

Département des Sciences de la Terre

Licence en Sciences et Techniques Eau & Environnement

Mémoire de projet de fin d'étude

Caractérisation hydrologique du bassin versant de l'oued Tamraght (Haut Atlas occidental, Maroc)

Réalisé par : **MELILI HAJAR & CHAOUI SANA**

Sous la Direction de :

Mohamed Elmehdi SAIDI (FST, Marrakech)

Mohamed Nehmadou (ABHSM, Agadir)

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

Le présent travail n'aurait pas pu voir la lumière sans l'aimable collaboration d'un certain nombre de personnes, qui avec leur soutien et leur patience, ont permis d'élaborer ce modeste travail dans les meilleures conditions possibles.

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Mr **Mohamed El Mehdi Saidi** : notre professeur encadrant à la faculté des Sciences et Techniques Marrakech qui a accepté notre encadrement. Nous lui sommes reconnaissantes d'être toujours disponible malgré ses préoccupations, pour ses précieux conseils et ses pertinentes corrections le long de la période de stage. Merci pour votre encadrement fructueux.*

*Notre estime la plus profonde va à Mr **Mohamed Nehmadou**, chef de service suivi et évaluation des ressources en eau au sein de L'ABH Sous Massa, qui a bien voulu nous accorder notre stage de fin d'études, son assistance et sa bonne humeur nous ont souvent aidées et encouragées.*

*Nos sincères remerciements vont également à, Mr **Lahoucine Hanich** qui nous fait l'honneur d'évaluer ce travail.*

Nous adressons nos vifs remerciements au corps professoral et administratif du département des sciences de la terre à la FST de Marrakech pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Finalement ce travail est dédié à tous ceux qui nous sont très chers: nos parents, nos frères, nos sœurs pour leurs sacrifices matériels et moraux qu'ils nous ont accordés le long de nos années d'études.

Sommaire

Remerciements	2
Présentation de l'agence du bassin hydraulique sous massa	7
Introduction :	8
Chapitre I : Présentation générale du bassin versant de Tamraght	9
1 Situation géographique :	9
2 Cadre géologique :	10
3 Contexte climatique :	11
4 Ressource en eau :	11
5 Morphologie du bassin versant de tamraght :	11
5.1 Surface du bassin :	11
5.2 Périmètre :	12
5.3 Indice de Gravelius :	12
5.4 Rectangle équivalent :	13
5.5 Carte hypsométrique :	14
5.6 Courbe hypsométrique :	15
5.7 La pente :	16
6 Temps de concentration :	18
7 Réseau hydrographique :	19
Chapitre II : Régimes hydro-pluviométriques et Analyse des données	21
1 Régime pluviométrique et variabilité temporelle aux échelles mensuelle, saisonnière annuelle : 21	
1.1 Précipitation moyenne mensuelle (1983/84 à 2019/20) :	21
1.2 Précipitation moyenne saisonnière :	22
1.3 Précipitations moyennes annuelles :	22
2 Régime hydrologique d'oued Tamraght et variabilité des débits :	23
2.1 Débits moyens mensuels :	23
3 Débits moyens saisonniers:	24
3.1 Débits moyens annuels :	25
4 Bilans Hydrologiques et relation entre les pluies et les débits :	25
4.1 Bilan hydrologique :	25
5 Corrélation entre les pluies et les débits :	28

5.1	Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels :	28
5.2	Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels :	29
Chapitre III : Les crues de l'oued Tamraght		30
1	Étude dynamique des crues :	30
1.1	Analyse des hydrogrammes des crues :	31
1.2	Les crues dans l'année hydrologique :	36
1.3	Variations des temps de montée et de base des crues :	37
1.3.1	Variations de temps de montée :	37
1.3.2	Variations de temps de base :	38
2	Analyse fréquentielle des crues de l'oued Tamraght :	39
2.1	Application de la loi de Gumbel:	39
2.2	Calcul des quantiles :	41
3	Application de logiciel d'analyse fréquentielle des crues :	42
3.1	L'analyse des graphes :	42
3.2	L'analyse des critères statistiques :	44
3.3	Estimation de probabilités de crues :	45
Conclusion		46
Bibliographie :		47

Liste des figures :

Figure 1 : situation géographique du bassin versant Tamraght (DAIDE 2017)	9
Figure 2 : carte de localisation l'oued Tamraght (Marché N° 35/2015/ABHSMD).....	10
Figure 3 rectangle équivalent du bassin versant Tamraght:	13
Figure 4 : Carte hypsométrique du bassin versant Tamraght	14
Figure : 5 courbe hypsométrique du bassin versant Tamraght	15
Figure 6 Carte des pentes du Bassin versant de Tamraght	17
Figure 7 Carte de réseau hydrographique du bassin versant Tamraght	19
Figure : 8 Précipitations moyennes mensuelles de la station IMI MIKKI (1983-1984 à 2019-2020)	21
Figure 9 Précipitations moyennes saisonnières à la station d'IMI MIKKI (1983-1984 à 2019-2020)	22
Figure 10 Précipitations moyennes annuelles à la station d'IMI MIKKI (1983-1984 à 2019-2020)	23
Figure 11 débits moyens mensuels à la station d'IMI MIKKI (1980-81 à 2016-17).....	24
Figure 12 Débits moyens saisonniers à la station d'IMI MIKKI (1980-81 à 2016-17)	24
Figure 13 Les débits moyens annuels d'IMI MIKKI (1980-81 à 2016-17).....	25
Figure 14 évolution comparative des précipitations et des écoulements d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17).....	27
Figure 15 corrélation entre les précipitations et les débits mensuels à la station d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17)	28
Figure 16 corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17).....	29
Figure 17 Répartition élémentaire d'un hydrogramme de crue	30
Figure 18 Hydrogramme de la crue de 4 décembre 1987 d'oued Tamraght	31
Figure :19 Hydrogramme de la crue de 9 novembre 1988 d'oued Tamraght	32
Figure : 20 Hydrogramme de la crue du 7 mars 1991 d'oued Tamraght.....	33
Figure 21 Hydrogramme de la crue du 15 décembre 1995 d'oued Tamraght	34
Figure 22 Hydrogramme de la crue du 24 décembre 2009 d'oued Tamraght	35
Figure 23 Répartition mensuelle des crues d'oued Tamraght.....	36
Figure : 24 Temps de montée des crues d'oued Tamraght	37
Figure 25 Temps de bases des crues d'oued Tamraght	38
Figure : 26 Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du bassin versant Tamraght à IMI MIKKI.....	41
Figure 27: Ajustement graphique des débits maximaux instantanés selon les lois statistiques, d'IMI MIKKI.....	43

Liste des tableaux :

Tableau 1 Paramètres du rectangle équivalent du bassin versant de Tamraght.....	13
Tableau 2 Répartition du bassin versant de Tamraght en tranches d'altitudes	15
Tableau 3 Temps de concentration du bassin versant de Tamraght	18
Tableau : 4 Caractéristiques globales du bassin versant Tamraght	20
Tableau 5 Bilan hydrologique moyen mensuel du bassin Tamraght à la station d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17)	26
Tableau 6 bilan hydrologique moyen annuel à la station d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17).....	27
Tableau 7 Caractéristique de la crue de 1987 de l'oued Tamraght	31
Tableau 8 Caractéristique de la crue de 9 novembre 1987 de l'oued Tamraght.....	32
Tableau 9 Caractéristique de la crue de 7 mars 1991 de l'oued Tamraght	33
Tableau 10 Caractéristique de la crue de 12 décembre 1995 de l'oued Tamraght	34
Tableau 11 Caractéristique de la crue de 24 décembre 2009 de l'oued Tamraght	35
Tableau 12 Nombre et pourcentages des crues mensuelles d'oued Tamraght.....	36
Tableau 13 temps de montée des crues d'oued Tamraght.....	37
Tableau 14 temps de bases des crues d'oued Tamraght	38
Tableau 15 Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Tamraght (1979/80 à 2016/17)	40
Tableau 16 Débits calculés de différentes périodes de retour selon la loi de Gumbel.....	41
Tableau 17 Ajustements numériques des lois statistiques pour la période de retour 100 ans.....	44
Tableau 18 Estimation des débits de pointe de différentes périodes de retour de Tamraght.....	45

Présentation de l'Agence du Bassin Hydraulique Sous Massa

Instituée par le Décret n° 2-00-480 du 14 novembre 2000 modifié et complété par le Décret n° 2-08-510 du 16 janvier 2009 et conformément aux dispositions de l'article 20 de la loi sur l'eau ; l'Agence du Bassin Hydraulique de Souss Massa est chargée de la gestion et de la protection du capital eau et du domaine public hydraulique. Elle regroupe les grands bassins de Souss Massa.

La zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique Sous Massa couvre les bassins du Souss, de Massa, de Tiznit, de Sidi Ifni, et les bassins côtiers Tamri et Tamraght.

L'Agence de bassin est l'organisme chargé de l'exécution de la gestion de l'eau à l'échelle du bassin, elle joue un rôle fédérateur de tous les intervenants dans le domaine de l'eau, de ce fait elle est chargée :

- D'élaborer le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau relevant de sa zone d'action.
- De veiller à l'application du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau à l'intérieur de sa zone d'action.
- De délivrer les autorisations et concessions d'utilisation du domaine public hydraulique prévues dans le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau de sa zone d'action.
- De fournir toute aide financière et toute prestation de service, notamment d'assistance technique, aux personnes publiques ou privées qui en feraient la demande, soit pour prévenir la pollution des ressources en eau, soit en vue d'un aménagement ou d'une utilisation du domaine public hydraulique.
- De réaliser toutes les mesures piézométriques et de jaugeages ainsi que les études hydrologiques, hydrogéologiques, de planification et de gestion de l'eau tant sur le plan quantitatif que qualitatif.
- De réaliser toutes les mesures de qualité et d'appliquer les dispositions de la présente loi 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 chargée de l'environnement.
- De proposer et d'exécuter les mesures adéquates, d'ordre réglementaire notamment, pour assurer l'approvisionnement en eau en cas de pénurie d'eau déclarée conformément au chapitre 10 de la présente loi ou pour prévenir les risques d'inondation.
- De gérer et contrôler l'utilisation des ressources en eau mobilisées.
- De réaliser les infrastructures nécessaires à la prévention et à la lutte contre les inondations en collaboration avec les collectivités locales.
- De tenir un registre des droits d'eau reconnus et des concessions et autorisations de prélèvement d'eau accordées.

Introduction :

Au cours de ces dernières décennies, les régions du sud du Maroc ont vécu des inondations catastrophiques qui ont causé plusieurs dégâts matériels et humains, ce qui a ramené les responsables à intervenir rapidement pour protéger ces zones contre tout risque d'inondation future.

Le bassin versant de l'oued Tamraght qui a fait l'objet de cette étude n'est pas épargnée par ces cataclysmes hydrologiques. C'est pour cela qu'on s'est décidées à entamer une étude dynamique et statistique des crues pour connaître la typologie des crues en ce milieu semi-aride, par l'analyse des débits de pointe, des formes des hydrogrammes, des temps de montée et de base.

À cet effet, cette étude s'est articulée autour de trois principaux axes ;

- L'analyse morphométrique et géomorphologique du bassin.
- L'analyse du régime pluviométrique et hydrologique et relation pluies-débits.
- L'analyse dynamique et fréquentielle des crues.

Chapitre I : Présentation générale du bassin versant de Tamraght

1 Situation géographique :

Le bassin versant de l'Oued Tamraght, se situe à 15 km de la ville d'Agadir, entre les longitudes Lambert 90 et 128.5 km et les latitudes Lambert 396 et 422 km. Il s'allonge dans une direction NE-SW orthogonalement à la ligne de crête littorale du Haut Atlas bordier qu'il draine (Fig. 1). Il traverse le centre d'Aourir qui se trouve dans une vallée littorale située entre le relief du versant NW du Haut Atlas Occidental et l'océan Atlantique. Cette vallée matérialise pratiquement l'exutoire du bassin versant, évacuant ses crues vers cet océan.

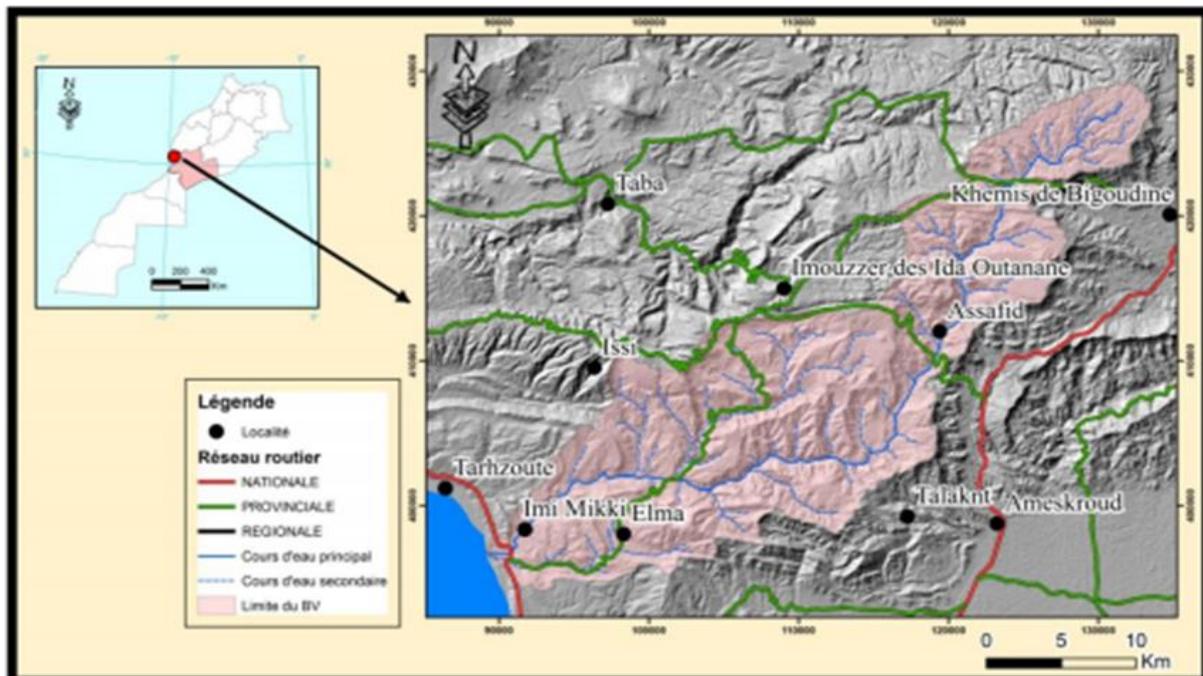


Figure 1 : situation géographique du bassin versant Tamraght (DAIDE 2017)



Figure 2 : carte de localisation l'oued Tamraght (Marché N° 35/2015/ABHSMD)

2 Cadre géologique :

L'oued Tamraght prend ses sources dans des calcaires jurassiques situés à l'amont du bassin versant du côté Est. Les cours d'eau entaillent ensuite des terrains crétacés qui forment le paysage dominant de ce bassin versant jusqu'à l'exutoire de l'oued vers l'océan Atlantique. Sa géomorphologie, est caractérisée par une prédominance des montagnes appartenant à la chaîne du haut Atlas et son couvert végétal est dominé par l'arganier.

