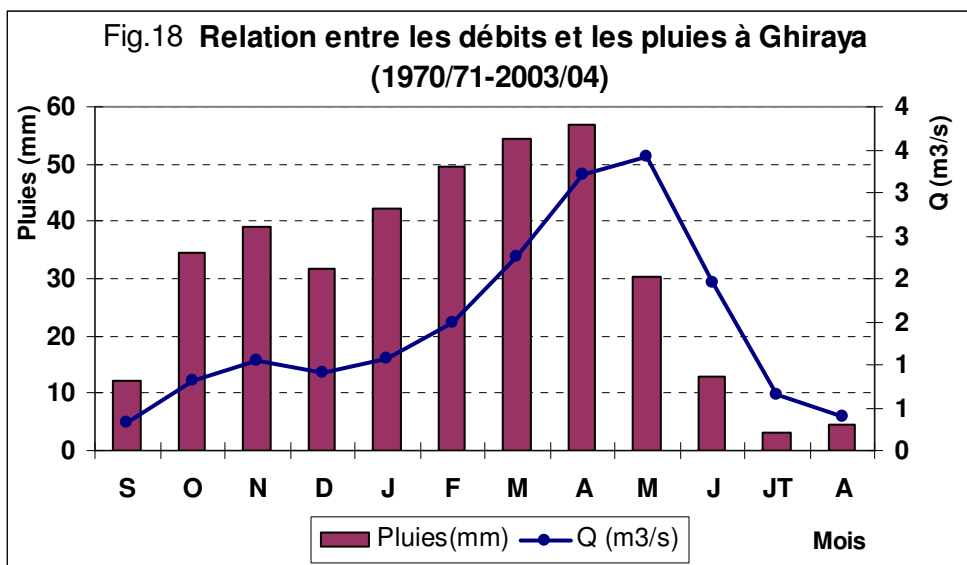
On remarque que la courbe des débits n'est pas complètement calquée sur celle des pluies et il y a un léger déphasage entre les deux courbes : Le maximum pluviométrique est en mars alors que le maximum hydrologique parvient un mois plus tard en avril.

Ceci est du à la rétention nivale en hiver et sa grande fonte au printemps, ce qui renforce l'écoulement pendant cette saison.

## 2- Le bassin de la Ghiraya :

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
<b>Pluies (mm)</b>	12,2	34,7	38,9	31,8	42,1	49,5	54,5	56,8	30,2	12,8	3	4,5
<b>Q (m³/s)</b>	0,335	0,822	1,055	0,905	1,061	1,479	2,249	3,216	3,423	1,952	0,661	0,404

Tableau 4: les pluies et les débits moyens mensuels interannuels à la Ghiraya (1970/71-2003/04).

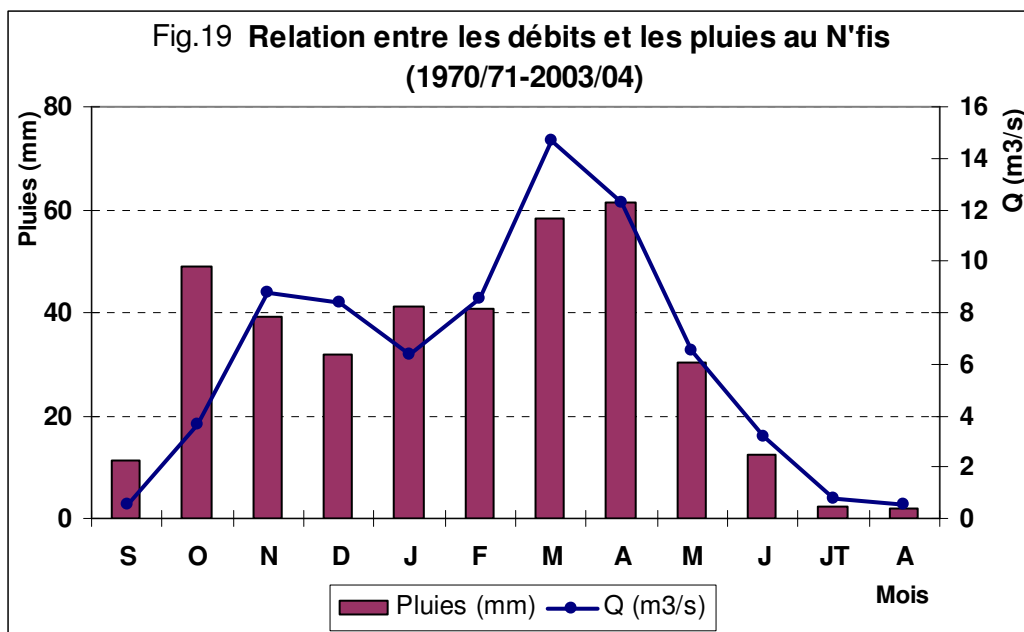


Ici la courbe des débits suit l'évolution de celle des pluies pendant l'automne et l'hiver. Mais comme pour le bassin de l'Ourika, le décalage entre les précipitations et les écoulements mensuels est visible lors du printemps. Le maximum pluviométrique d'avril ne se transforme en maximum hydrologique qu'au mois de mai ou les précipitations sont couplées à la fonte des neiges en plus des débits de base restitués par la nappe phréatique.

### 3- le bassin du N'fis:

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
<b>Pluies (mm)</b>	11,21	48,75	39,09	32,02	41,22	40,84	58,26	61,18	30,16	12,32	2,15	1,89
<b>Q (m3/s)</b>	0,541	3,659	8,741	8,410	6,393	8,545	14,647	12,281	6,541	3,197	0,741	0,560

Tableau 5: les pluies et les débits moyens mensuels interannuels au N'fis (1970/71-2003/04).



Sur le bassin du N'Fis, il y a un temps de réponse du bassin versant d'un mois : Les pluies maximum d'octobre ne constitue un maximum hydrologique à l'exutoire qu'un mois après. La grande superficie de ce bassin en est responsable.

Les deux régimes, pluviométrique et hydrologique, montrent deux maximums distincts dans l'année. Un en automne et l'autre au printemps.

Les régimes hydrologiques des bassins versants étudiés (l'Ourika, la Ghiraya et le N'fis) ne sont donc pas exclusivement liés aux pluies. Leurs imposants reliefs leur permettent de recevoir des chutes nivales. Celles-ci régularisent les débits des cours d'eau en renforçant les écoulements printaniers.

### Chapitre III : Etude dynamique des crues et analyse des hydrogrammes

Selon l'encyclopédie libre "Wikipédia", "Les crues désignent un fleuve qui déborde de son lit après de fortes pluies. Les zones à risque, c'est-à-dire les zones inondables, sont généralement connues et malheureusement trop souvent ignorées.

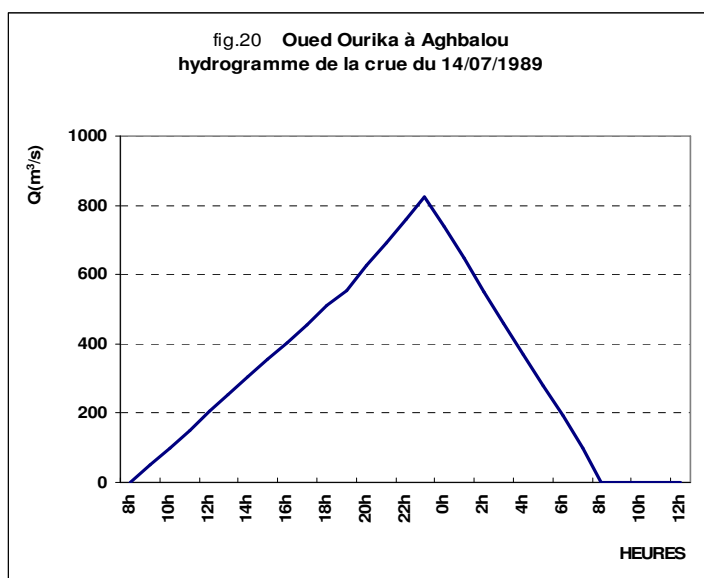
Une crue-éclair est le fait qu'une rivière ou un ruisseau sorte subitement de son lit à la suite de pluies torrentielles, généralement de durée limitée. Ce phénomène est fréquent dans les régions méditerranéennes ou montagneuses."

#### I- Analyse des hydrogrammes des crues :

##### 1- Le bassin versant de l'Ourika:

##### a- La crue du 14 juillet 1989 :

C'est une crue d'été (14 juillet) qui ressemble un peu à la célèbre crue de 1995. Le temps de base était de 23 heures et le débit de pointe fût de l'ordre de 823 m<sup>3</sup>/s. Il a été atteint après un temps de montée de 15 heures. Ce débit de pointe représente à peu près deux fois le débit moyen de la crue. Cette crue de forme aigue avec un fort débit de pointe.



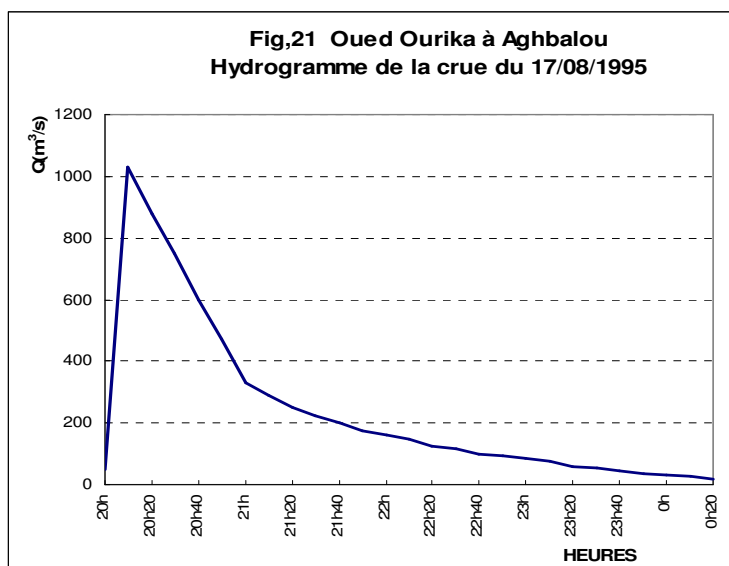
date début	14/07/1989 à 8h
date fin	15/07/1989 à 8h
débit de pointe	823 (m <sup>3</sup> /s)
débit max. moyen	416 (m <sup>3</sup> /s)
débit base avant	1,2 (m <sup>3</sup> /s)
débit base après	1,6 (m <sup>3</sup> /s)
volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	34,42 (m <sup>3</sup> /s)
temps de base	23 (heures)
temps de montée	15 (heures)
coefficient de pointe	2

**b- La crue du 17 août 1995 :**

La figure 21 illustre l'hydrogramme de la célèbre crue du 17 août 1995. Cette crue n'a duré que 3 heures, mais le temps de montée a été particulièrement bref (à peine un quart d'heure). Le débit de pointe a atteint à Aghbalou la valeur de 1 030 m<sup>3</sup>/s et les eaux mobilisées un volume de 3,3 millions de mètre cubes. L'hydrogramme de crue met en relief les caractéristiques d'une crue simple monogénique avec une forte pointe de crue, des temps de base et de montée assez courts et un tarissement prolongé.

Il s'agit donc d'une crue particulièrement grave et dangereuse, car sa soudaineté est exceptionnelle. Le temps de montée d'un quart d'heure ne laisserait aucune chance aux populations et estivants de se protéger et de sauver leurs biens. D'ailleurs les dégâts enregistrés (selon ABHT) étaient assez lourds :

- Pour l'agriculture, 210 ha endommagés et un coût financier de 2,26 Millions de dirhams;
- Les victimes sont officiellement de 289 personnes;
- Les maisons détruites sont au nombre de 194 soit un coût évalué à 11,64 Millions de dh;
- 83 véhicules ont été emportés, soit un coût approximatif de 6,23 Millions de dh;
- 1147 caprins et 1725 bovins ovins perdus (12.57 Millions de dh).

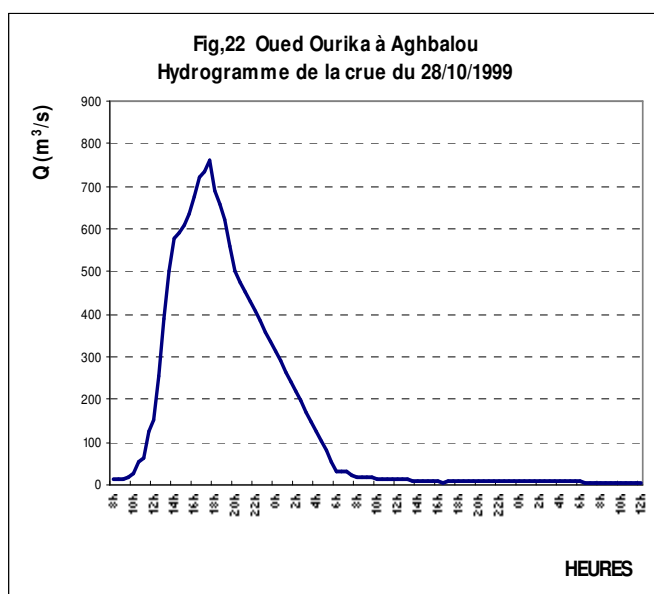
**Tab.7 Caractéristiques de la crue**

date début	17/08/1995 à 20h
date fin	18/08/1995 à 0h
débit de pointe	1030 (m <sup>3</sup> /s)
débit max. moyen	253,5 (m <sup>3</sup> /s)
débit base avant	50 (m <sup>3</sup> /s)
débit base après	30 (m <sup>3</sup> /s)
volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	3,651
temps de base	4 h
temps de montée	0,16 h
coefficient de pointe	4,1

### c- La crue du 28 octobre 1999 :

L'hydrogramme ci-dessous montre que la crue de 28/10/1999 est simple, avec un temps de base assez court et semblable à celui de la crue précédente (23 h). Le temps de montée est ici plus rapide (9 h 30). Le débit de pointe était aussi élevé que les crues précédentes (762 m<sup>3</sup>/s). L'hydrogramme prend ici la forme classique des grandes crues de l'Ourika, à savoir une forme aigue avec une forte pointe de crue, des temps de base et de montée assez courts. Tout cela augmente le danger et les risques des crues de ce bassin.

