



## Département des Sciences de la Terre

### Licence Sciences et Techniques Eau & Environnement

## Mémoire de projet de fin d'études

# Etude hydrologique du bassin versant de Tnine Ourika (Haut Atlas, Maroc)

Réalisé par : - LAMRANI Khadija  
- OUDOUR Khadija  
- EL HARRAB Chaima

Sous la Direction de :

Mohamed Elmehdi SAIDI (FST, Marrakech)

Rachid BARAKATE (ABHT, Marrakech)

Soutenu le : 30 Juin 2021

Devant la commission d'examen composée de :

Pr. Mohamed Elmehdi SAIDI, FST Marrakech

Pr. Lahoucine HANICH, FST Marrakech

Année universitaire 2020-2021

# Remerciements

Tout d'abord, ce travail ne serait pas riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr. SAIDI Mohamed El Mehdi**. On le remercie pour sa patience, sa rigueur et sa responsabilité durant notre préparation de ce projet.

Nos remerciements s'adressent aussi à notre encadrent externe **Mr. Rachid BARAKATE**, qui malgré son emploi du temps surchargé, a toujours été à l'écoute du moindre de nos besoins et pris de temps de nous orienter tout au long de notre travail de fin d'études.

Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Ce projet n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien actif des membres de notre famille, surtout nos parents qu'ils nous ont toujours encouragé moralement et matériellement et qui on tient à les remercier.

En fin, merci à toutes les personnes de la faculté des sciences et techniques qui ont participé à notre formation ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Table de matière

Remerciements.....	2
Liste des tableaux.....	6
Résumé.....	7
Introduction.....	8
<b>Chapitre I : Portrait général du bassin versant Tnine Ourika .....</b>	<b>11</b>
1 Définition d'un bassin versant .....	3
2 Généralités sur le bassin.....	12
2.1 Situation géographique.....	12
2.1.1 Zone d'étude .....	12
2.2 Cadre géologique.....	13
2.3 Le climat.....	13
2.4 Le couvert végétal .....	14
<b>Chapitre II : Caractéristiques du bassin versant Tnine Ourika .....</b>	<b>15</b>
1 Définition d'un bassin versant.....	15
2 Caractéristiques géométriques .....	17
2.1 Aire et périmètre.....	17
2.2 Indice de compacité.....	18
2.3 Le rectangle équivalent .....	18
2.3.1 La méthodologie de calcul.....	19
3 Caractéristiques topographique.....	20
3.1 Le relief .....	20
3.1.1 Carte hypsométrique.....	20
3.1.2 La courbe hypsométrique .....	22
3.2 Les pentes .....	23
3.2.1 Carte des pentes .....	23
3.2.2 Pente moyenne de l'écoulement.....	25
3.2.3 Indices de pente : .....	25
4 Caractéristiques du réseau hydrographiques.....	26
4.1 Classification de Strahler.....	27
4.2 Densité de drainage .....	28
5 Temps de concentration .....	28

<b>Chapitre III : les précipitations et régime d'écoulement sur le bassin versant.....</b>	<b>31</b>
1 Analyse du régime pluviométrique .....	32
1.1 Précipitation moyennes mensuelles .....	31
1.2 Précipitation moyenne saisonnières .....	31
1.3 Précipitation moyenne annuelles.....	32
2 Analyse du régime d'écoulement.....	33
2.1 Débits moyens mensuels .....	33
2.2 Débits moyenne saisonnières .....	34
2.3 Débits moyens annuels.....	35
3 Bilans hydrologique et relation entre les pluies et les débits .....	36
3.1 La lame d'eau écoulée.....	36
3.2 Détermination de l'ETR ou déficit d'écoulement.....	36
3.3 Le coefficient d'écoulement .....	37
3.4 Corrélation entre les pluies et les débits.....	37
3.4.1 Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels .....	38
3.4.2 Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels .....	39
3.4.3 Variations simultanées des précipitations et des débits mensuels.....	40
<b>Chapitre IV: Etude des crues et prédétermination de leur débit maximum probab.....</b>	<b>41</b>
1 Méthodes empiriques.....	46
1.1 Formule de Fuller II .....	41
Chapitre IV: Etude des crues et prédétermination de leur débit maximum probable... 41	
1.2 Formule de Mallet-Gautier.....	42
1.3 Formule de hazan-lazarvic .....	42
2 Méthode statistique .....	44
2.1 Le logiciel HYFRAN-plus .....	44
2.2 Analyse des graphes .....	45
2.3 Analyse des critères statistiques .....	46
2.4 La méthode de Francou-Rodier.....	47
3 Méthode hydrométéorologique de prédétermination de crues : Gradex.....	48
3.1 Principe.....	48
3.2 Méthode.....	49
3.3 Loi de Gumbel.....	51
3.4 Tableau récapitulatifs .....	52

## Liste des figures

Figure 1 : Agence du Bassin Hydraulique Tensit .....	9
Figure 2 : schéma d'un bassin versant .....	11
Figure 3 : Situation géographique du bassin versant de Tnine Ourika .....	12
Figure 4: Carte d'occupation de sol et de végétation du bassin versant Tnine Ourika .	14
Figure 5: Rectangle équivalent du bassin versant de Tnine Ourika .....	19
Figure 6 : Carte hypsométrique du bassin Tnine Ourika .....	21
Figure 7: Courbe hypsométrique du bassin versant de Tnine Ourika .....	22
Figure 8: carte des pentes du bassin versant Tnine Ourika.....	24
Figure 9 : Classification du réseau hydrographique selon Strahler. ....	27
Figure 10 : Les formules de calcul du temps de concentration. ....	29
Figure 11 : Histogramme de Précipitations moyennes mensuelles à la station d'Aghbalou 1970-2017 .....	31
Figure 12: Histogramme de Précipitations moyennes saisonnières à la station d'Aghbalou (1970-2017) .....	32
Figure 13 : histogramme de Précipitations moyennes annuelles a la station d'Aghbalou (1970-2017).....	33
Figure 14 : Histogramme de débits moyens mensuels à la station d'Aghbalou (1970- 2017) .....	33
Figure 15 : Histogramme de Débits moyennes saisonnières à la station d'Aghbalou (1970-1971 à 2016-2017) .....	35
Figure 16 : Histogramme de Débits moyennes annuelles à la station d'Aghbalou (1970-1971 à 2016-2017).....	35
Figure 17: Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels de Tnine Ourika.....	38
Figure 18 : corrélation entre les précipitations et les débits du bassin versant Tnine Ourika.....	39

Figure 19 : Variations simultanées des précipitations et des débits mensuels du bassin versant Tnine Ourika (1970-71/2016-17) .....	40
Figure 20 : Ajustement graphique des débits instantanés maxima annuels selon les lois statistiques .....	46
Figure 21 : Ajustements graphique des données de Pjmax et Qjmax selon la méthode de Gradex. ....	51

### **Liste des tableaux**

Tableau 1: Paramètres du rectangle équivalent du bassin versant Tnine Ourika .....	19
Tableau 2: Surfaces partielles du bassin versant par tranche d'altitude .....	20
Tableau 3: La répartition des tranches d'altitudes du bassin versant Tnine Ourika .....	22
Tableau 4 : Caractéristiques topographiques du bassin versant Tnine Ourika .....	26
Tableau 5 : Récapitulation du calcul de temps de concentration .....	30
Tableau 6 : les valeurs du temps de concentration retenue .....	30
Tableau 7: Précipitation saisonnières du bassin versant Tnine ourika .....	32
Tableau 8: Bilan hydrologique moyen mensuel du bassin de bassin Tnine Ourika .....	37
Tableau 9 : Les valeurs des paramètres k1 et k2 selon la situation géographique de la zone et de pluviométrie annuel .....	43
Tableau 10: Estimation des débits selon hazan-lazarvic .....	43
Tableau 11 : récapitulation du calcule de débits selon les méthodes empiriques .....	44
Tableau 12 : Ajustements numériques des lois statistiques pour la période de retour 100 ans. ....	47
Tableau 13 : Estimation des débits selon la loi Log Normal .....	47
Tableau 14 : Transposition du débit instantané maximum annuel. ....	48
Tableau 15 : extrapolation des débits par la méthode Gradex .....	50
Tableau 16 : Estimation des débits selon Gumbel. ....	51
Tableau 17 : Les différentes méthodes d'estimation des débits des crues différentes .	52

## Résumé

Le bassin versant de l'oued Ourika à Tnine Ourika est un sous bassin du grand bassin de Tensift qui se situe sur le versant nord-ouest du Haut Atlas de Marrakech, dans le centre-Ouest du Maroc, d'une superficie de 578 Km<sup>2</sup>.

L'oued principal prend ses sources dans les hauts reliefs de la chaîne du Haut Atlas à des altitudes avoisinant 4000 m. Ce bassin est à couvert végétal peu dense, et au climat variable et changeant.

La pluviosité annuelle est en moyenne de 532 mm/an à la station d'Aghbalou. Cette pluviométrie augmente évidemment avec l'altitude ; et peut dépasser 700 mm par an en amont du bassin. Les régimes pluviométriques et hydrologiques de l'Ourika sont caractérisés par des hautes eaux de printemps. Le maximum pluviométrique est généralement enregistré aux mois de mars et avril. Les altitudes varient de 822 m à l'exutoire Tnine Ourika au point culminant situé à 3993 m, et l'altitude moyenne est de l'ordre de 2383 m.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressées, entre autre, à l'estimation des débits de pointe du bassin versant de Tnine Ourika. C'est un bassin non jaugé. Nous avons donc effectué une caractérisation hydrologique du bassin versant à Aghbalou, puis procéder à une transposition au niveau non jaugé de la localité de Tnine Ourika. La caractérisation hydrologique a comporté une analyse géologique, géométrique, topographique et hydrographique. L'estimation des débits de crues est réalisée avec plusieurs méthodes : la méthode du Gradex, les méthodes empiriques, ou les analyses fréquentielles avec des lois statistiques.

# Introduction

Dans les régions méditerranéennes humides à arides, les oueds ont la particularité de rentrer fréquemment en crues. Au Maroc, par exemple, l'une des plus belles vallées du pays subit régulièrement une montée des eaux, dévastant à chaque fois le paysage. C'est la vallée de l'Ourika située dans la région de Marrakech.

L'Oued Ourika qui prend sa source dans le Haut Atlas de Marrakech, est un affluent de l'oued Tensift. Avant d'atteindre la plaine du Haouz, l'Ourika emprunte une vallée très encaissée avec des pentes très importantes au niveau des affluents et des versants, et un réseau hydrographique bien développé.

La connaissance des aléas et des risques d'inondation est un préalable fondamental à leur prévention. De nombreuses études ont déjà été réalisées et sont régulièrement lancées en vue d'améliorer les connaissances sur le risque inondation. Parmi ces études on trouve l'étude hydrologique qui consiste à définir les caractéristiques des crues de différentes périodes de retour (débits, durées, fréquences).

L'étude hydrologique est basée sur la connaissance des chroniques de débit sur la rivière, relevés aux stations hydrométriques et enrichies des informations sur les crues historiques. Des changements significatifs dans l'occupation de l'espace sur le bassin versant (forte urbanisation, reboisement important, etc.) ou des aménagements lourds en amont (barrages écrêteurs de crues) sont susceptibles de modifier le régime des crues (en particulier les crues moyennes) et peuvent nécessiter une actualisation d'études hydrologiques antérieures.

A cet effet, l'objectif de ce travail est une étude hydrologique du bassin versant l'oued Ourika. Ce bassin est jaugé au niveau de la station d'Aghbalou. A ce niveau, nous allons effectuer une caractérisation hydrologique du bassin versant, puis transposer l'information hydrologique au niveau non jaugé de la localité de Tnine Ourika. Cette transposition a pour effet de connaître les pointes de crues à ce niveau non jaugé de l'oued.

## Présentation de l'Agence de Bassin hydraulique du Tensift



**Figure 1 : Agence du Bassin Hydraulique de Tensift**

L'ABHT est instaurée par le décret n° 2-00-479 du 14 Novembre 2000, en application de l'article 20 de la loi sur l'Eau. Elle a pour mission d'évaluer, de planifier, de développer et de gérer les ressources en eau au niveau de sa zone d'action. Cette dernière représente une aire d'investigation globale d'environ 24800 Km<sup>2</sup>, comprenant deux ensembles hydrauliques : les bassins du Tensift (19800km<sup>2</sup>) et les bassins du Ksob-Igouzoulen (5000Km<sup>2</sup>)

Elle compte administrativement :

- ✓ La totalité de la préfecture de Marrakech et des provinces d'Essaouira et de Youssoufia.
- ✓ La majeure partie des provinces d'Al Haouz et de Chichaoua.
- ✓ Une partie des provinces de Kelaa des Sraghnas, de Rhamna et de Safi

L'Agence de Bassin Hydraulique du Tensift est chargée de :

- ✓ Réaliser toutes les mesures piézométriques et de jaugeage ainsi que les études hydrologiques, hydrogéologiques, de planification et de gestion de l'eau tant au plan quantitatif que qualitatif.
- ✓ Gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées.
- ✓ Réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations en collaboration avec les Collectivités locales.
- ✓ Tenir un registre des droits d'eau reconnus et des concessions et autorisations de prélèvements d'eau accordées.
- ✓ Réaliser toutes les mesures de qualité et appliquer les dispositions de la loi 10-95 et des lois en vigueur relatives à la protection des ressources en eau et à la restauration de leur qualité en collaboration avec l'autorité gouvernementale chargé de l'environnement.
- ✓ Proposer et exécuter les mesures adéquates pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau ou pour prévenir les risques d'inondations.

# Chapitre I : Présentation générale du bassin versant de Tnine Ourika

## 1 Définition d'un bassin versant

Un bassin versant (ou bassin hydrographique) est une portion de territoire délimitée par des lignes de crêtes (ou ligne de partage des eaux) et alimenté par un même réseau hydrographique (une rivière, avec tous ses affluents et tous les cours d'eau qui alimentent ce territoire).

A l'intérieur d'un même bassin versant, toutes les eaux reçues suivent, du fait du relief, une pente naturelle et se concentrent vers un même point de sortie appelé exutoire.

Chaque bassin versant est composé de plusieurs sous-bassins versants qui, à leur tour, sont également composés de sous-bassins versants.

On retrouve à l'intérieur d'un bassin versant des caractéristiques qui lui sont propres, soit : Hydrographie et hydrologie, géomorphologie et reliefs, pédologie et géologie, utilisation et couverture des sols, écologie, etc....