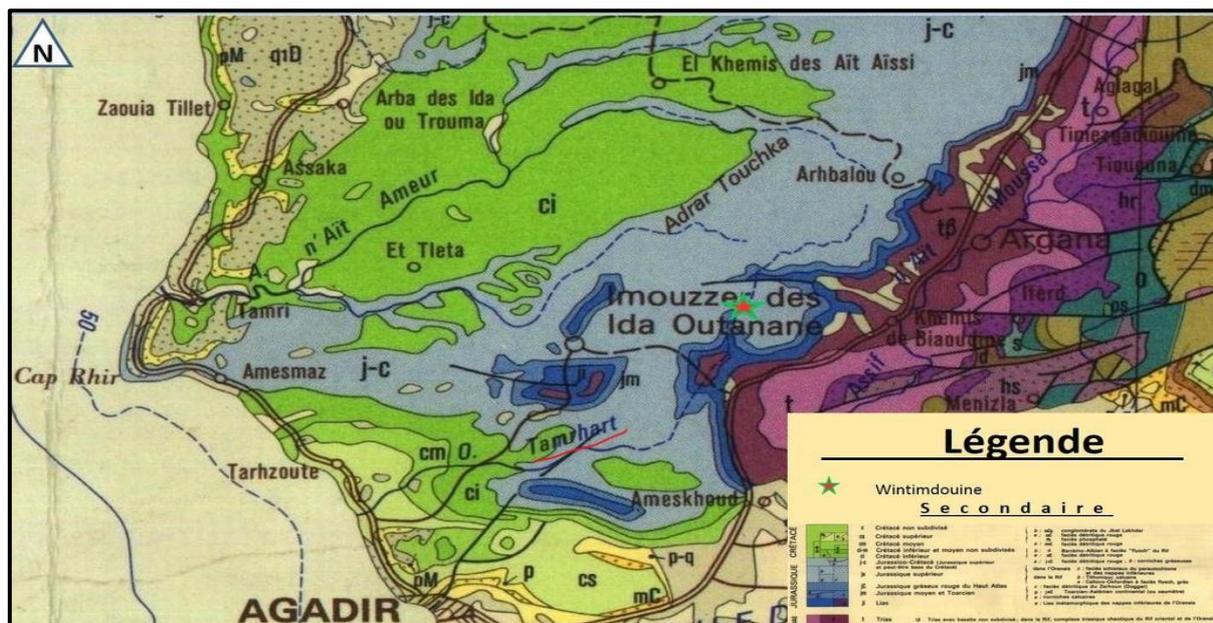


Figure:3 Carte géologique du bassin versant Tamraght (EZINI 2014)

3 Contexte climatique :

La région de Tamraght représente le contexte d'un climat semi-aride très variable.

L'étude climatique de notre zone d'étude est basée sur l'exploitation des données pluviométriques, de températures et de vents de la station IMI MIKKI, qui est située à l'intérieur du bassin au point de coordonnées (X=92150 m, Y=398100 m, Z=40 m).

La saison pluvieuse s'étale du mois d'octobre au mois de mai avec d'importantes périodes de sécheresse. Les températures varient de 11°C à 27°C avec une moyenne de 19°C, la température maximale journalière a atteint 49°C et la température minimale est descendue jusqu'à 3°C au-dessous de zéro. La région est relativement ventée. Des vents d'Est chauds, communément appelés Chergui, peuvent souffler en été et en automne. La vitesse moyenne annuelle du vent est de l'ordre de 3 km/h en montagne et 5 km/h en plaine.

4 Ressource en eau :

Les ressources en eau de surface sont limitées et très irrégulières.

Le bassin de l'oued Tamraght prend sa source dans le Haut Atlas Occidental.

Les apports moyens annuels sont évalués à 25 Mm³.

5 Morphologie du bassin versant de Tamraght :

La forme d'un bassin versant est définie par sa superficie, son relief, ses pentes et la disposition de son réseau hydrographique. Ces caractéristiques purement géométriques du bassin s'obtiennent à l'aide d'une étude morphométrique et cartographique.

5.1 Surface du bassin :

La surface du bassin correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux.

La surface du bassin versant, est exprimée en km², est calculée à partir d'un modèle numérique du terrain (MNT) et à l'aide du logiciel du SIG.

Pour le bassin versant de Tamraght, il s'étale sur une superficie de 449,6 Km².

5.2 Périmètre :

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km et a été calculé à l'aide du logiciel du SIG.

Le périmètre du bassin versant Tamraght est de l'ordre de 148,8 km.

5.3 Indice de Gravelius :

L'indice de compacité ou de Gravelius (Kg) donné par l'équation ci-dessous renseigne sur la forme du bassin versant qui a une influence primordiale sur les écoulements globaux du cours d'eau et surtout sur l'allure des hydrogrammes à l'exutoire des bassins résultant d'une pluie donnée. (ROCHE, 1963).

$$Kg = \frac{P}{\sqrt{\pi * A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

Kg: l'indice de compacité ou de Gravelius .

A : surface du bassin versant (km²).

P : périmètre du bassin (km).

La surface (A) du bassin versant de l'oued Tamraght est de l'ordre de 449,6 km², pour un périmètre (P) de 148,8 Km. Pour cela l'indice de compacité (kg) est de l'ordre 1,96. Selon ce coefficient de Gravius, le bassin de Tamraght est très allongé.

5.4 Rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent est une représentation du bassin versant sous forme d'un rectangle de même surface. L'objectif de son utilisation est de pouvoir comparer les bassins entre eux. On lui associe couramment les tranches d'altitudes qui permettent un aperçu plus facile du relief.

Les dimensions du rectangle équivalent sont calculées par ces deux relations :

$$L = K_c \frac{\sqrt{A}}{1.128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right)$$

$$l = K_c \frac{\sqrt{A}}{1.128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{K_c} \right)^2} \right)$$

Avec :

L : longueur du rectangle équivalent (km)

l : largeur du rectangle équivalent (km)

K_g : l'indice de compacité ou de Gravelius.

A : surface du bassin versant (Km²).

Indice de compacité	surface du bassin versant (Km ²)	longueur du rectangle équivalent (km)	largeur du rectangle équivalent (km)
1.96	449.6	66.97	6.71

Tableau 1 Paramètres du rectangle équivalent du bassin versant de Tamraght

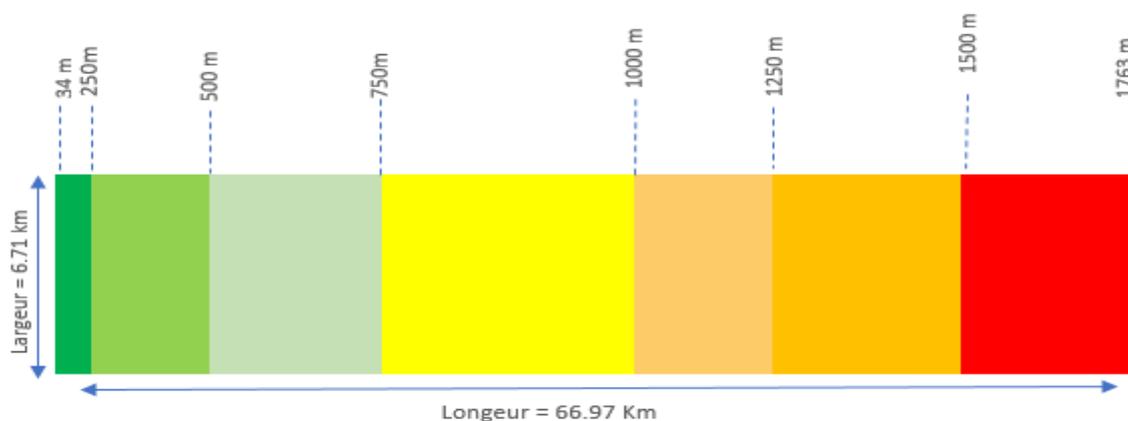


Figure 3 : Le rectangle équivalent du bassin versant Tamraght:

5.5 Carte hypsométrique :

Les cartes hypsométriques réunissent tous les points de même altitude. La plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude, alors il est intéressant de réaliser cette étude. La carte (fig 4) montre une répartition différentielle des tranches d'altitudes avec une prédominance des terrains compris entre 750 et 1000 m.

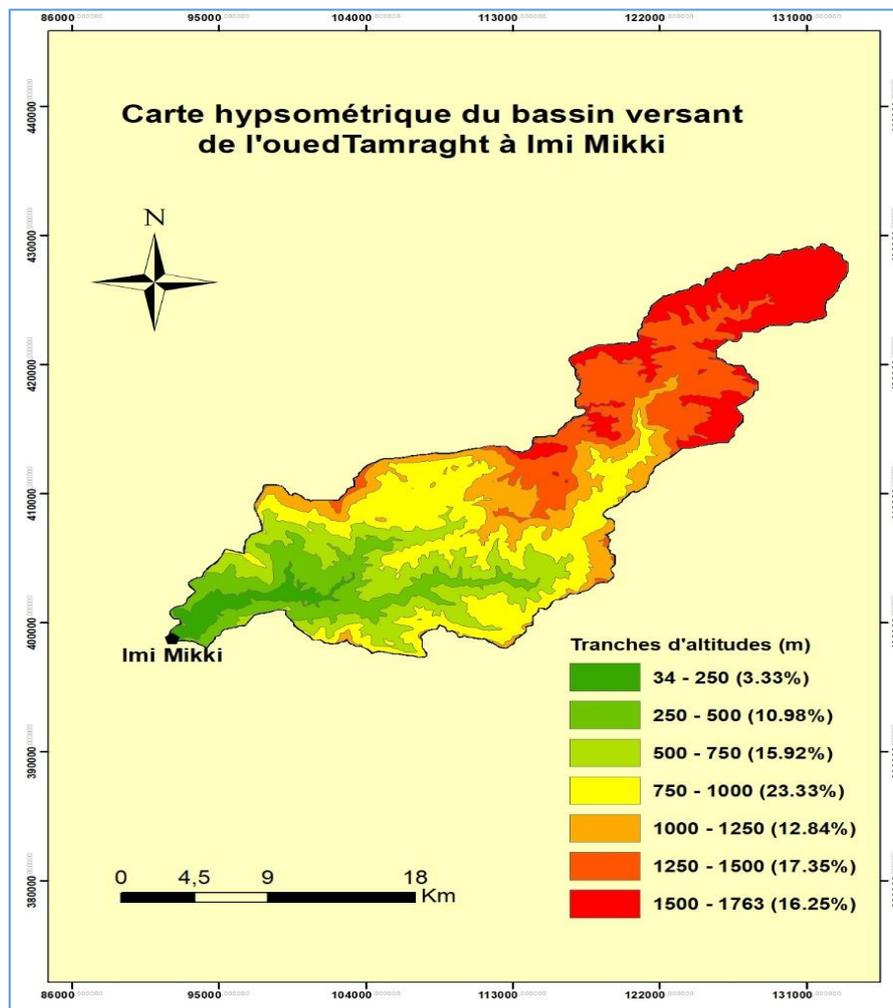


Figure 4 : Carte hypsométrique du bassin versant Tamraght

5.6 Courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique est obtenue en mesurant les surfaces comprises entre les courbes de niveau et en leur attribuant des pourcentages de la surface totale du bassin. On trace un diagramme avec les tranches d'altitudes en ordonnée et les superficies cumulées en abscisse. Les mesures sont résumées dans le tableau ci-dessous (tab. 2)

Tranches d'altitudes	Si (km ²)	Surface (%)	Surface cumulée (%)
34-250	14,97	3,33	100
250-500	49,36	10,98	96.67
500-750	71,59	15,92	85.69
750-1000	104,88	23,33	!69.77
1000-1250	57,71	12,84	46,44
1250-1500	77,99	17,35	33,6
1500-1763	73,07	16,25	16,25

Tableau 2 Répartition du bassin versant de Tamraght en tranches d'altitudes

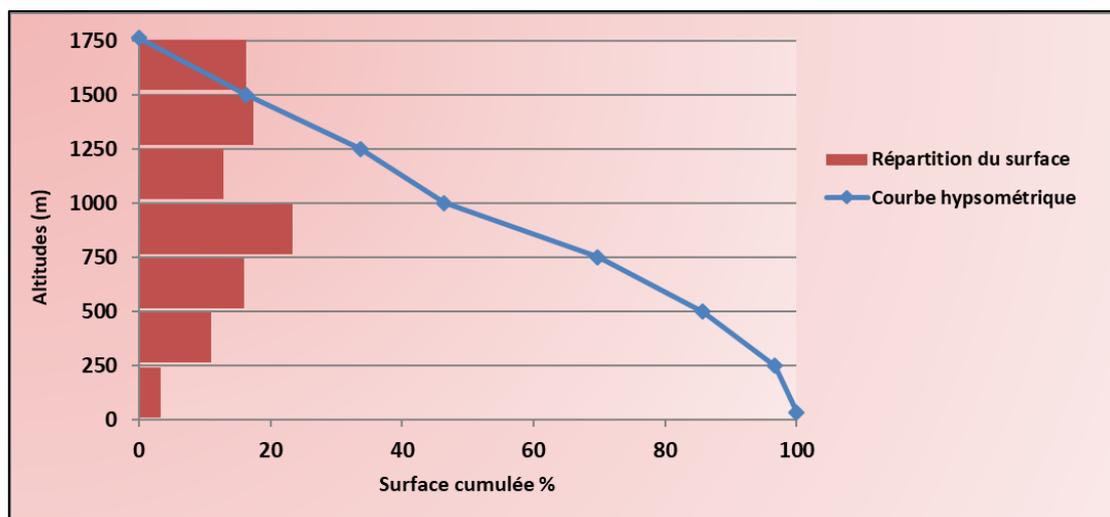


Figure : 5 courbe hypsométrique du bassin versant Tamraght

À partir de cette courbe on peut déduire :

L'altitude maximale qui représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas.