Pour les dégâts de cette crue, des dizaines d'hectares de terres agricoles ont été endommagés et un coût financier de 1.78 Millions de dh, 15 maisons détruites, 10 caprins et 12 bovins perdus.



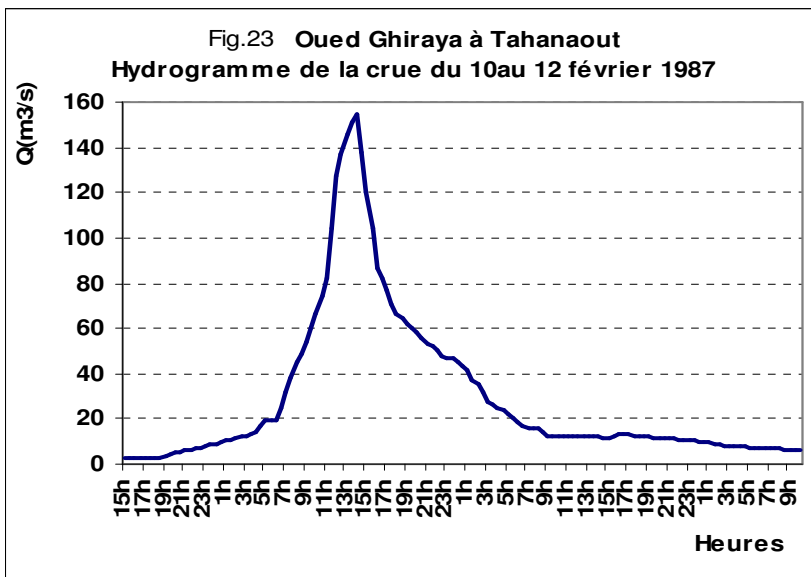
date début	28/10/1999 à 8h
date fin	29/10/1999 à 8h
débit de pointe	762 (m <sup>3</sup> /s)
débit max. moyen	307,17(m <sup>3</sup> /s)
débit base avant	12,72 (m <sup>3</sup> /s)
débit base après	16,46 (m <sup>3</sup> /s)
volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	25,987
temps de base	23,5h
temps de montée	9,5h
coefficient de pointe	2,5

## 2- Le bassin versant de la Ghiraya:

### a- La crue du 10 au 12 février 1987 :

L'hydrogramme de la crue du 10 au 12 février (fig.23) montre un temps de base de 37.5 heures. Le débit de pointe est de 154.9 m<sup>3</sup>/s. Il a été atteint après un temps de montée de 19 heures.

Cette crue a une forme aigue et pointue, ce qui peut augmenter sa gravité, par sa soudaineté et la population ne pourrait pas être avertie à temps.



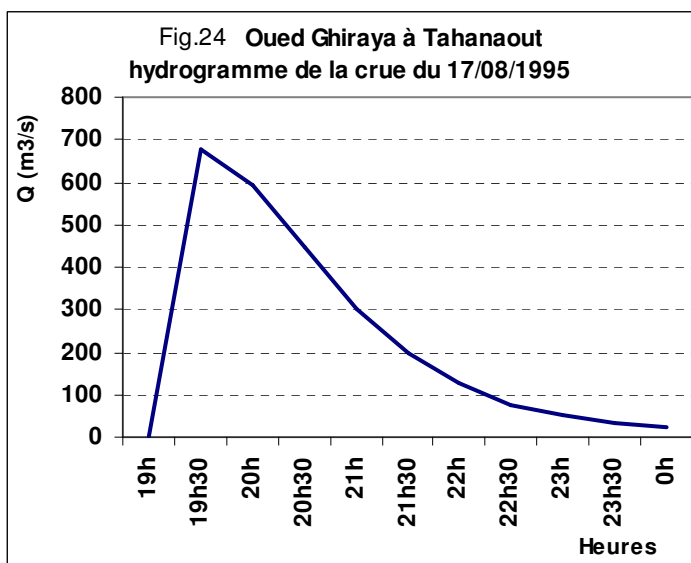
date début	10/02/1987 à 19h
date fin	12/02/1987 à 9h
débit de pointe	154,9 (m3/s)
débit max. moyen	37,136 (m3/s)
débit base avant	3,5 (m3/s)
débit base après	12,8 (m3/s)
volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	5,013
temps de base	37,5h
temps de montée	19h
coefficient de pointe	4,2

**b- La crue du 17 août 1995 :**

Pour la crue du 17 août 1995 de la Ghiraya à Tahanaout (fig. 24), l'hydrogramme prend quasiment la même forme que celui de l'Ourika le même jour. Il offre aussi les caractéristiques d'une crue simple monogénique avec une forte pointe de crue par rapport à la surface du bassin (680 m3/s pour une superficie de 225 km<sup>2</sup>).

Les temps de base et de montée étaient assez courts (4 heures et à peine une demi heure).

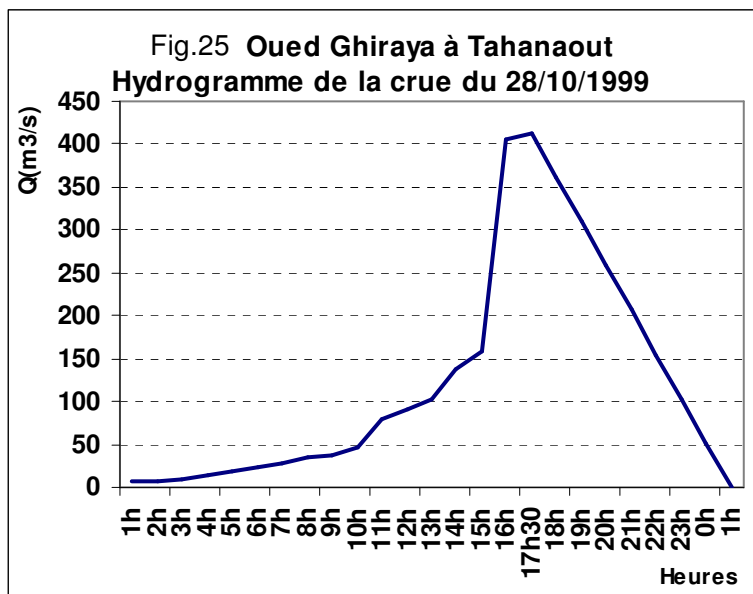
Ce genre de crue de courte durée et de fort débit de pointe constitue un risque majeur pour les dégâts occasionnés. C'est un caractère particulier pour ces bassins torrentiels du Haut Atlas de Marrakech.



date début	17/08/1995 à 19h
date fin	18/08/1995 à 0h
débit de pointe	680 (m3/s)
débit max. moyen	264,013 (m3/s)
débit base avant	0,02 (m3/s)
débit base après	25,4 (m3/s)
volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	4,277
temps de base	4,5 h
temps de montée	0,5 h
coefficient de pointe	2,6 h

### c- La crue du 28 octobre 1999 :

A partir de l'hydrogramme représenté sur la figure 25, la crue du 28/10/1999 est simple. Son temps de base est de 22 heures et le temps de montée de 15,5h. Cette durée n'est pas brève, probablement parce que la pluie responsable a intéressé la totalité du bassin versant. Les arrivées successives des eaux de ce bassin donnent un hydrogramme plus étalé.



Tab.11 Caractéristiques de la crue

date début	28/10/1999 à 2h
date fin	29/10/1999 à 1h
débit de pointe	413 (m³/s)
débit max. moyen	136,627 (m³/s)
débit base avant	6 (m³/s)
débit base après	0,08 (m³/s)
volume $10^6 \text{ m}^3$	10,821
temps de base	22 h
temps de montée	15,5 h
coefficient de pointe	3

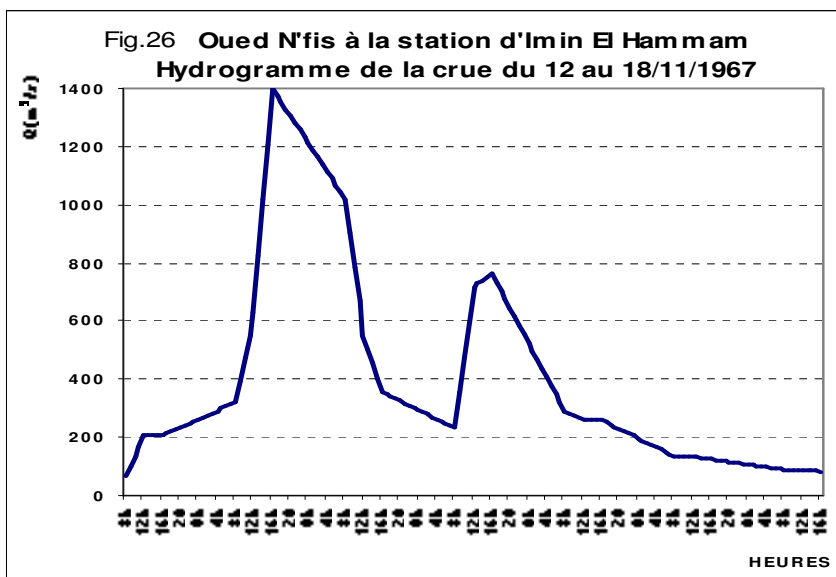
### 3- Le bassin versant du N'fis:

#### a- La crue du 13 novembre 1967:

La figure 26 montre qu'il s'agit d'une crue complexe (deux pics). Elle a duré environ six jours, passant de 68 m³/s à 1400 m³/s pendant 32 heures pour le premier pic. Une décrue s'en est suivie et le débit a diminué jusqu'à 232 m³/s. Un second pic a atteint et 762 m³/s en 8 heures. Le premier pic peut être expliqué par des orages près de l'exutoire (en aval du bassin) et le deuxième peut être due à l'arrivée des eaux des affluents, collectées plus tard.

Malgré son débit de pointe élevé et son long temps de base, cette crue ne peut être considérée dangereuse car son temps de montée (32h) minimise sa soudaineté, et donc les dégâts dus à la surprise.

La longue durée de cette crue probablement due à la grande superficie de ce bassin allongé ( $K_c=1.57$ ) qui nécessite plus du temps pour orienter les eaux au cours principal du son réseau hydrographique; et à l'homogénéisation des pluies sur la quasi-totalité du bassin. Les eaux du bassin aval passent à l'exutoire en premier, suivies des eaux du bassin moyen et enfin de celles du bassin amont



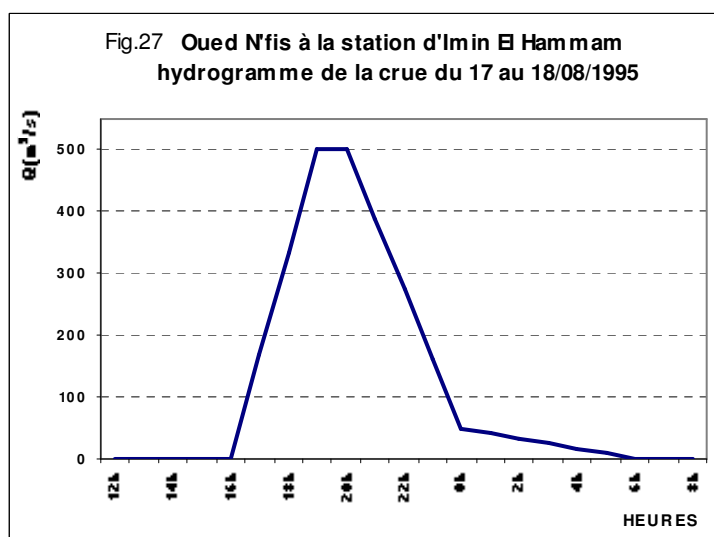
date début	12/11/1967 à 8h
date fin	18/11/1967 à 16h
débit de pointe	1400 (m3/s)
débit max. moyen	338,861 (m3/s)
débit base avant	68 (m3/s)
débit base après	82 (m3/s)
volume $10^6 m^3$	184,21
temps de base	151h
temps de montée	32h
coefficient de pointe	4,1

**b- La crue du 17 août 1995 :**

La figure 27 et le tableau montrent que la crue est simple et monogénique. Le temps de base était de 13 heures mais le temps de montée n'était que de 3 heures.

Il s'agit de la tristement célèbre crue du 17 août 1995 qui a affecté les trois bassins et a marqué les mémoires par son bilan catastrophique sur les plans humain et matériel.