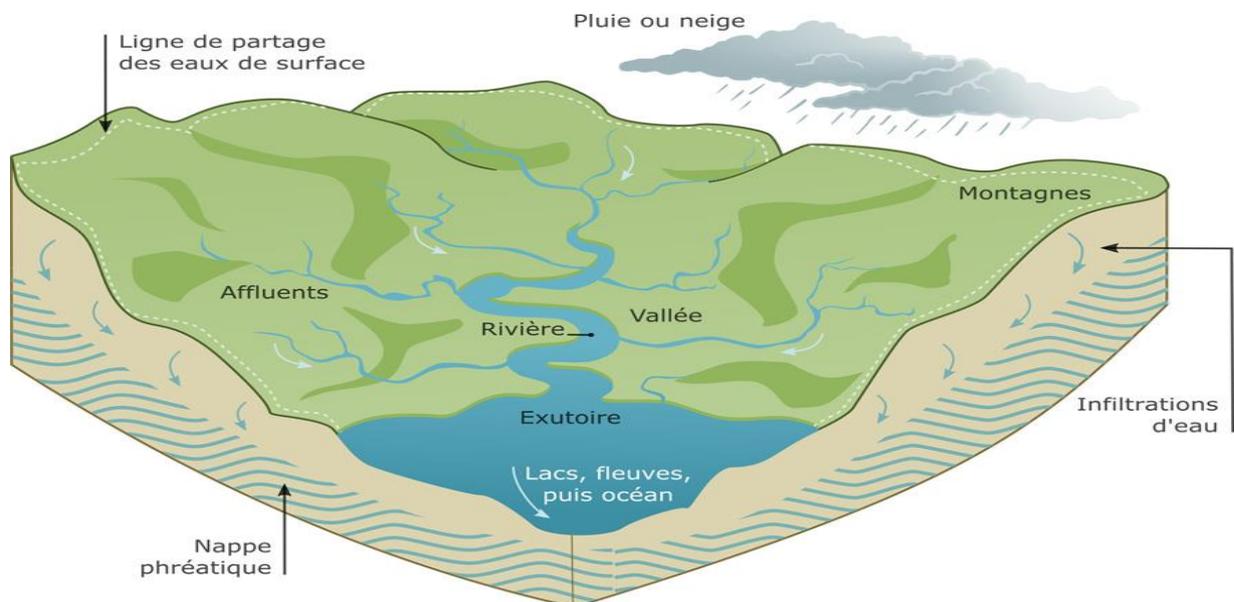


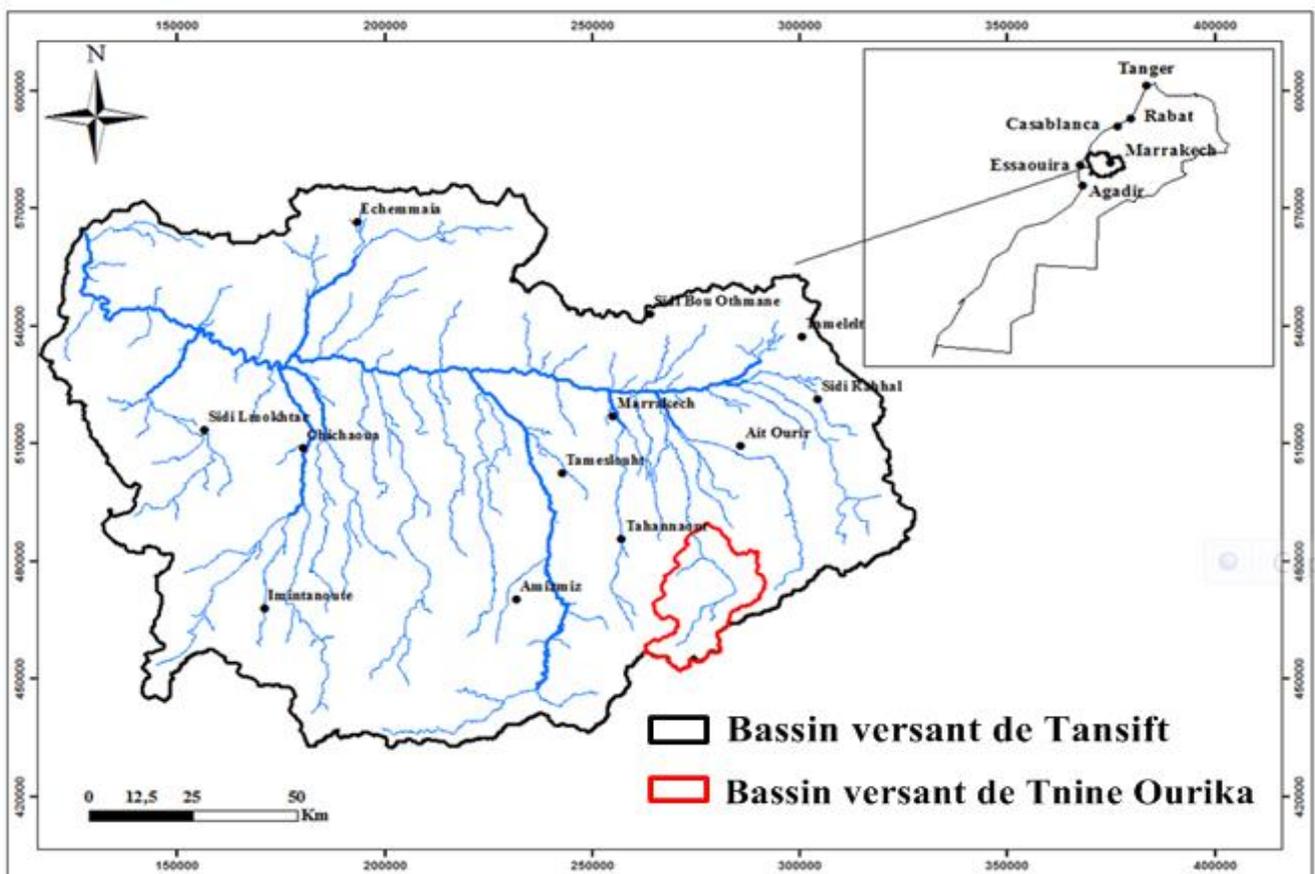
Figure 2 : schéma d'un bassin versant(Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust 2018)

## 2 Généralités sur le bassin

### 2.1 Situation géographique

#### 2.1.1 Zone d'étude

Le bassin versant de Tnine Ourika se situe dans le Haut Atlas de Marrakech, Maroc. Il constitue un sous bassin atlasique du grand bassin versant du Tensift (Figure 2). Ce bassin couvre une superficie de 578 km<sup>2</sup>. Il est situé entre les Latitudes 31° et 31°21' Nord et les longitudes 7°30' et 7°60' Ouest. Il est limité au Sud par le haut bassin de l'Oued Souss, au Nord par la plaine du Haouz, à l'Est par le bassin versant de Zat et à l'ouest par le bassin versant de la Rhéraya



**Figure 3** : Situation géographique du bassin versant de Tnine Ourika (Khattabi et al, 2016)

Notre zone d'étude est caractérisée par trois principales unités physiographiques: les zones du piémont avec une altitude aux alentours de 600 m, les vallées de l'Oued Ourika et ses affluents et les zones de haute montagne et les plateaux d'altitude.

Sur le plan topographique, l'altitude moyenne s'élève à 2500 m avec prédominance de terrains compris entre 1600 et 3200 m (75%). Les pentes du bassin sont dans l'ensemble fortes, amplifiant ainsi les phénomènes de ruissellement et d'érosion.

## **2.2 Cadre géologique**

Le bassin versant de Tnine Ourika offre deux grands types de faciès (Biron, 1982) :

Un substrat rocheux dur (roches éruptives ou métamorphiques) situé dans la partie amont du bassin versant représentant environ 61% de son étendue et un substrat tendre à moyennement tendre situé à des altitudes inférieures, composé de dépôts permotriassiques et quaternaires, représentant environ 39 % de la superficie du bassin.

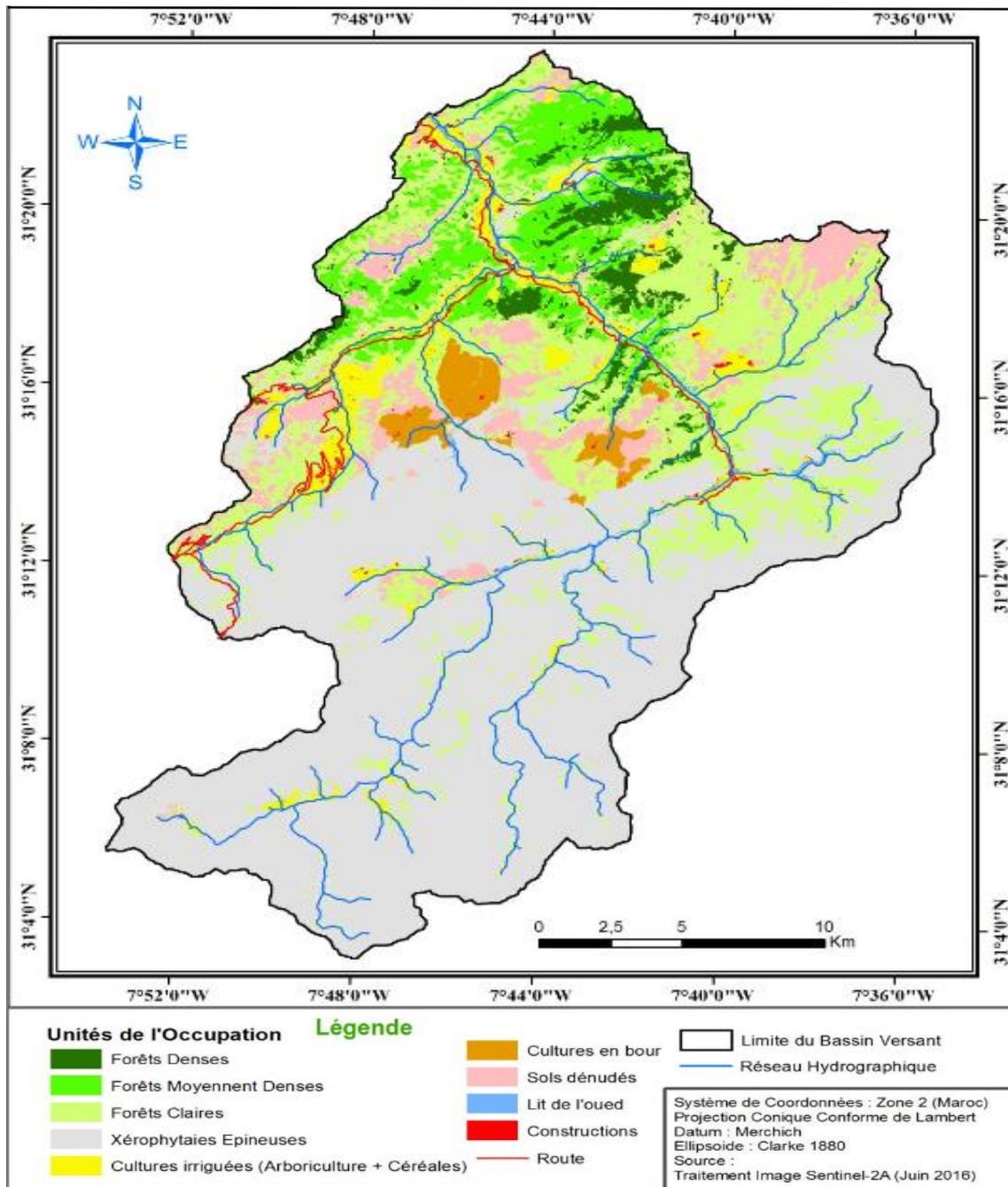
Il s'agit des grès friables et marnes rouges, des conglomérats et grès rouges massifs, et des flysch schisto-gréseux. Les ravins de la partie amont traversent un substrat rocheux dur caractérisé principalement par de faibles apports solides. Les eaux au moment des crues sont claires et non chargées. Les ravins situés dans la partie centrale du bassin sont par contre très vulnérables à l'érosion hydrique et charrient par conséquent des apports solides et liquides importants.

## **2.3 Le climat**

Le bassin versant de Tnine Ourika est caractérisé par sa grande variabilité spatiotemporelle. La précipitation annuelle est en moyenne de 532 mm. Cette pluviométrie augmente avec l'altitude. Elle est de l'ordre de 400 mm au piedmont et peut dépasser 700 mm par an sur les hauts sommets du bassin. Les températures moyennes varient de 21.5 à 32°C pour les maximas et de 4 à 5.7°C pour les minimas. Les mois de juillet et août sont les mois les plus chauds alors que les mois de décembre et janvier sont les mois les plus froids de l'année.

## 2.4 Le couvert végétal

Au niveau de la zone se trouve en grande partie dans l'étage Oroméditerranéen à base de matorrals de xérophytes épineuses et d'hémicryptophytes d'altitude (Ouhammou, 1986). La végétation arborée au niveau du bassin versant, est représentée par les étages Méditerranéen, Mésoméditerranéen et Thermoméditerranéen. Il s'agit essentiellement de forêts de chêne vert, de genévriers, et de thuya (Ouhammou, 1986).



**Figure 4:** Carte d'occupation de sol et de végétation du bassin versant Tnine Ourika(

## Chapitre II : Caractéristiques du bassin versant Tnine Ourika

### 1 Délimitation du bassin versant sous ArcGIS

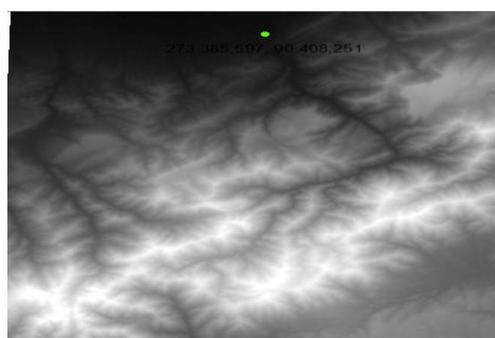
Les outils de modélisation hydrologique proposés dans la boîte à outils de l'Extension ArcGIS Spatial Analyst fournissent des permettant de méthodes décrire les composants physiques d'une surface.

Grâce aux outils d'analyse hydrologique, vous pouvez identifier des cuvettes, déterminer la direction du flux, calculer l'accumulation du flux, délimiter les bassins versants et créer des réseaux hydrographiques.

Pour délimiter ce bassin versant on s'est basé sur le modèle numérique de terrain (MNT) qui est une représentation en trois dimensions de la surface de la terre, créée à partir des données d'altitudes du terrain.

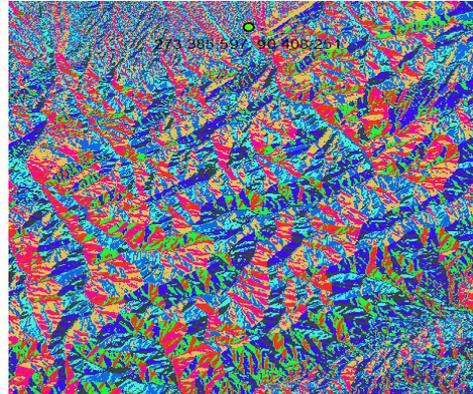
Cette délimitation a été effectuée en suivant plusieurs étapes :

1. Conversion de la DEM découpée (par Global Mapper) en image raster lisible par ArcGIS (en utilisant la commande ArcToolbox/Conversion Tools-DEM to Raster),



2. La fonction « **Fill** » utilisée, permet de combler des cellules identifiées comme étant des points bas (Par défaut la commande recherche la plus faible valeur voisine d'altitude et l'utilise pour combler la dépression). Cette correction est nécessaire pour une meilleure délimitation du bassin

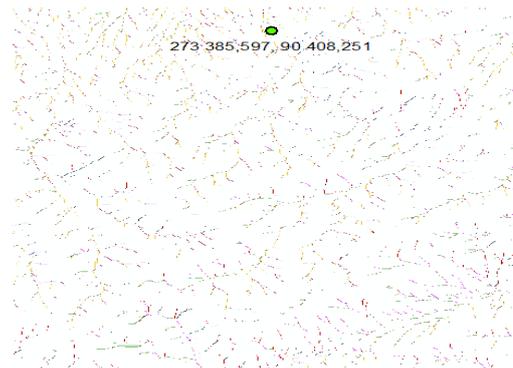
3. La commande « **Flow Direction** » (Directions des écoulements) utilisée, permet d'identifier les directions des écoulements dans la carte raster MNT.