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou par la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

$$H_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot h_i}{A}$$

Avec :

Hmoy : altitude moyenne du bassin [m]

Ai : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²]

hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m]

A : superficie totale du bassin versant [km²].

Pour le bassin versant de Tamraght :

- L'altitude maximale : 1763 m
- L'altitude minimale : 34 m
- L'altitude moyenne : 997 m

5.7 La pente :

C'est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin versant. La pente de cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin et donc le temps de concentration. Elle influence l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, la pente peut se traduire par l'infiltration de l'eau (pour des pentes faibles) ou au contraire un ruissellement de nature torrentielle (pour des pentes fortes) suivant la lithologie des roches rencontrées (Juillerat, 2004).

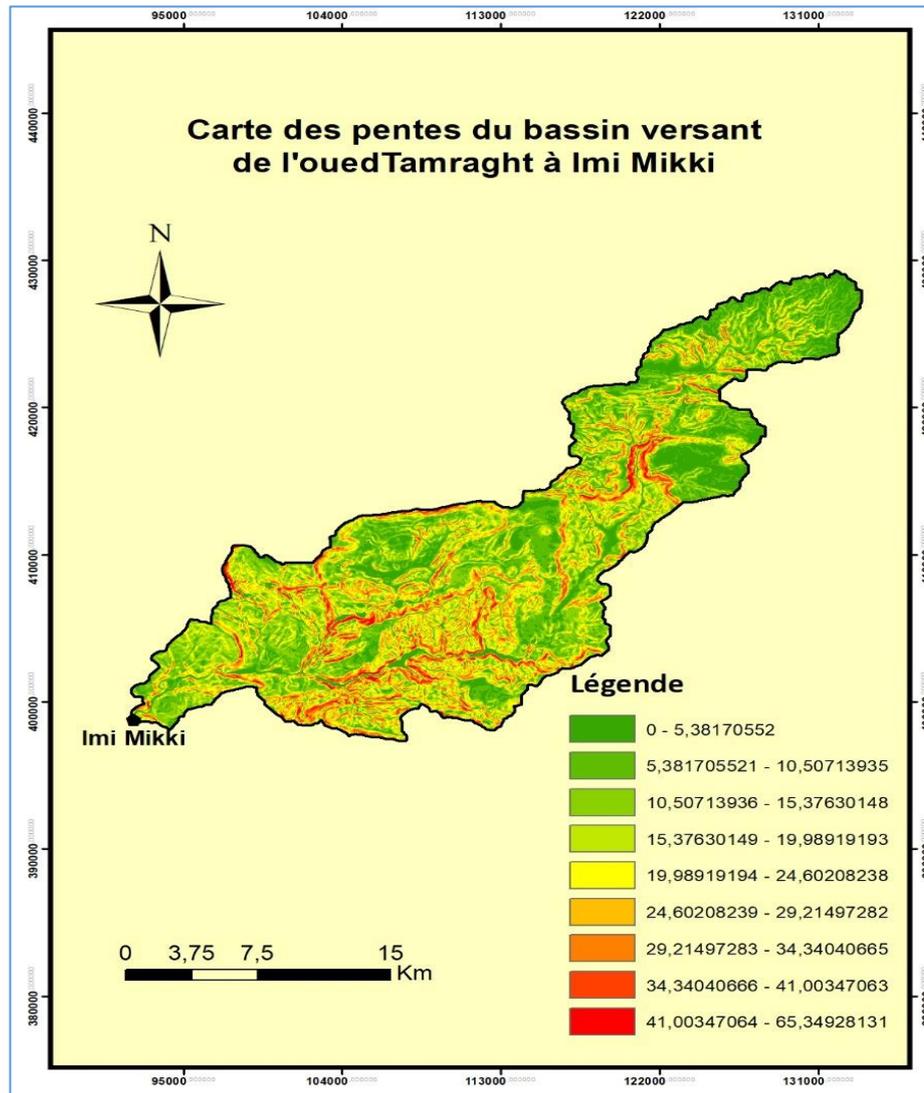


Figure 6 Carte des pentes du Bassin versant de Tamraght

À partir de la carte des pentes (fig :6) on peut déduire que les pentes au niveau du bassin versant de Tamraght varient entre très faible et très forte (0° à 65°).

La pente moyenne est mesurée à l'aide du logiciel Arcgis et a donné la valeur de 16° .

6 Temps de concentration :

Le temps de concentration des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier.

Pour ce paramètre on tient compte des caractéristiques géométriques et morphologiques du bassin. On le calcule à partir de la relation de Giandoht :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L_R}{0.8 \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec :

T_c : Temps de concentration (heures)

A : Surface du bassin versant (Km²)

L_R : Longueur du rectangle équivalent (Km)

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin(m).

H_{min} : Altitude de l'exutoire (m)

Surface du bassin (km ²)	Longueur du rectangle équivalent (km)	Altitude moyenne du bassin (m)	Altitude de l'exutoire (m)	Temps de concentration (heures)
449.57	66.57	997	34	7.46

Tableau 3 Temps de concentration du bassin versant de Tamraght

Le temps de concentration pour l'oued Tamraght : TC = 7,46 heures.

7 Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est une des caractéristiques les plus importantes du bassin qui se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement.

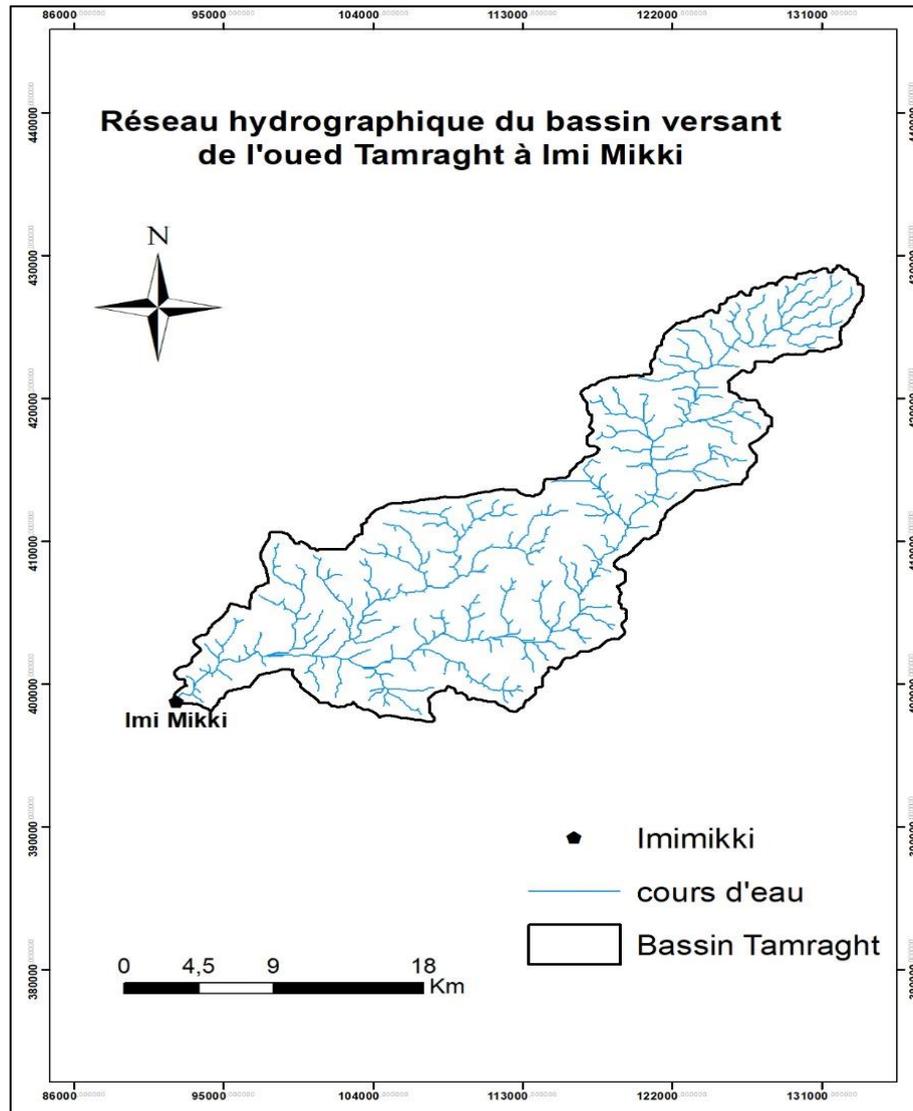


Figure 7 Carte de réseau hydrographique du bassin versant Tamraght

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques globales du bassin versant :

Surface Km²	449.57	
Périmètre km	148.85	
Indice de Gravelius Kg	1.96	
Rectangle équivalent	Longueur (Km)	66.97
	Largeur (km)	6.71
Altitudes du bassin	Altitude maximale (m)	1763
	Altitude minimale (m)	34
	Altitude moyenne (m)	997
Pentes du bassin	Pente maximale	65.3 °
	Pente minimale	0 °
	Pente moyenne	16 °
Temps de concentration (heures)	7.46	

Tableau : 4 Caractéristiques globales du bassin versant de Tamraght à Imi Mikki

Chapitre II : Régimes hydro-pluviométriques et Analyse des données

1 Régime pluviométrique et variabilité temporelle aux échelles mensuelle, saisonnière annuelle :

1.1 Précipitation moyenne mensuelle (1983/84 à 2019/20) :

La distribution des précipitations à l'échelle mensuelle à la station d'Imi-Mikki a montré des irrégularités importantes, avec une moyenne mensuelle de 19.6 mm. Les mois d'octobre à mars dépassent (parfois largement) cette moyenne ; les valeurs les plus élevées se produisent en novembre et décembre, tandis que les mois les plus secs de juin, juillet et août représentent les plus faibles valeurs qui peuvent chuter jusqu'à 0.1 mm (Fig. 8).

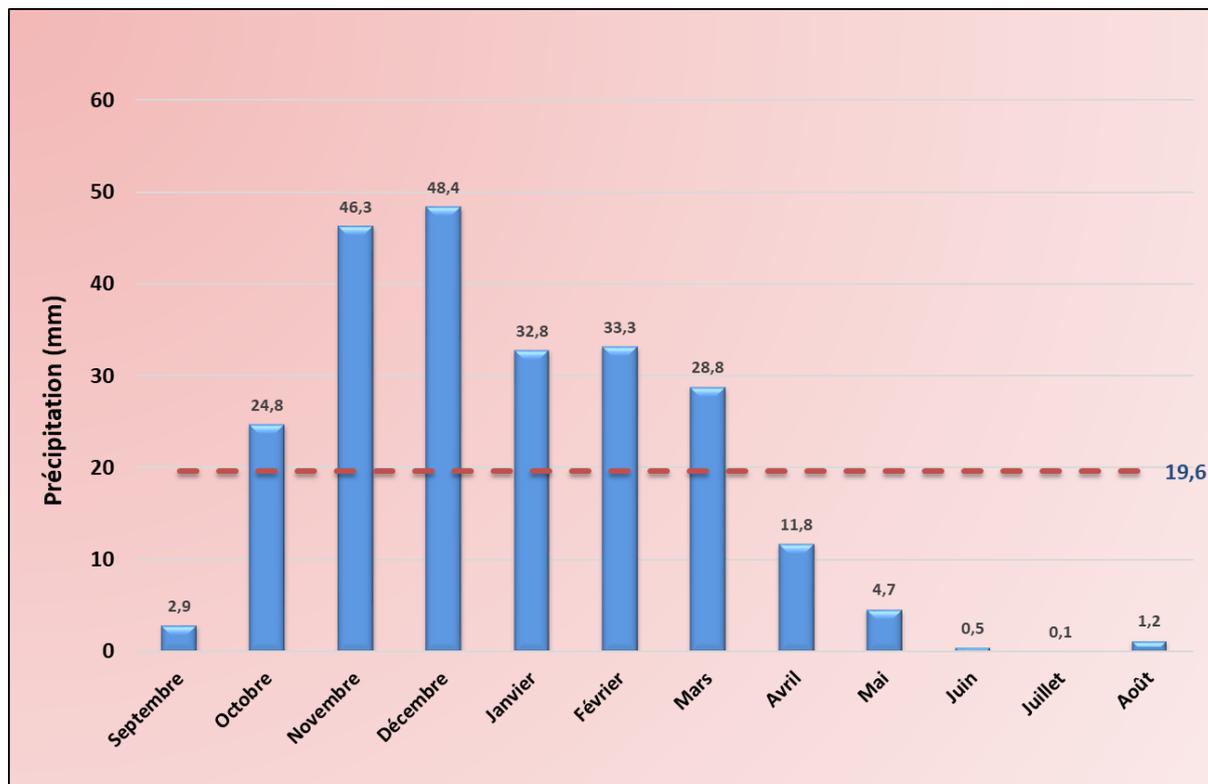


Figure : 8 Précipitations moyennes mensuelles de la station IMI MIKKI (1983-1984 à 2019-2020)

1.2 Précipitation moyenne saisonnière :

À la station d'Imi Mikki, l'hiver est la saison la plus pluvieuse avec une valeur de 114,5 mm. On note aussi des précipitations importantes en automne et printemps alors que l'été est la saison la plus sèche avec une valeur très faible ne dépasse pas en moyenne 1.8 mm.