Les caractéristiques de cette crue montrent sa gravité, surtout que le débit de pointe (501 m3/s) a été rapidement atteint (3 h). Ceci gênerait les mesures de protections et d'évacuation



date début	17/08/1995 à 16h
date fin	18/08/1995 à 6h
débit de pointe	501(m3/s)
débit max. moyen	192,146(m3/s)
débit base avant	0
débit base après	1,58 (m3/s)
volume $10^6 m^3$	8,882
temps de base	13 h
temps de montée	3 h
coefficient de pointe	2,6

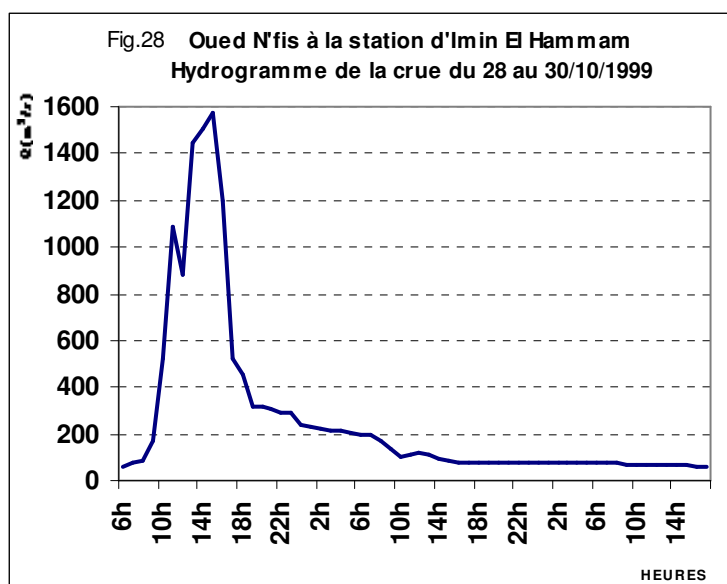
**c- La crue du 28 octobre 1999 :**

La figure 28 représente l'hydrogramme de la crue de 28/10/1999. C'est également une crue simple avec un seul pic (une seule montée et une seule décrue).

Cette crue a enregistré le débit de pointe le plus élevé qu'a connu ce bassin (1575 m<sup>3</sup>/s). Elle a connu une montée rapide des eaux (9 heures) et un temps de base de 58 heures.

Cette crue est surtout exceptionnelle par le débit atteint et non pas par le volume des eaux mobilisées. Son hydrogramme est alors aigu et pointu caractérisant les crues brèves et soudaines habituelles en milieu montagnard semi aride.

Notons qu'en raison de sa grande superficie, les hydrogrammes observés au bassin du N'Fis sont plus étalés et les crues s'étendent sur une plus grande période.



date début	28/10/1999 à 6h
date fin	30/10/1999 à 17h
débit de pointe	1575 (m <sup>3</sup> /s)
débit max. moyen	208,2 (m <sup>3</sup> /s)
débit base avant	59,7 (m <sup>3</sup> /s)
débit base après	59,7 (m <sup>3</sup> /s)
volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	44
temps de base	58h
temps de montée	9h
coefficient de pointe	7,6

## Conclusion

Globalement, Les crues des bassins versant de l'Ourika de la Ghiraya et du N'Fis sont assez puissantes pour des surfaces de quelques centaines de kilomètres carrés. Ces crues sont généralement de courtes durées et les hydrogrammes obtenus sont de forme très aiguë, surtout pour l'Ourika et la Ghiraya. Le milieu physique de nos bassins a offert un environnement propice aux fortes crues, notamment des pentes élevées, des sols imperméables et très peu couverts par la végétation, une bonne exposition et une pluviométrie conséquente.

Ces bassins versants présentent donc un risque particulier du fait de la conjonction de tous ces facteurs. On peut leur ajouter le fait que le terrain est assez accidenté et les vallées sont étroites. Elles seraient difficilement accessibles en cas de grandes inondations, et les secours seraient difficilement organisés. La crue du 17 août 1995 en est le parfait témoin.

## **II- Les temps de base et les temps de montée des crues:**

Dans ce paragraphe, nous allons essayer d'analyser les durées globales des crues et leurs temps de montée pour chercher une éventuelle typologie des crues du Haut Atlas de Marrakech concernant ces deux paramètres (voir les annexes 4, 5 et 6 correspondent respectivement à l'Ourika, la Ghiraya et le N'fis) . Nous avons pour cela analysé les hydrogrammes de toutes les crues enregistrées par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift de 1962 à 2006. Elles sont au nombre de 35 pour l'Ourika, 43 pour la Ghiraya et 39 Pour le N'Fis.

### **a- Le bassin versant de l'Ourika:**

Les figures 29 et 30 illustrent respectivement les temps de base et les temps de montée des crues de l'Ourika à Aghbalou.

**Les temps de base** les plus fréquents étant de 4 à 30 heures. Les classes [10h-20h] et [20h-30h] sont toutefois les plus enregistrées. Ce sont des intervalles de temps assez serrés, qui témoignent de la brièveté des événements de crues. Ces pulsations brutales des niveaux d'eau durent généralement moins d'une journée, voire quelques heures seulement. C'est un caractère général des crues en milieu montagnard aride et semi aride.

Pour **les temps de montée** des crues, les durées les plus fréquentes sont situées entre 4 h et 10 h. Ceci constitue un risque majeur car les montées rapides et soudaines des niveaux d'eau surprennent les estivants et les riverains

Les temps de base et de montées constatés peuvent être expliqués par plusieurs facteurs:

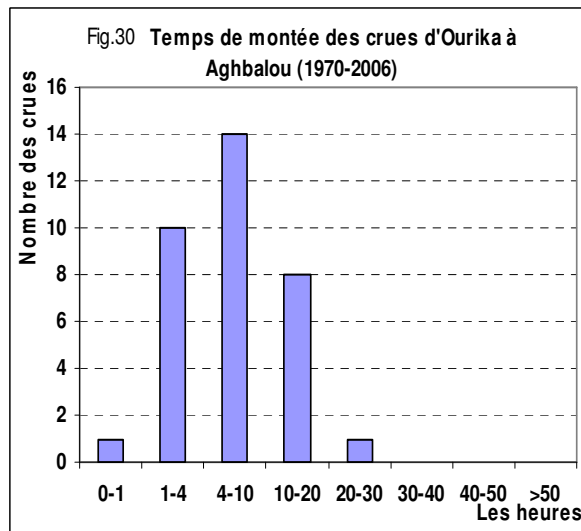
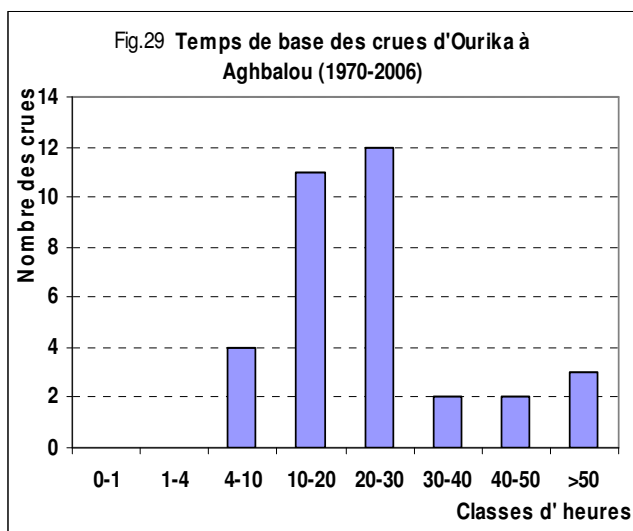
\* **L'imperméabilité:** Le bassin est constitué à 55 % des terrains imperméables, formés surtout des roches cristallines, ce qui implique un temps d'écoulement faible, car cette imperméabilité empêche l'infiltration des eaux qui ruissellent.

\* **La forme du bassin :** Ce bassin qui couvre une surface de 503 km<sup>2</sup>, est assez ramassé et compact (Kc= 1,3). Ceci facilite le rassemblement simultané des eaux des pluies vers l'exutoire.

\* **La topographie :** la pente moyenne du bassin étant de l'ordre de 6.9 %, mais certains versants et affluents du bassin présentent des pentes très élevées : 30 à 40 % pour l'Oufra et Tifni en amont du bassin par exemple (saidi 2003). Ces pentes importantes accélèrent les vitesses d'écoulement et diminuent les temps de ruissellement.

\* **La hiérarchisation du réseau hydrographique** qui est dense en ce milieu montagnard. Les branches de ce réseau collectent rapidement les eaux pluviales et les acheminent vers le cours principal.

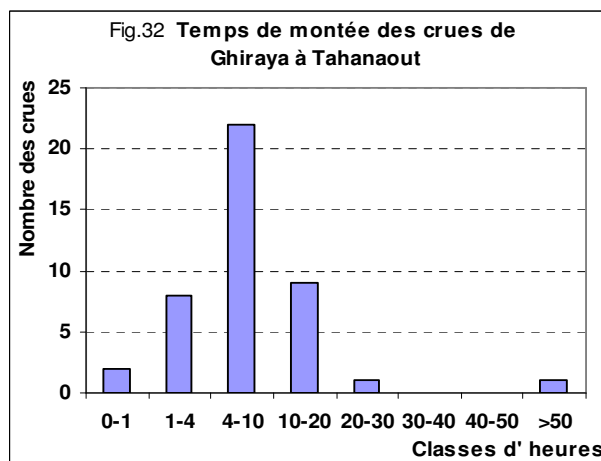
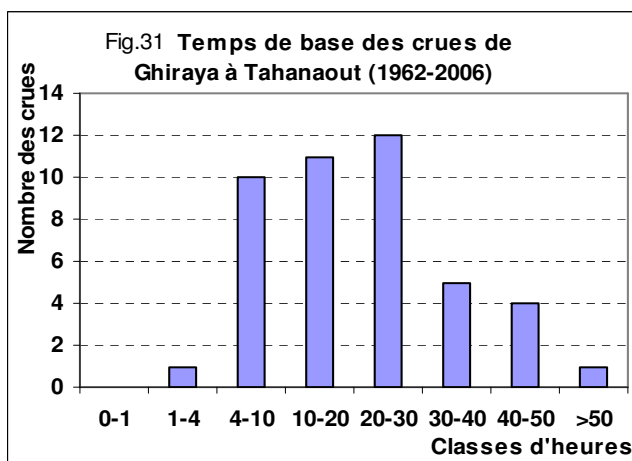
\* **Le faible couvert végétal du bassin** a un impact sur la facilité des écoulements. Une végétation plus dense freine généralement les ruissellements rapides et amortit les crues.



**b- Le bassin versant de la Ghiraya:**

**Les temps de base** les plus fréquentes ici sont [20-30], [10-20] et [4-10] (fig. 21). Ce sont également des courtes durées qui montrent la brièveté des événements de crues.

**Les temps de montée** (fig. 32) sont également très courts, ils sont situés pour la plupart entre 4 h et 10 h. D'autres crues ont même des temps de montée d'une à quatre heures seulement. Tout ceci montre le danger des crues de la Ghiraya qui sont aussi redoutables que celle de l'Ourika. La cause réside dans les mêmes facteurs précités, à savoir la nature peu perméable du sol et son couvert végétal dégradé, les pentes et le relief ...etc.

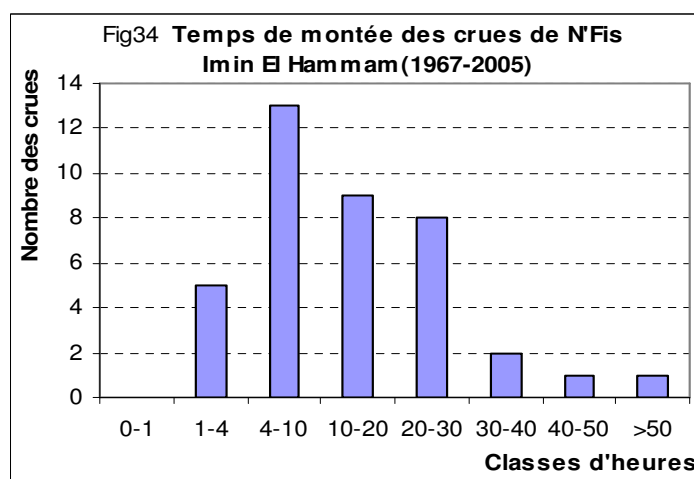
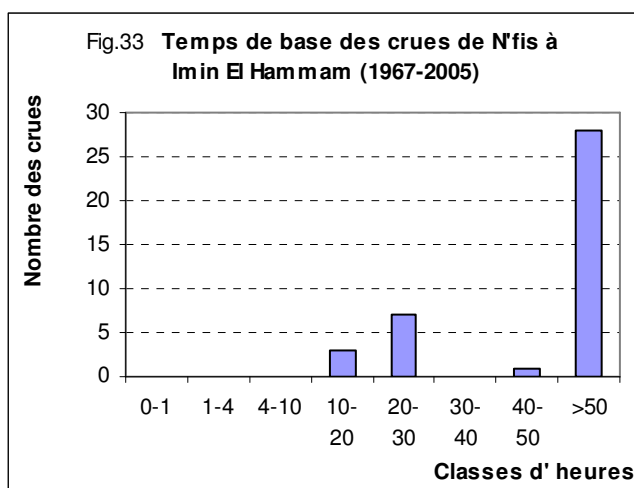


### c- Le bassin versant du N'fis:

Ici 72 % des crues ont un temps de base supérieur à 50 h mais la plupart ont des temps de montée assez courts (4 à 10 h ; 10 à 20 h et 20 à 30 h)

**Les temps de base** sont donc assez grands. Les crues durent généralement plus de deux jours car la superficie du bassin est assez grande (1270 Km<sup>2</sup>) et l'évacuation des eaux pluviales peut durer longtemps. Les pluies tombées en aval passent en premier à l'exutoire, suivies des eaux des bassins moyen et amont. Ceci nous donne des hydrogrammes étalés. Les volumes d'eau mobilisés lors des crues étant généralement très importants.

**Les temps de montée** sont en majorité de 4 à 30 h, avec une plus grande fréquence de l'intervalle 4-10 heures. On assiste donc ici à peu près au même scénario que sur les bassins de l'Ourika et la Ghiraya. Le risque des crues surprenantes est donc également présent ici.



### Conclusion

Les facteurs morphologiques, lithologiques et la végétation du bassin s'associent pour influencer sur les caractéristiques des crues et donc leurs degrés de gravité:

Plus le temps de montée est faible et le temps de base élevé, plus la crue est dangereuse.

Ceci appelle à plus de vigilance et à installer un système d'alerte et d'annonce de crues en amont du bassin. Justement, un réseau de station d'alerte et d'annonce de crue a été installé en amont du bassin de l'Ourika à la suite de la tristement célèbre crue du 17 août 1995. Ce réseau est constitué de cinq stations : Agouns, Tiourdiou, Amenzal, Tourcht et Tazitount.