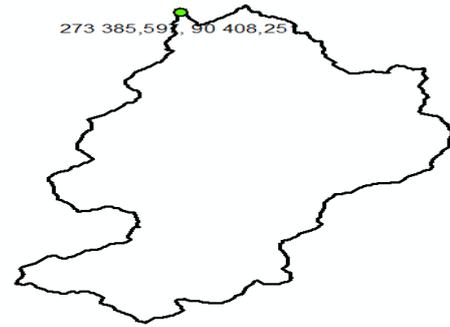
4. La fonction « **Flow accumulation** » (Accumulation des écoulements) utilisée permet de calculer, pour chaque cellule, la quantité d'eau accumulée dans la cellule du fait des écoulements en amont.



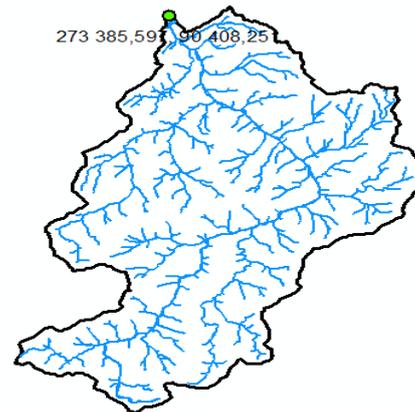
5. La fonction **Vectorisation du réseau hydrographique**, Cette commande permet de générer une couche correspondant au réseau hydrographique. Le niveau de détail du réseau peut être défini par l'utilisateur en nombre de cellules : 200, 300, 500, 1000...etc. dans la fenêtre Expression. Ceci en y tapant  $value > nombre$  (Plus le nombre est petit, plus le détail est grand).



6. La fonction « **Watershed** » (Bassin versant) permet de délimiter le bassin après avoir indiqué l'exutoire sur le cours d'eau principal.

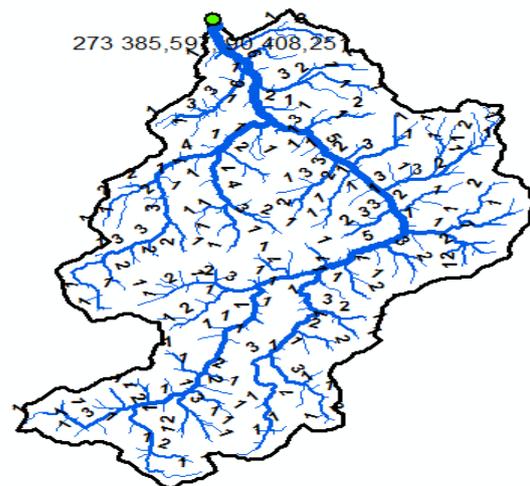


7. La commande « **Clip** » permet de découper le réseau hydrographique sur la limite finale du bassin versant.



8. Classification du réseau hydrographique (**Strahler**).

La classification de Strahler permet d'attribuer des ordres aux branches du réseau hydrographique selon leurs importances. Ensuite Il faut convertir la couche obtenue en shapefile linéaire par l'outil Conversion Tools (from raster to polyline).



## **2 Caractéristiques géométriques**

### **2.1 Aire et périmètre**

L'aire est la portion du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin. Sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre, soit par la méthode des *petits carrés*, et est généralement exprimée en km<sup>2</sup>.

Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en km, de la ligne de contour du bassin ; sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre. Pour certaines applications on trace le *périmètre stylisé* du bassin en *lissant* son contour.

## 2.2 Indice de compacité

Pour évaluer la forme du bassin on a utilisé l'indice de compacité de Gravelius, Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et donc compact ; mais supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

-Avec :

**P**: périmètre du bassin en km (= 136 km)

**A** : est la surface du bassin en km<sup>2</sup> (= 578 km<sup>2</sup>)

**KC = 1.58**, Ce bassin est donc de forme relativement allongée. Comme nous l'avons dit plus haut, cette forme favorise des faibles débits de pointes en raison du temps de concentration élevé.

## 2.3 Le rectangle équivalent

Pour pouvoir comparer des bassins versants entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement, on introduit la notion du rectangle équivalent.

On suppose que, sur un bassin donné, l'écoulement est approximativement le même que sur un rectangle de même superficie, ayant un même coefficient de Gravelius, une même répartition hypsométrique à conditions climatiques similaires, une même distribution des sols, de la végétation et même densité de drainage.

En considérant la longueur L et la largeur l du rectangle, connaissant le périmètre P, l'indice de compacité de Gravelius K<sub>G</sub> et la superficie A du bassin versant, on peut déduire l et L :

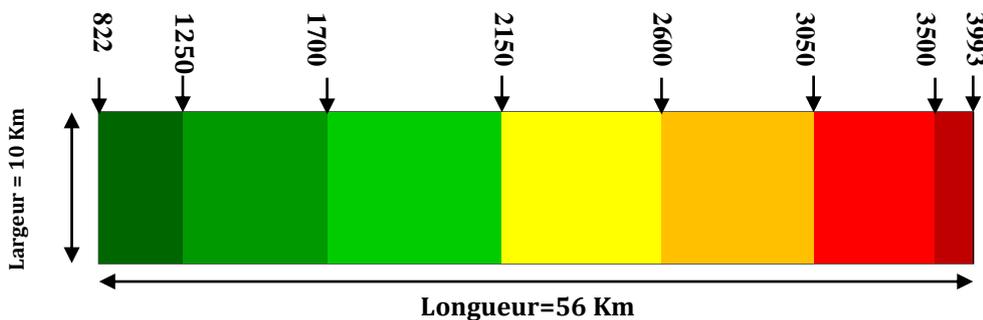
$$L(\text{Largeur}) = K_C \cdot \frac{\sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C}\right)^2}\right)$$

$$l(\text{longueur}) = K_C \cdot \frac{\sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C}\right)^2}\right)$$

-Avec **KC** : indice de compacité ; et **A** : l'aire du bassin

Indice de compacité	Surface du bassin versant en (Km <sup>2</sup> )	Longueur du rectangle équivalent en (Km)	Largeur du rectangle équivalent en (Km)
<b>1.58</b>	<b>578</b>	<b>56</b>	<b>10</b>

**Tableau 1:** Paramètres du rectangle équivalent du bassin versant Tnine Ourika



**Figure 5:** Rectangle équivalent du bassin versant de Tnine Ourika

### 2.3.1 La méthodologie de calcul

-pour dessiner le rectangle équivalent du bassin versant Tnine Ourika

On a :

- l (longueur du rectangle équivalent) = 56 Km

- L (largeurs) = 10 Km

- Les longueurs des tranches d'altitudes =  $\frac{S}{l}$

Avec : - S (surface de bassin versant Tnine Ourika) = 578 km<sup>2</sup>

- l (largeur) = 10 Km

- Avec une échelle 1cm = 5 km

Donc

Les longueurs tanches d'altitudes (cm) =  $\frac{\text{les longueurs tanches d'altitudes (km)}}{5}$

Les tranches (m)	Surface (km2)	longueur (km)	longueur (cm)
822-1250	55	5,5	1,1
1250-1700	96	9,6	1,92
1700-2150	116	11,6	2,32
2150-2600	105	10,5	2,1
2600-3050	101	10,1	2,02
3050-3500	78	7,8	1,56
3500-3993	27	2,7	0,54
<b>La somme</b>	<b>578</b>	<b>57,8</b>	<b>11,56</b>

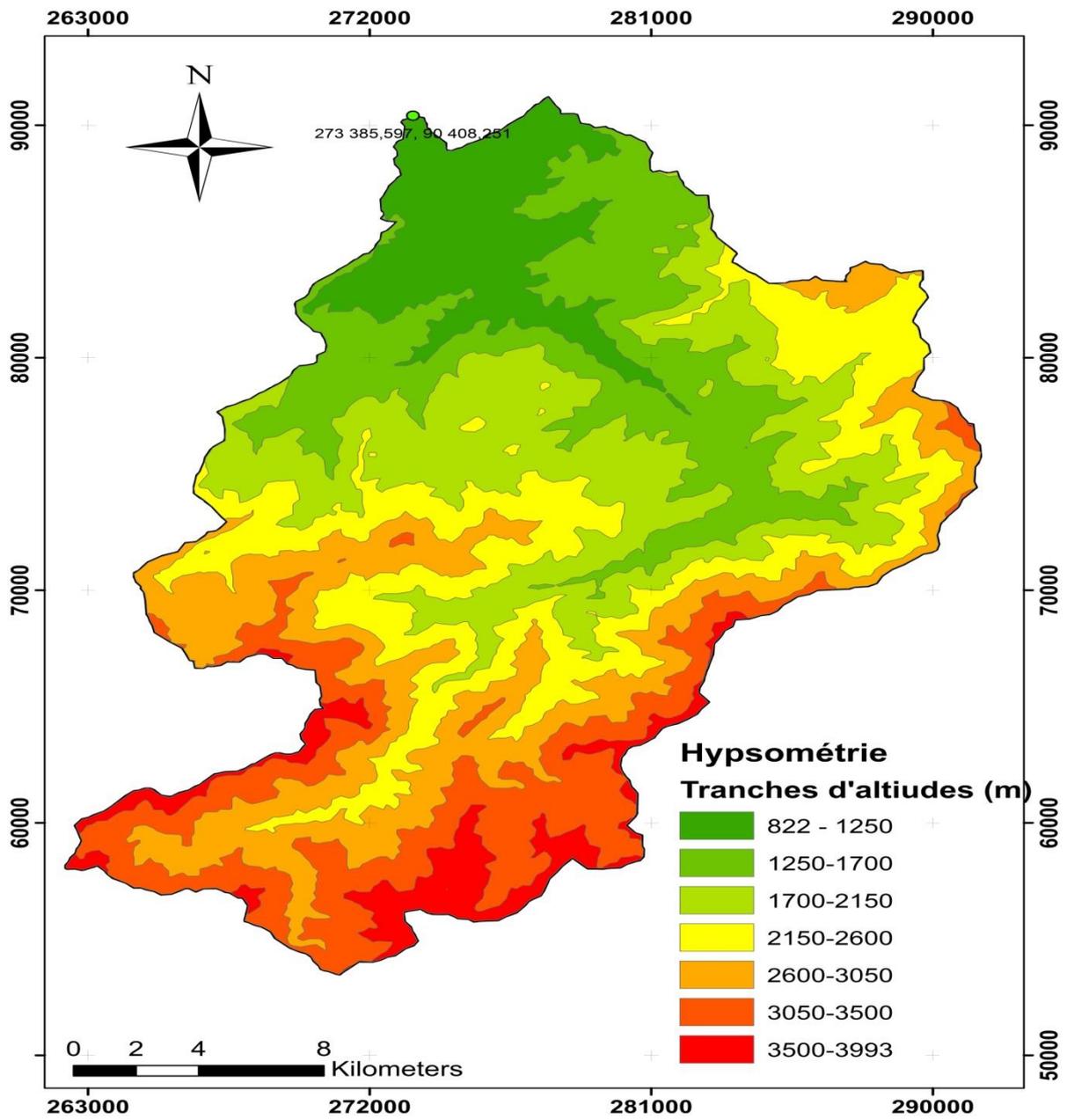
**Tableau 2:** Surfaces partielles du bassin versant par tranche d'altitude

### **3 Caractéristiques topographique**

#### **3.1 Le relief**

##### **3.1.1 Carte hypsométrique**

**L'hypsométrie** : Les altitudes du bassin versant sont déterminées à partir d'une carte hypsométrique générée automatiquement sur un MNT. Cette carte donne une idée sur la répartition des altitudes dans le bassin, ce qui permet d'identifier les zones où l'altitude est anormale.



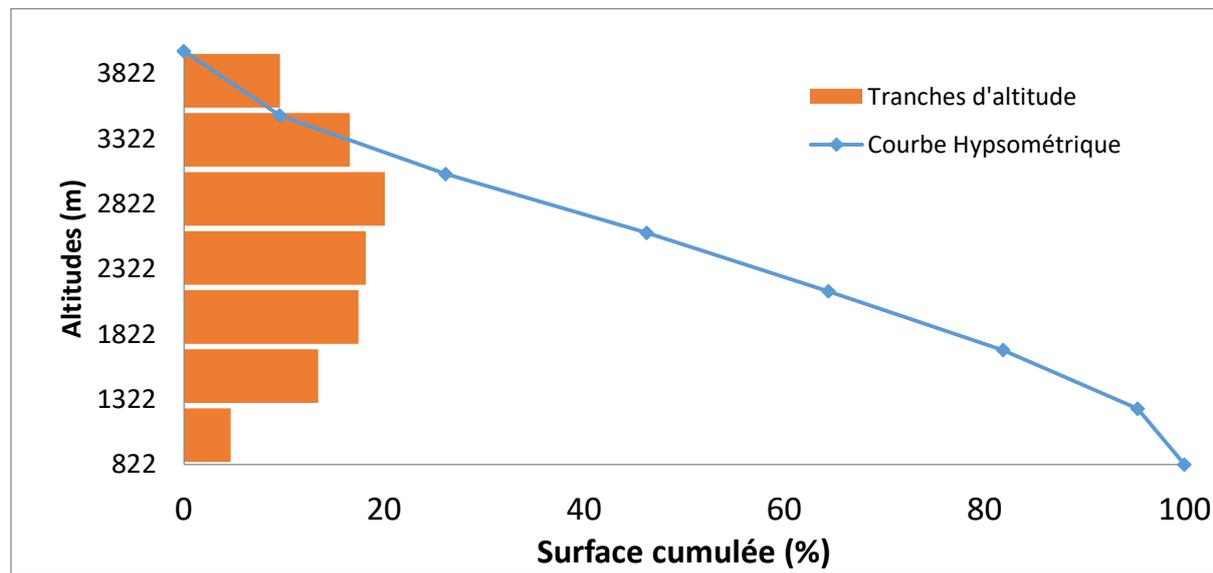
**Figure 6 : Carte hypsométrique du bassin Tnine Ourika**

### 3.1.2 La courbe hypsométrique

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique. Elle caractérise la répartition de l'altitude en fonction de la surface du bassin versant exprimée en pourcentage.

Tranches d'altitudes (m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Surface cumulée (%)
822-1250	55,404488	9,58751706	100
1250-1700	95,839639	16,5846524	95,32
1700-2150	116,035714	20,0794995	81,89
2150-2600	105,082937	18,1841668	64,44
2600-3050	100,872126	17,4555034	46,25
3050-3500	77,604134	13,4290738	26,17
3500-3993	27,042468	4,67958703	9,6

**Tableau 3:** La répartition des tranches d'altitudes du bassin versant Tnine Ourika



**Figure 7:** Courbe hypsométrique du bassin versant de Tnine Ourika

La courbe montre un profil avec une succession de tranches d'altitudes d'une façon régulière, c'est-à-dire il n'y a pas beaucoup de rupture de la pente, donc c'est une courbe mature.