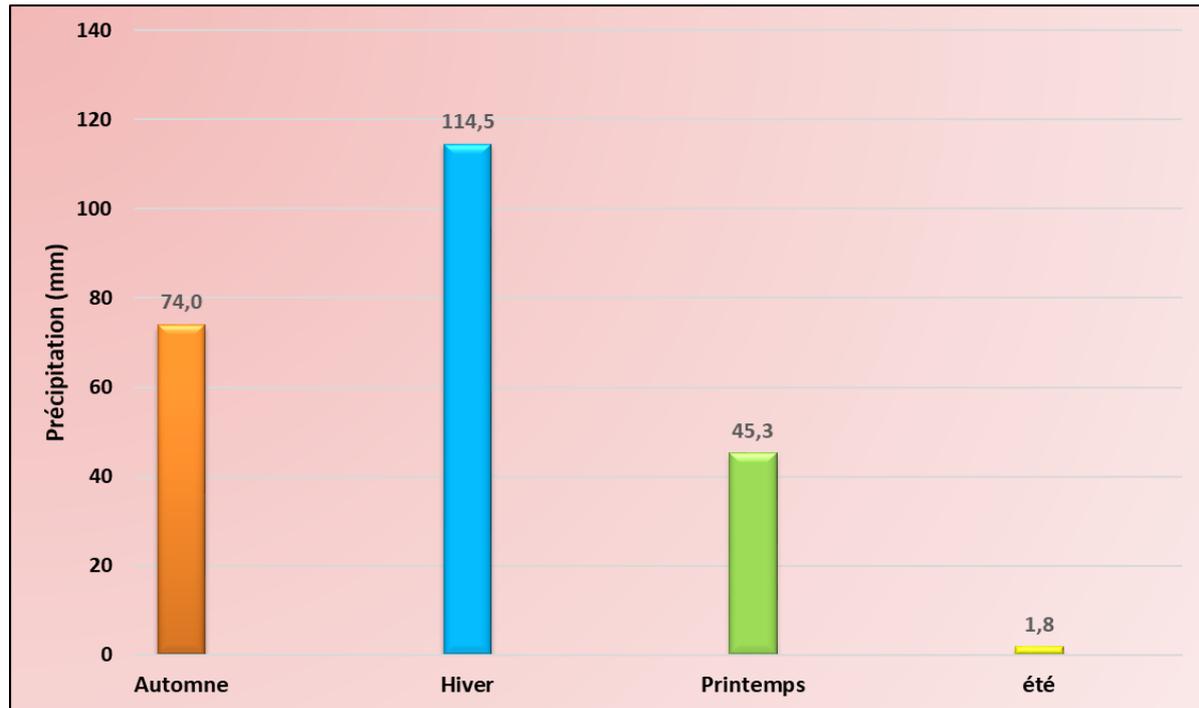


Figure 9 Précipitations moyennes saisonnières à la station d'IMI MIKKI (1983-1984 à 2019-2020)

1.3 Précipitations moyennes annuelles :

Les précipitations de 1983/84 à 2019/20 ont eu de fortes irrégularités interannuelles, reflétant le climat aride à semi-aride de notre bassin, avec une moyenne de 235.6 mm.

Nous pouvons remarquer que les années 1987/88, 1995/96, 2009/10, 2010/11, 2014/15 sont les plus pluvieuses dont la hauteur dépasse largement la moyenne. Par contre les années 1991/92, 2006/07, 2007/08, 2019/20 ont une pluviosité très faible inférieure à 100 mm.

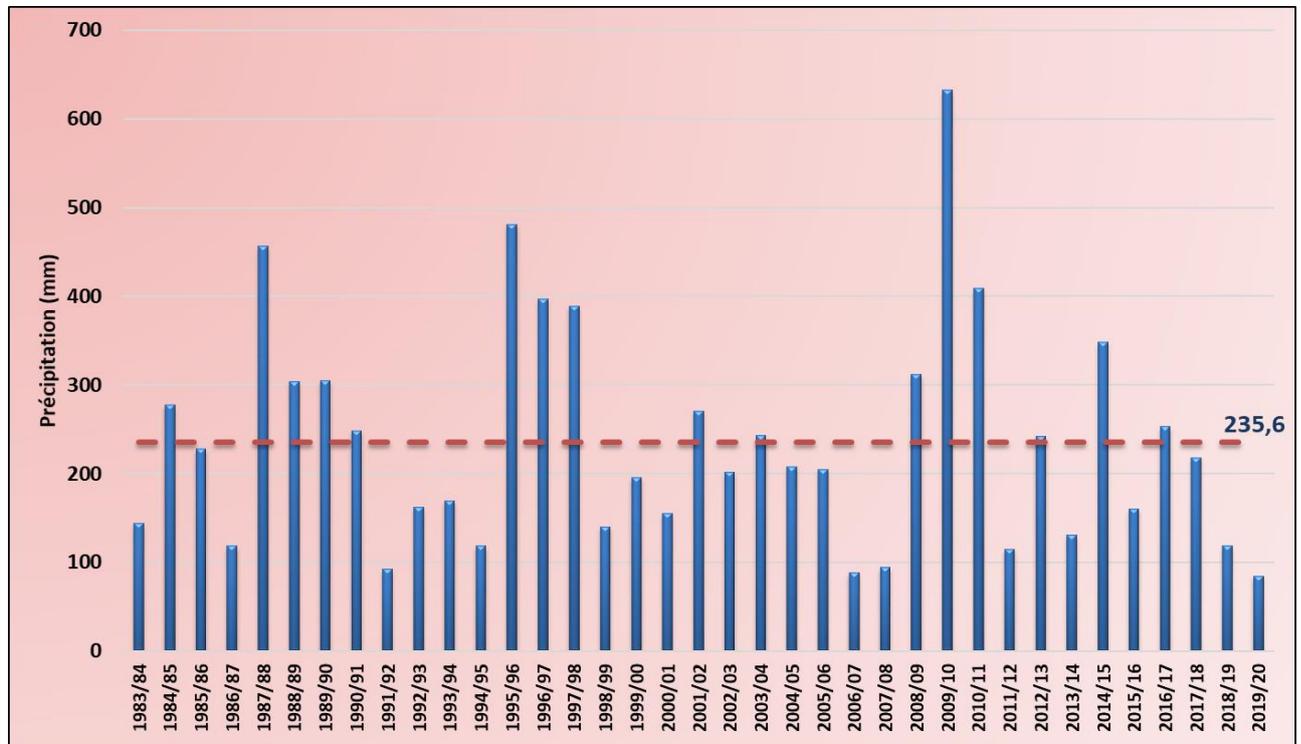


Figure 10 Précipitations moyennes annuelles à la station d'Imi Mikki (1983-1984 à 2019-2020)

2 Régime hydrologique de l'oued Tamraght et variabilité des débits :

2.1 Débits moyens mensuels :

L'analyse de l'évolution des débits moyens mensuels à la station d'Imi Mikki au cours des années 1980/81 à 2016/17 montre que les débits sont généralement faibles avec une moyenne de $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$. On remarque une augmentation pendant les mois de novembre et décembre où le débit atteint sa valeur maximale ($2.06 \text{ m}^3/\text{s}$). Les eaux commencent à diminuer durant le printemps jusqu'à ce qu'ils atteignent des valeurs très faibles en été (fig. 11).



Figure 11 débits moyens mensuels à la station d'IMI MIKKI (1980-81 à 2016-17)

3 Débits moyens saisonniers:

Les écoulements d'hiver sont les plus importants ($5.4 \text{ m}^3/\text{s}$), dépassant les autres saisons. Il est suivi par l'automne et le printemps avec des moyennes respectives de $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$, $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Les écoulements d'été sont évidemment les moins importants de toutes les saisons avec un débit de $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$.

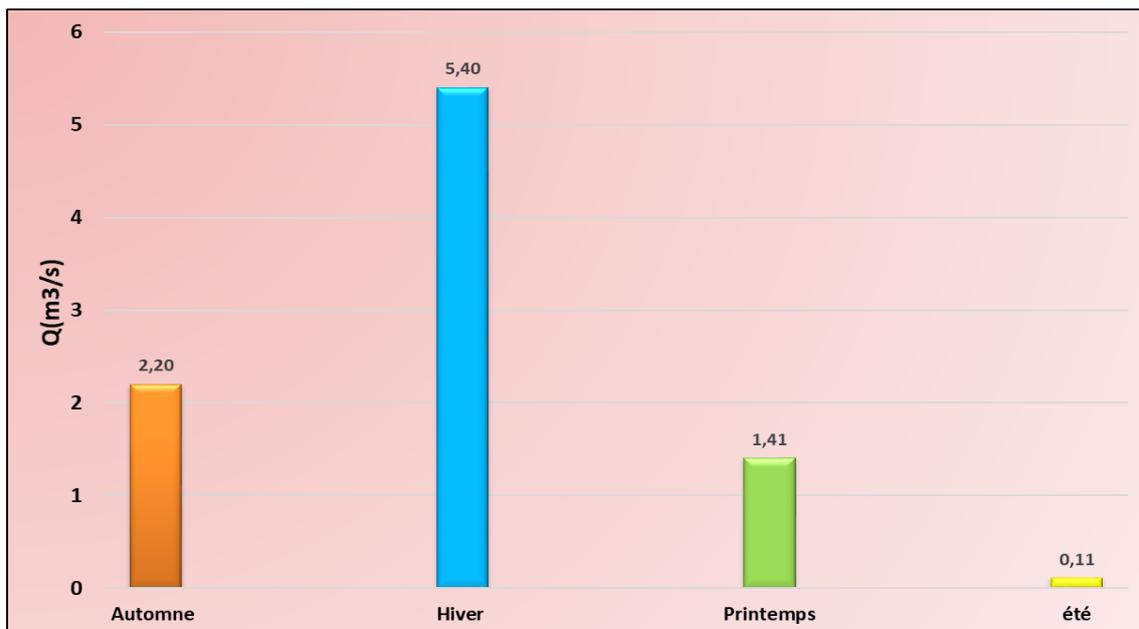


Figure 12 Débits moyens saisonniers à la station d'IMI MIKKI (1980-81 à 2016-17)

3.1 Débits moyens annuels :

L'histogramme suivant (fig. 13) présente les débits moyens annuels à la station d'IMI MIKKI pour une chronique de 37 ans, qui s'étale de 1980-81 à 2016-17 avec une moyenne de 0.76 m³/s. Les débits les plus importants sont enregistrés en 1995-1996 et 2009-2010, les années où la région a connu des conditions de pluviométrie importante. Pour le reste des années, les débits sont beaucoup plus faibles (par exemple 0.24 m³/s en 2006-2007).

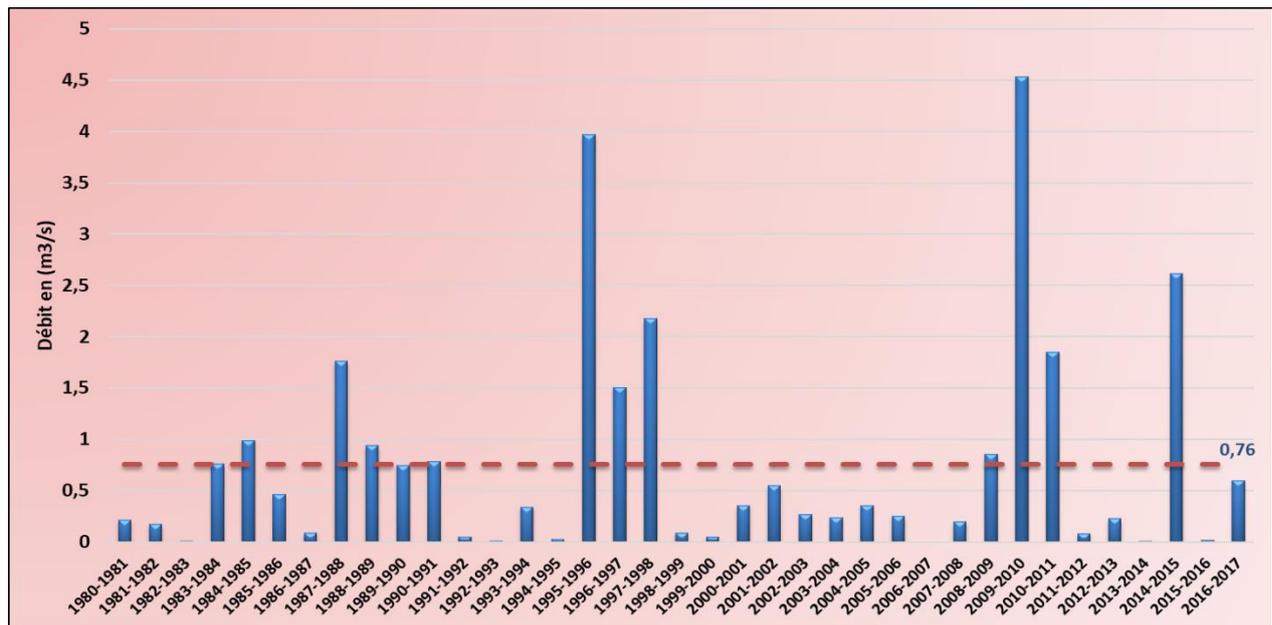


Figure 13 Les débits moyens annuels d'IMI MIKKI (1980-81 à 2016-17)

4 Bilans Hydrologiques et relation entre les pluies et les débits :

4.1 Bilan hydrologique :

L'établissement d'un bilan hydrologique a pour but de comparer les entrées et les sorties d'eau dans un bassin versant. Dans le cas du bassin versant tamraght, on calcule la lame d'eau écoulee annuelle qui est donnée par la relation :

Avec :

$$E = Q * ((3600 * 24 * 365) / S)$$

E : lame d'eau écoulee en (mm)

Q : débits à l'exutoire en (m³/s)

S : surface du bassin versant en (km²)

La lame d'eau écoulée représente la hauteur d'eau écoulée à l'exutoire définie comme étant le rapport entre le volume d'eau écoulée et la surface du bassin versant .

Exemple de calcul (pour le mois de septembre) :

$$E = \frac{0.04 \cdot (30 \cdot 24 \cdot 3600) \cdot 10^3}{449.57 \cdot 10^6} = 0.23 \text{ mm} \quad \text{Avec : } S = 449.57 \text{ km}^2 \text{ et } Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le coefficient d'écoulement correspond au rapport entre la lame d'eau écoulée et les précipitations.