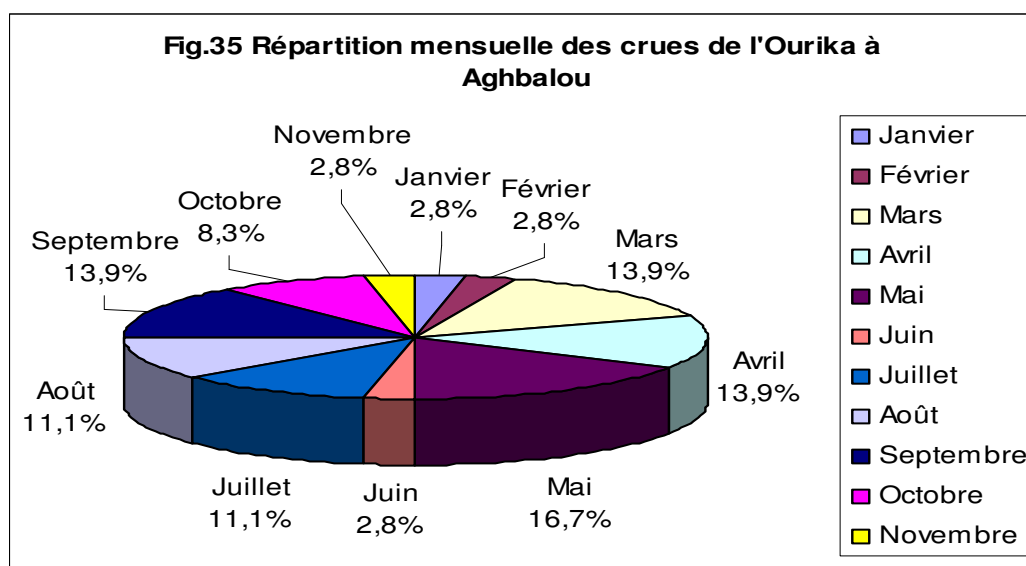
Le bassin de l'Ourika a été choisi comme bassin pilote pour expérimenter ce système d'alerte. Il a bien fonctionné lors des crues parvenues après son installation. La population a pu être alertée et évacuée à chaque fois (en août 2006 par exemple).

L'extension de l'expérience vers les autres bassins versants voisins n'a pas encore commencé. Probablement faute de budgets alloués.

### III- Répartition mensuelle et saisonnière des crues :

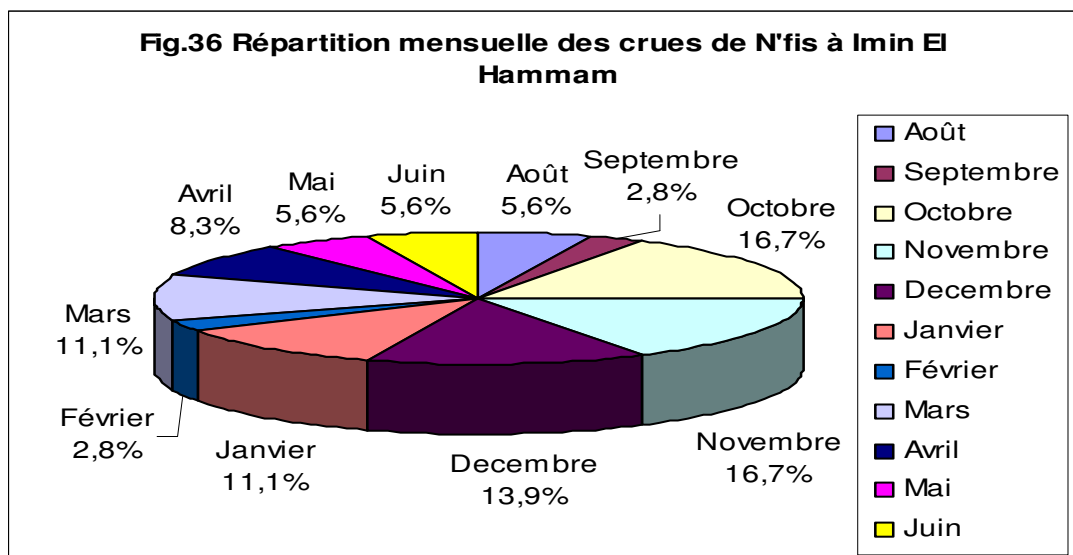
#### a- Le bassin versant de l'Ourika:

Dans le bassin de l'Ourika (fig. 35), c'est le mois de mai qui connaît le plus de crues, suivi des mois de mars et avril. Les saisons les plus riches en épisode des crues sont donc par ordre décroissant : le printemps, l'automne, l'été et enfin l'hiver. Les pourcentages sont respectivement de 44.5%, 25%, 24% et 5.6%.



#### b- Le bassin versant de la Ghiraya:

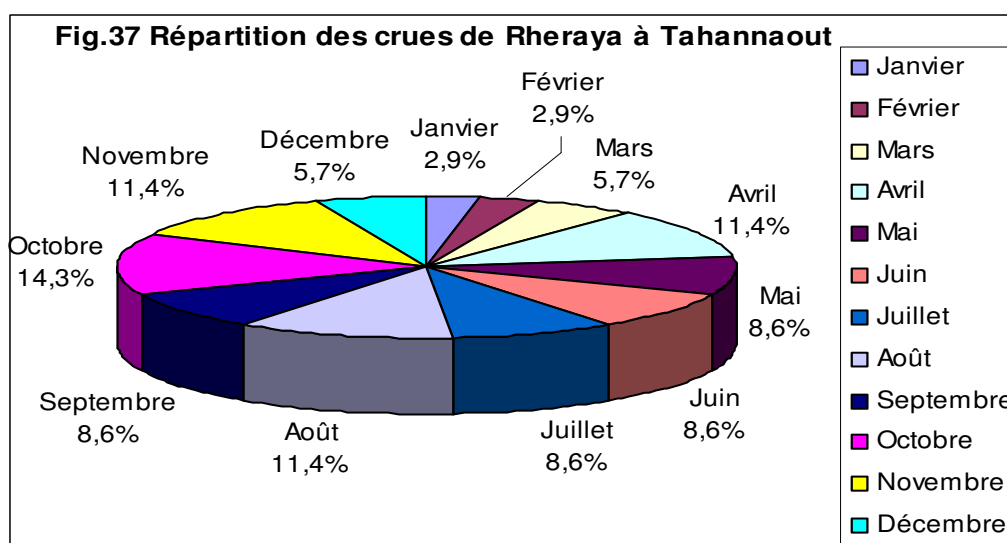
Les crues de la Ghiraya sont plus concentrées en automne avec 34.3%, puis en été avec 28.6%. Ici on note donc une progression des crues d'été par rapport à l'Ourika. Les phénomènes orageux sont donc plus fréquents ici.



**c- Le bassin versant du N'fis:**

Pour le N'Fis (fig. 37), l'automne arrive en premier avec 36.2% de crues, suivi de l'hiver avec 27.8%, le printemps 25% et l'été 11.2%.

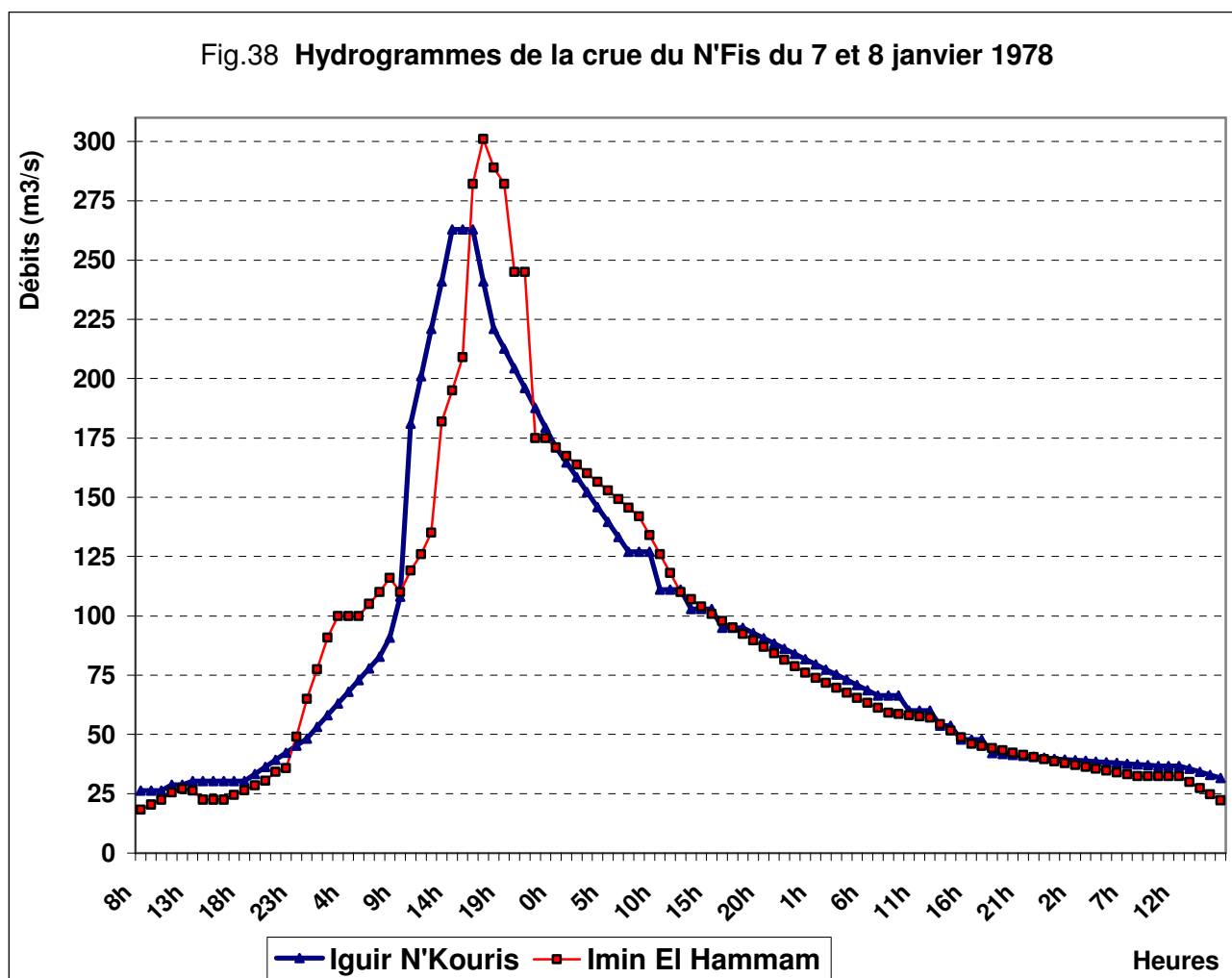
Chaque bassin a donc des saisons de prédilection pour les crues : le printemps et l'automne pour l'Ourika, l'automne et l'été pour la Ghiraya et l'automne et l'hiver pour le N'Fis. On peut donc dire que le Haut Atlas de Marrakech est constamment en danger de crues. Celles-ci peuvent parvenir en toute saison et en tout mois.