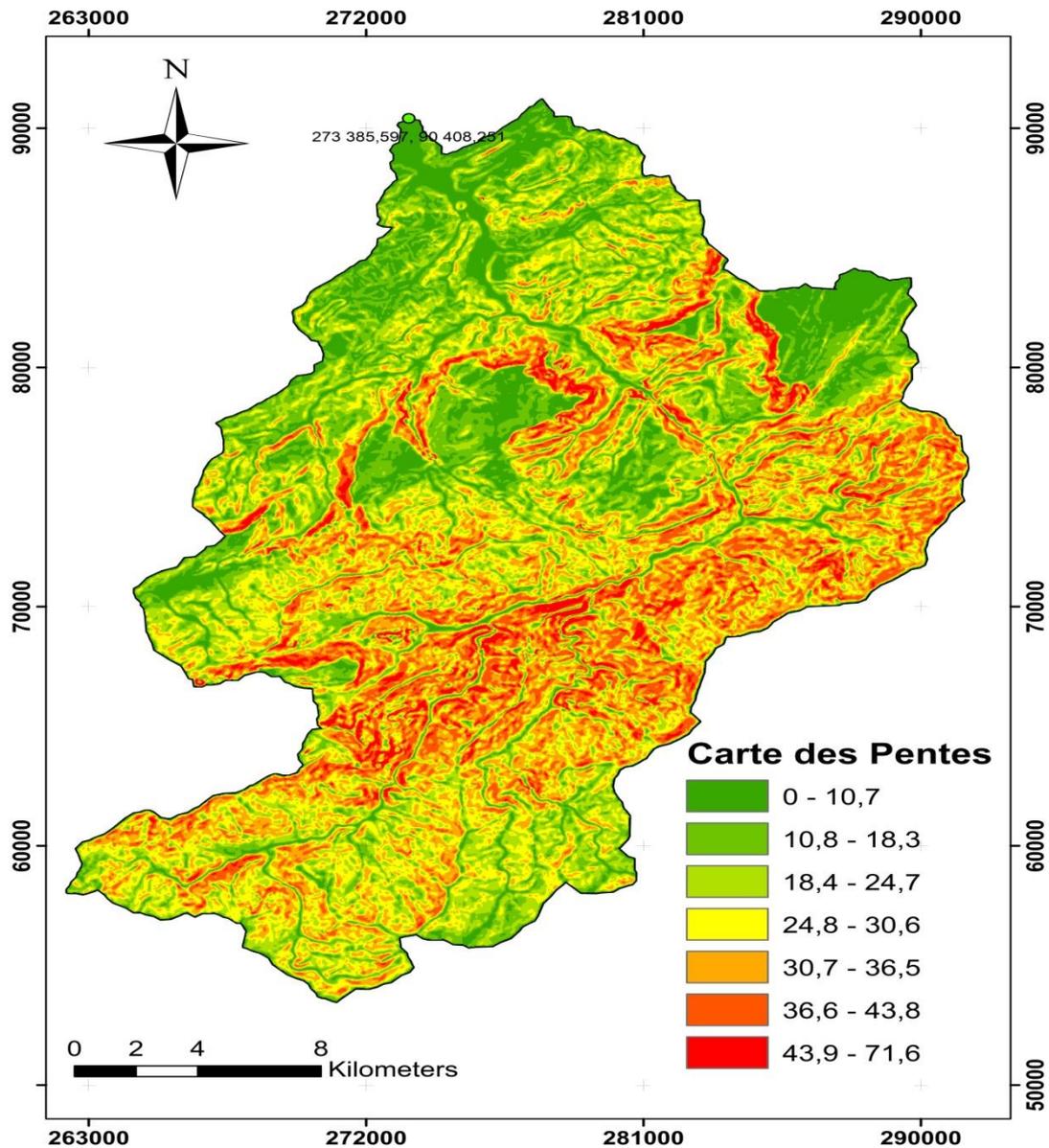
A partir de cette courbe on peut déduire :

- **L'altitude moyenne** : Permet d'analyser les lois réglant les précipitations et le ruissellement superficiel
- **L'altitude maximale** : C'est l'altitude la plus fréquente (ou le mode), représentant le point le plus élevé du bassin.
- **L'altitude minimale** : Représente le point le plus bas du bassin situé généralement à l'exutoire.
- **L'altitude médiane** : L'altitude lue, sur la courbe hypsométrique, au point d'abscisse 50%

## 3.2 Les pentes

### 3.2.1 Carte des pentes

La carte des pentes permet de quantifier les pentes des versants au sein d'un bassin versant. Elle donne une vue d'ensemble sur les versants pentus et ceux tabulaires, elle est obtenue automatiquement à partir du traitement d'un MNT.



**Figure 8:** carte des pentes du bassin versant Tnine Ourika(en degré)

La carte des pentes (figure5) illustre la répartition des différentes valeurs des pentes dans le bassin. Les pentes varient de  $0^{\circ}$  jusqu'à  $71.63^{\circ}$ . On remarque que les pentes fortes se distribuent dans la partie sud du bassin, où il y a des hautes altitudes. De plus, les faibles pentes se distribuent dans la partie Nord.

### 3.2.2 Pente moyenne de l'écoulement

La pente de l'écoulement se calcule par la relation suivante:

$$P = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \cdot 100$$
$$P = \frac{3993 - 822}{55000} \cdot 100 = 5.76\%$$

Avec:

- Hmax et Hmin : sont respectivement les altitudes max et min le long du cours d'eau.
- L : est la longueur du cours d'eau principal en m

C'est une caractéristique importante qui permet de déterminer la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin

### 3.2.3 Indices de pente :

Les indices de pentes sont des paramètres qui nous renseignent sur la topographie du bassin versant.

$$\text{- Ip (Indice de pente classique\%)} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L_{eq}} \cdot 100$$
$$= \frac{(3993 - 822) \text{ (m)}}{56000 \text{ (m)}} \cdot 100$$
$$= 5.66\%$$

Avec :

H max : l'altitude maximale.

H min : l'altitude minimale.

Leq : la longueur du rectangle équivalent.

$$\text{- Ig (Indice de pente global\%)} = \frac{D_u}{L_{eq}} \cdot 100$$
$$= \frac{2258}{56 \cdot 10^3} * 100 \text{ (m / m)}$$
$$= 4.03\%$$

Du : la dénivelée utile qui est l'altitude entre laquelle s'inscrit 90% de la surface du bassin

Avec : Du (m) = H5% - H95%

$$\begin{aligned}
 -P_{\text{moy}} &= 2 * \frac{H_{\text{moy}}}{L} * 100 \\
 &= 2 * \frac{2292}{55 * 10^3} * 100 (\text{m/m}) \\
 &= 8.33\%
 \end{aligned}$$

L : la longueur du cours d'eau principal en (m)

H moy : L'altitude moyenne (m)

**Tableau récapitulatif:**

Altitudes caractéristiques (m)				Indices de pente (%)			Dénivelée (m)	Pente de l'écoulement ( %)
H max	H min	H moy	H médiane	Ip	Ig	Pmoy	2258	5.76
3993	822	2293	2383	5.66	4.03	8.33		

**Tableau 4 : Caractéristiques topographiques du bassin versant Tnine Ourika**

#### **4 Caractéristiques du réseau hydrographiques**

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux :

- **La géologie** : par sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion, la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique.
- **Le climat** : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.
- **La pente du terrain**, détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.

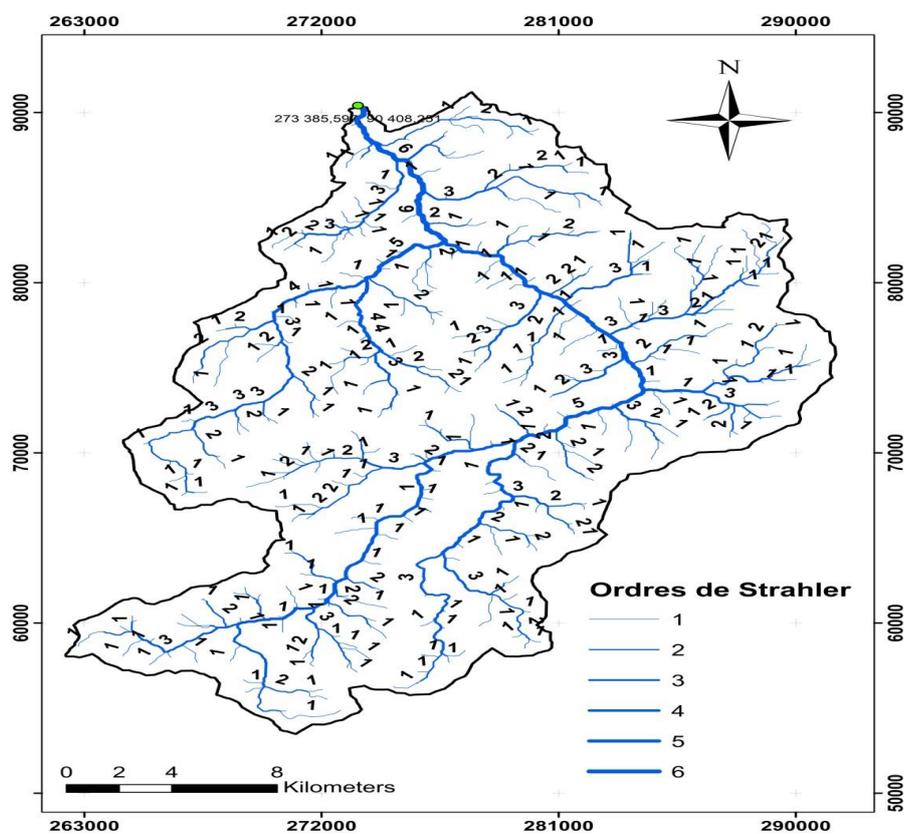
- **La présence humaine** : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé originel du réseau hydrographique.

Parmi les paramètres qui peuvent décrire le réseau hydrographique on trouve :

#### 4.1 Classification de Strahler

Les principes de cette classification de Strahler, qui est la plus utilisée aujourd'hui, sont les suivants :

- Tout cours d'eau dépourvu de tributaires est d'ordre un.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau d'ordre différent prend l'ordre du plus élevé des deux.
- Le cours d'eau formé par la confluence de deux cours d'eau du même ordre est augmenté de un.



**Figure 9** : Classification du réseau hydrographique selon Strahler.

On remarque que le réseau hydrographique du bassin versant de Tnine Ourika est bien développé dans la partie amont du bassin du fait de l'imperméabilité du socle précambrien, du couvert végétal restreint et du relief très accidenté. Alors que dans la partie aval, il est moins développé par la présence des terrains moins résistants et peu perméables, avec un relief plus ou moins modéré et un couvert végétal plus abondant que celui de l'amont.

#### 4.2 Densité de drainage

Elle représente la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$Dd = \frac{\sum_{i=0}^n Li}{A}$$
$$= \frac{533.96}{578} = 0.92 \text{ km/km}^2$$

**Dd**: la densité de drainage (en km/km<sup>2</sup>)

**Li**: longueur totale de tous les cours d'eau d'ordre i(en Km)

**A**: surface du bassin (en km<sup>2</sup>)

Elle renseigne sur la dynamique du bassin et le type du ruissellement de surface.

Le bassin versant de Tnine Ourika est caractérisé par une faible densité de drainage de l'ordre de 0.92. Sachant que nous avons travaillé avec une carte MNT de résolution 30m, la densité de drainage doit être plus importante avec une résolution plus fine.

### 5 Temps de concentration

le temps de concentration (Tc) des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point situé le plus loin possible de l'exutoire pour atteindre ce dernier.

Le temps de concentration est un concept utilisé en hydrologie pour mesurer la réponse d'un bassin versant à un événement pluvieux (réponse hydrologique) L'évaluation du temps de concentration est basée en général sur l'hypothèse que les gouttes de pluie se déplacent perpendiculairement aux lignes de niveau.

<p><b>Formule de Giandotti</b></p> $T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5 * L}{0.8 * \sqrt{D}}$	<p>Tc en heures  S: Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>  L: longueur du cours d'eau (Km)  D: dénivelée (m)</p>
<p><b>Formule de Ventura</b></p> $T_c = 76.3 * \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{I}} / 60$	<p>Tc en heures.  S: Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>  I: pente du cours d'eau m/m</p>
<p><b>Formule de Kripich</b></p> $T_c = \frac{0.01947 * L^{0.77} * I^{-0.385}}{60}$	<p>Tc en heures  L: Longueur du cours d'eau (m).  I: Pente moyenne du bassin m/m.</p>
<p><b>Formule d'espagnole</b></p> $T_c = 0.3 * 60 * \left(\frac{L}{P^{0.25}}\right)^{0.77}$	<p>Tc en min  L: la longueur du cours d'eau en Km  I: la pente en m/m.</p>
<p><b>Formule de Turrazza</b></p> $T_c = \frac{60 * 0.108 * \sqrt[3]{S * L}}{\sqrt{P}}$	<p>Tc en min  L: la longueur du cours d'eau en Km  P: la pente en m/m.</p>
<p><b>Formule de Californienne</b></p> $T_c = 60 * 0.1452 * \left(\frac{L}{\sqrt{P}}\right)^{0.77}$	<p>Tc en min  L: la longueur du cours d'eau en Km  P: la pente en m/m.</p>

**Figure 10 : Les formules de calcul du temps de concentration.**

	Giandotti	Ventura	Kripich	espagnole	Turrazza	Californienne
Tc (min)	<b>238.2</b>	<b>763.8</b>	<b>44.4</b>	<b>280.8</b>	<b>85.2</b>	<b>97.2</b>
Tc(h)	<b>3.97</b>	<b>12.73</b>	<b>0.74</b>	<b>4.68</b>	<b>1.42</b>	<b>1.62</b>

**Tableau 5 : Récapitulation du calcul de temps de concentration**

La valeur du temps de concentration retenue sera la moyenne des valeurs proches. Nous allons éliminer les valeurs extrêmes très grandes ou très petites (pour un bassin de 578 km<sup>2</sup>) pour ne laisser que les valeurs centrales.

Formules	Temps de concentration en heures
Giandotti	<b>3.97</b>
Espagnole	<b>4.68</b>

**Tableau 6 : les valeurs du temps de concentration retenue**

La moyenne des deux valeurs restantes donne la valeur finale du temps de concentration de notre bassin versant qui vaut :

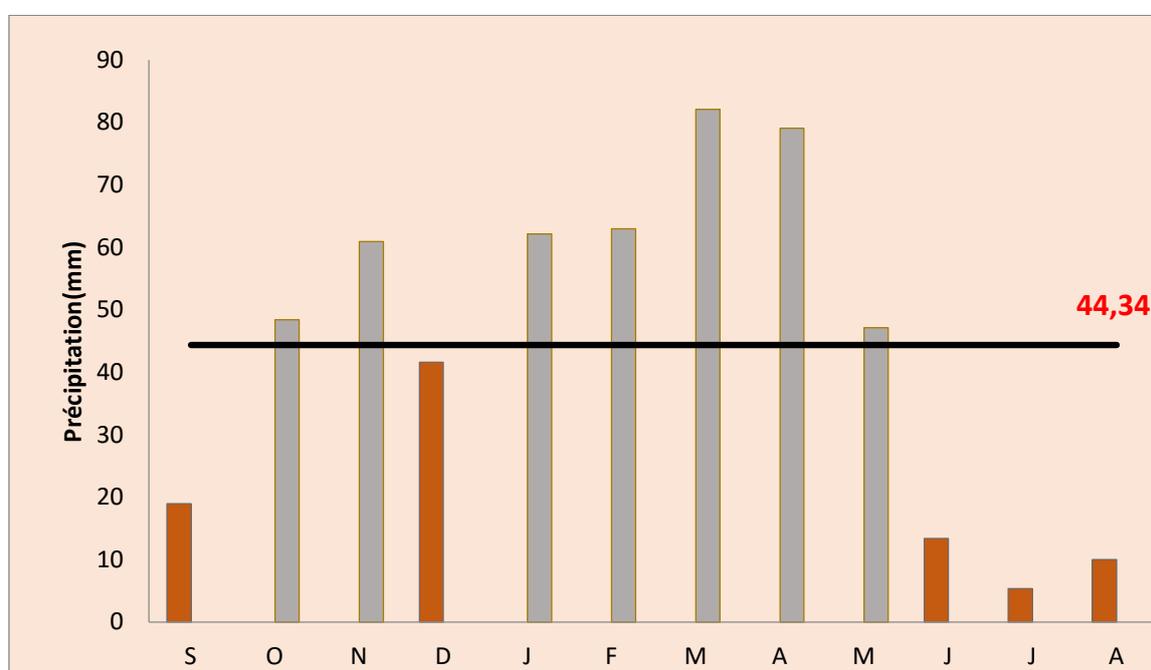
$$T_c = \frac{3.97+4.68}{2} = 4.33 \text{ heures}$$

# Chapitre III : les précipitations et régime d'écoulement sur le bassin versant

## 1 Analyse du régime pluviométrique

### 1.1 Précipitation moyennes mensuelles

Les précipitations mensuelles à la station d'Aghbalou ont été obtenues par le calcul de la moyenne arithmétique des données journalières de chaque mois durant la période 1970/1971- 2016/2017.



**Figure 11** : Histogramme de Précipitations moyennes mensuelles à la station d'Aghbalou 1970-2017

Nous pouvons voir que les mois les plus pluvieux sont Mars et Avril et que les mois les plus sèche sont de Juin à Septembre.

### 1.2 Précipitation moyenne saisonnières

Les précipitations saisonnières sont été calculées à partir des données mensuelles dans le but de connaître la pluviosité moyenne pour chaque saison de l'année :

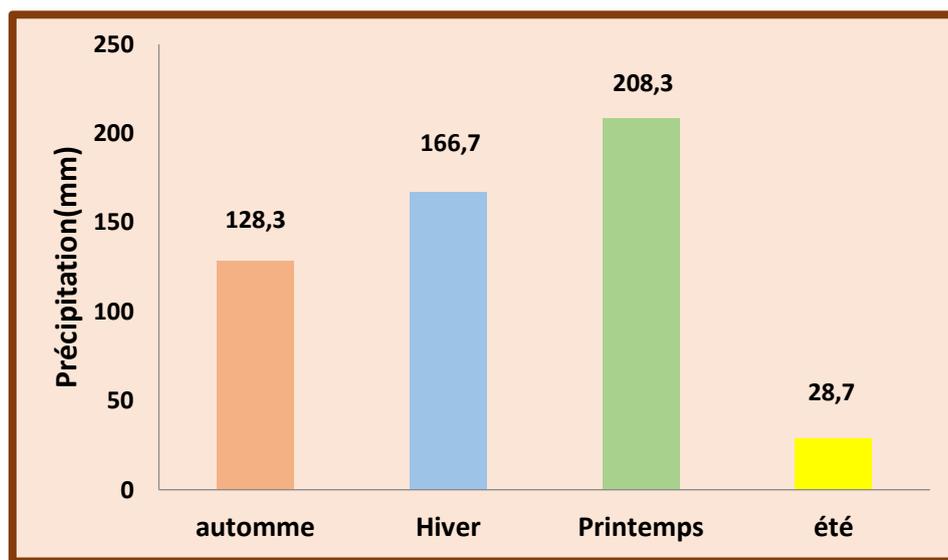
- L'été (Juin Juillet Août)
- L'automne (Mars, Avril et Mai)
- L'Hiver (Décembre, Janvier et Février)
- Le printemps (Mars, Avril et Mai)

-Pour le bassin de Tnine Ourika la répartition se présente comme suit :

Automne	Hiver	Printemps	été
<b>128,3</b>	<b>166,7</b>	<b>208,3</b>	<b>28,7</b>

**Tableau 7:** Précipitation saisonnières du bassin versant Tnine Ourika en (mm)

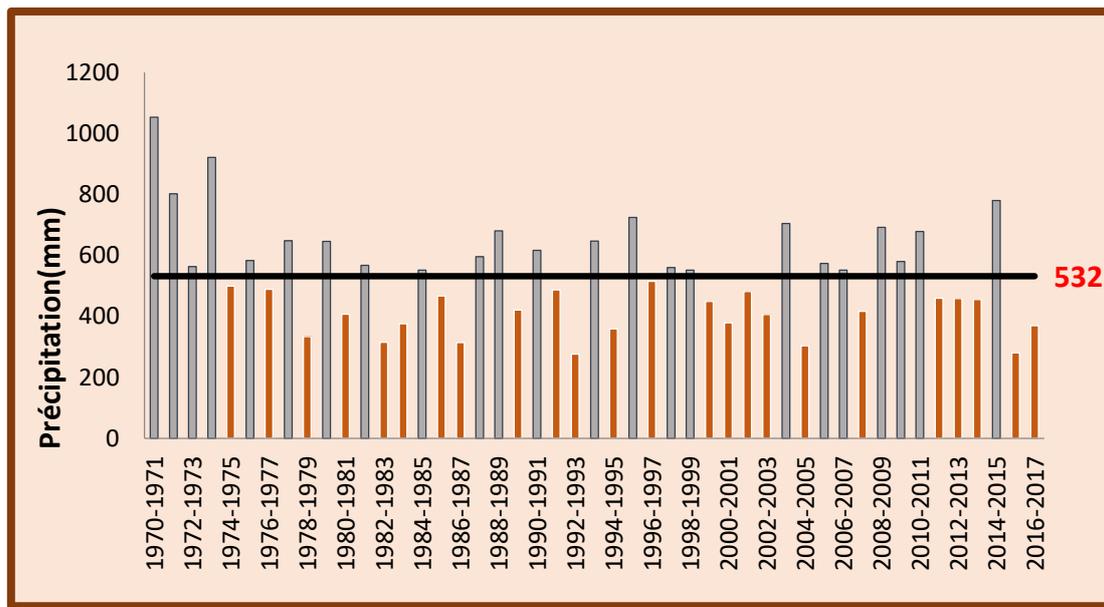
D'après l'analyse de ces précipitations on constate que la saison la plus arrosée est le printemps avec une valeur de 208.3 mm Alors que la saison la plus sèche est l'été avec des précipitations de 28.7 mm.



**Figure 12:** Histogramme de Précipitations moyennes saisonnières à la station d'Aghbalou (1970-2017)

### 1.3 Précipitation moyenne annuelles

Les précipitations moyennes annuelles ont été obtenues par sommation des moyennes mensuelles de chaque année.



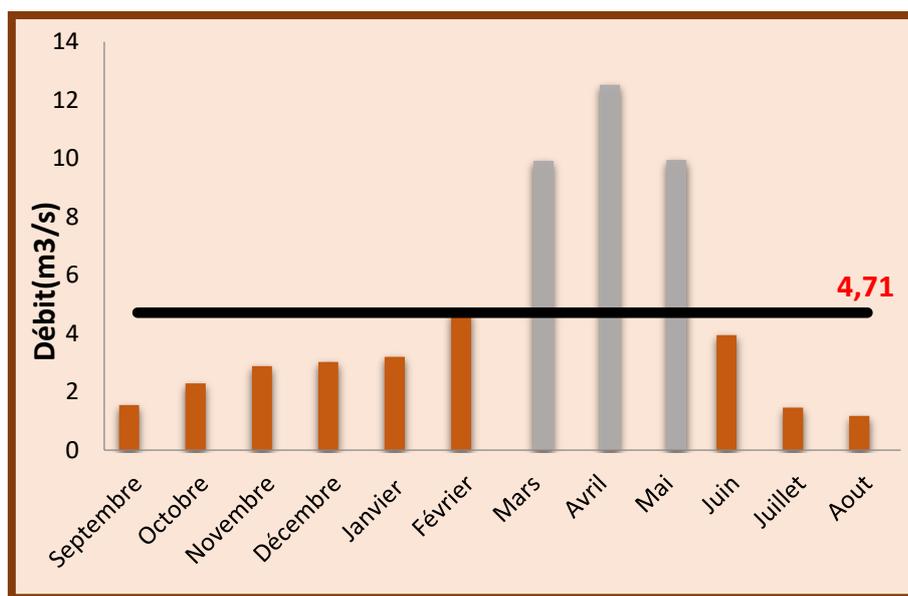
**Figure 13** : Précipitations annuelles à la station d’Aghbalou (1970-2017)

L’histogramme de la figure 13 montre l’évolution annuelle des précipitations. Nous pouvons voir que, dans la période de 1970 à 2017, deux années ont été exceptionnellement pluvieuses. Ce sont les années 1970-1971 et 1973-1974.

## 2 Analyse du régime d’écoulement

### 2.1 Débits moyens mensuels

Les débits moyens mensuels ont été obtenus par le calcul de la moyenne arithmétique des données des débits mensuels de chaque année.



**Figure 14** : Histogramme de débits moyens mensuels à la station d’Aghbalou (1970-2017)

Le graphe représente la variation des débits moyens mensuels couvrant la période qui s'étale de l'année 1970/71 à l'année 2016/17.

Ces débits varient dans la station Aghbalou de 1.17 m<sup>3</sup>/s au mois du aout à 12.52m<sup>3</sup>/s au mois d'avril, Ils sont généralement faibles avec un régime très irrégulier au cours de l'année.

Ces débits commencent à augmenter progressivement depuis le mois de Novembre et atteignent leur maximum pendant les mois de d'avril en raison des chutes importantes des précipitations durant ces mois et la légère fonte de neige des mois précédents.

Les mois de Juin, Juillet, Août, Septembre et Octobre sont les mois les plus secs de l'année.

-On constate que le régime du Tnine Ourika comprend deux périodes distinctes au cours de l'année:

- Une phase pluvieuse allant du mois de Novembre au mois de Mai période des hautes eaux;
- Une phase sèche allant du Juin à Octobre période d'étiage

## **2.2 Débits moyenne saisonnières**

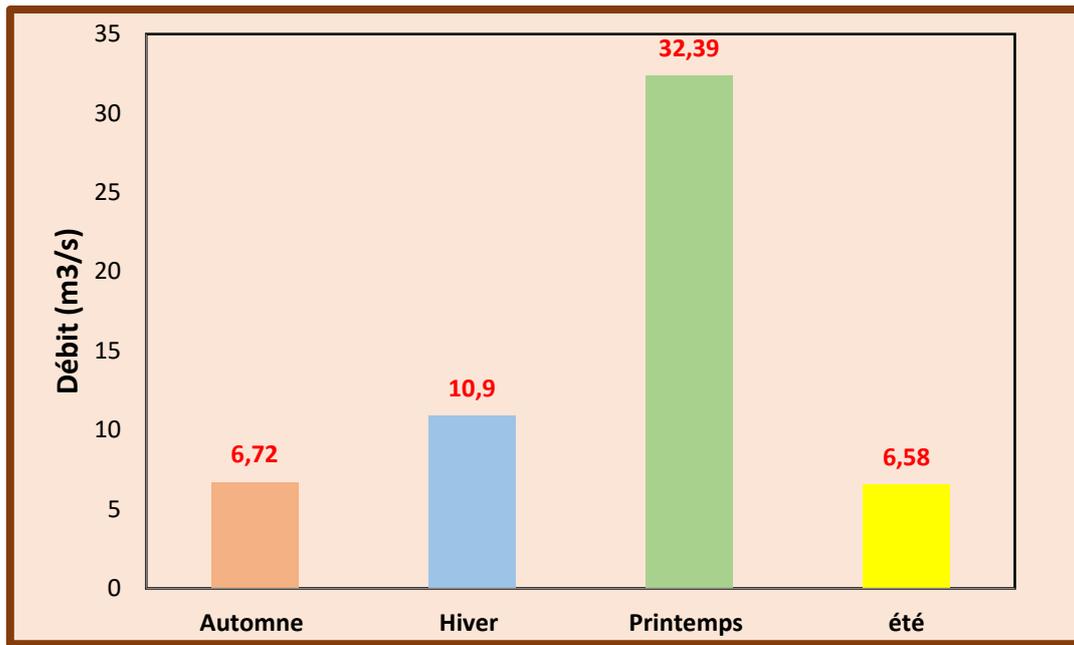
Les débits moyens saisonniers sont été calculés à partir des données mensuelles, la répartition des saisons se fait ainsi:

\*Les débits d'automne sont la somme des moyennes des mois de septembre, octobre et novembre.

\*Les débits en hiver sont la somme des moyennes des précipitations des mois de décembre, janvier et février.

\*Les débits du printemps sont la somme des moyennes des précipitations des mois de mars, avril et mai.

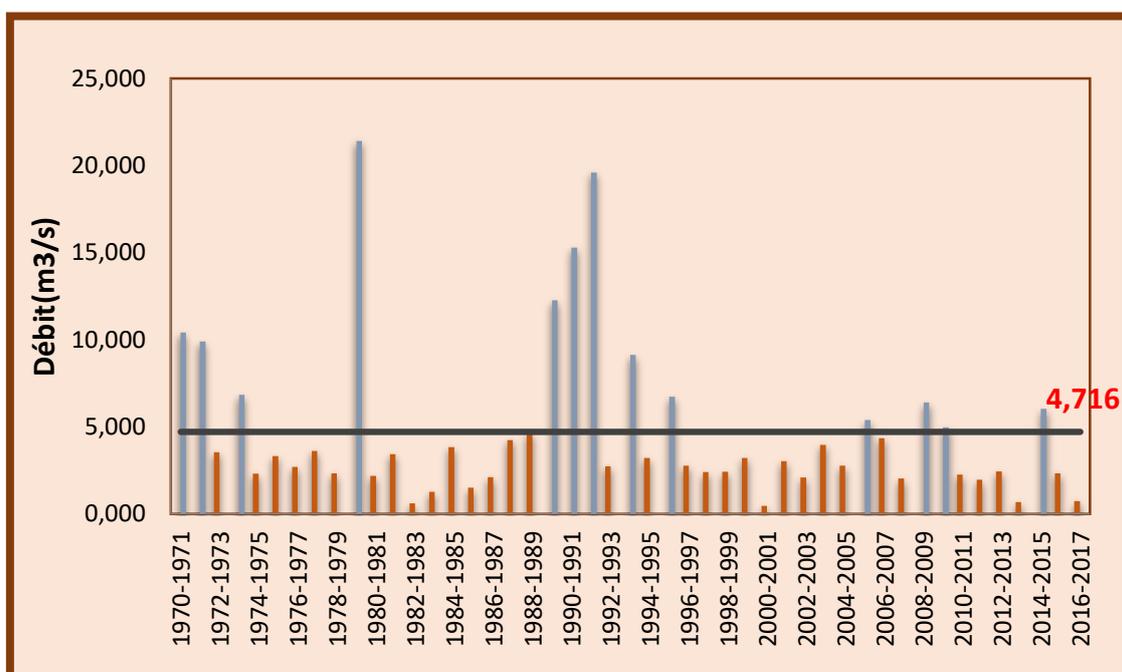
\*Les débits d'été sont la somme des moyennes des précipitations des mois de juin, juillet et août.



**Figure 15 :** Débits moyens saisonniers à la station d'Aghbalou (1970-1971 à 2016-2017)

La figure (15) représente la variation saisonnière des débits à la station Aghbalou, nous constatons un régime qui se manifeste par une augmentation constante de l'automne au printemps avec une diminution du printemps à l'été.

### 2.3 Débits moyens annuels



**Figure 16 :** Débits moyens annuels à la station d'Aghbalou (1970-1971 à 2016-2017)

Au niveau de la station Aghbalou nous avons des débits d'une période de 36 ans de 1980/81 à 2016/17.

La valeur moyenne de l'écoulement annuels pour la période considérée est de l'ordre de 4.716m<sup>3</sup>/s.

Les années qui ont une valeur inférieure à la moyenne sont plus nombreuses que celles qui la dépassent.

### **3 Bilans hydrologique et relation entre les pluies et les débits**

#### **3.1 La lame d'eau écoulée**

La lame d'eau écoulée représente la hauteur d'eau écoulée à l'exutoire défini comme étant le rapport entre le débit et la surface du bassin versant(en un temps donné). Elle est donnée par la relation suivant:

$$E = \frac{Q*(30*24*3600)}{A}$$

Avec:

E= écoulement en (mm)

Q =débit en (m<sup>3</sup>/s)

A= Surface de bassin versant en (m<sup>2</sup>)

Exemple de calcul (pour le mois de septembre):

$$E = \frac{1.54*(30*24*3600)*10^3}{503*10^6}$$

#### **3.2 Détermination de l'ETR ou déficit d'écoulement**

On obtient L'évapotranspiration réelle ETR Par la différence entre, hauteur moyenne annuelle des précipitations et la hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau uniformément répartie sur le bassin

$$D = P - Q$$

D= Déficit d'écoulement (mm),

P= Hauteur moyenne annuelle des précipitations tombées sur un bassin versant (mm)

Q= Hauteur moyenne annuelle de la lame d'eau écoulée (mm).

### 3.3 Le coefficient d'écoulement

C'est le rapport, exprimé en pourcentage, entre la quantité d'eau écoulée par la quantité d'eau précipitée, pour un bassin versant et une durée définie et significative.

MOIS	précipitation (mm)	Débit (m3/s)	Lame d'écoulement (mm)	Déficit d'écoulement (mm)	Coefficient d'écoulement %	Coefficient saison%
S	18,95	1,54	7,94	11,01	41,88	
O	48,41	2,29	11,80	36,61	24,38	30,21
N	60,93	2,88	14,84	46,09	24,36	
D	41,61	3,02	15,56	26,04	37,40	
J	62,17	3,2	16,49	45,68	26,53	34,08
F	62,96	4,68	24,12	38,84	38,30	
M	82,07	9,92	51,12	30,95	62,28	
A	79,08	12,52	64,52	14,56	81,58	84,23
M	47,12	9,95	51,27	-4,15	108,82	
J	13,39	3,94	20,30	-6,91	151,64	
J	5,36	1,46	7,52	-2,16	140,37	117,46
A	9,99	1,17	6,03	3,96	60,37	
<b>Moyenne</b>	<b>532,03</b>		<b>291,51</b>		<b>54,79</b>	

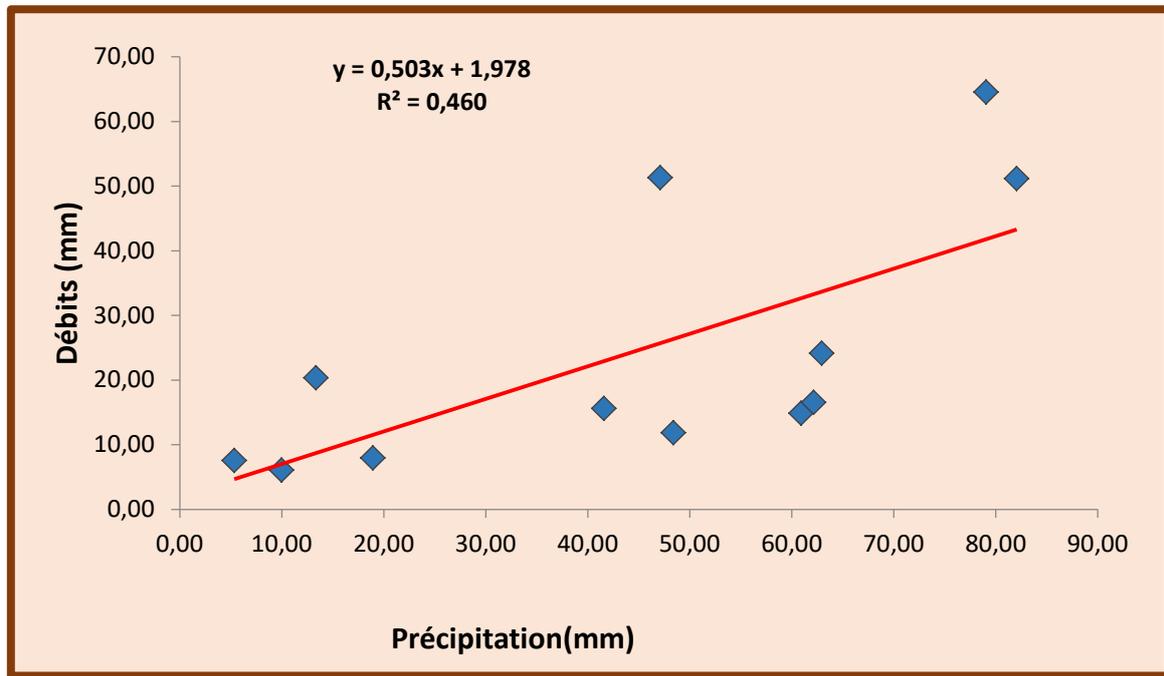
**Tableau 8:** Bilan hydrologique moyen mensuel du bassin à la station d'Aghbalou

### 3.4 Corrélation entre les pluies et les débits

Les relations entre les précipitations et les écoulements qui en résultent, constituent une partie essentielle du cycle hydrologique et par conséquent leur étude est nécessaire :

- Pour bien comprendre les processus qui interviennent dans la genèse des débits,
- Pour combler les lacunes des relevés des stations de jaugeages et reconstituer par extrapolation ces relevés dans le passé,
- Pour estimer les caractéristiques hydrologiques de bassins versants non pourvus des stations de jaugeages,
- Pour prévoir le comportement des bassins versants perturbés par l'homme,
- Pour prédéterminer les débits de fréquences exceptionnelles,
- Pour prévoir en temps réelles hauteurs d'eau ou les débits.

### 3.4.1 Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels



**Figure 17:** Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels à la station d'Aghbalou

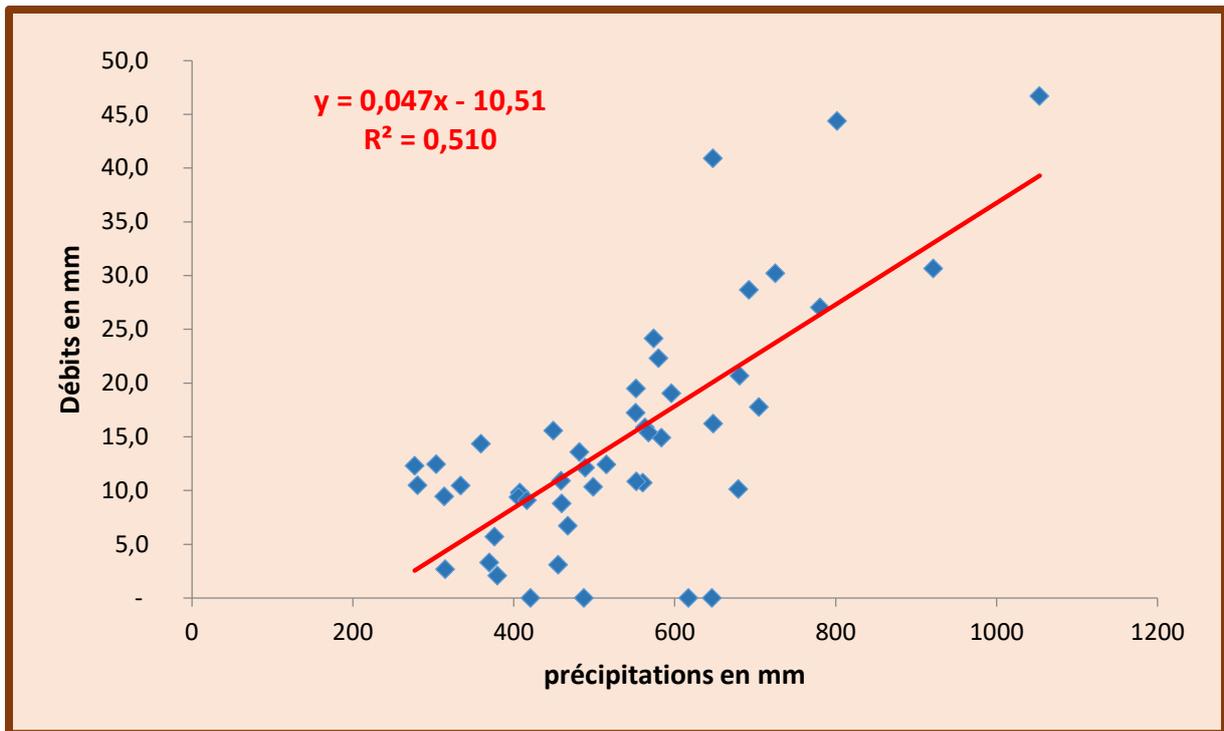
La figure (17) montre la relation entre les précipitations et les débits moyens mensuels à la station d'Aghbalou.

Nous pouvons remarquer que le bassin versant Tnine Ourika présente une corrélation relativement bonne. ( $R = 0,70$ ). Donc on peut dire que les précipitations sont étroitement liées aux débits.

A la station d'Aghbalou les débits et les précipitations augmentent avec un coefficient de corrélation assez élevé. Ceci indiquerait que la contribution de la neige est relativement faible par rapport aux pluies sur l'écoulement à l'exutoire des bassins versants Tnine Ourika.

### 3.4.2 Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels

Cette corrélation va nous renseigner sur le degré de liaison entre pluies et débits pour une période de temps de 46 ans. Cette liaison est représentée par un graphique où sont portés les débits annuels et les précipitations correspondantes.

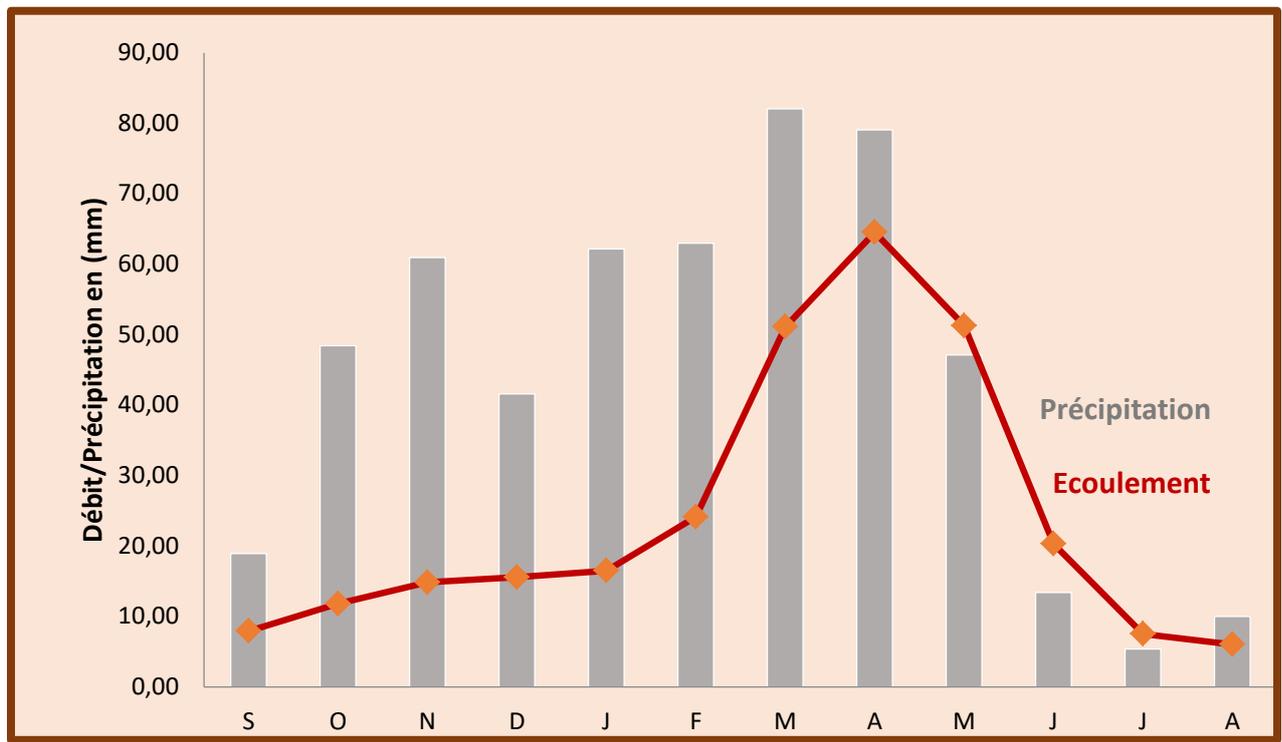


**Figure 18** : corrélation entre les précipitations et les débits du bassin versant à Aghbalou

D'après le graphe, on voit que le nuage de points a pris une forme d'ellipse inclinée par rapport aux axes, ce qui permet de dire que la relation entre les deux paramètres est linéaire, avec un coefficient de corrélation R de l'ordre de 0.71 qui confirmera le résultat obtenu graphiquement.

La valeur du coefficient de corrélation montre qu'il y a une étroite liaison entre les débits et les précipitations. Ce qui revient à dire que le bassin reçoit des précipitations sous forme de pluie qui ne sont pas perturbées par une infiltration importante, par des évaporations trop variables, ou encore par les rétentions souterraines durables surtout qu'on prend en considération l'année hydrologique.

### 3.4.3 Variations simultanées des précipitations et des débits mensuels



**Figure 19** : Variations simultanées des précipitations et des débits mensuels du bassin versant à la station d'Aghbalou (1970-71/2016-17)

La figure au-dessus illustre les variations des précipitations et des débits dans le bassin versant du Tnine Ourika, Au mois d'avril, le débit atteint le maximum et le minimum au cours des mois plus sèches tels que (juin, juillet, août), avec un décalage d'un mois par rapport aux précipitations qui ont connu un maximum le mois de mars.

# Chapitre IV: Etude des crues et prédétermination de leur débit maximum probable

## 1 Méthode empiriques

Les méthodes empiriques sont utilisées lorsqu'on ne possède que peu ou pas de données sur les débits des crues dans une région.

Des formules sont établies pour de nombreux cours d'eau et dans divers pays, permettant d'estimer soit des débits maximums de crues soit des débits fréquents à partir de certaines caractéristiques du bassin versant en les complétant parfois par certaines données météorologiques, (Gray, et al.1972).