Il exprime en pourcentage la tranche d'eau précipitée qui ruisselle jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

Ce coefficient est donné par la relation :

$$CE = E / P$$

Avec : **CE** : coefficient d'écoulement en %

P : les précipitations en (mm)

E : la lame d'eau écoulée en (mm)

Mois	Précipitation (mm)	Débit m ³ /s	Écoulement (mm)	Coefficient d'écoulement
Septembre	3,3	0,04	0,23	6,99
Octobre	26	0,12	0,69	2,66
Novembre	47,7	2,02	11,65	24,42
Décembre	51,4	2,29	13,20	25,69
Janvier	35,6	1,69	9,74	27,37
Février	35,7	2	11,53	32,30
Mars	28,5	1,07	6,17	21,65
Avril	12,3	0,33	1,9	15,47
Mai	4,6	0,13	0,75	16,29
Juin	0,6	0,06	0,35	57,66
Juillet	0,1	0,04	0,23	230,62
Aout	1,4	0,02	0,12	8,24

Tableau 5 Bilan hydrologique moyen mensuel du bassin Tamraght à la station d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17)

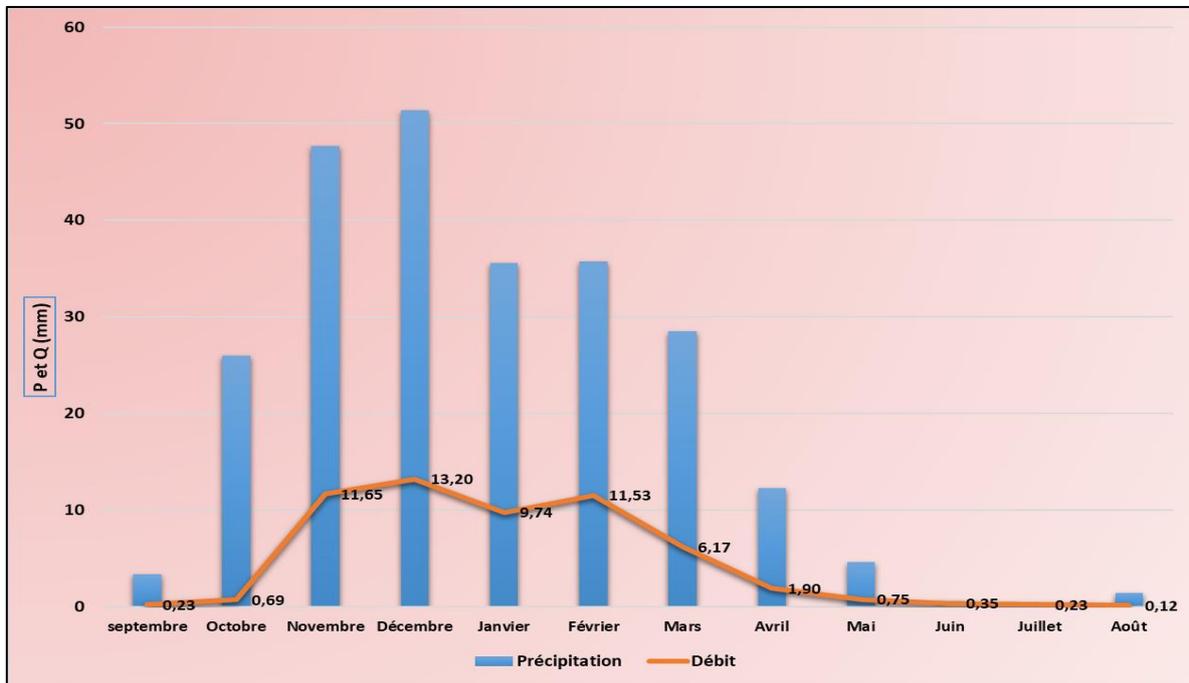


Figure 14 évolution comparative des précipitations et des écoulements d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17)

Au niveau du bilan hydrologique, on constate que le coefficient d'écoulement en juillet a dépassé 100%, ceci implique que pendant ce mois les pluies sont très faibles ou inexistantes, alors qu'il y a un écoulement dans la rivière. Cet écoulement provient de ce qu'on appelle « débit de base »; c'est-à-dire un débit fourni par la nappe phréatique qui alimente l'oued par des sources.

La figure de l'évolution comparative des précipitations et des écoulements à la station d'Imi Mikki (1984-85 à 2016-17) montre que la courbe des débits suit la tendance des pluies. Les débits augmentent quand les précipitations augmentent.

Le tableau suivant représente le bilan hydrologique à l'échelle annuelle. Nous pouvons remarquer que le coefficient d'écoulement est de 22.88%, qui signifie qu'à peu près 23% des pluies s'écoulent dans l'oued.

Précipitations (mm)	Débits (mm)	Coefficient d'écoulement
247,2	56,56	22,88

Tableau 6 bilan hydrologique moyen annuel à la station d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17)

5 Corrélation entre les pluies et les débits :

Pour la mise en évidence de la part des pluies et des débits afin de mieux comprendre la réponse hydrologique des bassins, nous allons effectuer des corrélations à des pas de temps mensuel et annuel. Sur les graphiques, les débits mensuels et les hauteurs de pluies moyennes mensuels forment un nuage de point incliné. Les droites de régression seront de la forme $Y = a X + b$. Un coefficient de corrélation est affecté à chaque droite, il montre la relation entre les deux paramètres étudiés.

5.1 Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuels :

La figure montre le lien existant entre les précipitations et les débits moyens mensuels à la station d'Imi Mikki. Nous pouvons constater que la droite de corrélation est linéaire avec un coefficient de détermination relativement bon ($R^2=0.867$). Les précipitations sont étroitement liées aux débits, ceci indique que ce sont les pluies qui conditionnent l'écoulement et non pas la neige comme pour les bassins pluvio-nivaux. Ici le régime est totalement pluvial.

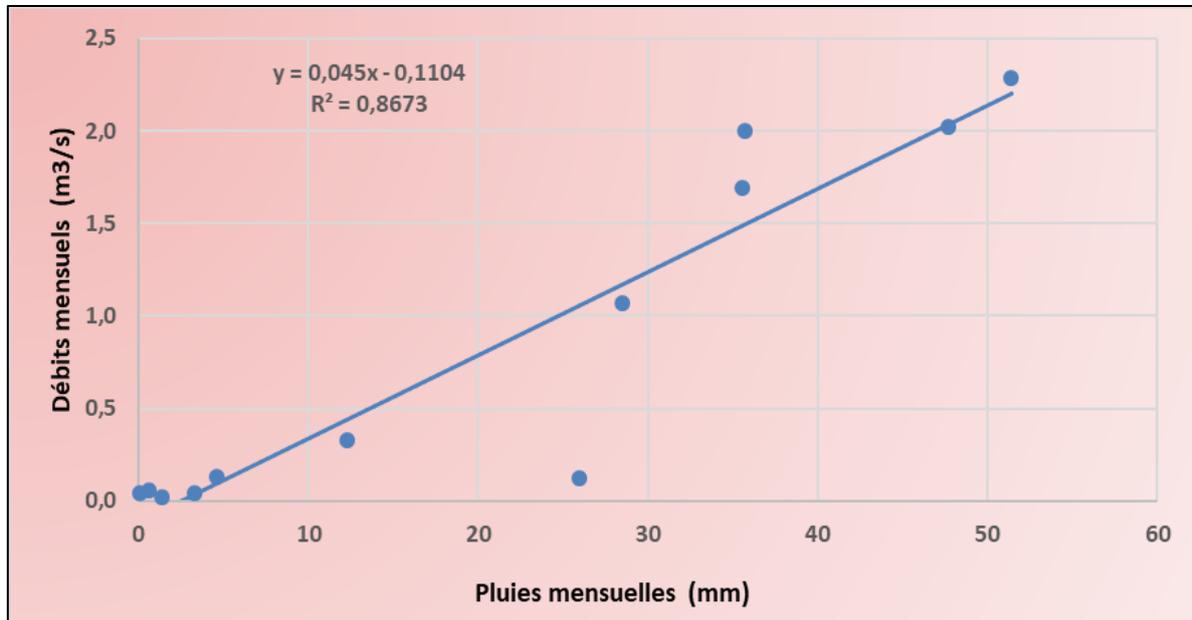


Figure 15 corrélation entre les précipitations et les débits mensuels à la station d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17)

5.2 Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels :

La figure 16 représente la corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels qui porte sur une période de 33 ans (1984/85-2016/17) du bassin de Tamraght.

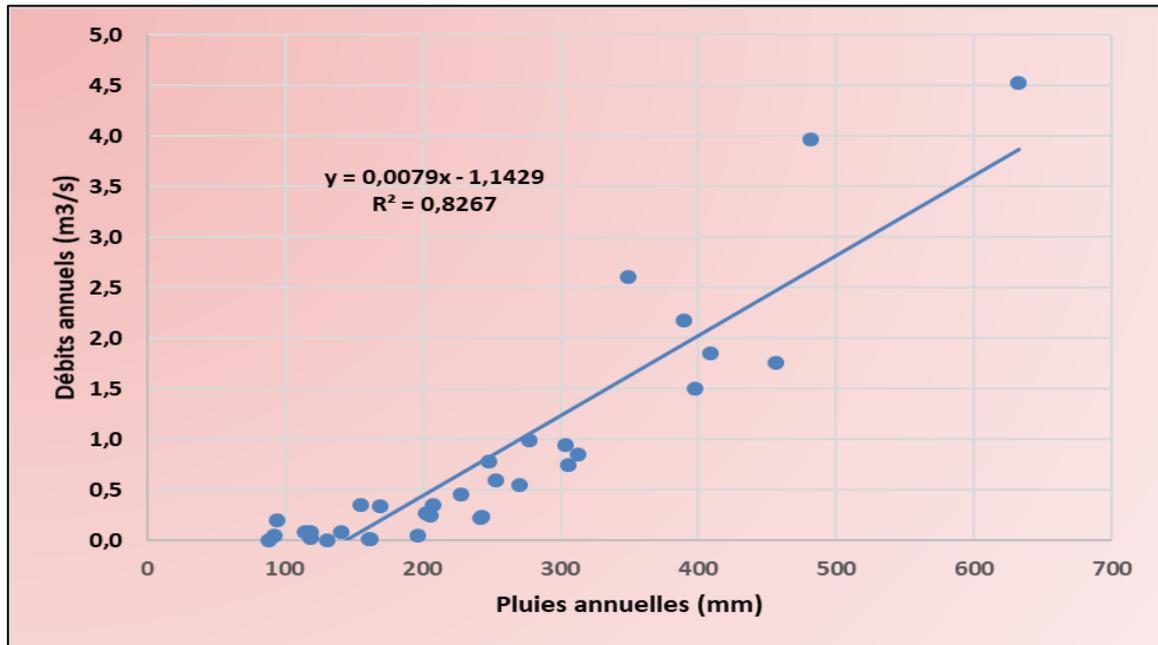


Figure 16 corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels d'IMI MIKKI (1984-85 à 2016-17)

D'après le graphique, la corrélation est bonne puisque son coefficient R^2 est de l'ordre de 0.826.

Nous pouvons remarquer que les précipitations et les débits sont étroitement liés et l'écoulement d'une année proviendrait donc quasiment toujours de la pluie de la même année. Les années de forte pluviosité ont des écoulements élevés et les années de faible pluviosité ont généralement des débits faibles.

Chapitre III : Les crues de l'oued Tamraght

1 Étude dynamique des crues :

Une crue est un phénomène hydrologique qui s'exprime par une augmentation brutale du niveau des eaux d'un cours d'eau. Elle produit des débits exceptionnels dépassant largement les normes habituelles. L'hydrogramme d'une crue fait apparaître cinq secteurs :

- ❖ Le temps de montée de la crue est la durée qui s'écoule entre le début de la montée du niveau d'eau et la pointe de la crue.
- ❖ La pointe de la crue ou débit de pointe, est le débit maximum observé au cours d'une crue.
- ❖ Le temps de base est la durée qui s'écoule entre le début de la montée du niveau d'eau et la fin du ruissellement pur (ou superficiel) de la crue.
- ❖ Le temps de concentration est le temps que met une particule d'eau, provenant d'un point du bassin le plus loin de l'exutoire, pour arriver à celui-ci. On l'estime à la durée entre la fin de la pluie et la fin du ruissellement (superficiel) de la crue.

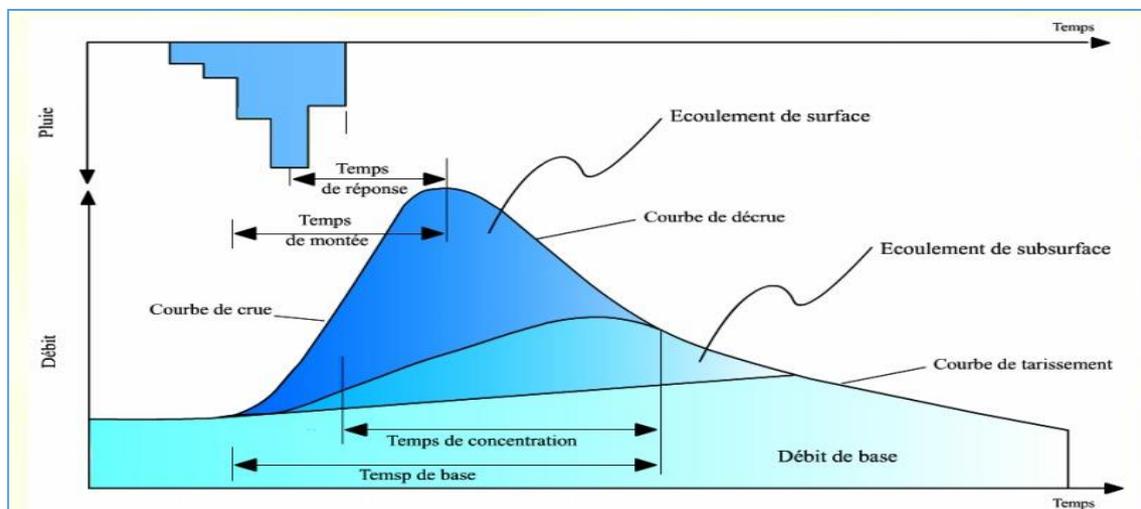


Figure 17 Répartition élémentaire d'un hydrogramme de crue

Ainsi qu'on distingue deux types des hydrogrammes selon le type de crue :

- Crue simple (ou monogénique) : Hydrogramme avec un seul pic du débit de pointe.
- Crue complexe ou (polygénique) : Hydrogramme avec au moins deux pics générés par différents épisodes pluvieux.

1.1 Analyse des hydrogrammes des crues :

Le bassin versant Tamraght a été affecté par des crues au cours de la période 1980-2017. Pour les analyser nous avons choisi 6 crues importantes du point de vue débit de pointe et qui sont représentatives pour la station d'Imi Mikki. Le but de cette analyse est d'étudier le comportement des crues dans le bassin versant Tamraght.

- **La crue de 4 décembre 1987 :**

La figure 18 montre une crue simple et rapide qui atteint son débit de pointe de l'ordre de $576 \text{ m}^3/\text{s}$ en un temps très court de l'ordre de 2h et un temps de base de 18 h.