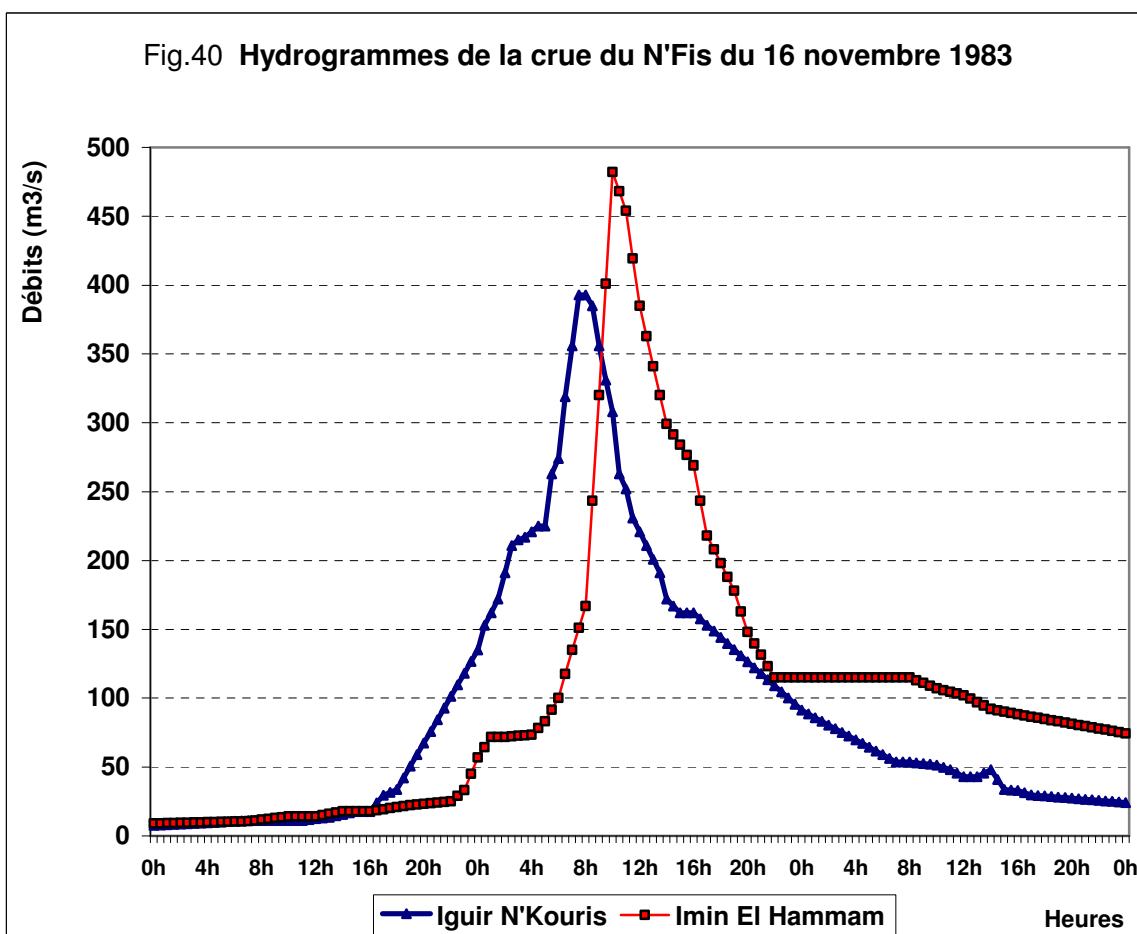
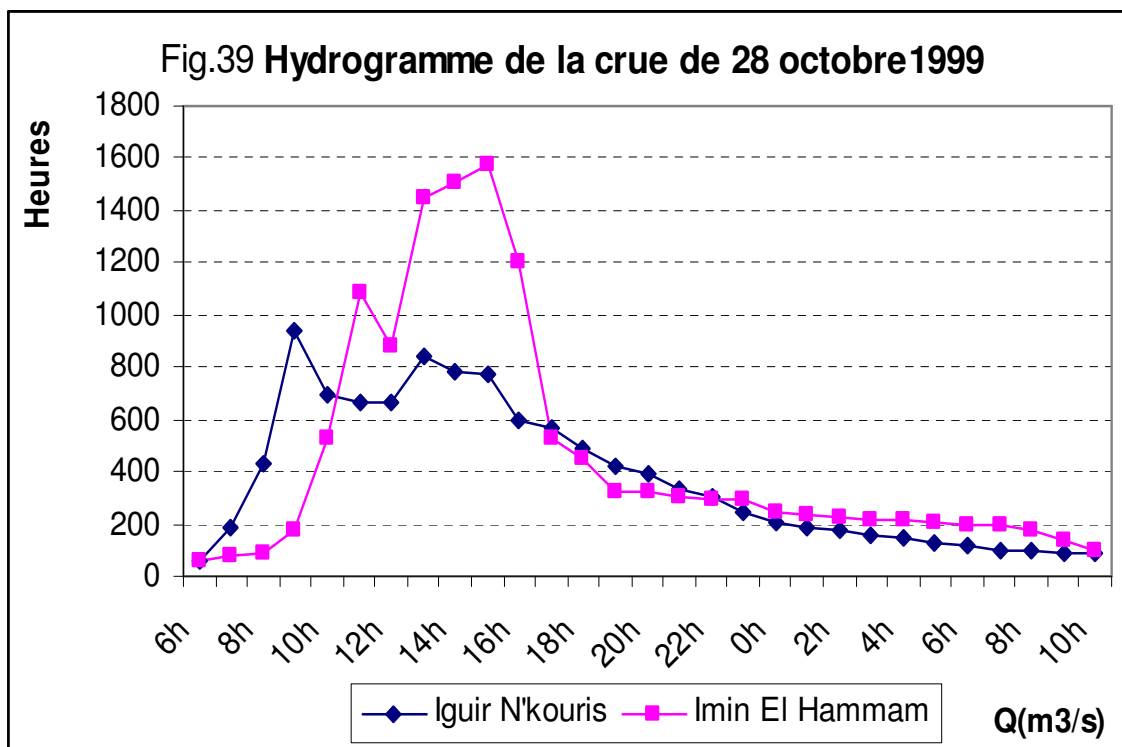


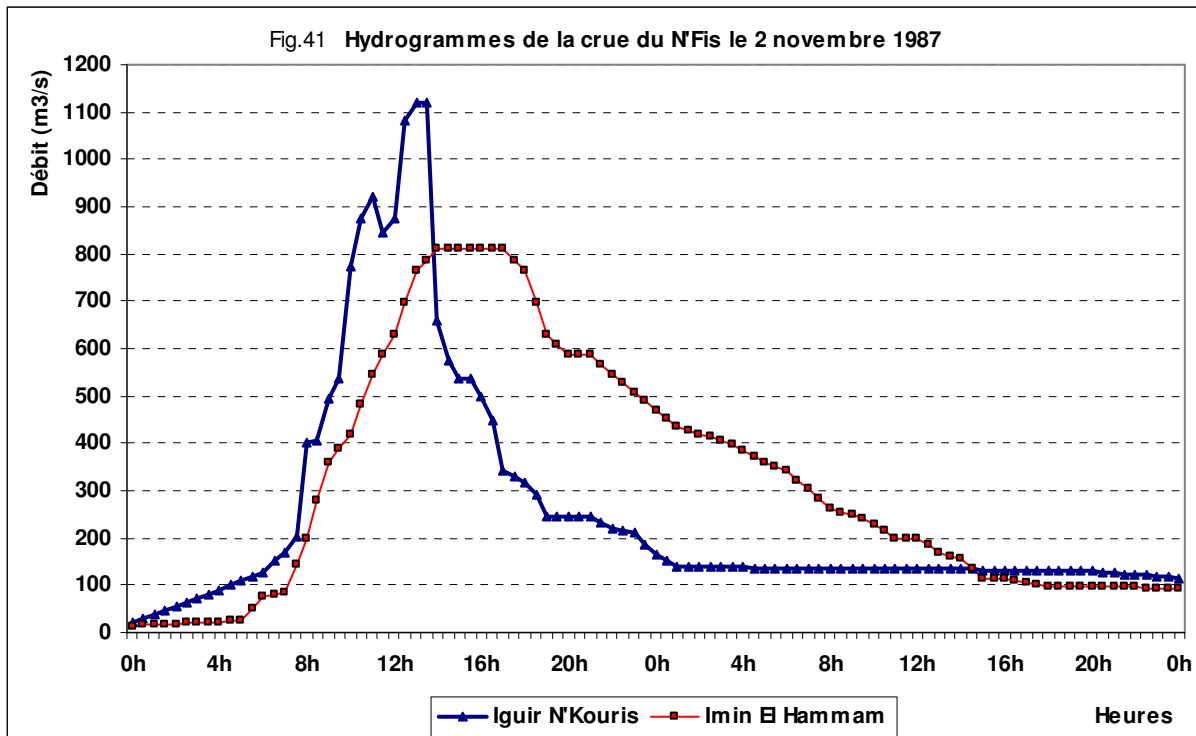
#### IV- Vitesses de propagation des crues de l'oued N'Fis

Le bassin versant du N'Fis dispose d'une seconde station hydrométrique à 33 kilomètres en amont de la station d'Imin El Hammam. Il s'agit de la station d'Iguir N'Kouris. Les données de crues de cette station nous permettrons de calculer les vitesses de propagations des crues du N'Fis. Ceci en divisant la distance séparant les deux stations par le temps qui s'écoule entre le moment de la pointe de crue à Iguir N'Kouris et le moment de la pointe de crue à Imin El Hammam.

Nous avons pour cela choisi quatre crues bien individualisées et ayant transité par les deux stations (Fig.38)







	Pointe à Iguir N'Kouris	Pointe à Imin El Hammam	Décalage horaire	Vitesse de propagation
Crue du 7 et 8 janvier 1978	14 h	17 h	3 h	<b>11 km/h</b>
Crue du 28 et 30 octobre 1999	1 <sup>ère</sup> pointe: 9 h 2 <sup>ème</sup> pointe: 11 h	1 <sup>ère</sup> pointe:13 h 2 <sup>ème</sup> pointe:15 h	2 h	<b>16,5 km/h</b>
Crue du 16 novembre 1983	7 h 30	10 h	2 h 30	<b>13,2 km/h</b>
Crue du 2 novembre 1987	13 h	14 h	1 h	<b>33 km/h</b>

On remarque que les pointes de crues passant par Iguir N'Kouris mettent une à trois heures pour atteindre Imin El Hammam. Ceci a donné des vitesses de propagation de 11 à 33 km par heure, c'est à dire des vitesses de **3 à 9 mètres par secondes**. Ce sont des vitesses très importantes. Elles résultent des conditions géomorphologiques citées au premier chapitre confirment la présence de risques et de grands dangers auxquels il faut accorder la plus grand intérêt et la plus grande prudence.

## Chapitre IV : Analyse statistique des crues

"La prédétermination peut être définie comme l'annonce des caractéristiques physiques et statistiques d'un événement futur non précisément daté, différant en cela de la *prévision* qui s'attache à dater l'annonce d'un événement physique spécifié. La prédétermination sera donc inséparable de la notion de probabilité d'occurrence d'un événement donné ou, de façon équivalente, de sa durée de retour. En matière de crues, on cherchera à estimer, pour une section donnée d'un cours d'eau, soit la probabilité de dépassement d'un débit donné, soit, de façon symétrique, le débit ayant une probabilité donnée d'être dépassé. Ces estimations, à l'encontre des approches basées sur les PMP/QMP (pluies et débits maximums possibles), permettent une approche rationnelle des problèmes socio-économiques de dimensionnement d'ouvrages et d'occupation des sols" (Hubert 2005).

Les données disponibles pour les stations hydrométriques (Aghbalou, Tahanaout et Imin El Hammam) sont fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique du Tensift (ABHT). Il s'agit des débits maximums instantanés enregistrés de 1970/71 à 2005/06.

### I- Ajustement de la loi de Gumbel :

#### 1- Définitions:

Cette une loi dite des valeurs extrêmes ou doublement exponentielle, dont la fonction de répartition est de la forme:

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

Avec  $y = a(Q - Q_0)$ . C'est la droite de Gumbel dont les paramètres sont :

- Le paramètre d'échelle:  $1/a = 0.87 \sigma$ .
- Le paramètre de forme:  $Q_0 = Q_m - (1/a * 0,577)$ .

Connaissant  $a$  et  $Q_0$  on trace la droite de Gumbel, normalement sur un papier Gumbel (Q = f (FND)). FND signifie fréquence au non dépassement.

A défaut de ce papier Gumbel, on procède à un changement de variable pour obtenir une échelle linéaire :

$$F(Q) = e^{-e^{-y}}$$

On obtient  $y = -\text{Ln}(-\text{Ln } f(Q))$ .

$F(Q)$  est la fréquence au non dépassement du débit.

Après avoir déterminé le débit de crues probables relatif à une fréquence donnée (exemple: la crue décennale) il faut connaître l'intervalle de confiance de ce débit, c'est-à-dire la gamme des valeurs qui devrait le contenir. Il a la forme :  $[Q_x + T_2 \cdot \sigma ; Q_x + T_1 \cdot \sigma]$

$Q_x$  est le débit de crue calculé,  $\sigma$  est l'écart type de la série de crues et  $T_1$  et  $T_2$  sont deux paramètres déterminés à partir de l'abaque de Bernier (annexe 15).

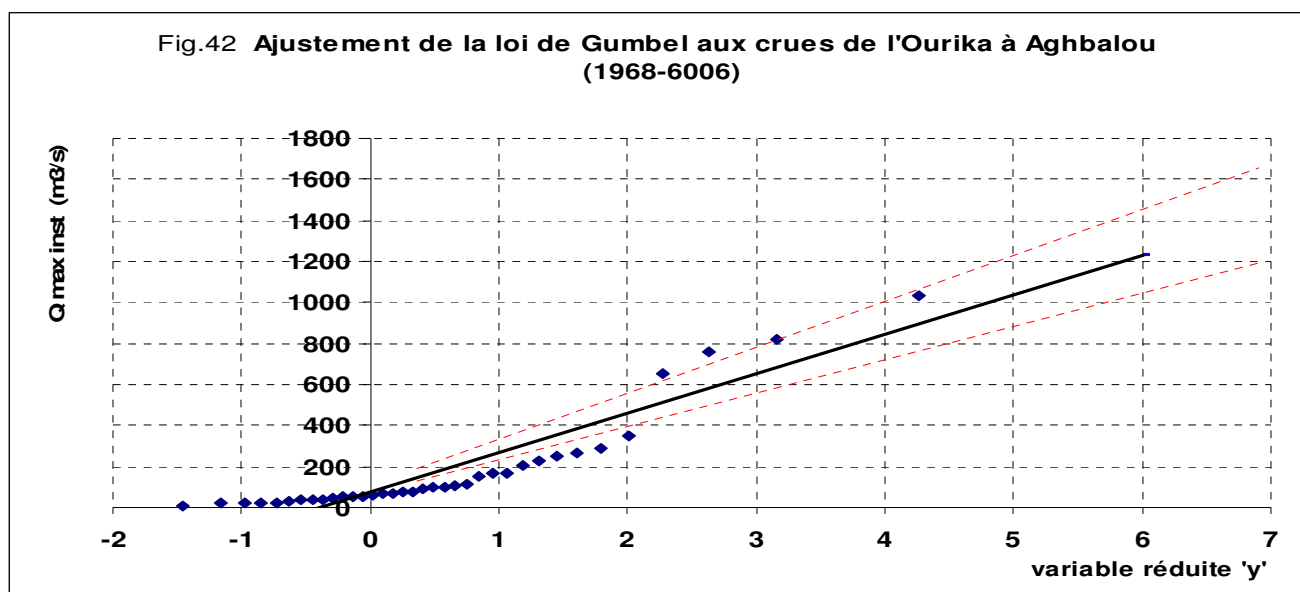
## 2- Ajustement de la loi :