Trois des formules les plus utilisées au Maroc ont été choisies : Formule de Fuller, Formule de Francou-Rodier, Formule de Mallet-Gauthier.

### 1.1 Formule de Fuller II

La formule de Fuller II, utilisée pour l'estimation des débits de crues des bassins versant de superficies supérieures à 10 Km<sup>2</sup>, s'écrit comme suit :

$$Q(T) = 1 + a \cdot \text{Log}(T) \left( A^{0.8} + \frac{8}{3} A^{0.5} \right) \frac{4}{3} \times \frac{N}{100}$$

**Qt** : Débit de point en m<sup>3</sup>/s de récurrence T

**T** : Période de retour égale à (10, 20, 50 et 100)

**a** : Coefficient varie entre 0.7 et 0.8 au Maroc c'est a = 0.8

**A** : superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>

**N** : coefficient régional pris :

- 80 en plaine
- 85 en région accidenté
- 100 en montagne

## 1.2 Formule de Mallet-Gautier

La formule de Mallet-Gauthier permet l'estimation des débits de crues de période de retour T pour un bassin donné. Sa forme générale s'écrit par, (Coutagne, 1951) :

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

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

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

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

**L** : Longueur du plus long talweg (Km)

**A** : Superficie du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

**T** : Période de retour

**Pan** : Pluie moyenne annuelle (m)

Les paramètres (a et K) peuvent donner des résultats assez contrastés si elles ne sont pas fixées avec une bonne connaissance du bassin.

## 1.3 Formule de hazan-lazarvic

La formule de Hazan a été établie sur la base de la synthèse des informations dans différents bassins versants du Maroc, le calcul de débit de pointe pour les différentes périodes de retour se fait par le calcul du débit de la fréquence T = 1000 ans. La formule s'écrit de façon suivante :

$$Q(1000) = k1 \times A^{K2}$$

Avec :

- **A** : la surface du bassin versant en km<sup>2</sup>

-Les valeurs des paramètres K1 et K2 dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie annuelle.

	Province nord			Moyen Atlas		Haut Atlas
	RIF					
	Central	Occidental	Oriental			
k1	15,55	9,78	7,58	13,51	13,47	9,38
k2	0,776	0,793	0,808	0,613	0,587	0,742
Pluviométrie	1000-1300	800-1000	600-800	700-900	500-700	200-400

**Tableau 9 :** Les valeurs des paramètres k1 et k2 selon la situation géographique de la zone et de pluviométrie annuel

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

**K1 : 9.38**

**K2 : 0.742**

De ce raisonnement  $Q_m \text{ max en } 1000 \text{ ans} = Q(1000) / (1 + a \log 1000)$ .

D'où :  **$Q_{1000} = (1 + a \log T) / (1 + a \log (1000))$**

**QT :** Débit de pointe en m<sup>3</sup>/s d'une période de retour T.

**a :** Coefficient qui varie entre 0.7 à 3.5 :

**0.7 < a < 0.8 :** Pour les bassins versants des régions bien arrosées.

**0.8 < a < 2 :** Pour les régions arides.

**3 < a < 3.5 :** Pour les oueds sahariens.

Notre région d'études est aride pour cela on prend

a = 0.8 ; a = 1.2 ; a = 2

	coefficient a		
	0,8	1,5	2
Q(10) en m <sup>3</sup> /s	556,35	477,67	450,38
Q(50) en m <sup>3</sup> /s	729,18	678,00	660,24
Q(100) en m <sup>3</sup> /s	803,61	764,28	750,63

**Tableau 10:** Estimation des débits selon hazan-lazarvic

D'après les valeurs obtenues, on prend le coefficient a = 0.8, pour une meilleure estimation des périodes de retour des crues.

Le tableau suivant représente les résultats de calcul effectués par les différentes formules empiriques :

	Débits $m^3/s$		
	FULLER	MALLET-GAUTTIER	HAZEN-LAZAREVICK
Q(10)	461,29	621,73	556.35
Q(50)	604,59	932,44	729.18
Q(100)	666,31	1037,98	803.61
Q(1000)	871,32	1329,76	1050.88

**Tableau 11** : récapitulation du calcul de débits selon les méthodes empiriques

On peut conclure que la formule de MALLET GAUTHIER surestime les débits, tandis que les formules de FULLER et HAZAN- LAZARVICK sous-estime les débits.

## 2 Méthode statistique

Cette méthode permet la prédétermination des débits maxima d'une crue et leurs périodes de retour, en se basant sur l'analyse statistique des crues précédentes, afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Cette prédétermination repose sur la mise en œuvre d'un modèle probabiliste fréquentiel, qui est une loi de probabilité décrivant le comportement statistique d'un processus.

L'objectif est de faire une analyse fréquentielle sur une série de débits instantanés maxima annuels enregistrés au niveau de la station d'Aghbalou période d'observation de 46ans (1970-2017); en essayant d'ajuster à cette série une loi de probabilité théorique.

Les lois statistiques appliquées dans cette étude sont : lois Normal et Log. Normal, loi de Gumbel, loi de Gamma généralisé, loi normal et loi exponentielle. Cette étude est réalisée par le logiciel Hyfran Plus

### 2.1 Le logiciel HYFRAN-plus

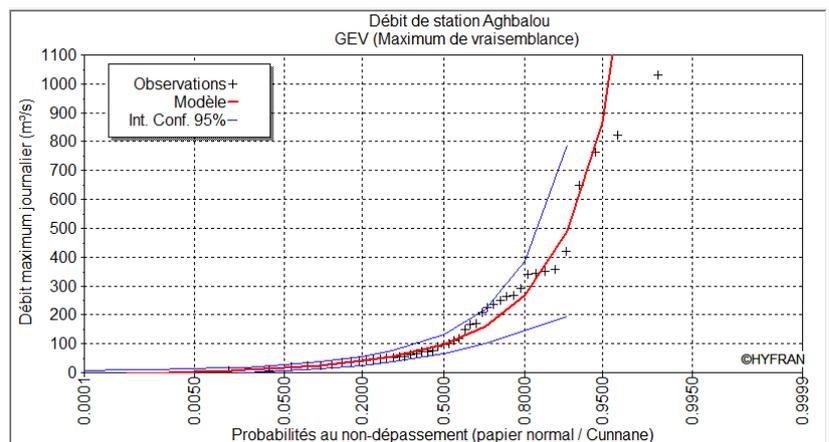
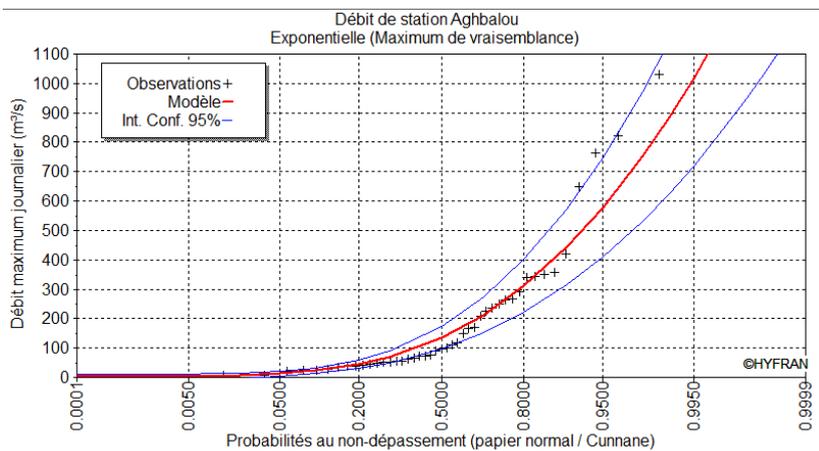
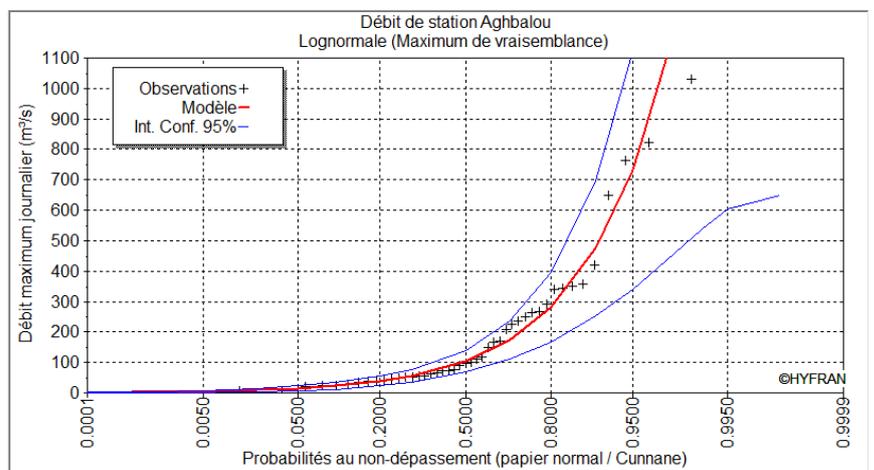
Le logiciel HYFRAN-PLUS permet d'ajuster un nombre important de distributions statistiques à une série de données qui vérifient les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité.

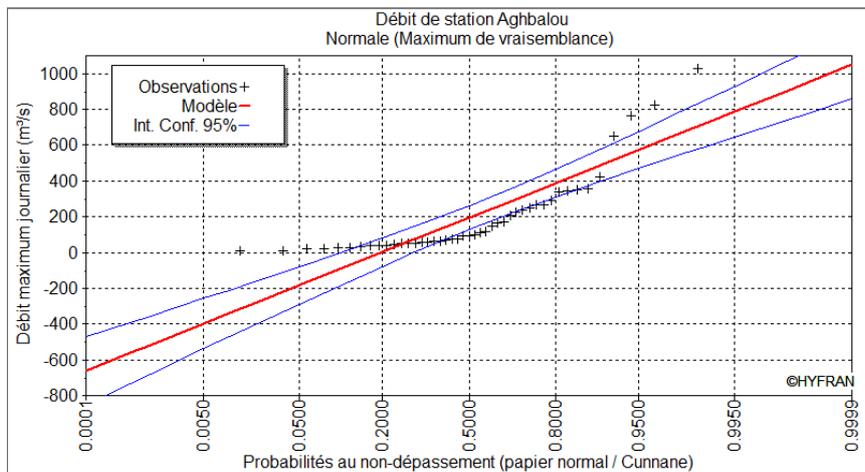
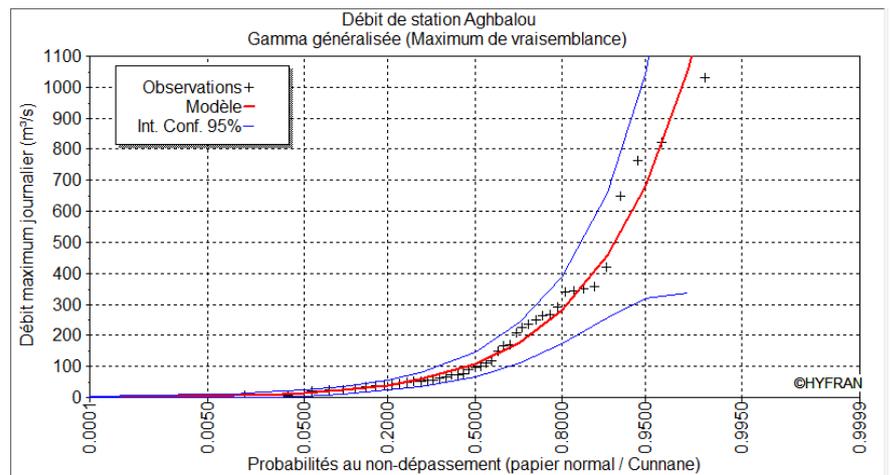
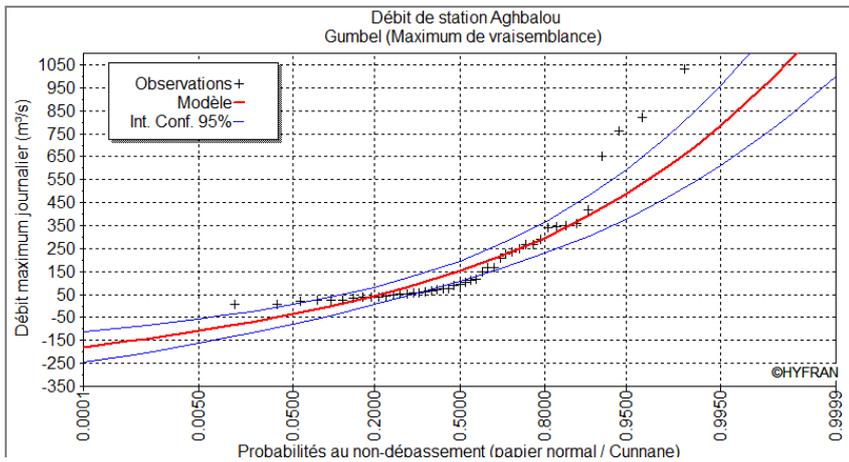
Un Système d'Aide à la Décision (SAD) a été développé pour permettre de choisir la classe de distributions la plus adéquate pour estimer le quantile de période de retour élevée.

## 2.2 Analyse des graphes

Les figures ci-dessous représentent les graphiques des résultats obtenus. Ils montrent la distribution des lois statistiques, Gumbel, Lognormale, Exponentielle, et Gamma généralisé sur papier de probabilité normal à l'aide du logiciel Hyfran

Visuellement, on peut conclure que la loi Lognormale récente le meilleur ajustement de la variable débit maximal journalier.





**Figure 20 :** Ajustement graphique des débits instantanés maxima annuels selon les lois statistiques

### 2.3 Analyse des critères statistiques

Le tableau 11 illustre la valeur observée des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC), qui permettent de comparer le degré d'ajustement. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces critères statistiques.

	100		
	Débit estimé	BIC	AIC
<b>Lognormal</b>	1641.473	567.694	564.081
<b>Exponentielle</b>	884.564	570.577	566.963
<b>Gamma généralisée</b>	1398.195	571.356	565.936
<b>GEV</b>	3082.297	574.003	568.583
<b>Gumbel</b>	694.739	595.752	592.139
<b>Normale</b>	729.009	623.721	620.107

**Tableau 12** : Ajustements numériques des lois statistiques pour la période de retour 100 ans.

L'ajustement numérique confirme que Log Normal est la loi la mieux adaptée pour l'estimation du débit.

La loi Lognormal permet d'estimer les débits pour différentes périodes de retour, comme il est représenté dans le tableau ci-dessous:

période de retour (ans)	10	50	100	1000
débits (m <sup>3</sup> /s)	<b>475,6</b>	<b>1188,2</b>	<b>1641.5</b>	<b>4058,9</b>

**Tableau 13** : Estimation des débits selon la loi Lognormale

## 2.4 La méthode de Francou-Rodier

Elle se base sur la comparaison avec des bassins versants régionaux sur lesquels existent des données hydrologique.

Ces méthodes consistent à extrapoler le débit de projet au site non jaugé à partir des données observées dans un bassin jaugé qui lui est hydrologiquement comparable.

On se base dans cette comparaison sur les paramètres qui définissent géométriquement et morphologiquement le bassin :forme ,pentes et indices de pente ,paramètres du rectangle équivalent, caractéristiques des relief , densité de drainage et rapport de confluence ainsi que des paramètres climatiques ,géologiques- et pédologiques renseignant sur les types de précipitation, les perméabilités des sols, la nature de la végétation .