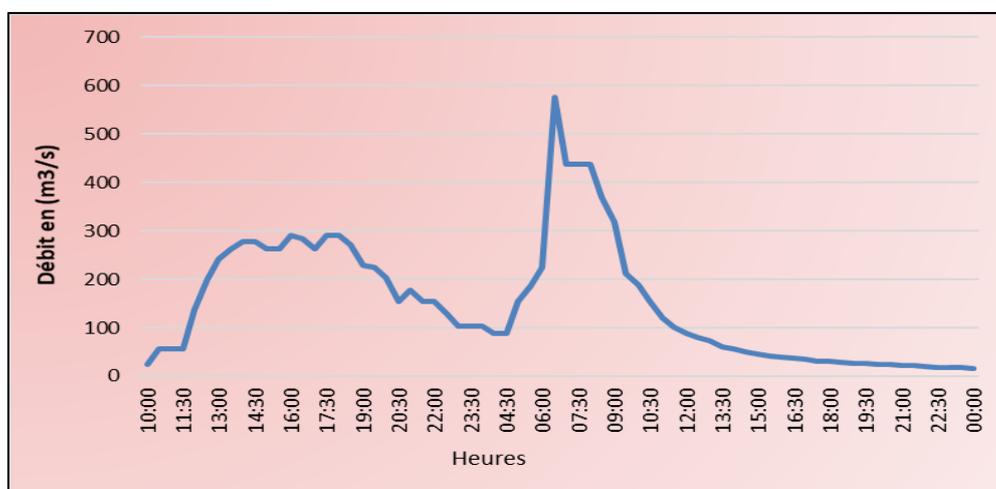


Figure 18 Hydrogramme de la crue du 4 décembre 1987 d'oued Tamraght

Caractéristiques de la crue	
Date de début	03/12/1987
Date de fin	04/12/1987
Débit de pointe (m^3/s)	576
Débit de base avant (m^3/s)	87,9
Débit de base après (m^3/s)	19
Débit moyen (m^3/s)	130,93
Coefficient de pointe	4,4
Temps de base (h)	18
Temps de montée (h)	2
Volume de crue (m^3)	8484195,79

Tableau 7 Caractéristique de la crue de 1987 de l'oued Tamraght

- **La crue du 9 Novembre 1988 :**

Le bassin a enregistré cette crue qui se distingue par son caractère simple avec un débit de pointe de 420 m³/s, un temps de montée de 6h et un temps de base de 12,5h.

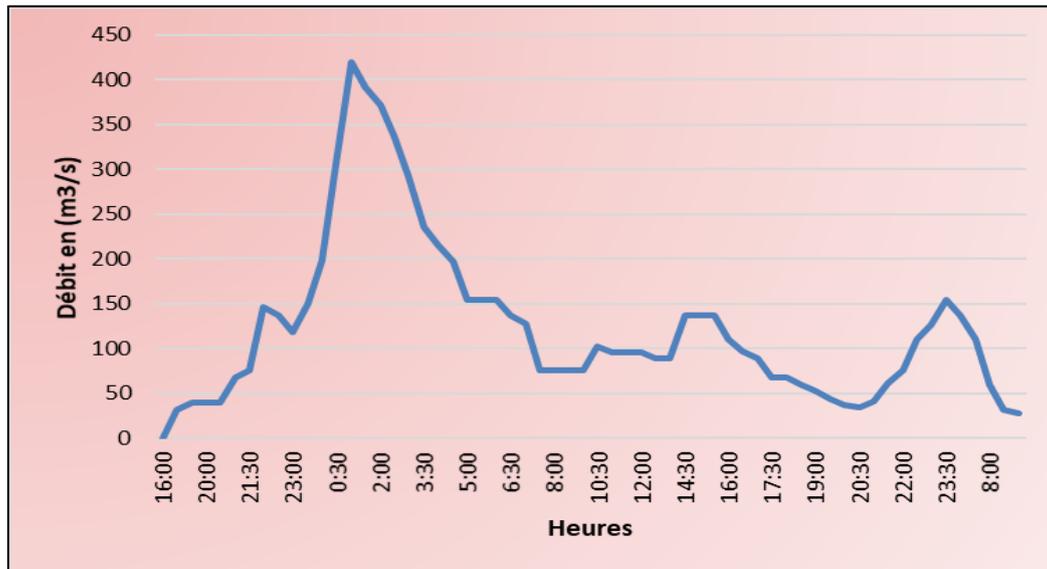


Figure :19 Hydrogramme de la crue du 9 novembre 1988 d'oued Tamraght

Caractéristiques de la crue	
Date de début	09/11/1988
Date de fin	11/11/1988
Débit de pointe (m ³ /s)	420
Débit de base avant (m ³ /s)	31,2
Débit de base après (m ³ /s)	75,2
Débit moyen (m ³ /s)	177,51
Coefficient de pointe	2,37
Temps de base (h)	12,5
Temps de montée (h)	6
Volume de crue (m ³)	7987950

Tableau 8 Caractéristique de la crue de 9 novembre 1987 de l'oued Tamraght

- **La crue du 7 mars 1991 :**

L'hydrogramme montre que cette crue est également simple caractérisée par une seule montée du niveau d'eau suivie d'une descende de ce niveau. On note aussi un débit de pointe de $438 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un temps de montée rapide de l'ordre de 7,5h et un temps de base de 20h. C'est donc une crue violente qui a rapidement atteint son débit de pointe.

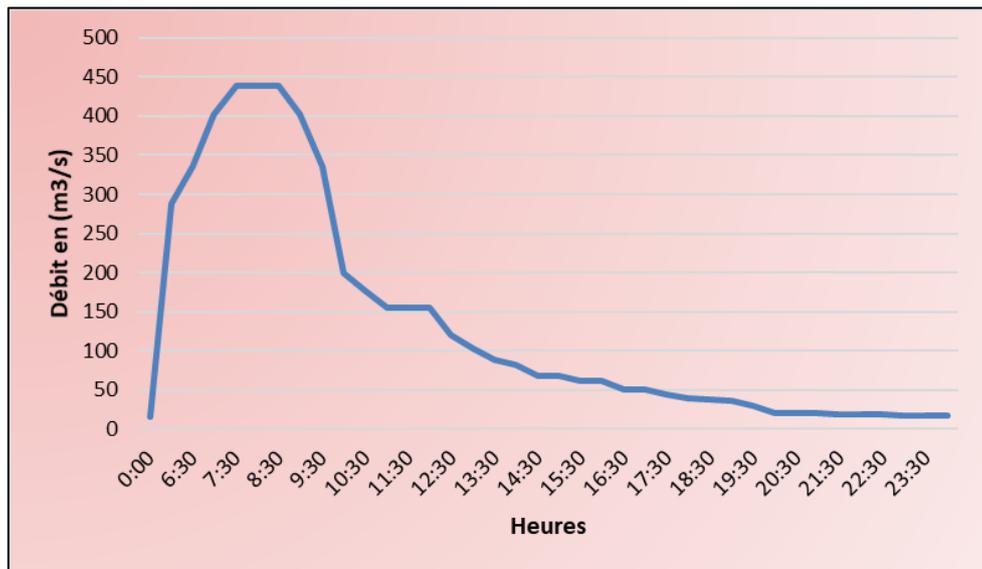


Figure : 20 Hydrogramme de la crue du 7 mars 1991 d'oued Tamraght

Caractéristiques de la crue	
Débit de pointe (m^3/s)	438
Débit de base avant (m^3/s)	15,2
Débit de base après (m^3/s)	21
Débit moyen (m^3/s)	168,14
Coefficient de pointe	2,60
Temps de base (h)	20
Temps de montée (h)	7,5
Volume de crue (m^3)	12106179,31

Tableau 9 Caractéristique de la crue de 7 mars 1991 de l'oued Tamraght

- La crue de 15 décembre 1995 :

Contrairement aux exemples précédents, l'hydrogramme ci-dessous montre plusieurs hausses et plusieurs baisses des niveaux d'eau, ce qui assure que c'est une crue complexe, caractérisée par quatre montées principales dont la plus importante atteint un débit de pointe de 498 m³/s, avec un temps de montée de 13h et un temps de base de 25,5 h.

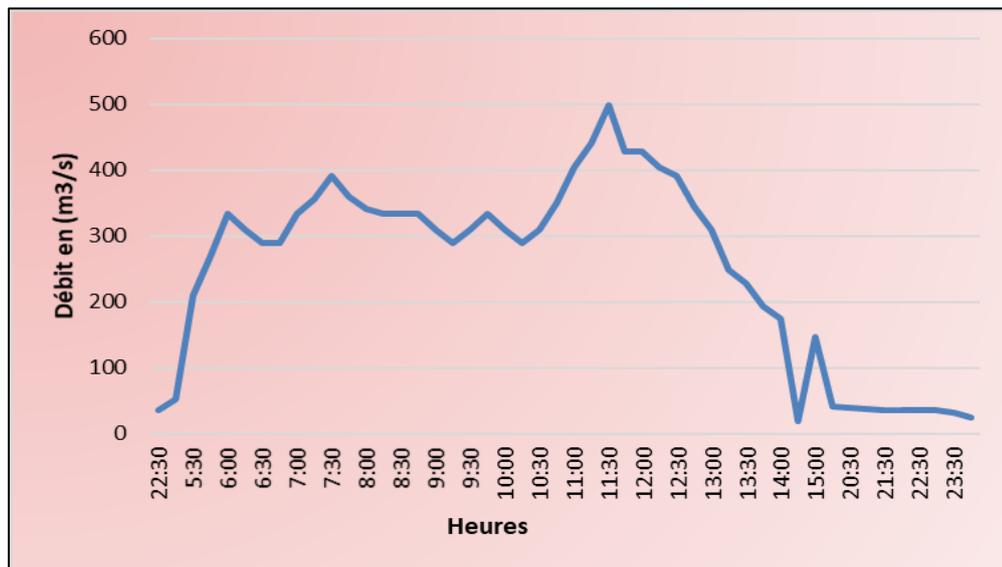


Figure 21 Hydrogramme de la crue du 15 décembre 1995 d'oued Tamraght

Caractéristiques de la crue	
Date de début	14/12/1995
Date de fin	15/12/1995
Débit de pointe (m ³ /s)	498
Débit de base avant (m ³ /s)	34,8
Débit de base après (m ³ /s)	24
Débit moyen (m ³ /s)	250,89
Coefficient de pointe	1,98
Temps de base (h)	25,5
Temps de montée (h)	13
Volume de crue (m ³)	23031663,75

Tableau 10 Caractéristique de la crue de 12 décembre 1995 de l'oued Tamraght

- **La crue de 24 décembre 2009 :**

D'après l'allure d'hydrogramme ci-dessous, on remarque que cette crue est la plus importante des années étudiées. Elle atteint son débit de pointe de 1321 m³/s en un temps de montée de 30h et un temps de base de 40h. Cette crue peut être considérée dangereuse pour un bassin versant de 449,57 km² car elle est caractérisée par un débit de pointe très élevé et un temps de base et de montée long, qui a provoqué des dégâts très importants.

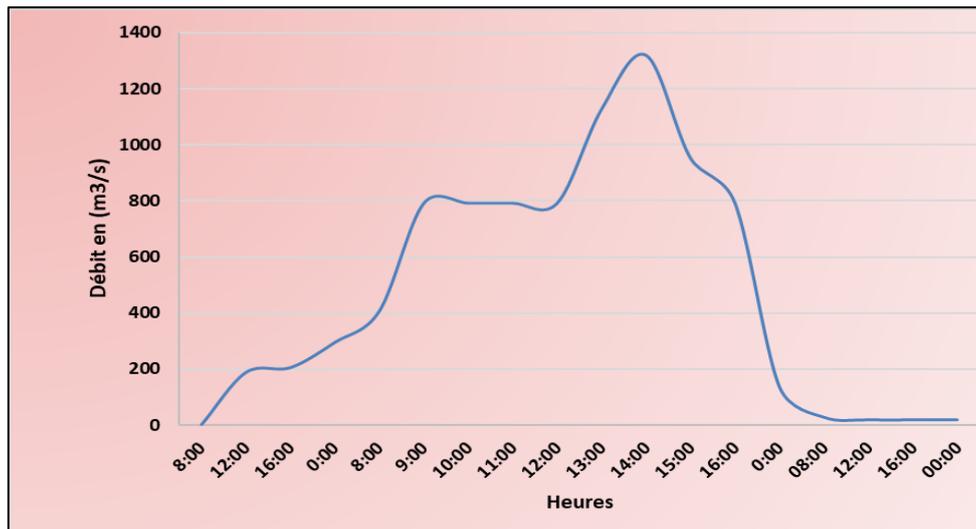


Figure 22 Hydrogramme de la crue du 24 décembre 2009 d'oued Tamraght

Caractéristiques de la crue	
Date de début	23/12/2009
Date de fin	24/12/2009
Débit de pointe (m ³ /s)	1321
Débit de base avant (m ³ /s)	2.55
Débit de base après (m ³ /s)	19.6
Débit moyen (m ³ /s)	540,92
Coefficient de pointe	2,44
Temps de base (h)	40
Temps de montée (h)	30
Volume de crue (m ³)	77892750

Tableau 11 Caractéristique de la crue de 24 décembre 2009 de l'oued Tamraght

1.2 Les crues dans l'année hydrologique :

Pour sélectionner les événements de crues, nous devons fixer un seuil de débit qui va sélectionner des événements qui correspondraient effectivement à des crues intéressantes. Après plusieurs essais et des concertations avec notre tuteur de stage, nous nous sommes fixé un seuil correspondant à 20 fois le module moyen de l'oued. Ce seuil nous a permis de sélectionner 58 événements les plus importants de la série d'étude de 37 ans. Le tableau suivant regroupe ces crues et leurs pourcentages mensuels, afin de réaliser une étude statistique de la répartition mensuelle des crues de l'oued Tamraght.