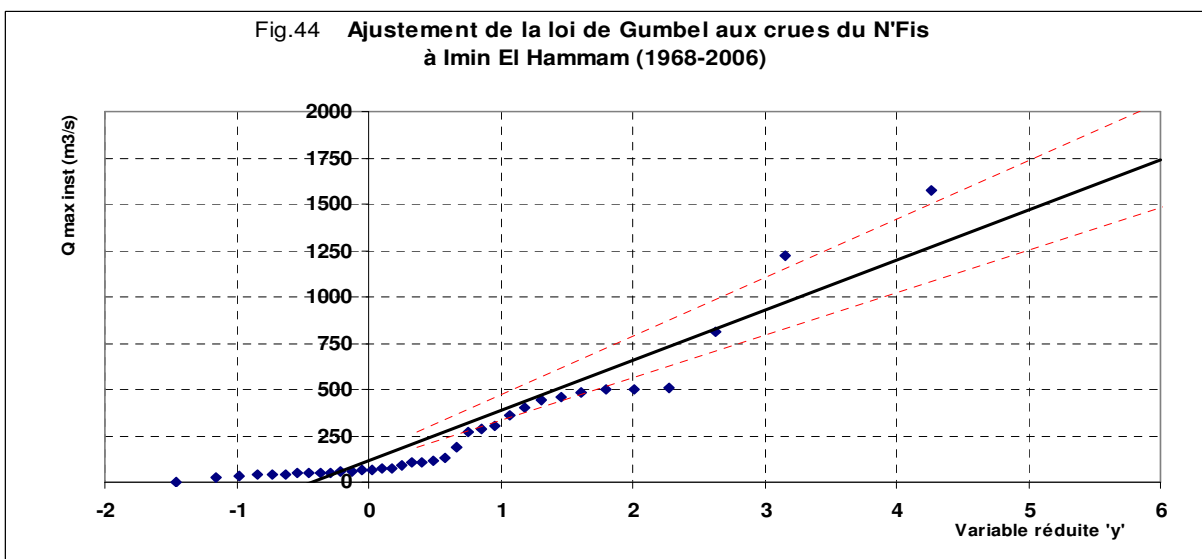
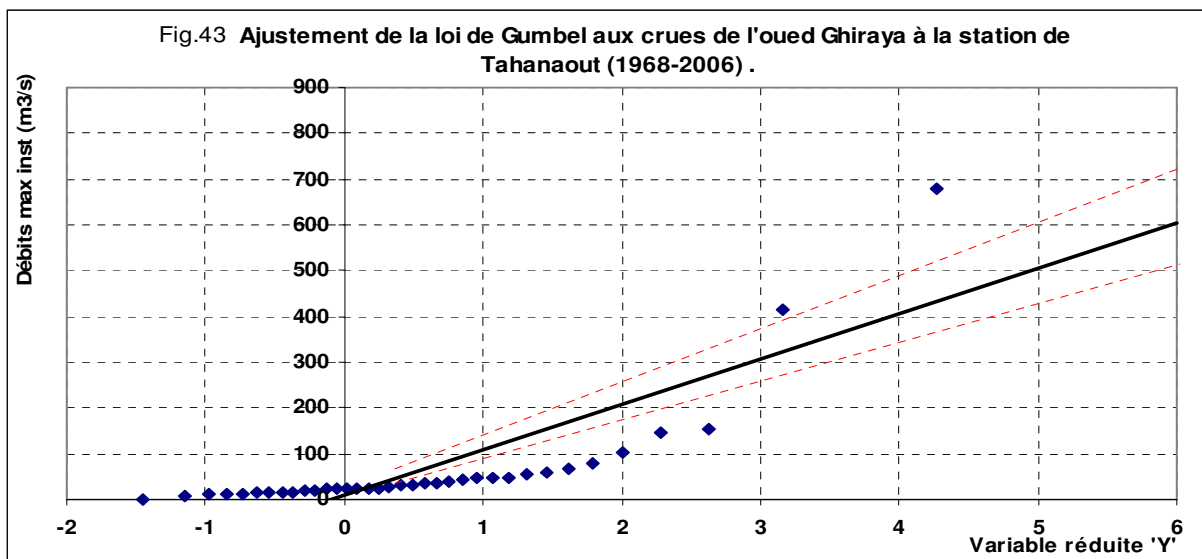
Les figures 42, 43 et 44 illustrent l'ajustement de la loi de Gumbel aux crues de l'Ourika, de la Ghiraya et du N'Fis. A coté des droites de Gumbel, nous avons tracé les intervalles de confiance à 70 %.

Pour l'Ourika, la droite de Gumbel, dont l'équation est  $y = 0,0052Q - 0,386$ , passe au milieu du nuage des points expérimentaux, ce qui permet de déduire que l'ajustement est dans l'ensemble satisfaisant et qu'on peut éventuellement utiliser la loi de Gumbel pour estimer les probabilités des crues et leurs périodes de retour.

Concernant la Ghiraya (fig.43) On remarque que la droite du Gumbel qui a pour l'équation  $y = 0.0037Q - 0.41884$  traverse également le nuage des points. Ceci permet comme pour l'Ourika d'estimer les probabilités d'occurrence des crues.

Le même constat est enregistré pour le bassin du N'fis (fig.44) où la loi de Gumbel, utilisée d'habitude pour les débits extrêmes, peut être adaptée aux débits des crues de l'oued.





**3- Calcul des quantiles et leurs intervalles de confiance pour chaque station :**

A partir de l'équation de la droite de Gumbel ( $y = a (Q - Q_0)$ ), on a pu calculer les quantiles de la crue médiane à la crue millennale. Ils sont exprimés en m3/s et se présentent ainsi:

	crue médiane	crue décennale	crue Cinquantennale	crue centennale	crue millennale
<b>Imin El Hammam</b>	212	721	1167	1356	1978
Intervalles de confiance	[167,4-280,6]	[652,4-858,3]	*	[1157-1603]	[1686-2338]
<b>Tahanaout</b>	46	233	396	465	693
Intervalles de confiance	[29,5-71,4]	[207,6-283,7]	*	[391.4-556,3]	[585-826]
<b>Aghbalou</b>	143	507	824	959	1401
Intervalles de confiance	[111-192]	[458-605]	*	[816-113.6]	[1192-1659]

Tableau 15 : Estimation des débits de crues caractéristiques et les intervalles de confiance par la loi de Gumbel.

## Conclusion

L'ajustement de la loi de Gumbel au niveau des trois stations a permis de constater que les crues des bassins versants étudiés sont assez fortes pour les superficies drainées et pour un milieu semi aride. A titre d'exemple le débit moyen à Aghbalou n'est que de 6 m<sup>3</sup>/s et la crue qui reviendrait tout les 10 ans peut atteindre 507 m<sup>3</sup>/s. Pareil pour les deux autres bassin où les crues Cinquennale et centennale sont très élevées et appelle à bien gérer ces pulsations brutales des niveaux d'eau des oueds par des aménagements appropriés et par la sensibilisation de la population aux dangers des crues en ce milieu montagnard vulnérable par ses conditions géomorphologiques et climatiques.

Les hauteurs des crues augmentent naturellement avec la superficie drainée. Ainsi la Ghiraya qui présente le plus petit bassin versant a les plus faibles débits de crues, mais le danger y est également présent à cause de l'encaissement de la vallée et la présence de fortes pentes et faibles perméabilités du substratum.

Les estimations les plus élevées sont pour le N'Fis qui est presque trois fois plus grand que le bassin de l'Ourika. Sa grande superficie lui permet de collecter un plus grand volume d'eaux pluviales.

Afin de vérifier la validité de l'ajustement des débits de crue par la loi de Gumbel utilisé manuellement, on va faire appel à des autres lois déjà établies pour une étude établie concernant l'oued de Martil (Annexe 22), en remplaçant ses débits maximums par les débits observés au niveau des trois bassins étudiés.

## II- Ajustement d'autres lois mathématiques aux débits de crues

### 1- Définition des lois étudiées

#### a- Loi normale (loi de Gauss):

La loi normale se définit comme la loi d'une variable aléatoire  $x$  formée de la somme d'un grand nombre de variables aléatoires. En hydrologie fréquentielle des valeurs extrêmes, les distributions ne sont cependant pas symétriques, ce qui constitue un obstacle à son utilisation. Cette loi s'applique toutefois généralement bien à l'étude des modules annuels et mensuels des variables hydrométéorologiques. Elle est définie par la fonction suivante :

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

Dont les deux seuls paramètres sont la moyenne  $m$  et l'écart type  $\sigma$ .

Sa fonction de répartition est la suivante :

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2)$$

Avec :  $t = \frac{x - m}{\sigma}$  variable réduite de Gauss.

F (t) probabilité au non dépassement.

Les paramètres sont estimés par la méthode des moments et la méthode de vraisemblance. Ainsi, la moyenne et l'écart type de la distribution théorique sont la moyenne et l'écart type de l'échantillon.

**b- Loi de Galton (loi Log normale)**

La loi log-normale est préconisée par certains hydrologues qui la justifient en argumentant que l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient. Dès lors la variable aléatoire  $X=x_1x_2\dots x_r$  suit une loi log-normale. En effet le produit de r variables se ramène à la somme de r logarithmes de celles-ci et le théorème central-limite permet d'affirmer la log-normalité de la variable aléatoire.

Cette loi résulte de loi normale rendue dissymétrique positive par un changement de variable. Ainsi, au lieu de travailler avec la variable aléatoire  $X(x_1, \dots, x_n)$  on travaillera avec son logarithme.

$$\mu_y = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{\mu_x^2}{1 + C_{vx}^2} \right]$$

$$\sigma_y = \sqrt{(1 + C_{vx}^2)}$$

**c- Loi de Pearson:**

La loi de Pearson ou du Gamma incomplet est une loi statistique qui fixe, a priori, la valeur du paramètre de position  $x_0$  à zéro. En retenant toujours Q comme variable débit, et  $u=a.Q$  comme variable réduite, avec  $a=1/s$ , s étant le paramètre d'échelle.

Dans ces conditions, la fonction de répartition s'écrit:

$$F(Q) = a\lambda / T(\lambda) \int e^{-aQ} \cdot Q^{\lambda-1} \cdot dQ$$

Avec la limite supérieure est de Q et celle inférieure 0.

Avec l' $\lambda$  est calculé à partir d'une fonction complexe:

$$g(\lambda) = \log Q_m - \sum \log Q_i / N$$

A partir de  $\lambda$  on peut tirer  $a = \lambda/Q_m$

## 2) Ajustement des lois mathématiques aux débits crues

Les annexes 12,13 et 14 regroupent les résultats des ajustements des débits maximums instantanés annuels pour les trois stations.

### 2-1- L'Ourika

Les figures 45, 46, 47, 48, 49 et 50 présentent les courbes d'ajustement pour la station d'Aghbalou. Ils illustrent la corrélation entre les débits maximums observés (en ordonnées) et ceux calculés par les lois mathématiques (en abscisses).

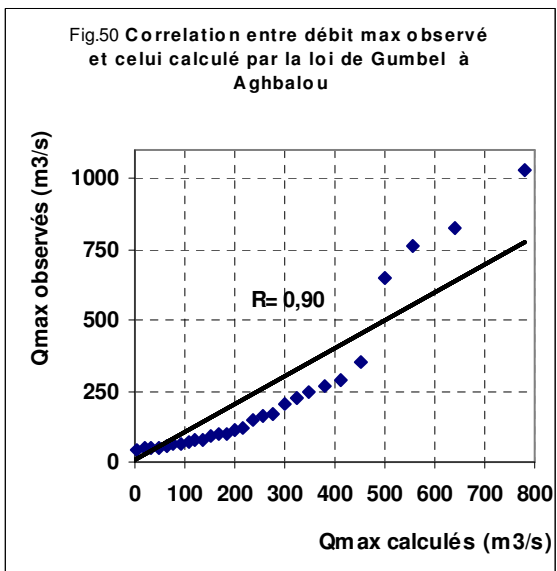
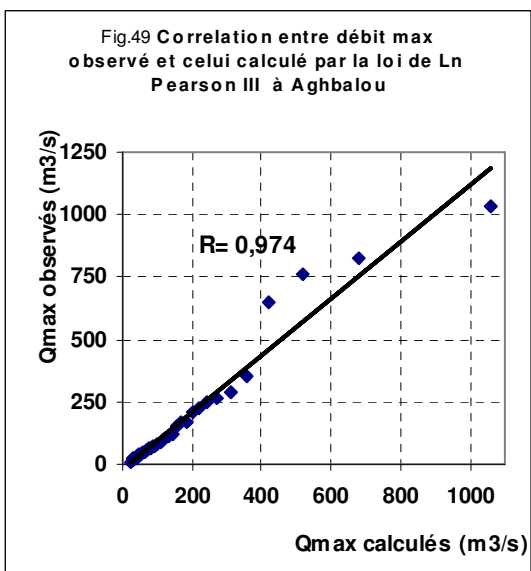
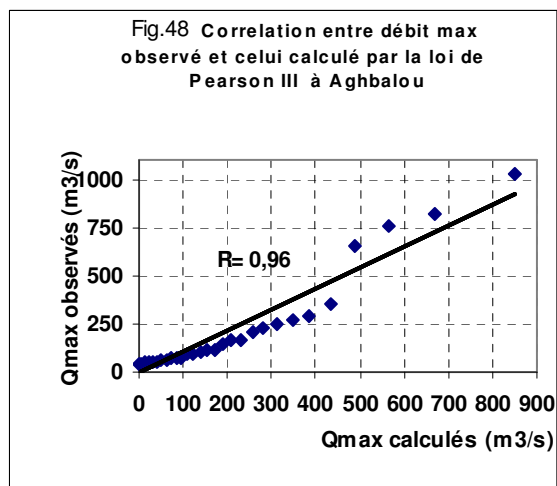
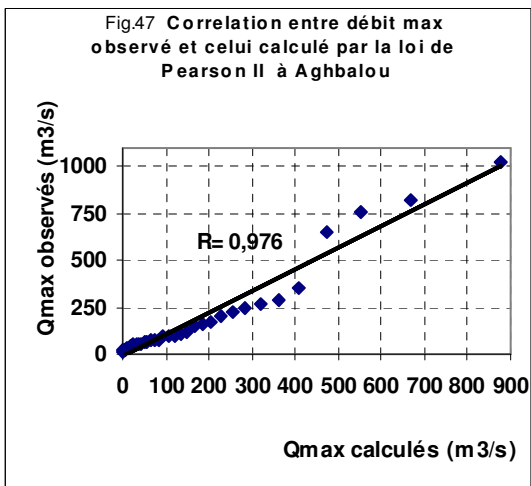
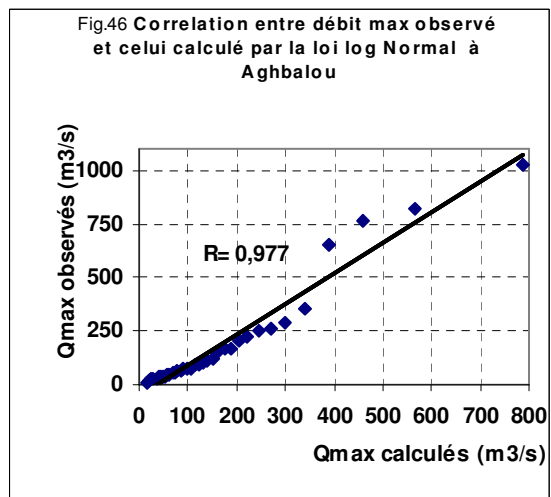
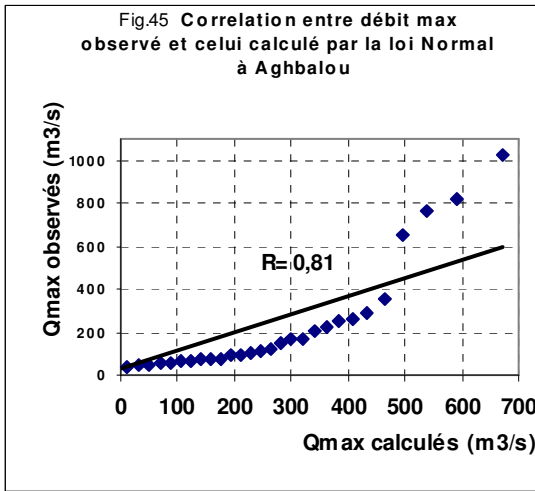
En vue de chercher la loi la plus adaptée à nos échantillons de crues, on cherchera les coefficients de corrélation les plus élevés entre les débits observés et ceux calculés. Cette loi appropriée nous permettra ensuite d'estimer les débits de pointe correspondant à une fréquence ou période de retour donnée.

Les coefficients de corrélation pour les différentes lois se présentent comme suit :

Lois	Normal	Log normal	Pearson II	Pearson III	LN Pearson III	Gumbel
R (%)	81	<b>97.7</b>	97.6	96	97.4	90

Tableau 16: les coefficients de corrélation entre les crues observées et les crues calculées par chaque loi à Aghbalou.

On constate que c'est la loi Log Normal qui a le plus grand coefficient de corrélation. Elle serait la plus adaptée pour l'estimation des débits de pointe et leurs périodes de retour.



Les coefficients de corrélation pour les différentes lois se présentent comme suit :

<b>Lois</b>	<b>Normal</b>	<b>Log normal</b>	<b>Pearson II</b>	<b>Pearson III</b>	<b>LN Pearson III</b>	<b>Gumbel</b>
<b>R (%)</b>	81	<b>97.7</b>	97.6	96	97.4	90

*Tableau 16: les coefficients de corrélation entre les crues observées et les crues calculées par chaque loi à Aghbalou.*

On constate que c'est la loi Log Normal qui a le plus grand coefficient de corrélation. Elle serait la plus adaptée pour l'estimation des débits de pointe et leurs périodes de retour.

### **2-2- La Ghiraya**

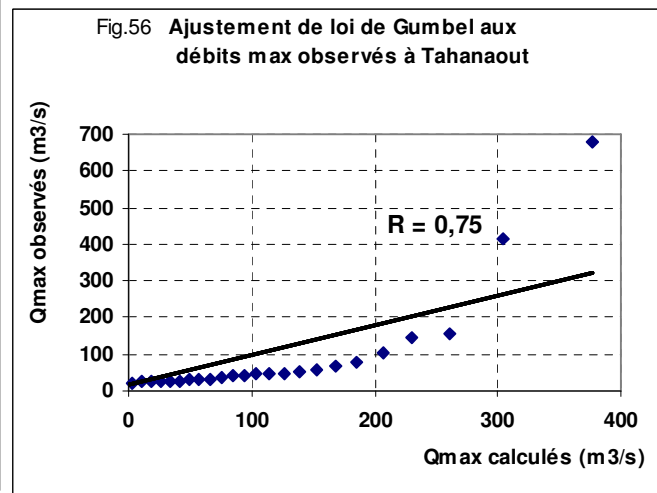
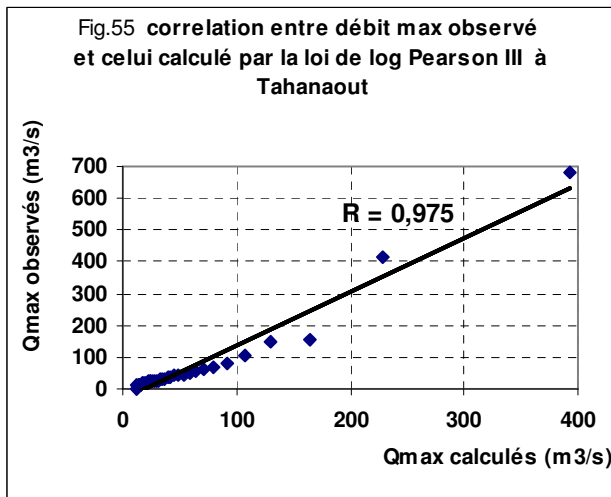
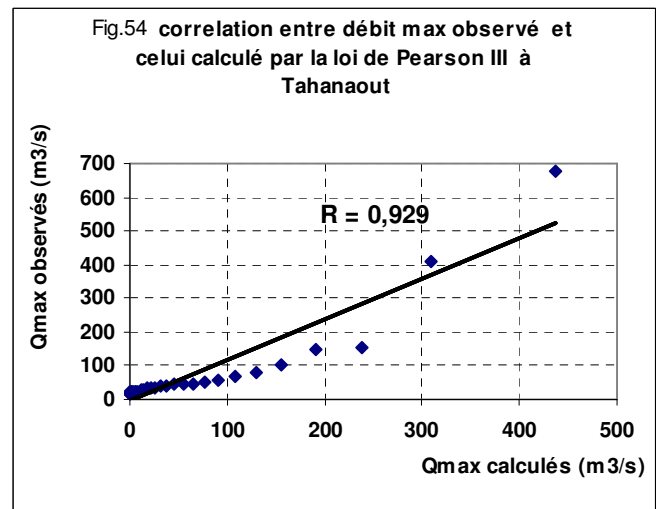
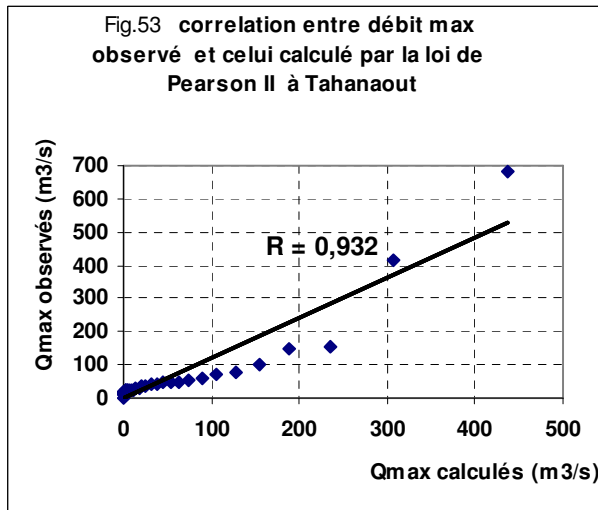
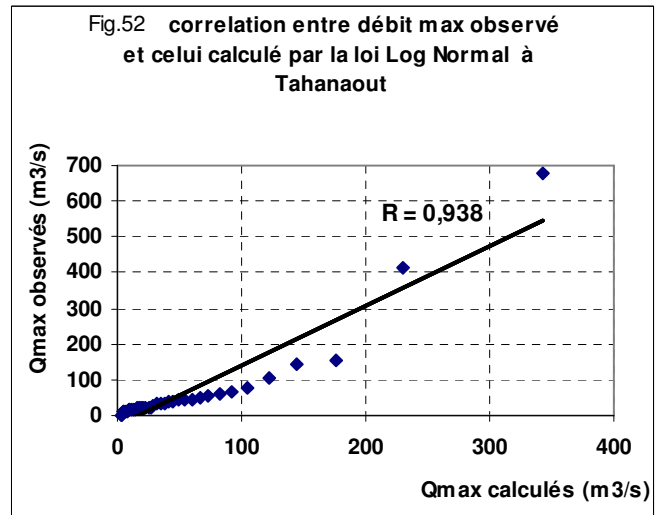
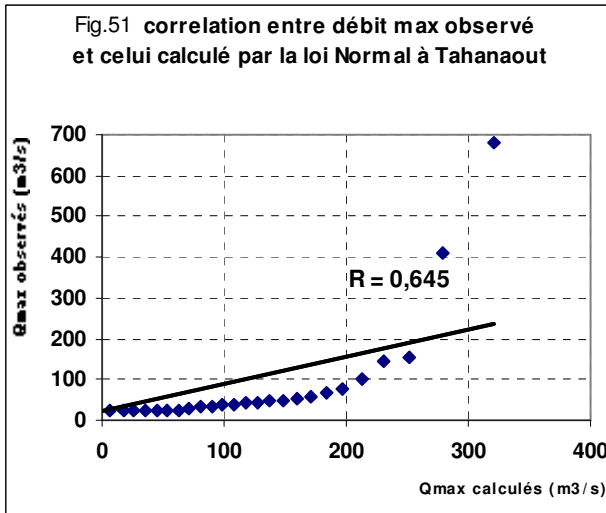
Les corrélations entre les débits maximums observés et les débits calculés pour l'oued Ghiraya sont illustrées par les figures 51, 52, 53,5, 45 et 56.

Les coefficients de corrélation pour les différentes lois étant :

<b>Lois</b>	<b>Normal</b>	<b>Log normal</b>	<b>Pearson II</b>	<b>Pearson III</b>	<b>LN Pearson III</b>	<b>Gumbel</b>
<b>R (%)</b>	64.5	93.8	93.2	92.9	<b>97.5</b>	75

*Tableau 17: les coefficients de corrélation entre les crues observées et les crues calculées de chaque loi à Tahanaout.*

Le coefficient de corrélation le plus élevé (97.5%) est donné par la loi LN Pearson III. C'est donc cette loi qui paraîtrait la plus adaptée pour la Ghiraya à Tahanaout.



**2-3- L'oued N'fis**

Pour l'oued N'Fis, Les coefficients de corrélation entre les débits maximums réellement observés et ceux estimés par différentes lois mathématiques se présentent comme suit :

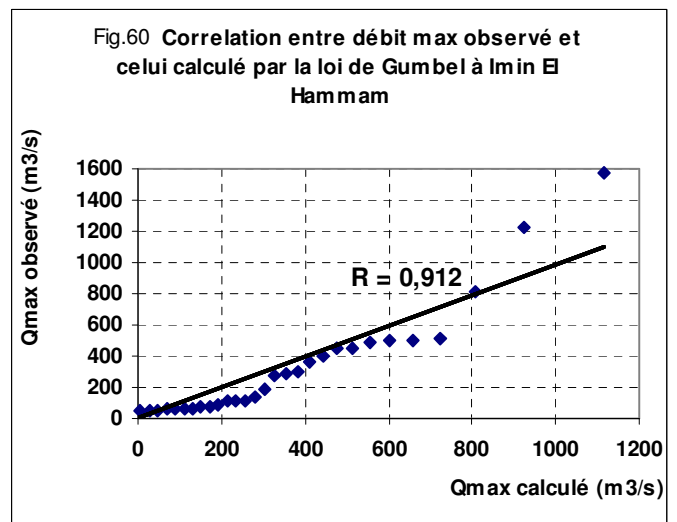
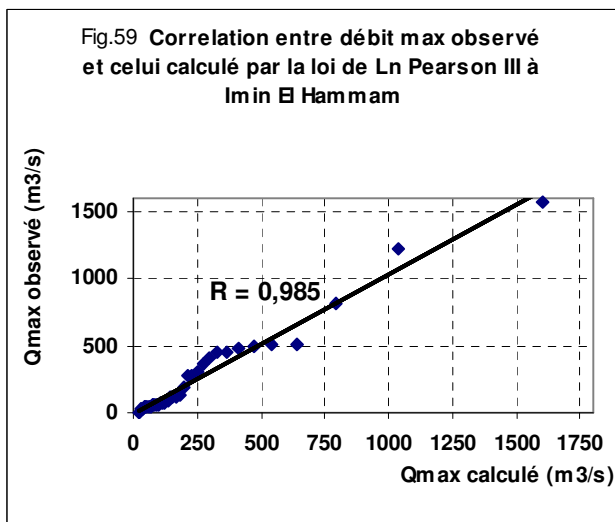
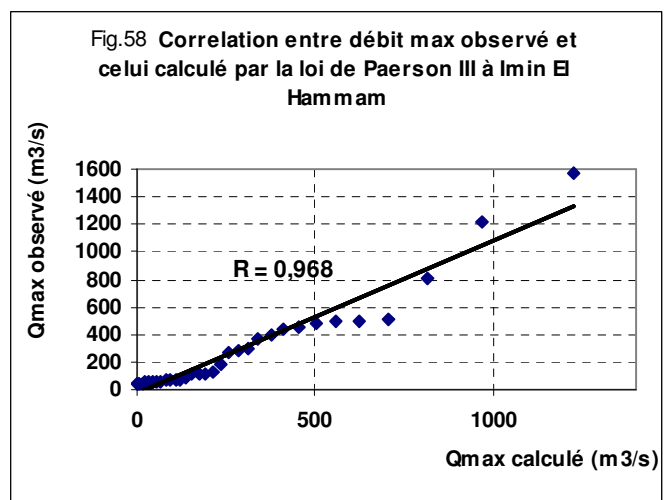
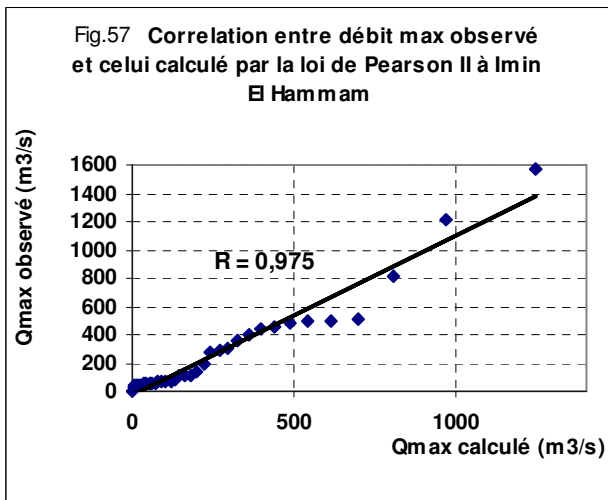
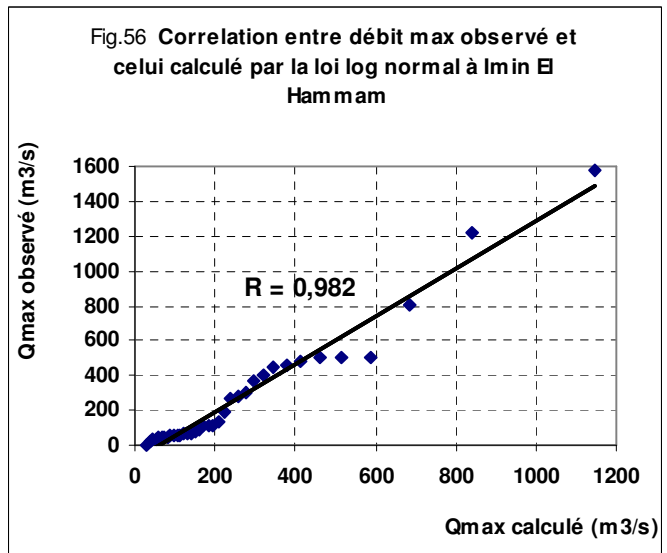
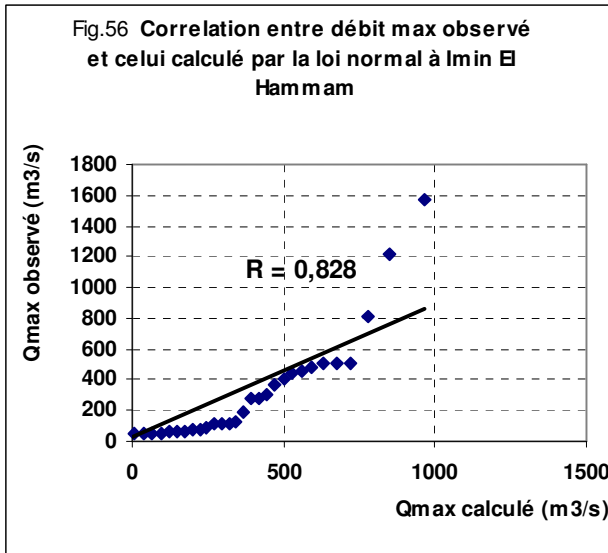
(fig. 57 à 62)

Lois	Normal	Log normal	Pearson II	Pearson III	LN Pearson III	Gumbel
R (%)	82.8	98.2	97.5	96.8	<b>98.5</b>	91

Tableau 18 : les coefficients de corrélation entre les crues observées et les crues calculées par chaque loi à Imin El Hammam.

Comme pour la Ghiraya, ici aussi la loi la plus convenable est la loi LN Pearson III pour laquelle le degré de liaison entre les débits observés et ceux estimés a atteint 98,5 %

Elle serait donc la plus adaptée pour l'estimation des débits de crues dans ce bassin versant.



**II- Estimation des probabilités des crues :****1- Bassin versant de l'Ourika:**

Les débits de pointe correspondant à certaines périodes de retour et estimés par les six lois mathématiques analysées se présentent à la station d'Aghbalou comme suit :

Période de retour / Lois	Normale	Log normale	PERSON II	Pearson III	LN Pearson III	Gumbel
2 ans	185	<b>109</b>	89	103	104	144
10 ans	509	<b>407</b>	493	510	446	515
50 ans	704	<b>898</b>	967	931	1270	840
100 ans	772	<b>1188</b>	1181	1114	1897	977
1000 ans	965	<b>2601</b>	1909	1725	6396	1432

Tableau 19: Les quantiles calculés par les lois étudiées à Aghbalou.

Pour ce bassin de l'Ourika, la loi Log Normal était la plus adaptée. On lui accordera donc la plus de confiance et on utilisera ses résultats d'estimation à savoir :

crue médiane	crue décennale	crue cinquantennale	crue centennale	crue millénaire
<b>109 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>407 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>898 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>1188 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>2601 m<sup>3</sup>/s</b>

**2- Bassin versant de la Ghiraya:**

Les débits de pointe pour chaque périodes de retour et pour chaque loi à la station de Tahanaout sont estimés en m<sup>3</sup>/s comme suit :

Période de retour / Lois	Normal	log Normal	Pearson II	Pearson III	LN Pearson III	Gumbel
2	67	31	13	13	<b>32</b>	46
10	236	153	201	203	<b>138</b>	239
50	338	403	498	497	<b>496</b>	409
100	374	567	640	637	<b>840</b>	481
1000	474	1480	1143	1133	<b>4552</b>	718

Tableau 20: Les quantiles calculés par les lois étudiées à Tahanaout.

La loi la plus ajustable était celle de Log Pearson III. Par conséquent, c'est son résultat qui sera pris en considération dans l'estimation des débits correspondant à telle ou telle fréquence.

La crue décennale par exemple sera de l'ordre de 138 m<sup>3</sup>/s et la crue centennale de l'ordre de 840 m<sup>3</sup>/s.

### 3- L'oued N'fis

Le tableau suivant résume les résultats des ajustements des différentes lois :

Période de retour/Lois	Normal	log Normal	Pearson II	Pearson III	LN Pearson III	Gumbel
2	283	176	155	164	<b>150</b>	224,5
10	737	613	726	736	<b>681</b>	745,5
50	1011	1298	1364	1341	<b>1907</b>	1202,2
100	1107	1691	1647	1606	<b>2804</b>	1395,3
1000	1378	3554	2608	2495	<b>8788</b>	2033,4

Tableau 21: Les quantiles calculés par les lois étudiées à Imin El Hammam

Comme pour la Ghiraya les débits de crues sont mieux estimés par la loi LN Pearson III même s'elle exagère le débit millénaire. Elle estime la crue décennale à 681 m<sup>3</sup>/s et la crue centennale à 2804 m<sup>3</sup>/s. Ce sont des valeurs très élevées pour des bassins versants en zone semi aride et couvrant une surface d'un millier de kilomètres carrés.

### Conclusions

L'estimation statistique des débits de crue des bassins versants de l'Ourika, de la Ghiraya et du N'Fis par les lois mathématiques a mis en lumière des valeurs très élevées de ces débits pour des bassins versants de 503, 225 et 1270 km<sup>2</sup>. Ces petits bassins montagneux offrent un environnement climatique et géomorphologique favorable au développement de très grandes crues. Les pentes élevées, les sols peu perméables, le faible couvert végétal, les reliefs élevés, le positionnement sur le versant Nord du Haut Atlas et des averses intenses ont permis d'avoir des pointes de crues de plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/s. La crue qui reviendrait tous les 10 ans par exemple est de l'ordre de 407 m<sup>3</sup>/s pour l'Ourika qui n'a qu'un débit moyen journalier de 6 m<sup>3</sup>/s. Ce quantile atteint à l'Ourika une valeur de 681 m<sup>3</sup>/s.

Les crues centennales sont à l'Ourika, à la Ghiraya et au N'Fis respectivement de l'ordre de 1188, 840 et 2804 m<sup>3</sup>/s.

Outre le fait que ces débits sont très élevés, ils sont proportionnels à la surface du bassin versant. Plus la surface de réception est large plus les débits de crues sont élevés.

Les débits de crues des bassins du Haut Atlas de Marrakech étant d'une telle importance qu'il faut leur accorder un intérêt particulier en les étudiant et en adoptant des mesures de protection adéquates pour atténuer leurs conséquences. La prévision est également importante à entreprendre. Des stations d'alerte et d'annonce de crues ont justement été installées en amont du bassin de l'Ourika. Leur mise en place dans les autres bassins est vivement souhaitée.

## **Conclusion générale**

Les oueds de l'Ourika et de la Ghiraya et du N'Fis coulent dans des vallées où la topographie, la morphologie et la lithologie accentuent les phénomènes de crues par des fortes pentes, des sols peu perméables et des terrains généralement peu couverts.

L'étude des régimes hydrologiques moyens des bassins versants étudiés a montré qu'ils sont de types pluvio-nivaux. Ces régimes ne sont pas exclusivement liés aux pluies. Les reliefs importants ont permis aux bassins de recevoir des chutes nivales. Celles-ci régularisent les débits des cours d'eau en renforçant les débits du printemps.

L'Ourika et la Ghiraya se ressemblent cependant pour certaines caractéristiques physiques. Les hydrogrammes observés à leurs exutoires présentent des similitudes. Les formes de ces hydrogrammes étant généralement aiguës avec des temps de montée et de base assez courts. Quant aux crues du N'Fis, bien qu'elles ont des temps de montées semblables à ceux de l'Ourika et de la Ghiraya, ont souvent des temps de base plus élevés. Ces crues du N'Fis durent généralement plus de deux jours.

Pour les moments de l'année où les crues surviennent dans les bassins, nous avons constaté que chaque bassin a des saisons de prédilection pour les crues : le printemps et l'automne pour l'Ourika, l'automne et l'été pour la Ghiraya et l'automne et l'hiver pour le N'Fis. On peut donc dire que le Haut Atlas de Marrakech est constamment en danger de crues. Celles-ci peuvent parvenir en toute saison et en tout mois.

Sur le plan statistique, nous avons ajusté un certain nombre de lois mathématiques aux crues des oueds on a trouvé que la loi log normal le plus adaptée à l'Ourika et Ln Pearson III pour Ghiraya et N'fis, afin de déterminer les probabilités d'occurrence de certains débits de pointes et leurs périodes de retour.

Les résultats ont montré que les débits de crues de l'Ourika, la Ghiraya et le N'Fis sont très élevés pour des bassins versant de 503, 225 et 1270 km<sup>2</sup>. La situation géo-climatique de ces bassins a permis d'avoir des grandes vitesses d'écoulement et des débits de pointes très fortes. Ceci appelle à prendre des mesures structurelles et non structurelles pour la protection et l'aménagement des bassins. Certaines ont été entreprises dans la vallée de l'Ourika à savoir l'aménagement de seuils pour l'amortissement des crues, la stabilisation des thalwegs et réalisation de murs de soutènement, la réalisation d'ouvrages d'art et d'assainissement routiers l'aménagement d'une piste en crête et de zones de refuge. Un système de prévision et d'alerte aux crues a par ailleurs été installé en amont du bassin pour prévenir les riverains et les évacuer en cas de crue. Le bassin de l'Ourika a été choisi comme bassin pilote. L'extension de cette mesure de prévision aux bassins limitrophes est attendue et sera très bien accueillie par tout le monde.

### **Références bibliographiques**

**Agence de Bassin Hydraulique de Tensift, 2001**, Etude du plan directeur sur le système de prévision et d'alerte aux crues pour la région de l'Atlas au Maroc. Rapport de l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (JICA), Marrakech, 150 p.

**Chaponniere A., 2005** - Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride. Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon, France, 233 p..

**El Wahidi F., 2004**; Le Cyprès de l'Atlas, in "Les espèces de cyprès", publication supmed, l'Italie; division de Recherches et d'Expérimentations Forestières; Centre régional de la recherche forestière, Marrakech, Maroc; 19 P; Edizioni Centro Promozione Pubblicità – Firenze.

**Hubert P. 2005**, La prédétermination des crues, C. R. Géosciences 337 pp. 219–227

**Juillerat M., 2004**, Etude hydrologique comparative de 5 bassins versants du Haut Atlas marocain. Rapport de maîtrise de l'Université de Franche-comté Besançon, France, 69 p.

**Ouagga T., 2005**, Etude de l'effet des modes d'occupation des sols et de l'érosion sur la séquestration du carbone et l'agrégation des sols dans le bassin versant de la Rhéraya (Haut Atlas du Maroc); mémoire de 3<sup>o</sup> cycle pour l'obtention du diplôme d'ingénieur des eaux et forêts; école nationale forestière d'ingénieurs; 82 p.

**Saidi M. E., Agoussine M. et Daoudi L., 2006**, Effet de la morphologie et de l'exposition sur les ressources en eau superficielle de part et d'autre du Haut Atlas (Maroc) ; exemple des bassins versants de l'Ourika et du Marghène. Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre n°28, Rabat p. 41-49.

**Saidi ME., Daoudi L., Aresmouk M.E, Blali A., 2003**, Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard : exemple de la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). Revue Sécheresse, Paris, pp. 107-114.