La formule de Franco-Rodier s'écrit :

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

**K** : est le paramètre de Franco-Roudier. La méthode consiste à transférer ce paramètre régional estimé pour un bassin non jauge concerné par la détermination du débit de projet. Avec  $\left( K = 10 \cdot \left( 1 - \frac{\ln\left(\frac{Q_t}{10^6}\right)}{\ln\left(\frac{A}{10^8}\right)} \right) \right)$

station de référence(Aghbalou)				zone de projet (Tnine Ourika)	
T (ans)	Qt (m3/s)	S (Km2)	K	Sp (km2)	Qt (m3/s)
10	472	503	3,72	578	515
50	1170	503	4,47	578	1263,5
100	1620	503	4,73	578	1743
1000	4060	503	5,49	578	4322,8

**Tableau 14** : Transposition du débit instantané maximum annuel.

Avec :

**S** : surface d'Aghbalou

**Sp** : surface de la zone d'étude (Tnine Ourika)

### **3 Méthode hydrométéorologique de prédétermination de crues : Gradex**

#### **3.1 Principe**

Les méthodes hydrométéorologiques ont pour principe de relier les débits de crue aux précipitations. Il s'agit d'utiliser l'information pluviométrique pour calculer le débit de crue. Pour cela, on peut relier les lois de probabilité de crues aux lois de probabilités des pluies. C'est dans ce but qu'a été développée la méthode du Gradex.

Celle-ci s'applique à des bassins versants relativement imperméables, ayant une superficie de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés, et permet d'estimer les débits de crues extrêmes pour des fréquences d'apparition rares à très rares (temps de retour au-delà de 100 ans).

### 3.2 Méthode

Les pluies maximales journalières ont été ajustées selon la loi de Gumbel. La pente de la droite de Gumbel est appelée Gradex et correspond pour cette loi au paramètre  $1/a$ .

La méthode de Gradex suppose que la loi d'ajustement des débits s'extrapole selon une pente égale à celle du Gradex des pluies correspondantes au-delà du débit décennale ( $T=10$ ans).

L'unité du débit est convertie en mm, cette opération permet d'exprimer les deux variables par la même unité ce qui rend leur association et traitement plus adéquat.

Le passage du débit extrapolé  $Q_{ext}$  au débit de pointe  $Q_p$  se fait selon la relation suivante:

$$Q_p = C_p \times Q_{ext}$$

**$C_p$**  : le coefficient de pointe, qui dépend de l'analyse du débit instantané maximum  $Q_{inst}$  : débit journalier maximum  $Q_{moy}$ , généralement il est obtenu par le rapport suivant :

$$C_p = \frac{Q_{inst}}{Q_{moy}}$$

La série des débits des crues (1970 –2017) à la station d'Aghbalou permet d'obtenir un coefficient de pointe moyen égale à 2.6.

Pour appliquer la méthode de Gradex on suit les étapes suivantes :

-Premièrement on détermine :

- Le rang  $r$ .
- La probabilité au non dépassement FND par la formule suivante :

$$FND = 1 - \frac{1 - \frac{1}{2}}{n}$$

Avec:  $R$ : le rang.  
 $n$ : le nombre des années de la série.

- Deuxièmement on calcule la variable réduite  $y$ :

$$Y = - \ln (-\ln (FND))$$

- Finalement on détermine les paramètres d'ajustement à savoir :

-Le paramètre d'échelle :  $\frac{1}{a} = 0.577 \sigma$  ( $\sigma$  : l'écart-type de la série des pluies) .

- Le paramètre de forme :  $P_0 = \bar{P} - \left(\frac{1}{a} \times 0.577\right)$  ( $\bar{P}$  : La moyenne des pluies)

-Les paramètres précédent sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Ecart type	La moyenne des pluies (mm)	1/a	$P_{0(mm)}$
<b>13,74</b>	<b>51,7</b>	<b>10,72</b>	<b>43,33</b>

-Pour tracer la courbe des pluies on utilise l'équation suivante :

$$P = \frac{1}{a}y + P_0 \quad (1)$$

Et pour tracer la courbe des débits on utilise l'équation suivante :

$$Q = \frac{1}{a}y + Q_0$$

Avec :

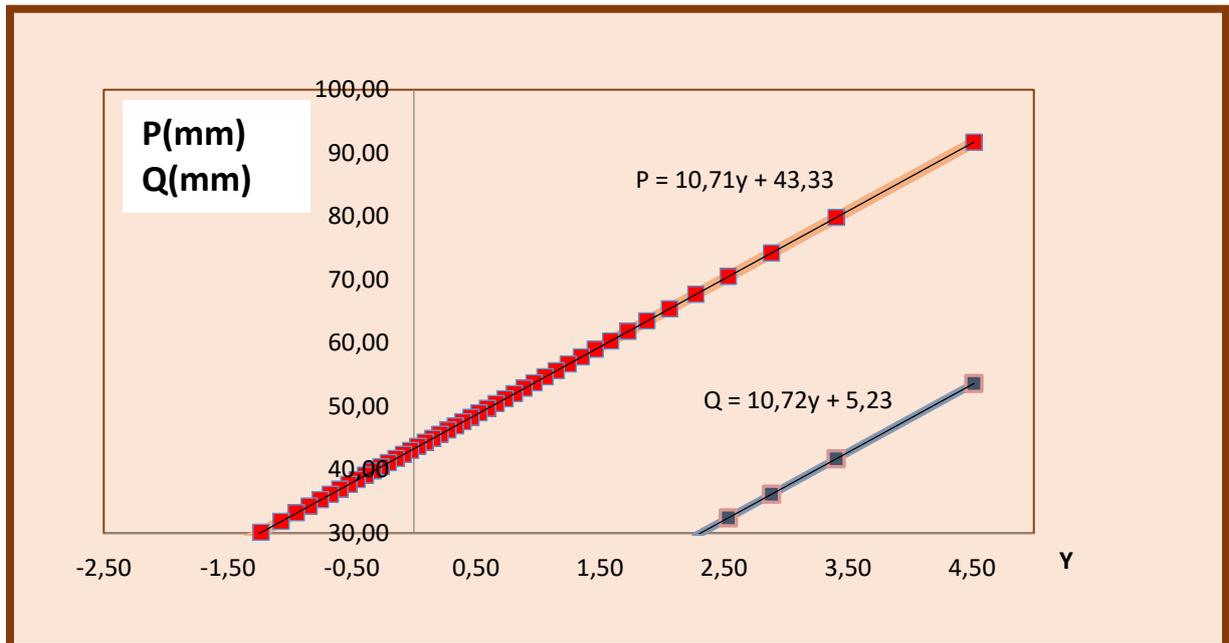
- $\frac{1}{a} = 10.72$  (déjà calculer dans l'équation (1))
- $Q_0 = Q_{2.25} - \frac{1}{a} y$

1/a	$Q_{2.25(mm)}$	Y	$Q_0(mm)$
<b>10,72</b>	<b>29,35</b>	<b>2,25</b>	<b>5,23</b>

Les étapes précédentes nous a permis d'en déduire les débits de pointe pour différentes périodes de retour :

Temps de retour (ans)	Fréquence F	Fréquence au non-dépassement (FND)	Variable réduite (y)	Débit extrapolé (mm)	Débit extrapolé (m <sup>3</sup> /s)	Débit de pointe en (m <sup>3</sup> /s)
10	<b>0.1</b>	<b>0.9</b>	<b>2.25</b>	<b>29.35</b>	<b>170.87</b>	<b>444.3</b>
50	<b>0.02</b>	<b>0.98</b>	<b>3.90</b>	<b>47.04</b>	<b>273.86</b>	<b>712</b>
100	<b>0.01</b>	<b>0.99</b>	<b>4.60</b>	<b>54.54</b>	<b>317.52</b>	<b>825.5</b>
1000	<b>0.001</b>	<b>0.999</b>	<b>6.91</b>	<b>73.31</b>	<b>426.79</b>	<b>1109.6</b>

**Tableau 15** : Extrapolation des débits par la méthode de Gradex.



**Figure 21 :** Ajustements graphique des données de  $P_{jmax}$  et  $Q_{jmax}$  selon la méthode de Gradex.

### 3.3 Loi de Gumbel

Le tableau suivant représente les résultats de calcul effectués par la méthode de Gumbel :

T	FND	Y	QT (mm)	QT (m <sup>3</sup> /s)
10	0,9	2,25	84	<b>561,9</b>
50	0,98	3,9	134	<b>898,7</b>
100	0,99	4,6	155,7	<b>1041,6</b>
1000	0,999	6,9	225,9	<b>1511</b>

**Tableau 16 :** Estimation des débits selon la loi de Gumbel.

### 3.4 Tableau récapitulatifs

Le tableau 17 regroupe les résultats obtenus après le choix des meilleures estimations des débits par différentes méthodes :

Temps de retour	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)			
	Statistiques (Francou-Rodier)	Empiriques (Mallet Gauthier)	Gradex	Ajustement statistique
10	515	621,7	444,3	475,6
50	1263,5	932,4	712	1188,2
100	1743	1038	825,5	1641,5
1000	4322,8	1329,8	1109,6	4058,9

**Tableau 17** : Les différentes méthodes d'estimation des débits des crues différentes

D'après les résultats obtenus par les trois méthodes d'estimation des débits (Gradex, les formules empiriques et l'ajustement statistique), on peut conclure que la méthode statistique est la plus fiable car elle utilise plusieurs lois (Gumbel, Log-normal, exponentiel, GEV...) qui disposent de plusieurs paramètres.

## CONCLUSION

Le but de ce travail n'est pas de développer un outil de prévention de crues dans un premier temps, mais d'apporter des connaissances sur les processus et les particularités du fonctionnement du bassin versant de l'Ourika à Tnine Ourika. Cette étude préliminaire nous permet de comprendre l'influence des éléments qui participent à la génération du ruissellement dans le bassin versant.

La réponse hydrologique d'un bassin versant est influencée par une multitude de facteurs tels que ceux liés à la condition climatique du milieu, la pluviosité, la morphologie du bassin versant et la structuration du réseau hydrographique ...

Le bassin versant de Tnine Ourika est caractérisé par une forme relativement allongée ( $K_c = 1.58$ ), une superficie de  $578 \text{ km}^2$ , une grande variabilité spatiotemporelle climatique et des précipitations annuelles moyennes de  $532 \text{ mm}$ .

La délimitation et la détermination des paramètres du bassin versant est faite à l'aide du logiciel ArcGIS, l'ajustement statistique des débits et des pluies extrêmes est réalisé par le logiciel HyfranPlus et les données (débit, pluie) sont traitées par le tableur Excel.

D'après le traitement des données, le bassin de Tnine Ourika présente des tranches d'altitudes régulières et un profil régulier ainsi qu'une pente moyenne de l'écoulement égal à  $5.76 \%$ .

Le réseau hydrographique est bien développé dans la partie amont du bassin à cause de l'imperméabilité du socle, alors qu'il est moins développé dans la partie aval. La densité du drainage, selon le modèle numérique de terrain de  $30 \text{ m}$  de résolution, est de  $0.92 \text{ km/km}^2$ .

Les précipitations sont variables dans le temps et dans l'espace, avec une moyenne annuelle d'environ  $532 \text{ mm}$ . La valeur annuelle maximale a été enregistrée pendant l'année 1970/71 tandis que l'année la plus sèche était 1992/93.

Les variations mensuelles montrent que la période pluvieuse s'étend d'octobre à mai. Les débits sont irréguliers durant l'année, avec un maximum aux mois printaniers de mars, avril et mai, tandis que le cours d'eau a un débit très faible pendant la période sèche.

La corrélation pluies - débits à l'échelle annuelle a été très bonne avec un coefficient de corrélation de 0,7 ce qui revient à dire que les débits dépendent étroitement des pluies du bassin.

L'estimation des débits de crues est réalisée avec plusieurs méthodes (méthode empiriques, statistique, Gradex et Gumbel..). A cet effet, nous avons trouvé que la loi de Log-normal est la mieux adaptée pour l'estimation des débits maxima instantanés du bassin versant de Tnine Ourika.

## **Références bibliographiques:**

- AUBIN. P.,(1991) : Troisième session extraordinaire de Botanique méditerranéenne : La région de Marrakech (Maroc, 9-16 avril 1988) (suite), *Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon*, 60<sup>e</sup> année, n°8. pp. 303-308.
- Banacer A. , Benpa I. ,(2016) : Etude hydrologique du bassin versant de Ghdat à Sidi Rahal : Cas de la crue du 28 novembre 2014 ,mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech ,p.55.
- El Alaoui El Fels A., SAIDI, M. E., (2014) : Simulation et spatialisation du risque d'inondation dans une vallée anthropisée. Le cas de vallée de l'Ourika (HAUT ATLAS, MAROC), *European Scientific Journal* (vol.10, No.17), p.14
- L. HANICH, V. SIMONEAUX, G. BOULET ET AG. CHEHBOUNI., (Hydrologie des bassins versants du Haut Atlas marocain),p.20.
- MELIHO, M , Khattabi.A , MHAMMDI ,N., HONGMING, Z., (2016) : Cartographie Des Risques De L'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Révisée Des Pertes En Sols, La Télédétection Et Les Sig Dans Le Bassin Versant De L'ourika (Haut Atlas, Maroc), *European Scientific Journal* (vol.12, No.32),pp.5-22
- NDUWAYO.E., (2017) : Évaluation des potentialités de réhabilitation des écosystèmes forestiers du Haut Atlas Occidental : Cas du bassin versant de l'oued Ourika (Maroc), mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle d'ingénieure des eaux et forêts, École nationale forestière d'ingénieure de Sale, Sale, pp.30-138.
- SARAANE.A, et BEN YAHIA.R., (2018) : Etude hydrologique du bassin versant du Tensift et recherche des solutions pour réduire les effets néfastes des crues extrêmes. Marrakech, (Maroc), mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech, 48p.
- M.E.Saidi (2013). Apport des logiciels de SIG dans la morphométrie des bassins versants. L'exemple d'ArcGIS. Rapport inédit, 09 p.
- NAMOUS, M. (2012) : Evolution quaternaire et dynamique actuelle d'un système géomorphologique de front de chaîne active : L'exemple du bassin versant de l'Ourika, thèse FACULTÉ DES SCIENCES SEMLALIA – MARRAKECH, 308 p.
- OUAKANNOU.A, ABAIRROUB.B, (2020) : Crues et relation pluie-débit en milieu montagneux semi-aride. Cas du bassin versant du Ghdat (Haut Atlas, Maroc), mémoire de fin d'étude de licence, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech,61p.
- SAIDI. M, DAOUDI. L, ARESMOUK, S. FNIGUIRE, F. BOUKRIM, S .,(2010): Les crues de l'oued Ourika (Haut Atlas, Maroc):Événements extrêmes en contexte montagnard semi-aride, *Comunicações Geológicas* ,pp14 -128

- **Webographie :**

- <https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>

Accédé le 10 mai 2021

- <http://www.semnon.fr/definition-d-un-bassin-versant.htm>

Accédé le 31 mai 2021

- <http://www.grandbassindeloust.fr/nos-bassins-versants/notion-de-bassin-versant>

Accédé le 5 juin 2021

- <http://www.grobec.org/definition.php>

Accédé le 10 juin 2021