Mois	Nombre de crues	Pourcentage (%)
Septembre	1	1,72
Octobre	1	1,72
Novembre	12	20,69
Décembre	12	20,69
Janvier	9	15,52
Février	11	18,97
Mars	10	17,24
Avril	1	1,72
Mai	1	1,79
Juin	0	0
Juillet	0	0
Août	0	0

Tableau 12 Nombre et pourcentages des crues mensuelles d'oued Tamraght

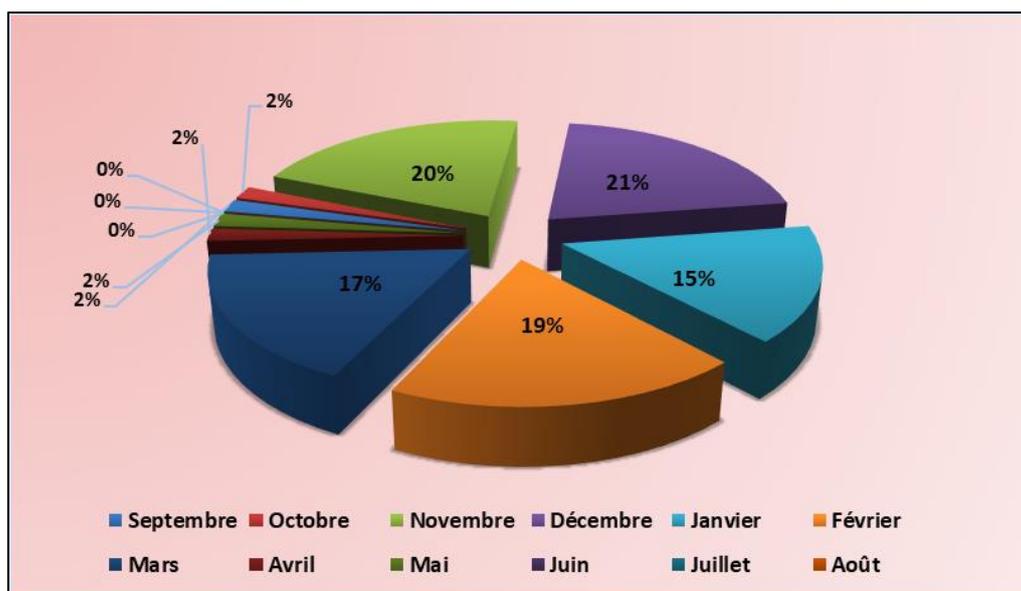


Figure 23 Répartition mensuelle des crues d'oued Tamraght

On remarque que les crues se concentrent en majorité dans une période de cinq mois de novembre à mars. Ces cinq mois totalisent à eux seuls 92% des crues du Tamraght.

C'est donc un bassin qui connaît surtout des crues d'hiver.

1.3 Variations des temps de montée et de base des crues :

Concernant cette étude, nous avons analysé les hydrogrammes de toutes les crues enregistrées à la station IMI MIKKI de 1980 à 2016 qui sont au nombre de 58, pour en déduire leurs temps de montée et de base.

1.3.1 Variations de temps de montée :

Le temps de montée est le temps compris entre le début de la montée du niveau d'eau et le débit maximum observé au cours de la crue.

Temps de montée	Intervalle de temps	0-1h	1-4h	4-10h	10-20h	20-40h	> 40h
	Nombre de crues		5	19	21	8	4

Tableau 13 temps de montée des crues d'oued Tamraght

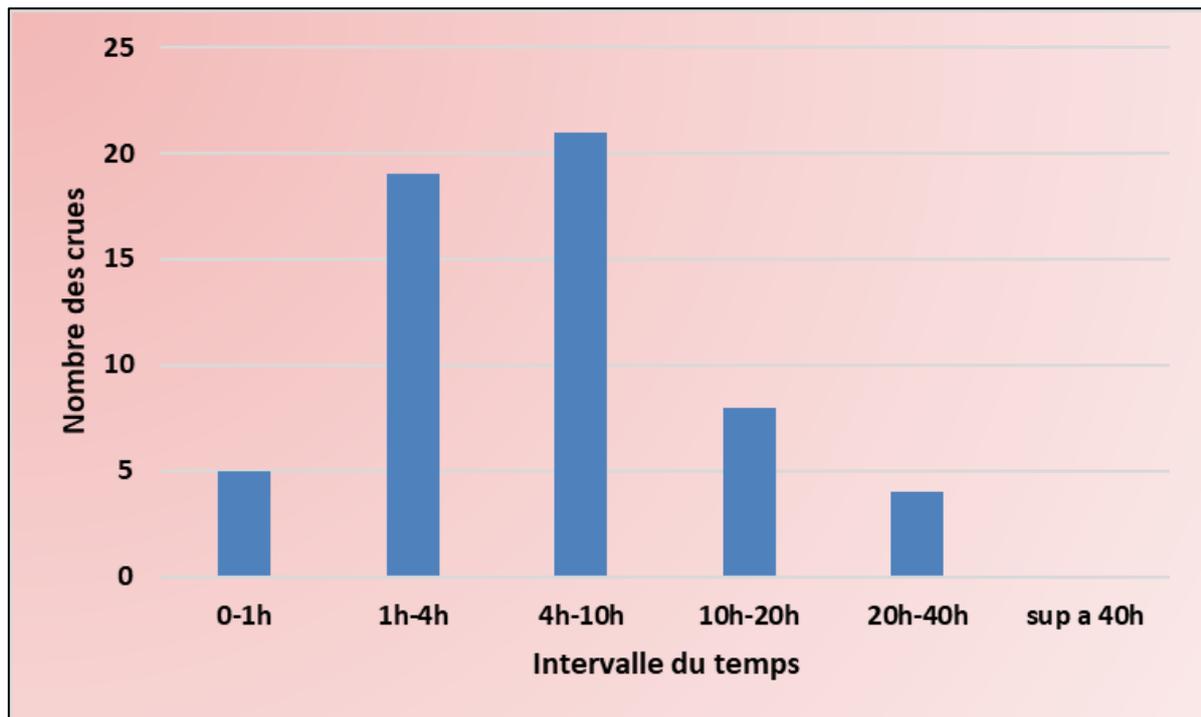


Figure : 24 Temps de montée des crues d'oued Tamraght

D'après cette répartition (fig. 24), le temps de montée des crues le plus dominant pour le bassin versant de Tamraght se situe dans l'intervalle [4-10h].

1.3.2 Variations de temps de base :

Le temps de base est compris entre le début de la montée et la fin du ruissellement superficiel.

Temps de bases	Intervalle de temps	0-1h	1-4h	4-10h	10-20h	20-40h	> 40h
	Nombre de crues	0	4	10	30	12	1

Tableau 14 temps de bases des crues d'oued Tamraght

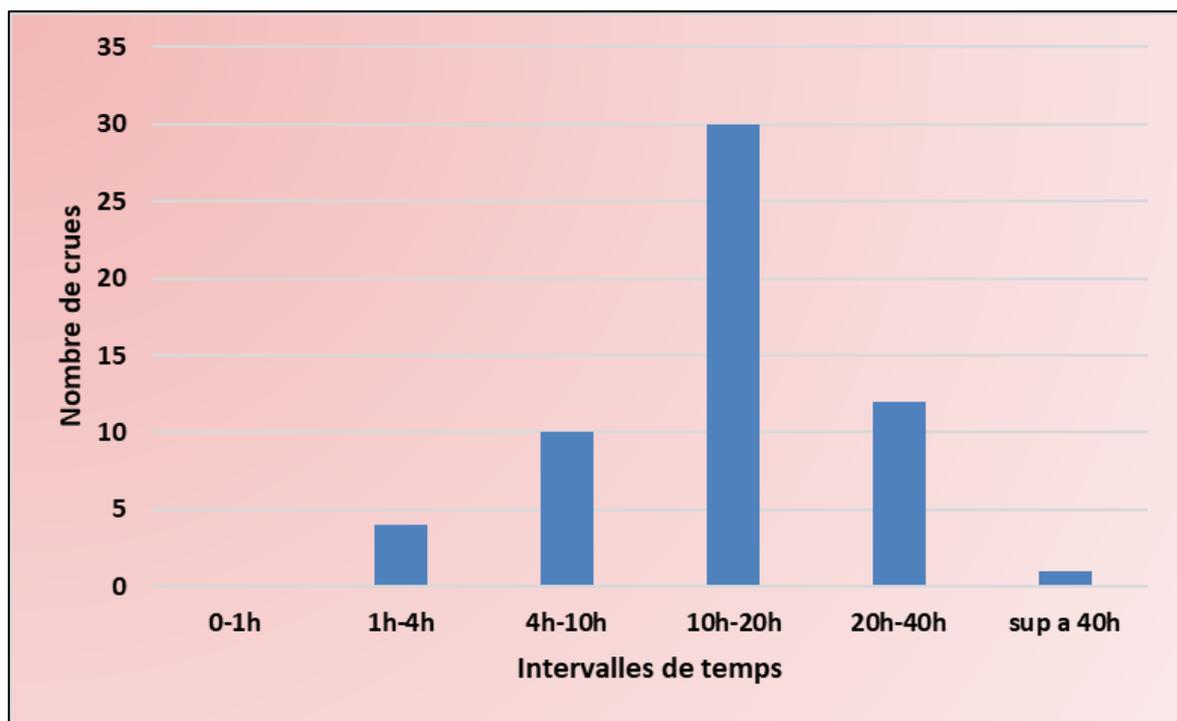


Figure 25 Temps de bases des crues d'oued Tamraght

On remarque que le temps de base de la majorité des crues est situé dans l'intervalle du temps [10-20h].

2 Analyse fréquentielle des crues de l'oued Tamraght :

2.1 Application de la loi de Gumbel:

La fonction de Gumbel est une fonction doublement exponentielle qui s'écrit :

Avec :

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

$Y = a(Q - Q_0)$, y est la droite de Gumbel.

Les paramètres d'ajustement étant :

Le paramètre d'échelle : $1/a = 0,78 \sigma$ (σ est l'écart-type de la série des crues).

Le paramètre de forme : $Q_0 = \bar{Q} - (1/a * 0,577)$ (\bar{Q} est la moyenne des crues).

Connaissant les paramètres a et Q_0 , on obtient, l'équation de la droite de Gumbel :

$$Y = a(Q - Q_0)$$

On trace cette droite sur un papier de Gumbel, sur lequel on porte aussi les valeurs des fréquences au non-dépassement de toutes les crues de la série étudiée

A défaut du papier diagramme à échelle de probabilité de Gumbel on procède à un changement de variable pour obtenir une échelle linéaire y sachant que :

$$FND = e^{-e^{-y}}$$

Par conséquent $y = -\ln(-\ln(FND))$; FND est la fréquence au non dépassement du débit.

La série des débits maxima annuels classés par ordre décroissant, se présentent comme suit. Pour chaque débit nous avons calculé le rang R , la fréquence expérimentale F , la fréquence au non dépassement FND et la variable réduite y :

$$F = \frac{R-1/2}{n} \quad FND = 1 - F \quad y = -\ln(-\ln(FND))$$

Année hydrologique	Rang	Débits max (m ³ /s)	F	FND	Y
2014- 2015	1	2275	0,013888889	0,986111111	4,2697
2009- 2010	2	1321,25	0,041666667	0,958333333	3,1568
2010- 2011	3	649,112	0,069444444	0,930555556	2,6315
1987- 1988	4	576	0,097222222	0,902777778	2,2801
1995- 1996	5	498	0,125	0,875	2,0134
1990- 1991	6	438	0,152777778	0,847222222	1,7970
1988- 1989	7	420	0,180555556	0,819444444	1,6138
1997- 1998	8	344,428	0,208333333	0,791666667	1,4541
2002- 2003	9	293,752	0,236111111	0,763888889	1,3118
2016- 2017	10	224,739	0,263888889	0,736111111	1,1829
1996- 1997	11	209	0,291666667	0,708333333	1,0647
2008- 2009	12	192,35	0,319444444	0,680555556	0,9549
2000- 2001	13	160	0,347222222	0,652777778	0,8521
1989- 1990	14	155	0,375	0,625	0,7550
2004- 2005	15	148,85	0,402777778	0,597222222	0,6627
2005- 2006	16	148,85	0,430555556	0,569444444	0,5743
1993- 1994	17	136	0,458333333	0,541666667	0,4892
1980- 1981	18	112	0,486111111	0,513888889	0,4068
1979- 1980	19	81,6	0,513888889	0,486111111	0,3267
2007- 2008	20	72,434	0,541666667	0,458333333	0,2483
1981- 1982	21	65,6	0,569444444	0,430555556	0,1712
2001- 2002	22	49,442	0,597222222	0,402777778	0,0950
2012- 2013	23	48,092	0,625	0,375	0,0194
1986- 1987	24	44,5	0,652777778	0,347222222	-0,0562
2003- 2004	25	41,431	0,680555556	0,319444444	-0,1321
1991- 1992	26	29,7	0,708333333	0,291666667	-0,2088
1992- 1993	27	22,1	0,736111111	0,263888889	-0,2869
1999- 2000	28	12,788	0,763888889	0,236111111	-0,3670
1994- 1995	29	11,1	0,791666667	0,208333333	-0,4502
1998- 1999	30	6,07	0,819444444	0,180555556	-0,5375
2015- 2016	31	0,916	0,847222222	0,152777778	-0,6306
2011- 2012	32	0,312	0,875	0,125	-0,7321
2013- 2014	33	0,1	0,902777778	0,097222222	-0,8462
2006- 2007	34	0,001	0,930555556	0,069444444	-0,9810
1982- 1983	35	0	0,958333333	0,041666667	-1,1563
1985- 1986	36	0	0,986111111	0,013888889	-1,4532
Moyenne		244,12	Ecart- type	435,32	

Tableau 15 Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du Tamraght (1979/80 à 2016/17)

Sur un papier à échelles linéaires, nous avons ajusté l'équation de la droite de Gumbel :

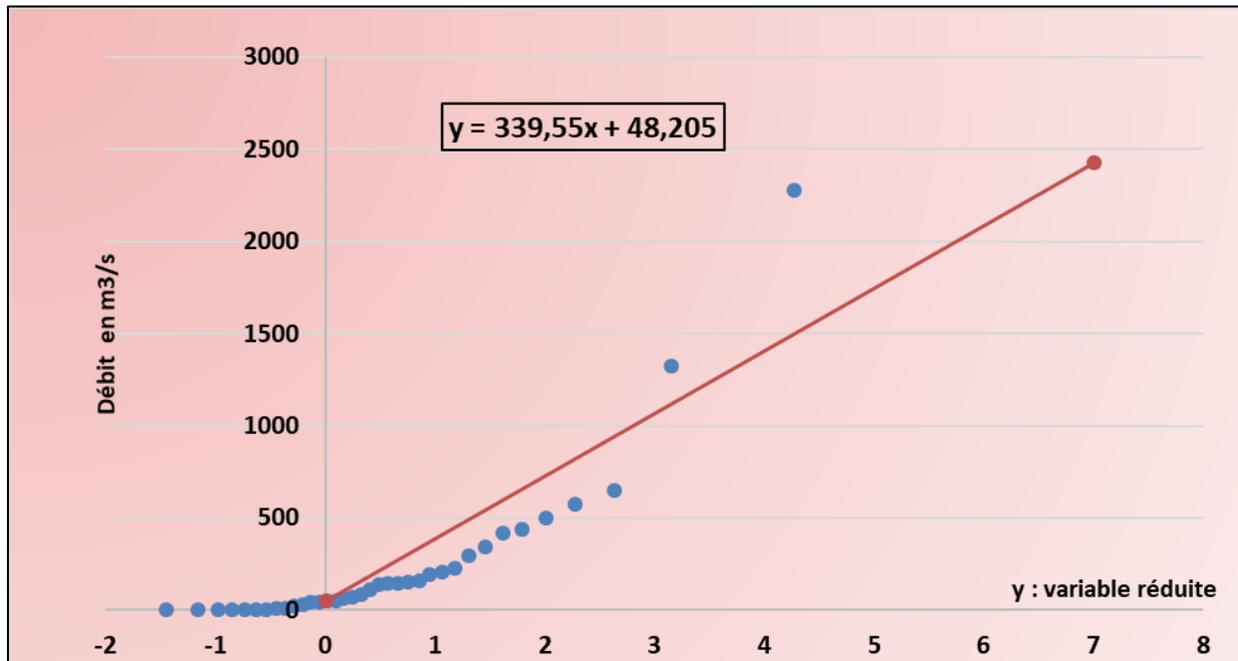


Figure : 26 Ajustement de la loi de Gumbel aux crues du bassin versant Tamraght à IMI MIKKI

La droite du Gumbel qui a pour l'équation $Q = 339,55 y + 48,2$ traverse le nuage des points.

Ceci permet d'estimer les probabilités d'occurrence des crues à partir de cette loi.

2.2 Calcul des quantiles :

Les calculs des quantiles (crue médiane, décennale, ...) ou les périodes de retour de certaines pointes de crues peut se faire soit par la lecture directe du graphique soit par l'utilisation de l'équation de la droite de Gumbel $Q = 339,55y + 48,205$ avec la fréquence au non dépassement $FND = e^{-y}$

Pour le bassin versant du Tamraght, les débits de crue et leurs probabilités se présentent comme suit :

T(ans)	10	20	50	100
Q(m3/s)	812,2	1056,7	1372,5	1610,1

Tableau 16 Débits calculés de différentes périodes de retour selon la loi de Gumbel

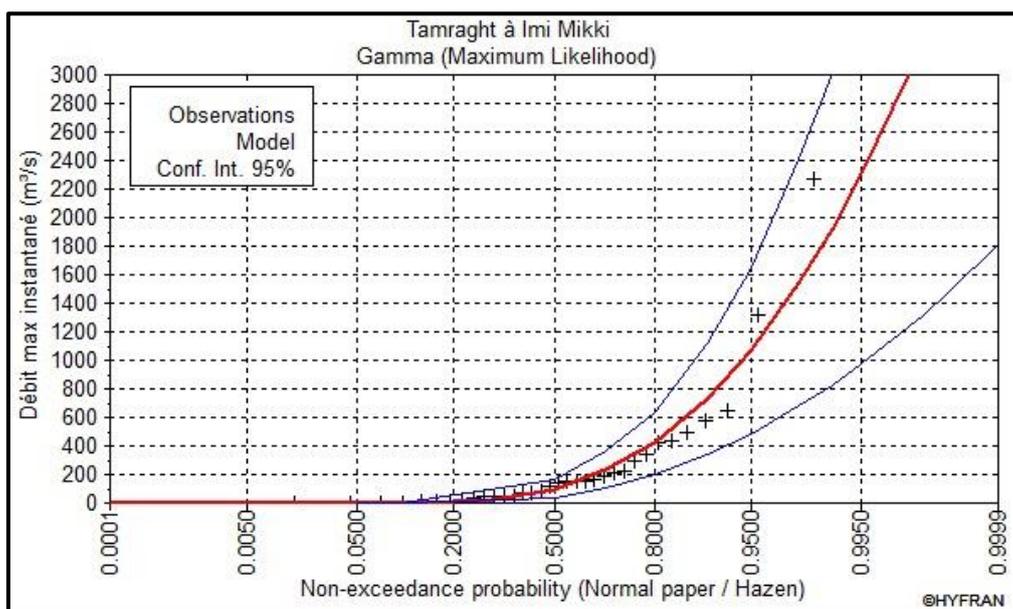
L'ajustement de la loi de Gumbel au niveau de la station d'Imi Mikki a permis de constater que les crues du bassin versant sont assez fortes pour la superficie drainée et pour un milieu semi-aride. À titre d'exemple la crue qui reviendrait tous les 10 ans peut atteindre 812,2 m³. Il en est de même pour les crues cinquantennale et centennale qui sont très élevées.

3 Application de logiciel d'analyse fréquentielle des crues :

Cette méthode est basée sur des données de débits instantanés maximaux annuels. Ces données ont été ajustées à l'aide du logiciel Hyfran-Plus avec plusieurs modèles probabilistes, pour en retenir le meilleur. La série des débits enregistrés a été ajustée avec les lois suivantes : log-Pearson type III, 3-parameter, Lognormal et Gamma. Pour chaque loi, nous obtenons un tableau récapitulatif des paramètres statistiques. La loi retenue est celle qui donne le meilleur ajustement, c'est-à-dire avec des critères statistiques bayésiens AIC et BIC de plus faible valeur.

3.1 L'analyse des graphes :

Les figures ci-dessous montrent les graphiques des résultats obtenus. Ils représentent la distribution des lois statistiques. Visuellement, on peut remarquer que la loi Gamma est la plus adaptée pour l'ajustement de la variable débit maximal instantané.



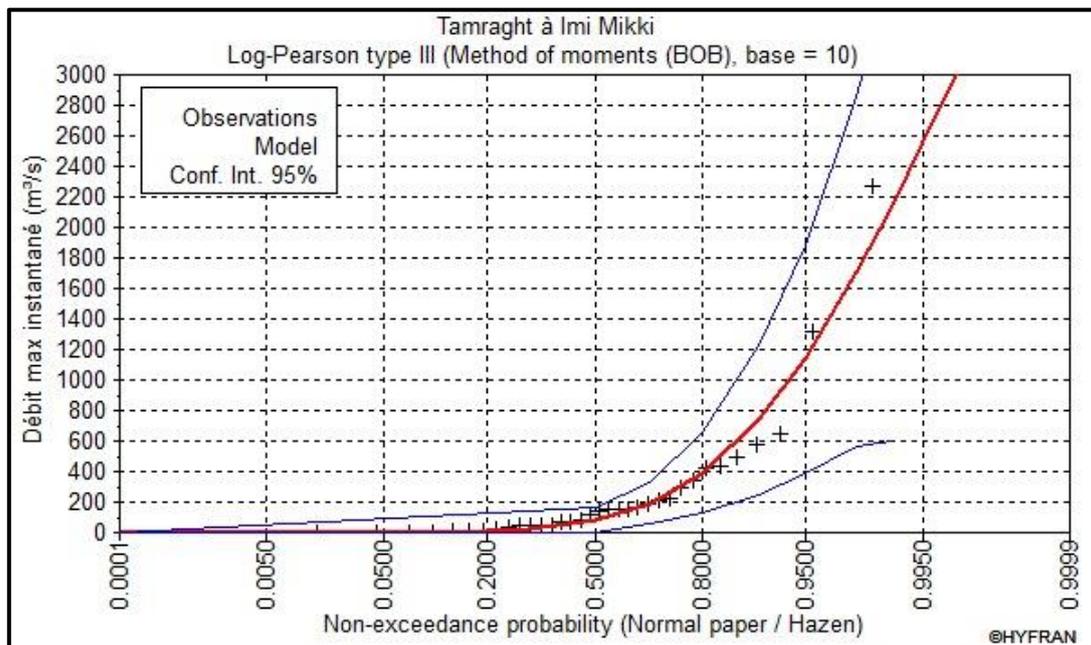
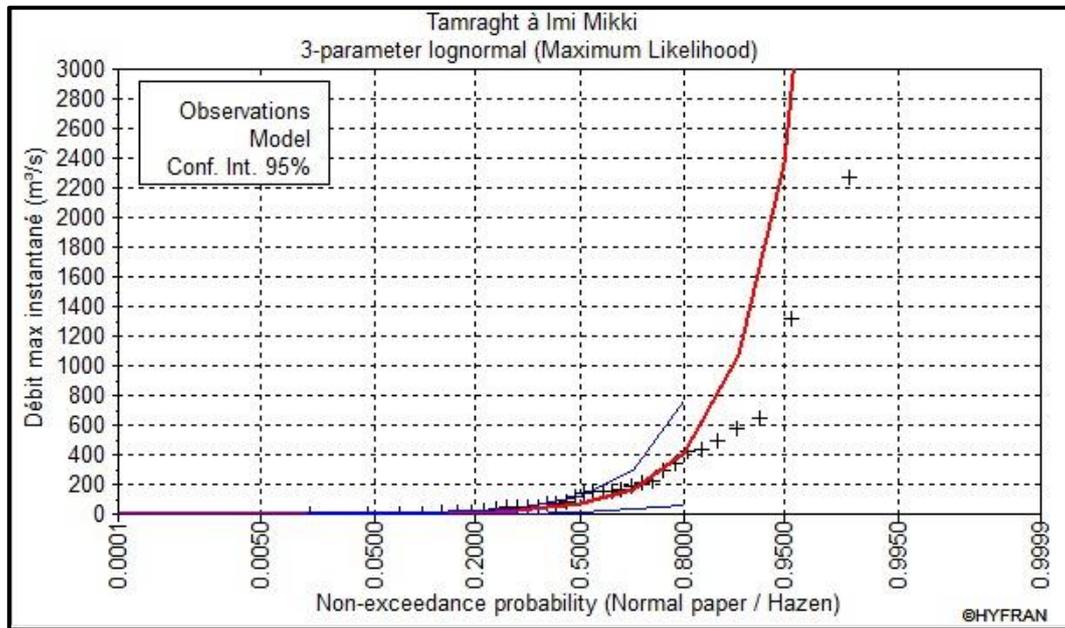


Figure 27: Ajustement graphique des débits maximaux instantanés d'IMI MIKKI selon les lois statistiques

3.2 L'analyse des critères statistiques :

Les critères statistiques bayésiens BIC et d'Akaike AIC permettent de classer les lois selon une performance d'estimation. La loi qui obtient les plus faibles valeurs des deux critères est la plus performante pour la prédétermination des débits extrêmes.

Ces critères se définissent de la façon suivante :

$$AIC = -2\log(\text{Lik}) + 2K$$

$$BIC = -2\log(\text{Lik}) + K.\log(N)$$

Avec :

- **log(Lik)** : Représente la log-vraisemblance des paramètres associés aux données.
- **K** : Désigne le nombre de paramètres indépendants dans le modèle.
- **N** : le nombre d'individus composant l'échantillon

Le tableau suivant représente les résultats de l'ajustement des lois statistiques :

Lois statistiques	BIC	AIC
Gamma	425,616	422,564
Log pearson III	432,430	427,851
3-parameter Lognormal	445,191	440,612

Tableau 17 Ajustements numériques des lois statistiques pour la période de retour 100 ans.

L'ajustement numérique confirme que Gamma est la loi la mieux adaptée pour l'estimation du débit puisqu'elle a les plus faibles valeurs des critères AIC et BIC.

3.3 Estimation de probabilités de crues :

Le tableau suivant représente les estimations des débits maxima instantanés annuels calculés pour les différentes périodes de retour selon la loi Gamma.

Période de retour (ans)	10	20	50	100
Débit de pointe (m ³ /s)	728	1070	1540	1920

Tableau 18 Estimation des débits de pointe de différentes périodes de retour de Tamraght

Pour un cours d'eau de 0.76 m³/s de débit moyen, la crue décennale (Q10) s'élève à 728 m³/s et la pointe centennale (Q100) est de l'ordre 1920 m³/s. Ce sont des pointes très élevées pour un milieu semi-aride et d'un bassin versant de 449.57 km² de surface.

Conclusion

Le bassin versant de l'oued Tamraght draine une superficie de 449,6 km², avec une altitude qui varie entre 34 et 1763 m. Du point de vue morphologique le bassin présente une forme allongée avec un indice de compacité de l'ordre de 1,9. Le temps de rassemblement des eaux vers l'exutoire est de l'ordre de 7,46 h.

Les précipitations du bassin versant sont variables dans le temps et dans l'espace avec une moyenne annuelle autour de 235,6 mm à la station Imi Mikki. La valeur annuelle maximale a été enregistrée pendant l'année 2009/2010 tandis que 2019/2020 était la plus sèche. Les variations mensuelles montrent que la période pluvieuse s'étend d'octobre à mars.

Les débits sont généralement faibles avec un maximum au mois de novembre. Ces débits sont étroitement liés aux pluies et la relation entre eux, aux échelles mensuelles et annuelles était assez bonne avec des coefficients de corrélation respectivement de 0,86 et 0,82.

Bien qu'avec un débit moyen interannuel assez faible (0.76 m³/s), les crues de l'oued Tamraght, qui se concentrent beaucoup dans les saisons d'automne et d'hiver, sont très violentes. L'une d'entre elles a par exemple emporté un pont de la route principale reliant Agadir à Essaouira en novembre 2014. L'analyse fréquentielle de ces crues a justement montré cette importance. La crue qui aurait une période de retour de 10 ans par exemple s'élèverait à 728 m³/s et la pointe centennale à 1920 m³/s. Ce sont des pointes très élevées pour un bassin versant d'à peine 449.6 km² de surface.

La violence des crues de l'oued Tamraght nous interpelle donc pour bien gérer ce risque naturel et lutter contre ses effets destructeurs. Ceci par la prévision à l'aide d'un système d'alerte par exemple ou par la construction d'ouvrages de protection des localités balnéaires d'Aourir et Tamraght. Celles-ci sont en effet des zones touristiques bien fréquentées par des visiteurs nationaux et internationaux.

Bibliographie :

Agence de Bassin Hydraulique de Souss Massa, Étude hydraulique pour la délimitation des berges des cours d'eau dans les provinces de Taroudant, Tiznit, Chtouka Ait Baha et la préfecture Agadir Idaoutanane. Rapport interne.

Daide F. (2017) : Modélisation hydraulique des crues du bassin versant d'oued Tamraght, Région Souss Massa (Maroc), Mémoire de Master de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès.

Hanich, L., Simoneaux, V., Boulet, G. et Chehbouni, A. (2006) : Hydrologie des bassins versants du Haut Atlas marocain, p 20.

Saidi. M. E. (2020) Étude des crues et prédétermination de leur débit maximum probable. Cours d'hydrologie, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech.