



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et
Techniques



وكالة الصوض المائي لتانسيفت
Agence de Bassin Hydraulique du Tensift

Agence du Bassin
Hydraulique de Tensift
Marrakech

Département des Sciences de la Terre

Licence Es-Sciences et Techniques

Eaux et Environnement

**Contribution à une modélisation hydrologique
événementielle.
Application au bassin Versant de l'Ourika à Tazzitount**

Réalisé par: ASSAGDI Assmae et SEMLALI Yousra

Soutenu : Le 24 Juin 2019

Devant le jury composé de :

| | | | |
|------------------|---|------------------|--------------|
| Mr. M. E. Saidi | : | FST, Marrakech, | Encadrant |
| Mr. A. Morabbi | : | EHTP, Casablanca | Co-encadrant |
| Mr. B. Igmoullan | : | FST, Marrakech, | Examineur |

2018/2019

Remerciements

Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur ; elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries.

Marcel Proust

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté des sciences et techniques, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenant à remercier sincèrement Monsieur Mohamed El Mehdi SAIDI qui, en tant que l'encadrant de mémoire il est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. On tient à remercier notre encadrant le doctorant vacataire à l'école Hassania des Travaux Publics de Casablanca (EHTP), Monsieur MORABBI Ali, pour l'aide compétente qu'elle nous a apportée, pour sa patience et son encouragement. Son œil critique il est toujours à notre disposition pour répondre aux questions de manière très cordiale.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------------------------|
| Introduction: | 4 |
| Présentation de l'agence du bassin hydraulique de Tensift..... | 5 |
| Chapitre 1: Situation géographique et analyse géomorphologique..... | 6 |
| 1-Situation géographique du bassin versant ourika : | 7 |
| 2-Caractéristiques morphologiques du bassin : | 8 |
| 3-Délimitation du bassin versant de l'ourika à Tazzitout : | 9 |
| a) L'hypsométrie et reliefs..... | 9 |
| b) Cartes des pentes | 11 |
| c) Le réseau hydrographique..... | 11 |
| 4- Géologie générale et lithologie : | 12 |
| 5- Le climat global, le couvert végétal et l'imperméabilité : | 14 |
| a) Climat globale:..... | 14 |
| b) La couverture végétal et Occupation du sol :..... | 14 |
| c) L'imperméabilité:..... | Erreur ! Signet non défini. |

Chapitre 2: Le régime pluviométrique et hydrologique du bassin versant de l'Ourika:.....16

| | |
|---|-----------------------------|
| 1-Le régime pluviométrique : | Erreur ! Signet non défini. |
| a) L'exutoire Amenzal :..... | 17 |
| b) L'exutoire Tazzitout:..... | 19 |
| c) L'exutoire Tourcht :..... | 22 |
| d) L'exutoire Agouns :..... | 23 |
| e) L'exutoire Tourdio: | 26 |
| f) Le Régime pluviométrique saisonnière du Bassin versant de l'ourika (2001/02-2018/19):..... | Erreur ! Signet non défini. |
| 2- le régime hydrologique du bassin ourika à l'exutoire Tazzitout :. Erreur ! Signet non défini. | |
| a) Variation mensuelle des débits : (2001-2013):..... | Erreur ! Signet non défini. |
| b) La variation annuelle des débits (2001-2013)..... | Erreur ! Signet non défini. |

| | |
|--|-----------------------------|
| c) Variation saisonnière des débits : (2001-2013)..... | 30 |
| 3-Relation entre les pluies et les débits moyens mensuels de l'ourika à Tazzitount (2001-2014): | 30 |
| | |
| Chapitre 3: Modélisation Hydrologique par l'Outil HEC-HMS..... | 32 |
| | |
| 1-Généralité sur la modélisation hydrolique: | 33 |
| a) Crue:..... | 33 |
| b) Evénements disponibles pour la modélisation :..... | 34 |
| 2-modèle pluie-débit:..... | 35 |
| 3- Présentation de la plateforme HEC-HMS :..... | 36 |
| a) Calibration des paramètres:..... | Erreur ! Signet non défini. |
| 4- Cas du modèle non spatialisé (Global) :..... | 40 |
| a) Calage et discussion des résultats :..... | 42 |
| b) Présentation des paramètres à calibrer :..... | 43 |
| c) La validation des ces paramètres par l'épisode de 5 mai 2016 :..... | 43 |
| d) Les avantages et les limites du logiciel HEC-HMS:..... | 44 |
| ➤ Les avantages :..... | 44 |
| ➤ Les limites :..... | 45 |
| | |
| Conclusion :..... | 46 |
| | |
| Liste des illustrations:..... | 47 |
| ➤ Les figures..... | 47 |
| ➤ Les tableaux:..... | 48 |
| Référence et bibliographie:..... | 49 |
| | |
| Annexes:..... | 50 |

Introduction

En Maroc et dans le reste du monde, les inondations sont devenues un véritable fléau durant ces dernières années, de plus en plus fréquentes et de plus en plus dévastatrices. Même si Météo Maroc dispose d'importants moyens d'observation du temps, ainsi que des modèles de prévision à 5 ou 7 jours, les précipitations sont la variable météorologique la plus difficile à prévoir, il est difficile de quantifier avec précision les précipitations qui tombent au sol et de localiser les zones qui seront les plus touchées. De plus, il existe des services d'annonce des crues qui ont pour mission de surveiller les cours d'eau placés dans leur aire géographique.

Notre région d'étude est formée du bassin versants de l'Ourika à l'exutoire Tazzitount. Elle couvre une superficie d'environ 332.8 km². Cette région est convoitée pour ses atouts naturels et touristiques. Mais elle est vulnérable à d'importants risques naturels sous différents aspects : Les crues, l'érosion, glissement des terrains...etc. Ceci à cause du climat et de la géomorphologie de la région qui offrent un environnement propice aux pulsations brutales des cours d'eau et les processus d'érosion qui s'en suivent.

CHAPITRE 1 :

SITUATION GEOGRAPHIQUE ET

ANALYSE GEOMORPHOLOGIQUE

1. Situation géographique du bassin versant ourika

Le bassin versant de l'Ourika est un hydro système du Haut Atlas de Marrakech. Il fait partie du grand bassin versant de Tensift dans la région de Marrakech. Situé à 40Km au Sud- Est de la ville de Marrakech. Il est localisé entre la latitude 31 et 31°20' Nord et entre la longitude 7°30' et 7°60' Ouest. Il est encadré à l'est par le bassin versant de Zât, tandis qu'à l'ouest par celui de Rhéraya (Fig. 1). Par ailleurs, et à son exutoire d'Aghbalou, il est limité au nord par la plaine du Haouz, au sud par la chaîne du Haut Atlas. La région est caractérisée par une variabilité spatiotemporelle des précipitations et une irrégularité relative des écoulements superficiels.

L'exutoire de Tazzitount est située à la latitude 31° 16'27'' à l'Ouest de Greenwich et à la longitude 7° 41'29'' au Nord de l'équateur.

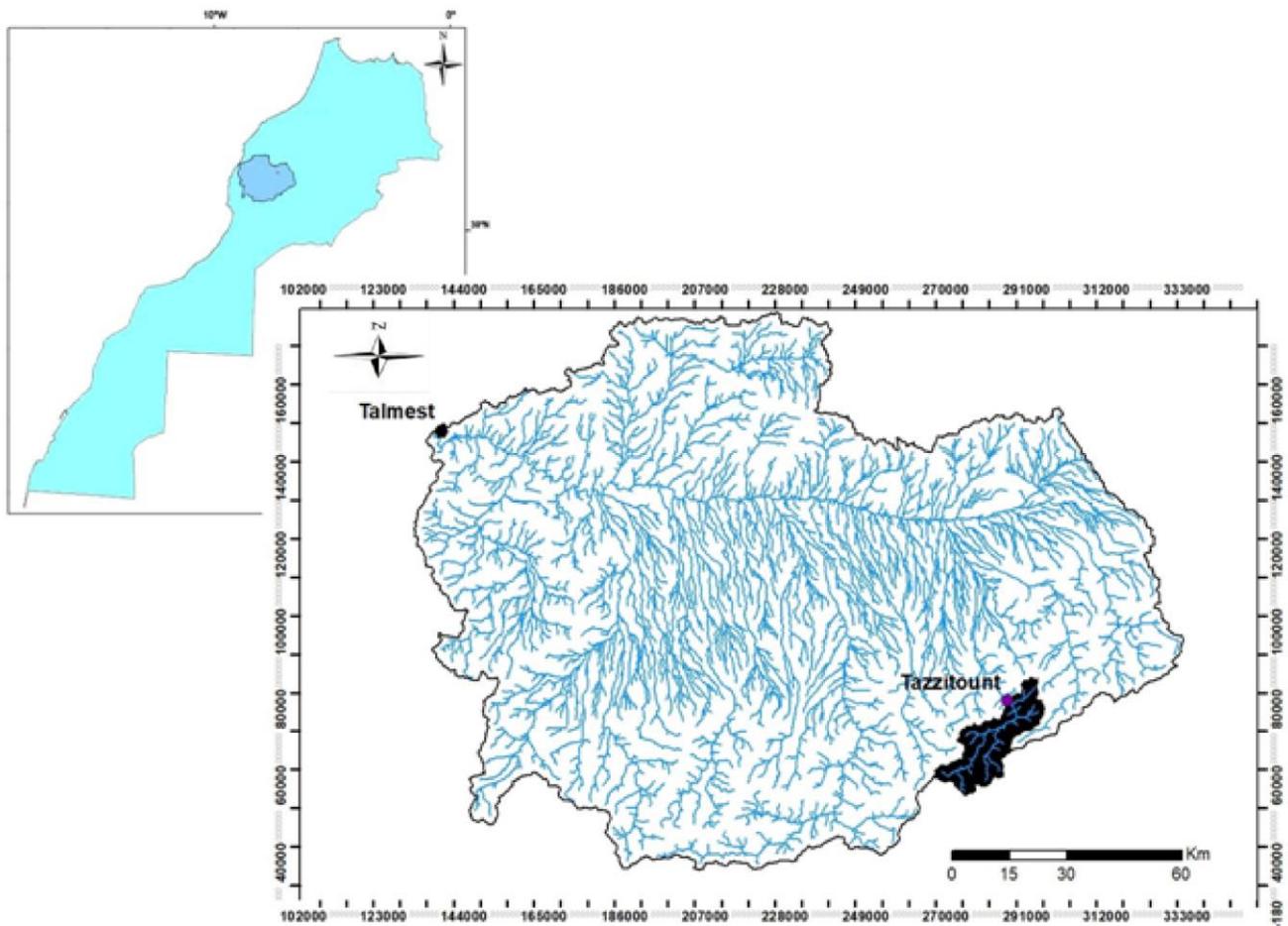


Figure1 : la situation géographique du sous-bassin versant d l'Ourika à Tazzitount

2. Caractéristiques morphologiques du bassin :

La morphologie du bassin versant de l'Ourika influe considérablement les phénomènes hydrologiques. Cette influence affecte plus la relation pluie débit et l'évolution des écoulements en périodes de crues. En d'autres termes, ce sont les caractéristiques morphologiques qui déterminent la forme des hydrogrammes observés à l'exutoire. Plusieurs formules et indices permettent de montrer ces caractéristiques:

| Paramètres | Bassin ourika à Tazzitount |
|--|-----------------------------------|
| Surface (Km²) | 332.8 |
| Périmètre (Km) | 111.6 |
| Indice de compacité | 1.7 |
| Altitude maximale (m) | 3993 |
| Altitude moyenne (m) | 2684 |
| Altitude minimale (m) | 1263 |
| Longueur du cours principal (km) | 38 |
| Longueur du rectangle équivalent (km) | 48.5 |
| Largeur du rectangle équivalent (km) | 6.8 |
| Pente moyenne du cours principal (%) | 12,47% |

Tableau.1: Caractéristiques morphologique du bassin versant de l'Ourika à Tazzitount

Le bassin versant de l'Ourika à Tazzitount couvre une superficie de 332.8 Km² avec un périmètre de 111.6 Km. La figure 3 représente les tranches d'altitudes comprises entre 1263 m à l'exutoire et 3993 m au point culminant du bassin. L'altitude moyenne est d'environ 2684 m. La pente moyenne du cours principal est de l'ordre de 12,47 % selon l'agence de bassin hydraulique de Tensift.

L'indice de compacité de Gravelius ($KC = 0,28 P/\sqrt{S}$), où P est le périmètre et S la surface) permet d'avoir une idée sur la forme géométrique du bassin : il est de l'ordre de 1,7 pour le bassin de l'Ourika à Tazzitount, ce qui témoigne d'une forme allongée du bassin. Le cours principal forme une vallée profonde alimentée, sur les deux rives, par une succession de ravins affluents. Cette situation permet aux ondes de crues de grossir vers l'aval à mesure de leur alimentation par les affluents.

3. Délimitation du bassin versant de l'ourika à Tazzitount :

Nous avons pu relever les caractéristiques morphométriques et décrire les composantes physiques du bassin versant grâce au logiciel ArcMap, en utilisant la carte du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 30m.

Le MNT est un ensemble de points altimétriques (trois coordonnées, x, y et z). L'assemblage des ces points permet de reconstituer la topographie du site .cette carte était le support de base de l'extraction de différents critères tels que :

- Hypsométrie
- Réseau hydrographique
- Carte des pentes

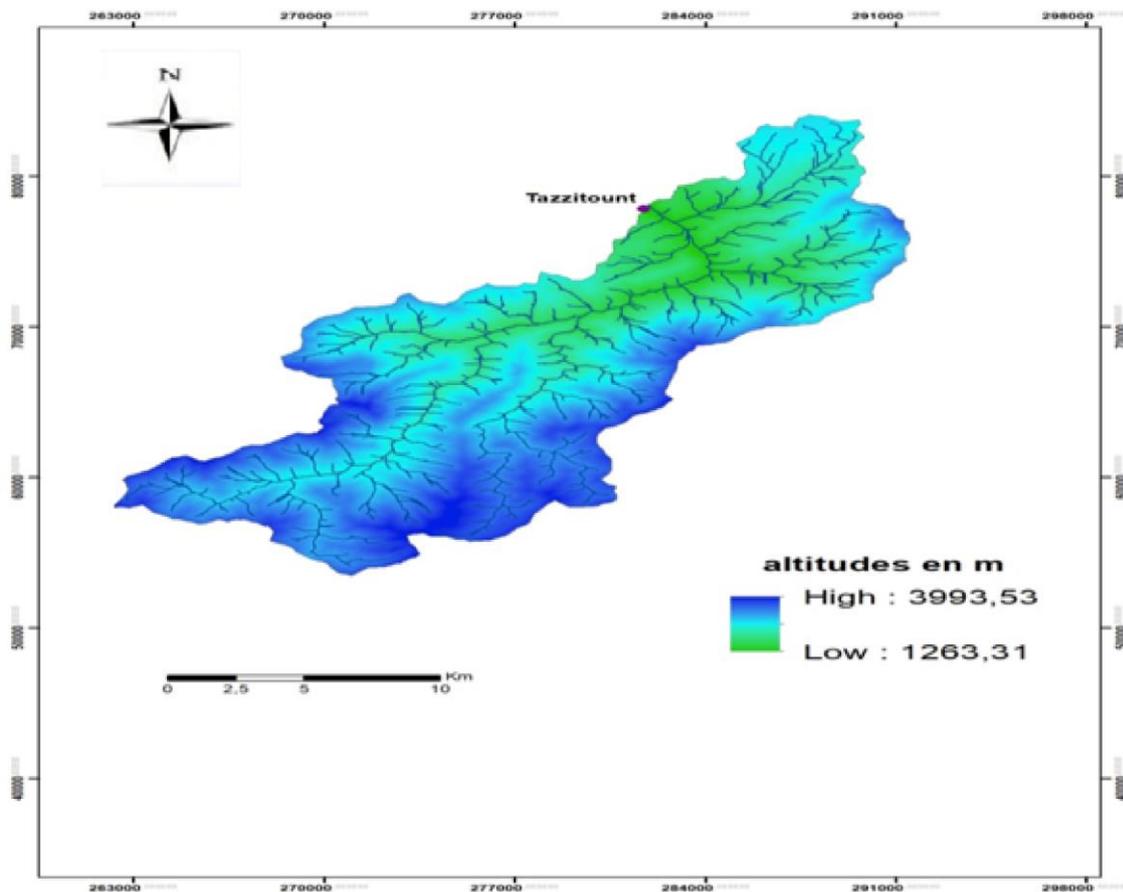


Figure 2: Vue à 3 dimensions du bassin versant de l'Ourika à Tazzitount

a. L'hypsométrie et reliefs :

la répartition hypsométriques du bassin versant de l'ourika est comprise entre les tranches d'altitudes de 1263m et 3993 m, L'altitude moyenne est de l'ordre de 2319m supérieure à l'altitude médiane, ce qui montre que ce bassin est pourvu de très hauts reliefs en amont.

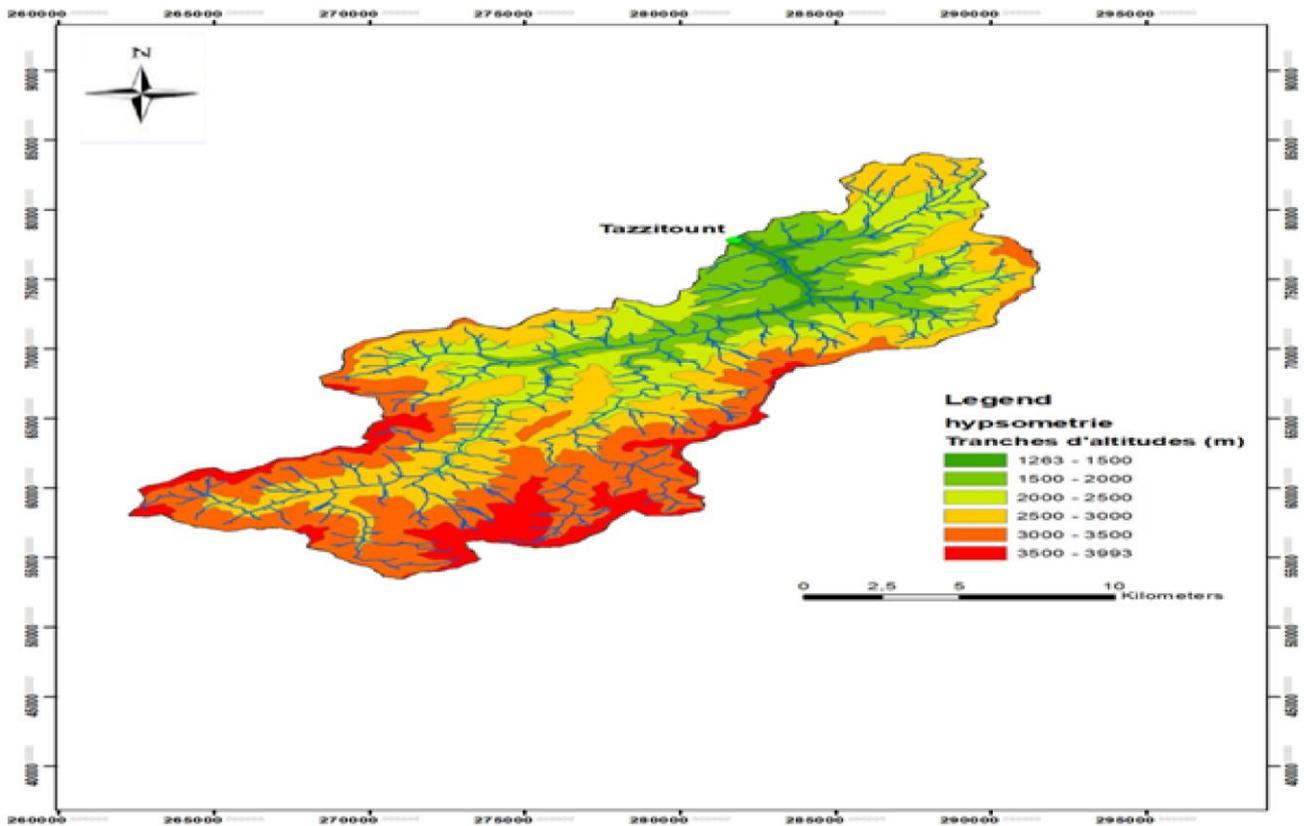


Figure 3 : Carte hypsométrique du bassin versant de l'Ourika

Le relief peut être illustré par la courbe hypsométrique qui représente la répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude (fig.4)

| altitude en m | surface en % | surface cumulative en % |
|---------------|--------------|-------------------------|
| 1000-1500 | 2,07 | 100 |
| 1500-2000 | 14,14 | 90,78 |
| 2000-2500 | 21,62 | 65,55 |
| 2500-3000 | 27,72 | 37,83 |
| 3000-3500 | 25,23 | 16,21 |
| 3500-4000 | 9,25 | 2,07 |

Tableau2 : Répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude

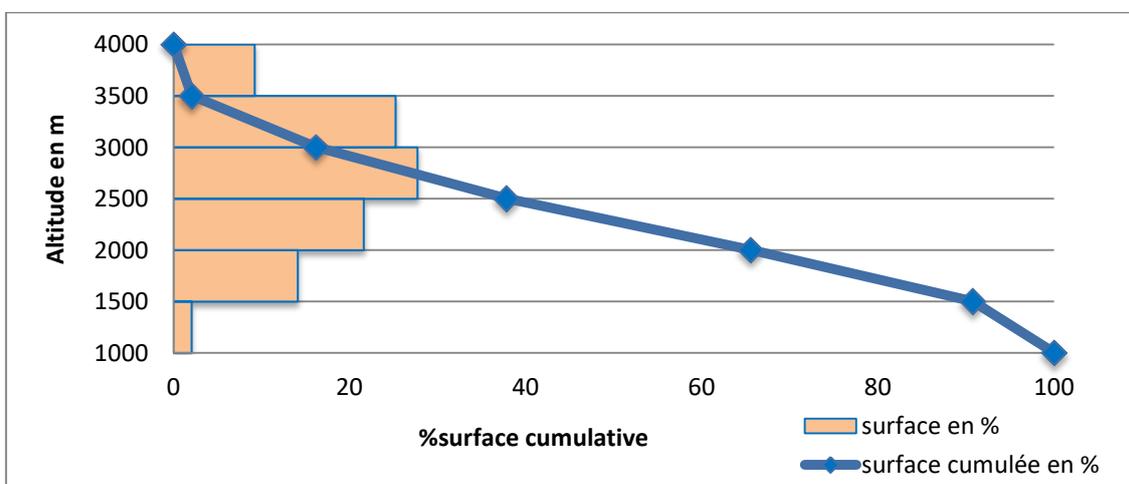


Figure 4: Hydrogramme hypsométrique

b. cartes des pentes :

Au niveau du bassin versant de l'Ourika jusqu'au l'exutoire Tazzitount les pentes sont dans l'ensemble fortes, ces pentes confèrent à l'oued un caractère violent et torrentiel.

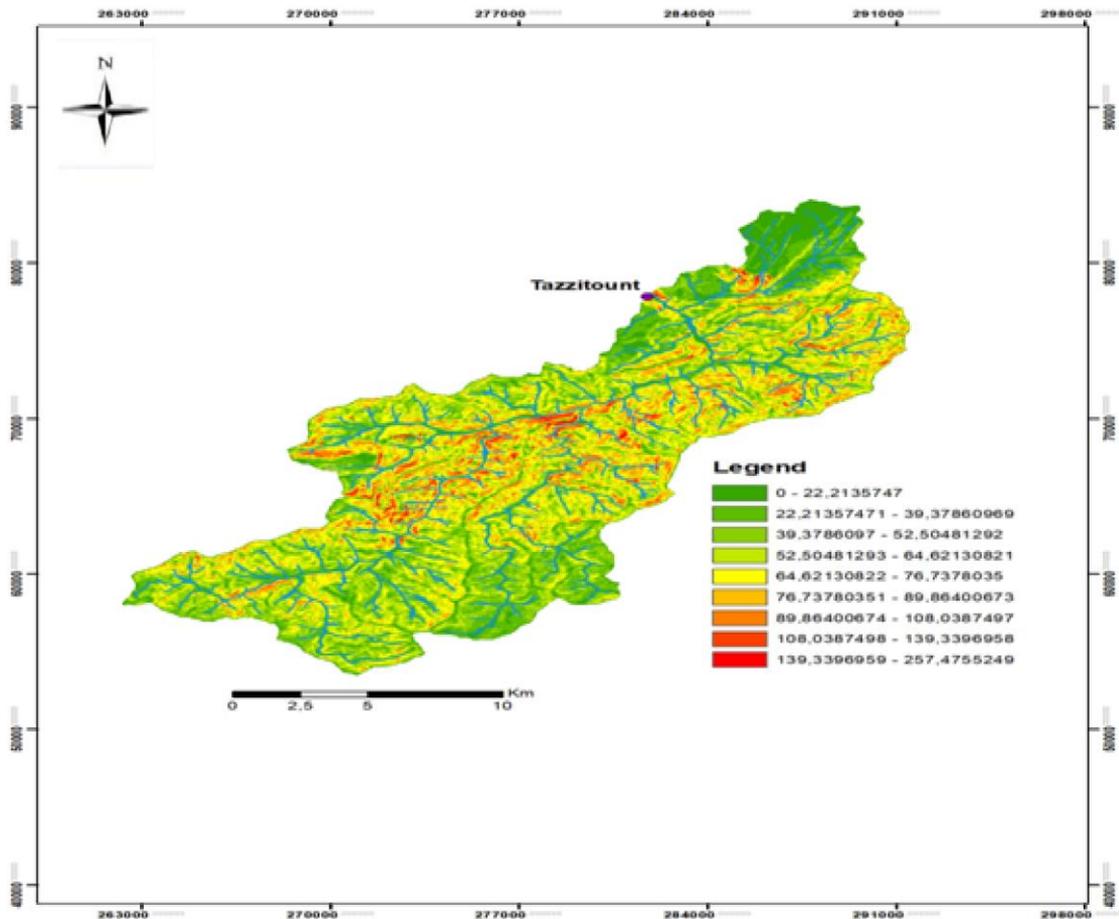


Figure 5: la carte des pentes

c. Le réseau hydrographique :

Le bassin versant de l'ourika présente un réseau hydrographique bien développé dans sa partie amont du fait de l'imperméabilité du socle précambrien (Gneiss, granite, granodiorites..), du couvert végétal restreint et du relief plus modéré. Au contraire 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 une couverture végétale plus développée que celle de l'amont.

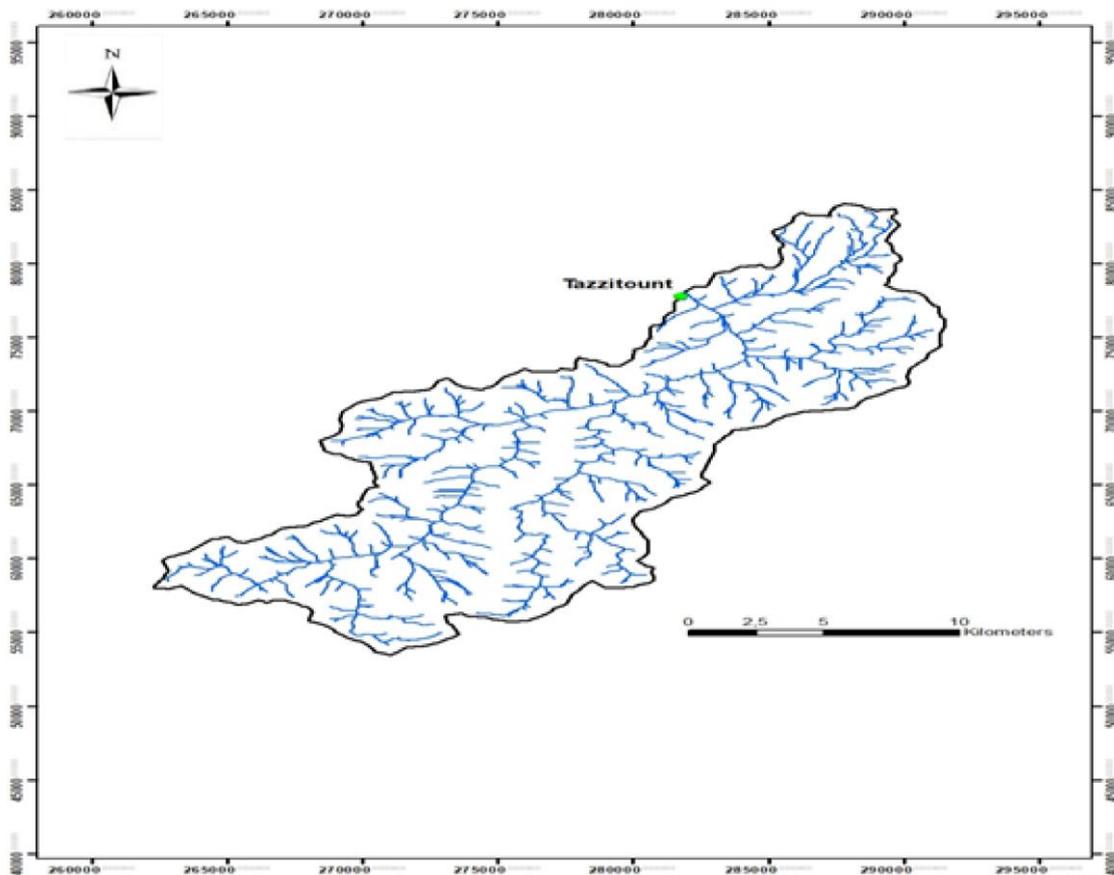


Figure 6: Le réseau hydrographique du bassin versant de l'Ourika à Tazzitount.

4. Géologie générale et lithologie :

Sur le plan géologique, le bassin versant se caractérise par deux faciès différent :

- la partie amont, située à des altitudes supérieures à 2000 m, constituée de roches magmatiques et métamorphiques, qui constituent le socle de la chaîne atlasique. On y rencontre des roches plutoniques (notamment des granites et granodiorites), des roches volcaniques (andésites, rhyolites, etc.) et des faciès métamorphiques (gneiss et migmatites). Cette mosaïque cristalline est propice à un ruissellement immédiat des eaux de pluie.
- la partie aval (notamment l'exutoire Tazzitount), située à des altitudes inférieures à 2 000 m, composée de dépôts Permo-triasiques continentales plus tendres. La lithologie du Permo-trias est composée d'un faciès nord, formé par des grès et argiles. Ce dernier facilite l'écoulement d'eau d'une façon plus faible que le faciès amont grâce à la forte imperméabilité des roches cristallines amont

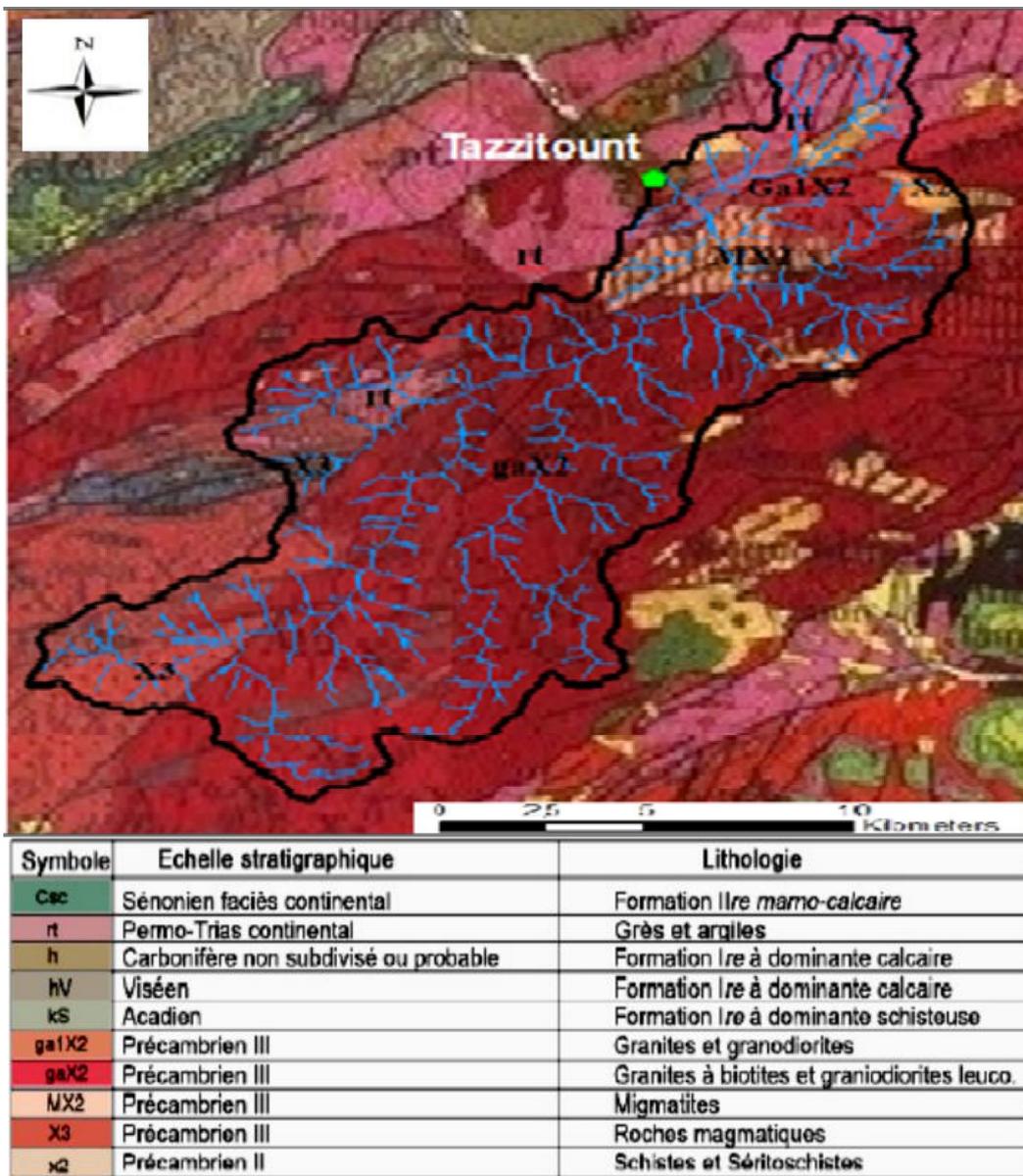


Figure 7: Esquisse géologique du bassin de l'Ourika

Selon la carte géologique au 1/500000, on observe que 40% des terrains sont de nature tendres à moyennement tendres et 65% des terrains représentent une lithologie cristalline. Ainsi, la source des blocs et des galets charriés par l'Ourika proviendrait essentiellement du socle qui constitue la partie axiale de la chaîne atlasique. Quant aux matériaux latéraux plus tendres en provenance des versants, leurs entrées au niveau des drains principaux sont très variées : matériaux alluviaux (contact avec les cônes de déjection et les confluences des tributaires) et matériaux non alluviaux (cônes d'éboulis et glissements de terrain) (Saidi et al. 2003).

5. Climat global, le couvert végétal et l'imperméabilité:

a. Climat global:

Le bassin versant de l'Ourika est caractérisé par une température moyenne annuelle est de l'ordre de 17,6 °C à Aghbalou, mais la différence de température entre le mois le plus chaud (juillet) et le mois la plus froid (janvier) peut atteindre une amplitude de 15 °C. La région est caractérisée par une variabilité spatiotemporelle des précipitations et une irrégularité relative des écoulements superficiels.

b. Occupation du sol :

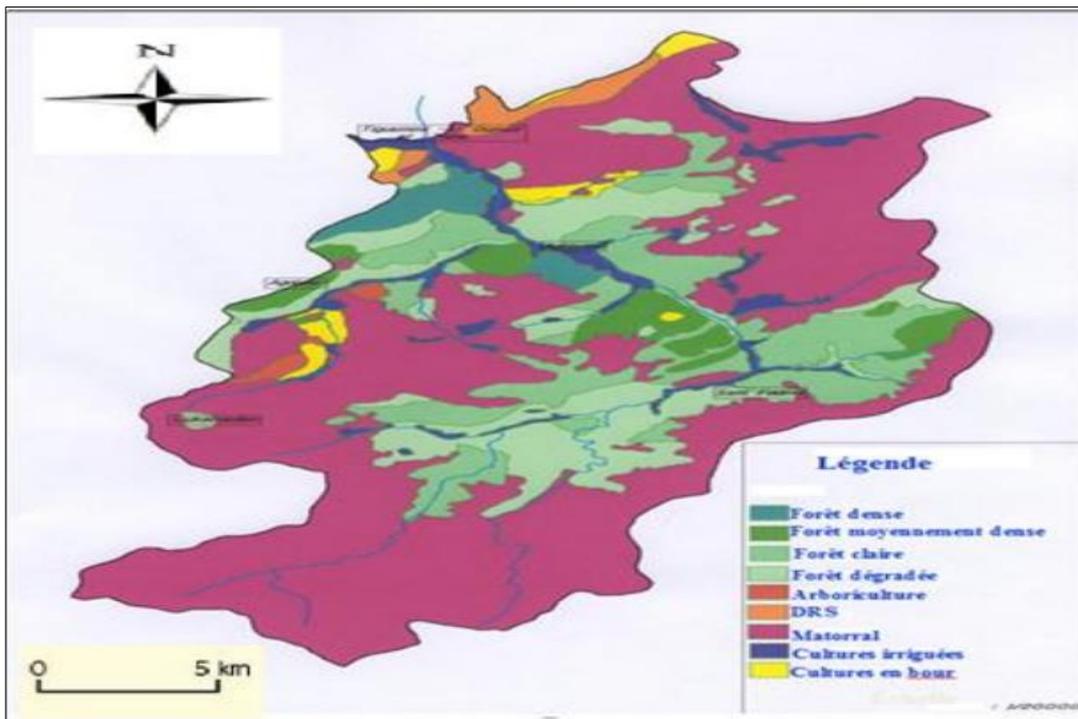


Figure 8: carte d'occupation du sol (DREF*, 2010)

La couverture végétale est généralement très faible dans le bassin versant, a eu un impact sur la facilité des écoulements ce qui augmente l'intensité des crues. L'occupation du sol se répartie dans l'ordre suivant :

- ✓ **Matorral et vides 58,2%**
- ✓ **Forets : 33.8%**
- ✓ **Agriculture: 6.7%**
- ✓ **Reboisements : 1,3%**

Le domaine forestier occupe une superficie assez importante dans le bassin versant. Cependant son état est très dégradé et clairsemé et ce sur une grande partie de la superficie soit **82%**.

*Direction Régionale des Eau et Forets

c. L'imperméabilité:

Le bassin est constitué à 55 % des terrains imperméables, formés surtout des roches cristallines, ce qui implique une vitesse d'écoulement forte et donc un temps d'écoulement faible, car cette imperméabilité empêche l'infiltration des eaux qui ruissellent.

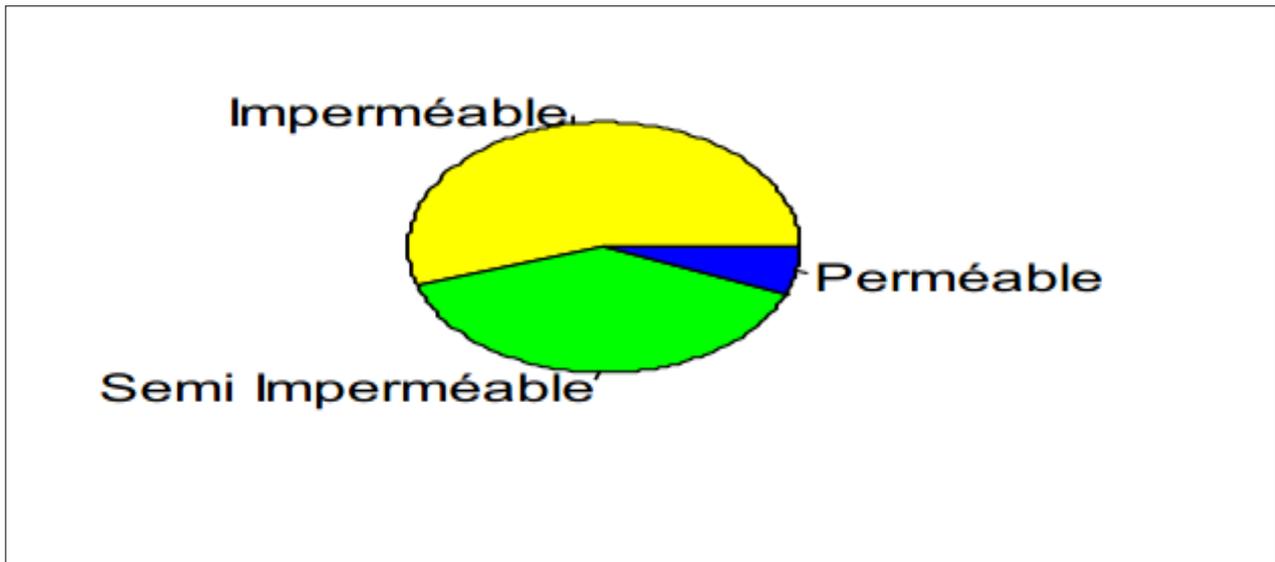


Figure 9: la répartition des terrains imperméable (Selon ABHT)

- ✓ **Surface imperméable 55%**
- ✓ **Surface semi perméable 39%**
- ✓ **Surface perméable 6%**

CHAPITRE 2:

LE REGIME PLUVIOMETRIQUE ET

HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE

L'OURIKA :

1. Le régime pluviométrique :

Les données de précipitations et de débits du cours d'eau sont fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift. Les données de précipitations sont principalement recueillies à cinq stations Agouns, Amenzal, Tazzitount, Tiouridio et Tourcht située à l'exutoire du bassin versant de l'Ourika, aux coordonnées Lambert suivantes :

- **Agouns :** X : 271,45 ; Y : 69,65 ; Z : 2200
- **Amenzal :** X : 278,22 ; Y : 67,2 ; Z : 2230
- **Tazzitount :** X : 281,95 ; Y : 77,8 ; Z : 1240
- **Tiouridio :** X : 277,2 ; Y : 69,3 ; Z : 1850
- **Tourcht :** X : 286,85 ; Y : 74,15 ; Z : 1650

Pour l'analyse de ces données, il a été choisi de travailler à différents pas de temps pour établir des comparaisons, à l'échelle mensuelle, saisonnière, et annuelle des précipitations et des débits.

a. L'exutoire Amenzal :

➤ Variation mensuelle des précipitations (2001-2018) :

Les précipitations mensuelles à la station Amenzal ont été obtenues par le calcul de la moyenne arithmétique des données journalières de chaque mois, les données disponibles sont résumées sur le tableau suivant :

| Mois | sep | oct | nov | déc | jan | fév | mars | avr | mai | juin | Juil | Aout |
|-------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Préci en mm | 30.31 | 41.82 | 47.83 | 15.1 | 21.95 | 31.73 | 34.96 | 56.05 | 25.09 | 13.76 | 13.03 | 25.81 |

Tableau 3: Pluies moyennes mensuelles interannuelles à la station d'Amenzal (2001/2018)

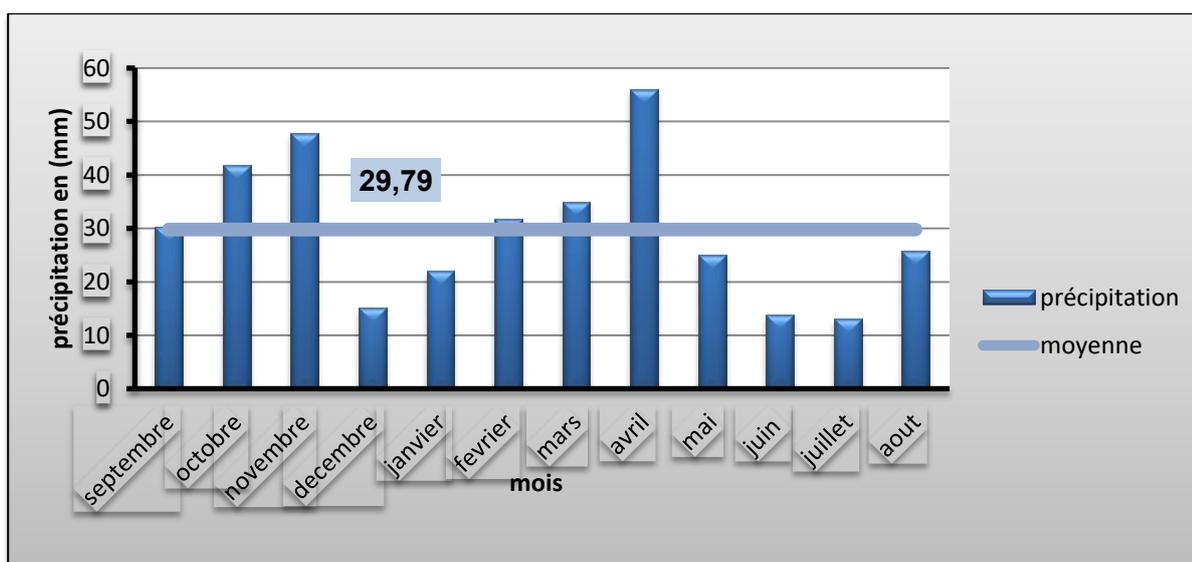


Figure 10: précipitations moyennes mensuelles d'Amenzal (mm)

Les précipitations augmentent de septembre à novembre, puis diminution en décembre, augmentation jusqu'en avril et diminution jusqu'au mois de juin à juillet, cette précipitation reste constante en juillet et elle s'augmente en août.

On peut distinguer alors :

- Une période humide qui s'étend depuis le mois de septembre jusqu'au mois de novembre et depuis le mois février jusqu'au, avec des hauteurs supérieures à 29.79mm
- . - Une période sèche depuis le mois de décembre à janvier et depuis le mois mai jusqu'au mois d'aout.
- Le mois le plus arrosé est avril avec une hauteur de 56.05 mm.
- Le mois le moins arrosé est juillet avec une hauteur inférieure à 13.03 mm.

➤ **Variation saisonnière des précipitations (2001-2018) :**

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles

| Saison | Automne | Hiver | Printemps | Eté |
|------------------------|---------|-------|-----------|------|
| Précipitations en (mm) | 119,96 | 68,78 | 116,1 | 52,6 |

Tableau 4: Pluies moyennes saisonnières interannuelles à la station d'Amenzal (2001/2018)

Les Précipitations d'automne sont la somme des mois de septembre, octobre et novembre. Les précipitations en hiver sont la somme des précipitations des mois de décembre, janvier et février. Les précipitations du printemps sont la somme des précipitations des mois de mars, avril et mai. Les précipitations d'été sont la somme des précipitations des mois de juin, juillet et août (figure 11).

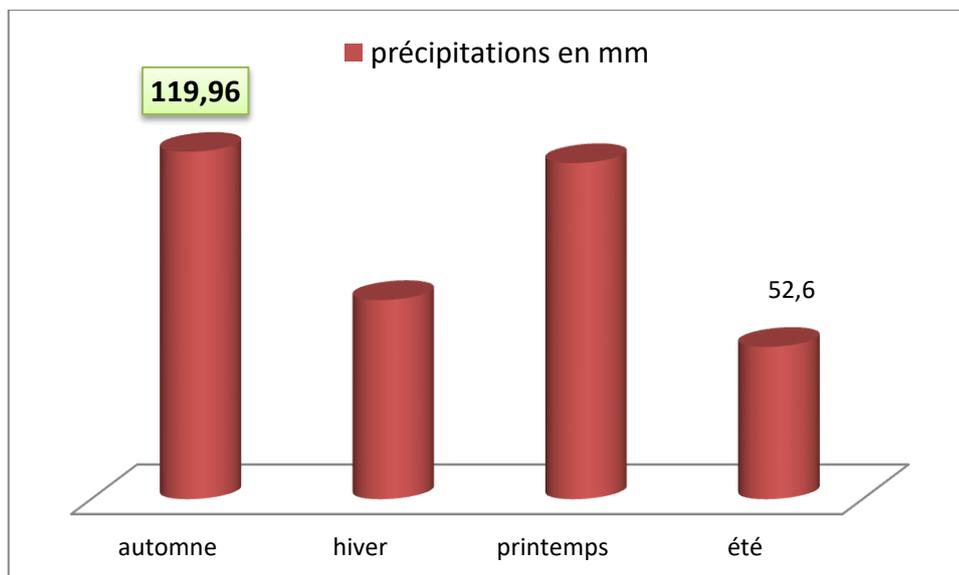


Figure 11: précipitations moyennes saisonnières d'Amenzal (mm)

L'analyse de la figure fait ressortir que : les précipitations sont plus abondantes en automne et printemps, la saison la plus sèche est l'été avec des précipitations de 52.6mm.

➤ Variation annuelle des précipitations (2001-2019) :

Les précipitations moyennes annuelles ont été obtenues par sommation des moyennes mensuelles de chaque année pour la station de Tazzitount (Figure 12).

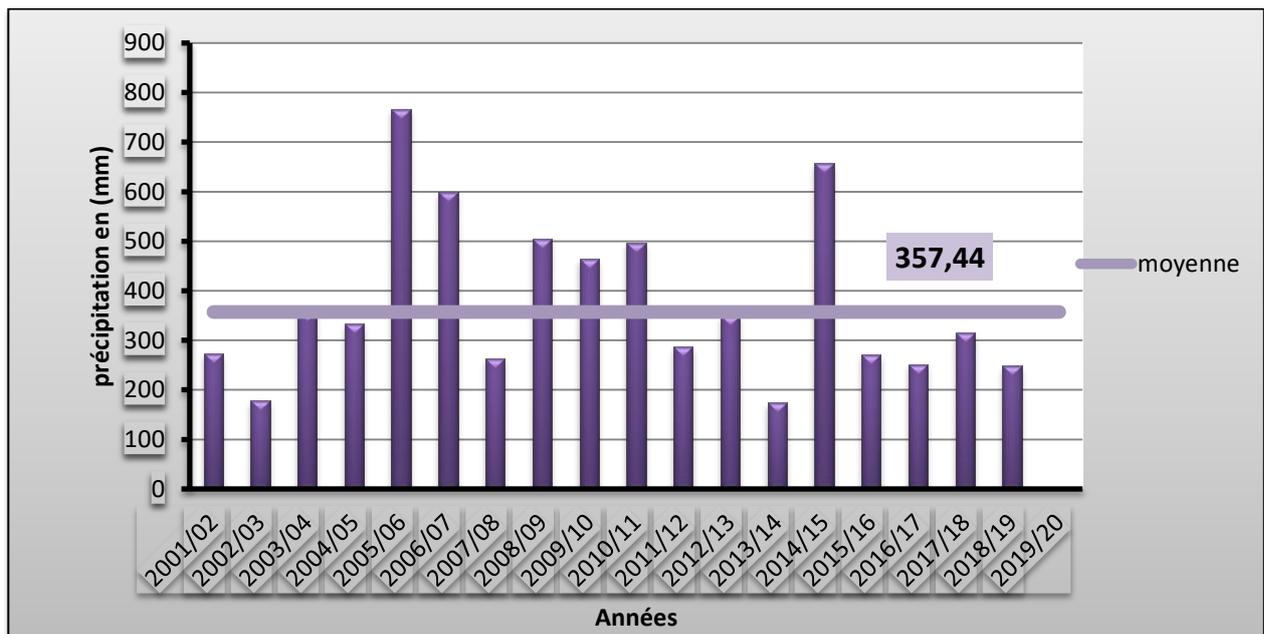


Figure 12: précipitations moyennes annuelles d’Amenzal (mm)

Nous pouvons voir que, dans la période de 2001 à 2019, deux années ont été exceptionnellement pluvieuses, ce sont les années 2005/2006 avec une grande élévation arrive 767 mm et 2014/2015. La période sèche est reconnu en 2002/2003 et 2013/2014 avec des précipitations inférieures à 200 mm.

b. l’exutoire Tazzitount :

➤ Variation mensuelle des précipitations (2001-2018) :

| Mois | sep | oct | nov | déc | jan | fév | mars | avr | mai | juin | Juil | Aout |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Préci en mm | 20.45 | 44.09 | 71.73 | 27.73 | 56.58 | 53.03 | 59.37 | 63.28 | 30.38 | 30.86 | 6.11 | 27.49 |

Tableau 6: Les pluies moyennes mensuelles interannuelles à la station de Tazzitount (2001-2018)

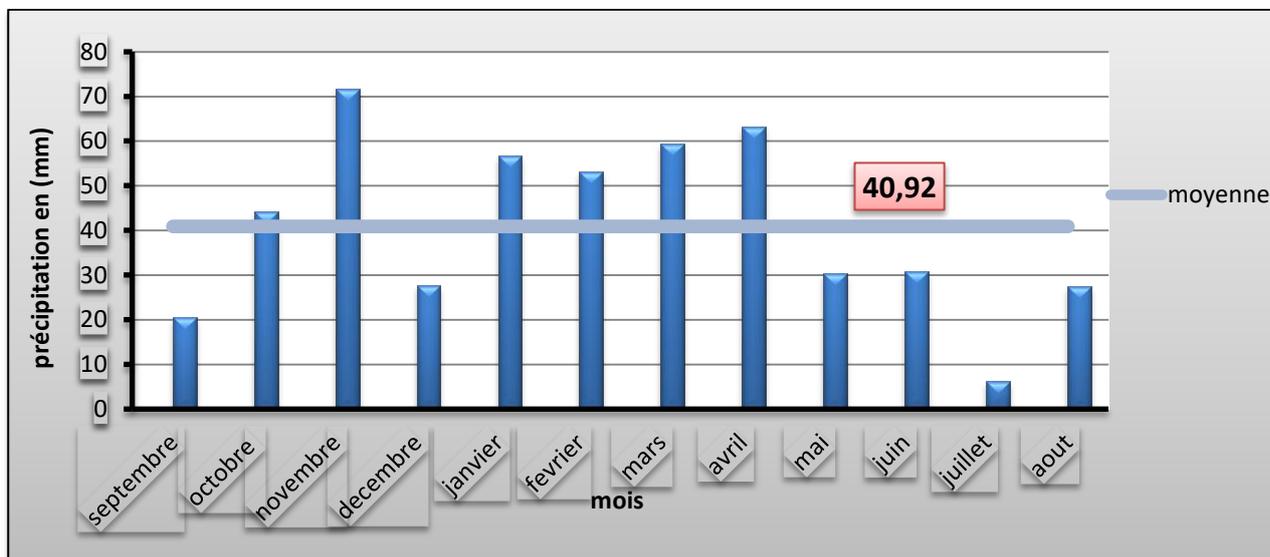


Figure 13: précipitations moyennes mensuelles de Tazzitount (2001-2018)

Les précipitations augmentent de septembre à novembre, puis diminution en décembre, augmentation en janvier et une petite diminution en février de 3 mm, augmentation en mars jusqu'au avril , les précipitations se diminuent en mois mai et elles restent constantes en juin , chute nette en mois juillet , augmentation en mois d'août. On peut distinguer alors :

- Une période humide qui s'étend depuis le mois d'octobre jusqu'au mois novembre et depuis le mois janvier jusqu'au avril avec des hauteurs supérieures à 40.92mm.
- Une période sèche depuis mai jusqu'au septembre et en décembre avec des précipitations inférieures à 30mm
- Le mois le plus arrosé est novembre avec une hauteur de 71.73 mm.
- Le mois le moins arrosé est juillet avec une hauteur inférieure à 6.11 mm.

➤ **Variation saisonnière des précipitations (2001-2019) :**

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles.

| Saison | Automne | Hiver | Printemps | Été |
|----------------------|---------|--------|-----------|-------|
| Précipitations en mm | 136,26 | 137,33 | 153,04 | 64,46 |

Tableau 6: Les pluies moyennes saisonnières interannuelles à la station de Tazzitount (2001-2018)

Les Précipitations d'automne sont la somme des mois de septembre, octobre et novembre. Les précipitations en hiver sont la somme des précipitations des mois de décembre, janvier et février. Les précipitations du printemps sont la somme des précipitations des mois de mars, avril et mai. Les précipitations d'été sont la somme des précipitations des mois de juin, juillet et août.

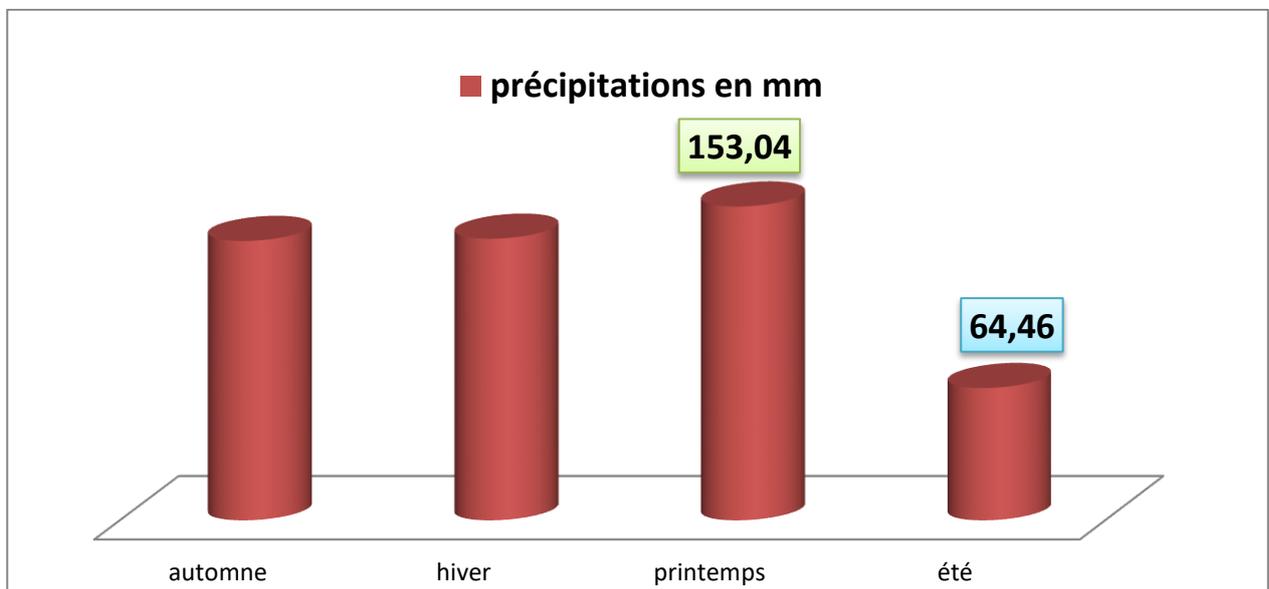


Figure 14: précipitations moyennes annuelles de Tazzitount (mm)

L'analyse de la figure fait ressortir que : les précipitations sont plus abondantes en printemps et la saison la plus sèche est l'été avec des précipitations 64.46 mm.

➤ Variation annuelle des précipitations (2001-2018) :

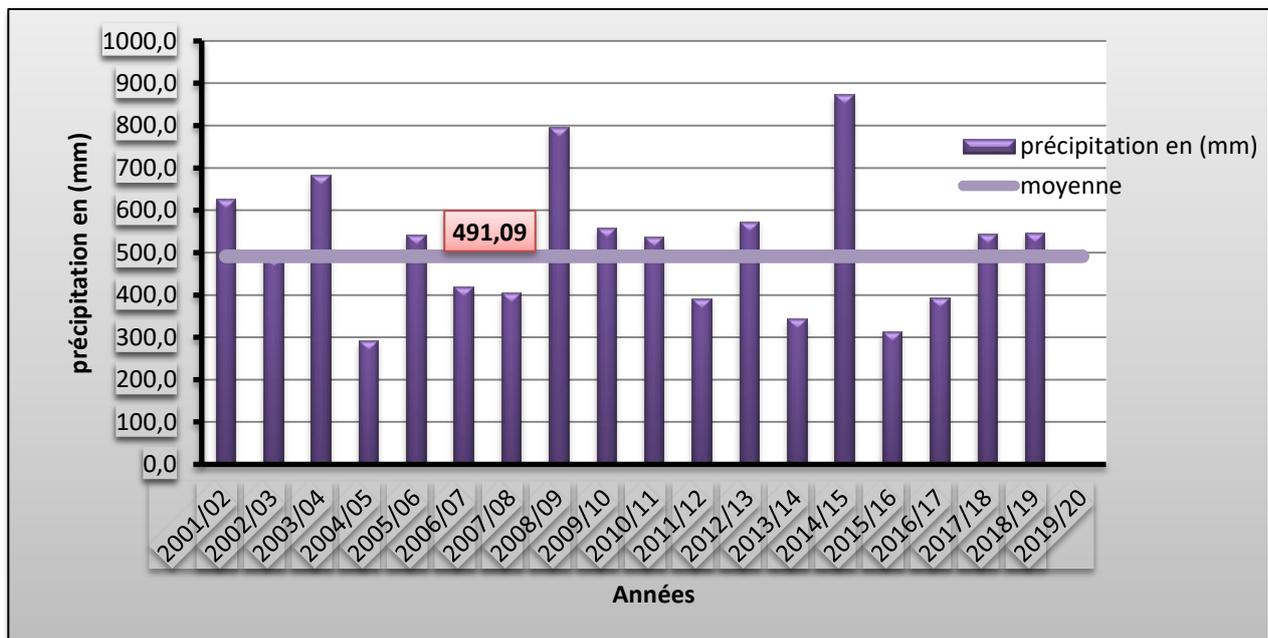


Figure 15: précipitations moyennes annuelles de Tazzitount (mm)

Nous pouvons voir que, dans la période de 2001 à 2019, deux années ont été exceptionnellement pluvieuses, ce sont les années 2008/2009 avec une grande élévation arrive à 796.7 mm et 2014/2015 avec une somme de 873.8 mm. La période sèche est reconnu en 2004/2005 avec des précipitations inférieures à 300 mm.

c. L'exutoire Tourcht :

➤ Variation mensuelle des précipitations (2001-2018) :

| Mois | sep | oct | nov | déc | jan | fév | mars | avr | mai | juin | Jui l | Aout |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|----------|-------|
| Préci en mm | 25,75 | 43,99 | 81,51 | 23,44 | 49,14 | 50,48 | 53,92 | 43,06 | 30,1 | 11,86 | 8,27 | 25,96 |

Tableau 7: Les pluies moyennes mensuelles interannuelles à la station de Tourcht (2001-2018)

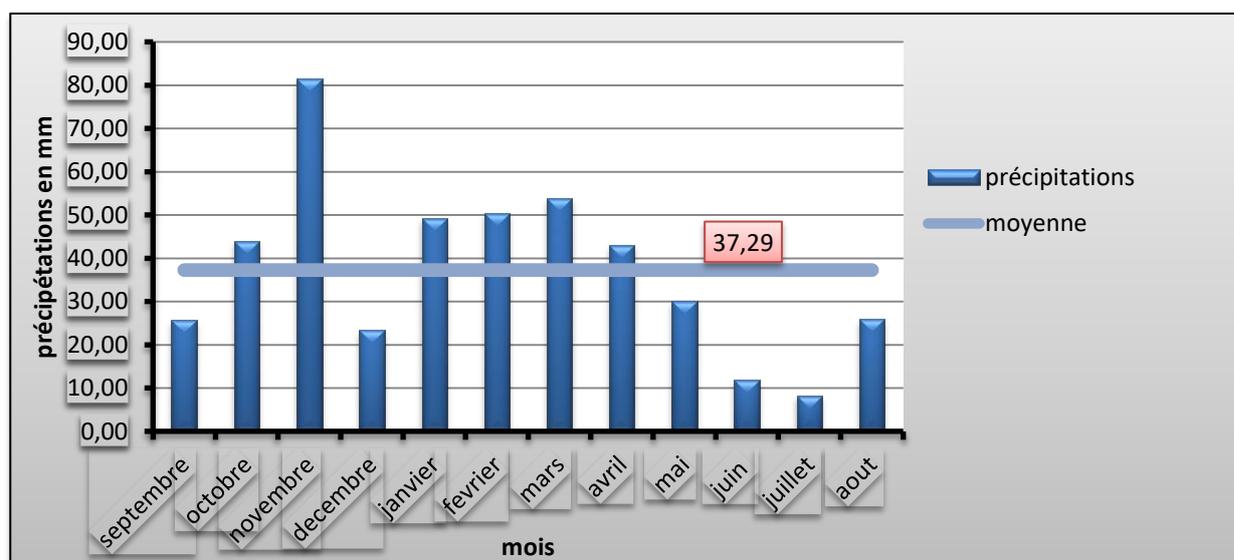


Figure 16: précipitations moyennes mensuelles de Tourcht (mm).

Les précipitations augmentent de septembre à novembre, puis diminution en décembre, augmentation de janvier jusqu'en mars et diminution depuis avril jusqu'au mois de juillet, cette et elle s'augmente en août.

On peut distinguer alors :

- Une période humide qui s'étend depuis le mois d'octobre jusqu'au mois de novembre et depuis le mois janvier jusqu'au avril, avec des hauteurs supérieures à 37.29mm
- Une période sèche depuis le mois de mai jusqu'au aout et en mois de septembre et decembre avec des précipitations inférieure à 30mm
- Le mois le plus arrosé est novembre avec une hauteur de 81.51 mm.
- Le mois le moins arrosé est juillet avec une hauteur inférieure à 8.27 mm.

➤ Variation saisonnière des précipitations (2001-2018) :

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles.

| Saison | Automne | Hiver | Printemps | Eté |
|----------------------|---------|--------|-----------|-------|
| Précipitations en mm | 151,25 | 123,06 | 127,08 | 46,09 |

Tableau 8: Les pluies moyennes saisonnières interannuelles à la station de Tourcht (2001-2018)

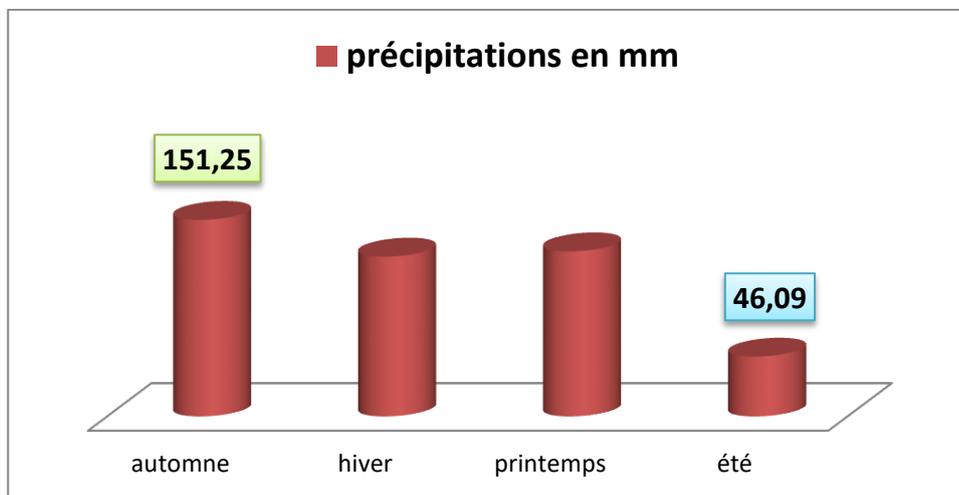


Figure17: Les pluies moyennes saisonnières interannuelles à la station de Tourcht (2001-2018)

L'analyse de la figure fait ressortir que : les précipitations sont plus abondantes en automne et la saison la plus sèche est l'été avec des précipitations 46.09mm.

➤ Variation annuelle des précipitations (2001-2018) :

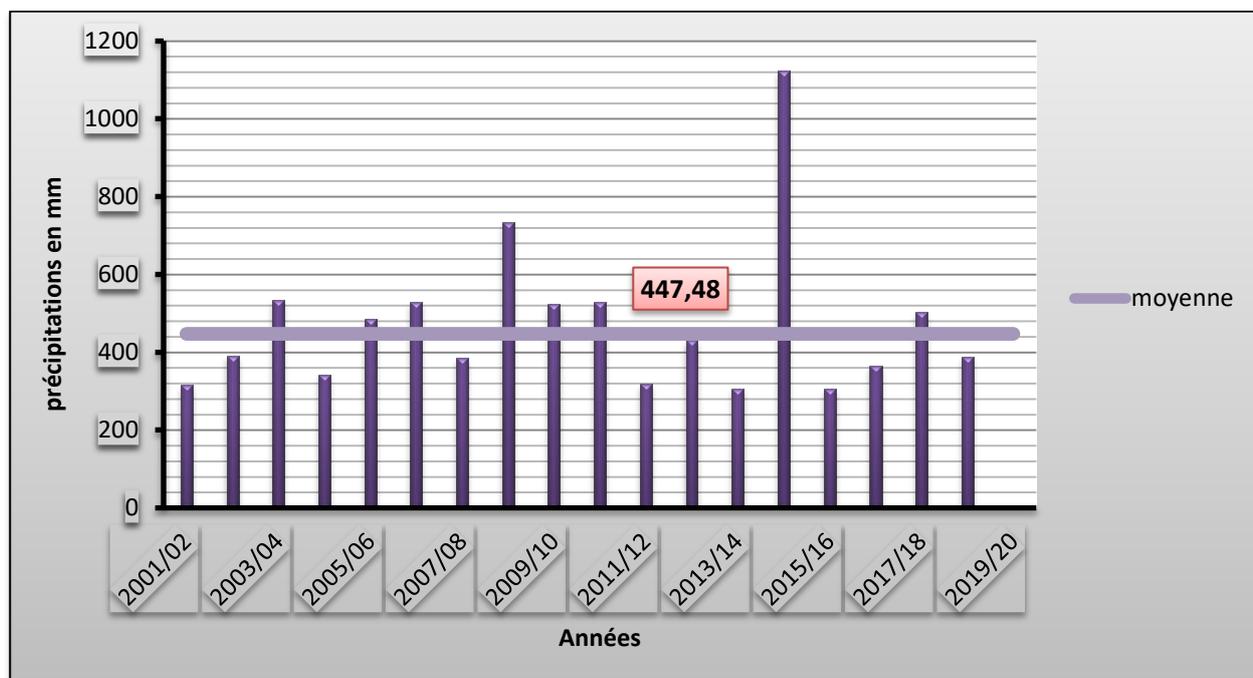


Figure 18: précipitations moyennes annuelles de Tourcht (mm)

Nous pouvons voir que, dans la période de 2001 à 2019, une année été exceptionnellement pluvieuse, c'est l'années 2014/2015 avec une grande élévation arrive à 1122.2 mm. La période sèche est reconnu en2015/2016 avec des précipitations inférieures à 306.1 mm.

d. L'exutoire Agouns :

➤ Variation mensuelle des précipitations (2001-2018) :

Les précipitations mensuelles à la station d'Agouns sont résumées dans le tableau suivant :

| Mois | sep | oct | nov | déc | jan | fév | mars | avr | mai | juin | Juil | Aout |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Préci en mm | 21,23 | 37,91 | 29,93 | 11,93 | 18,04 | 22,33 | 17,92 | 24,03 | 21,48 | 13,73 | 11,12 | 18,79 |

Tableau 9: les pluies moyennes mensuelles à la station d'Agoums (2001-2018)

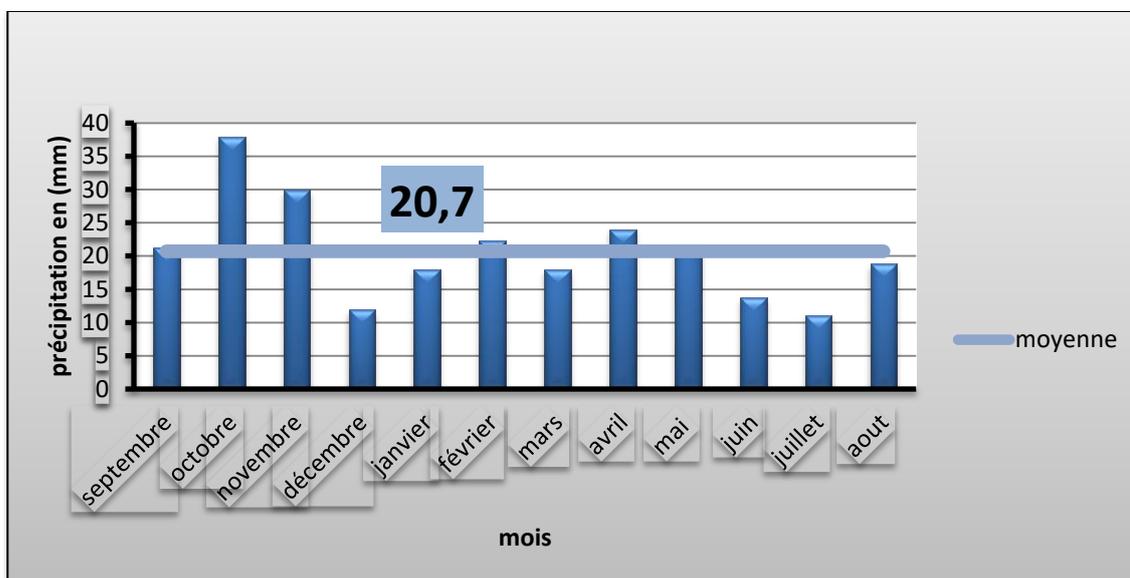


Figure 19: précipitations moyennes mensuelles d'Agoums (mm)

Les précipitations augmentent de septembre à octobre, puis diminution en décembre, augmentation jusqu'en février et diminution jusqu'au mois de mars, et une autre augmentation jusqu'en avril et diminution jusqu'au mois de juillet avec une augmentation au mois aout on peut distinguer alors :

- Une période humide qui s'étend depuis le mois de septembre jusqu'au mois de novembre et les mois février, avril et mai, avec des hauteurs supérieures à 37.91mm.
- Une période sèche depuis le mois de décembre à janvier et le mois mars et depuis le mois juin jusqu'au mois d'aout.

Le mois le plus arrosé est octobre avec une hauteur de 37.91 mm.

Le mois le moins arrosé est juillet avec une hauteur inférieure à 11.12 mm.

➤ **Variation saisonnière des précipitations (2001-2019) :**

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles. ces données sont résumées dans le tableau suivant :

| saisons | Automne | Hiver | Printemps | Eté |
|-----------------------|---------|-------|-----------|-------|
| Précipitation en (mm) | 89,07 | 52,30 | 63,43 | 43,64 |

Tableau 10: les pluies moyennes saisonnières à la station d'Agoums (2001-2018)

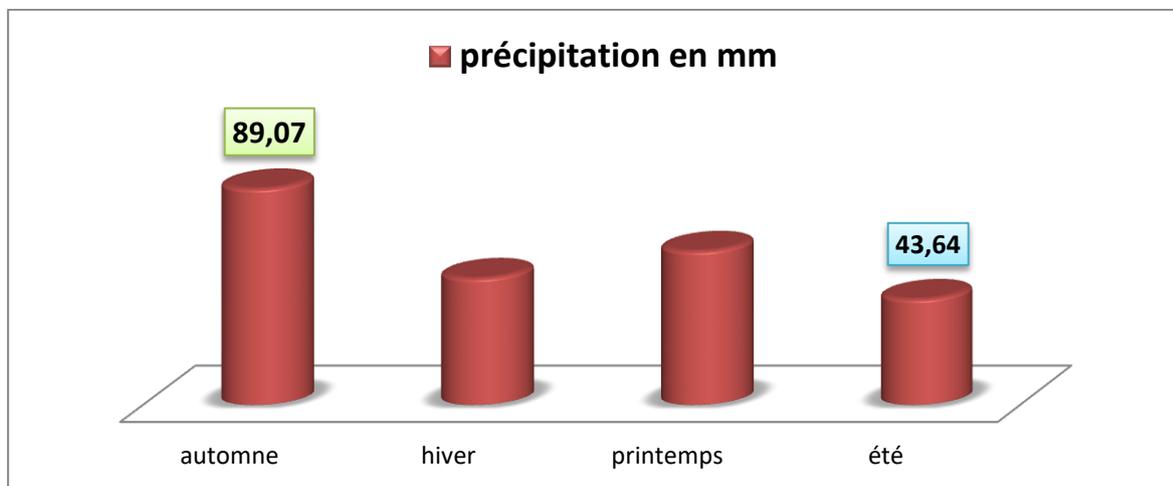


Figure 20 : précipitations moyennes saisonnières d'Agouns (mm)

L'analyse de la figure fait ressortir que : les précipitations sont plus abondantes en automne, la saison la plus sèche est l'été avec des précipitations de 43.64mm.

➤ **Variation annuelle des précipitations (2001-2018) :**

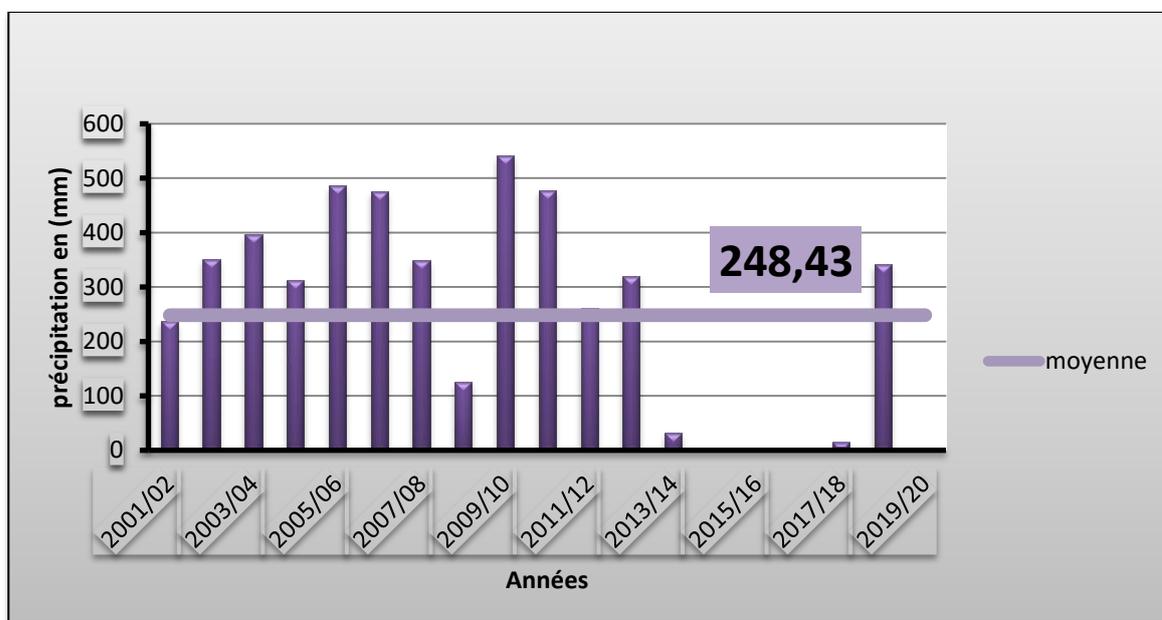


Figure 21: précipitations moyennes annuelles d'Agouns (mm)

- Nous pouvons voir que, dans la période de 2001 à 2019, quatre années ont été exceptionnellement pluvieuses, se sont les années 2005/06, 2006/2007, 2009/2010 et 2010/2011, mais la plus importante c'est année 2009/2010 avec une grande élévation arrive 541.4 mm.
- Les années 2014/2015 jusqu'au 2016/2017 caractérise par une précipitation nulle 0mm.
- La période sèche est reconnue depuis 2013/2014 jusqu'au 2017/2018 avec des précipitations avec des précipitations inférieures à 32 mm

e. L'exutoire Tiouridio:

➤ **Variation mensuelle des précipitations (2001-2018) :**

Les précipitations mensuelles à la station de Tiouridio sont résumées dans le tableau suivant :

| Mois | sep | oct | nov | déc | jan | fév | mars | avr | mai | juin | Juil | Aout |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Préci en mm | 13,48 | 20,71 | 31,98 | 12,66 | 23,43 | 22,60 | 22,26 | 29,24 | 15,55 | 16,10 | 9,95 | 18,96 |

Tableau 11: les pluies moyennes mensuelles à la station de Tiouridio (mm) (2001-2018)

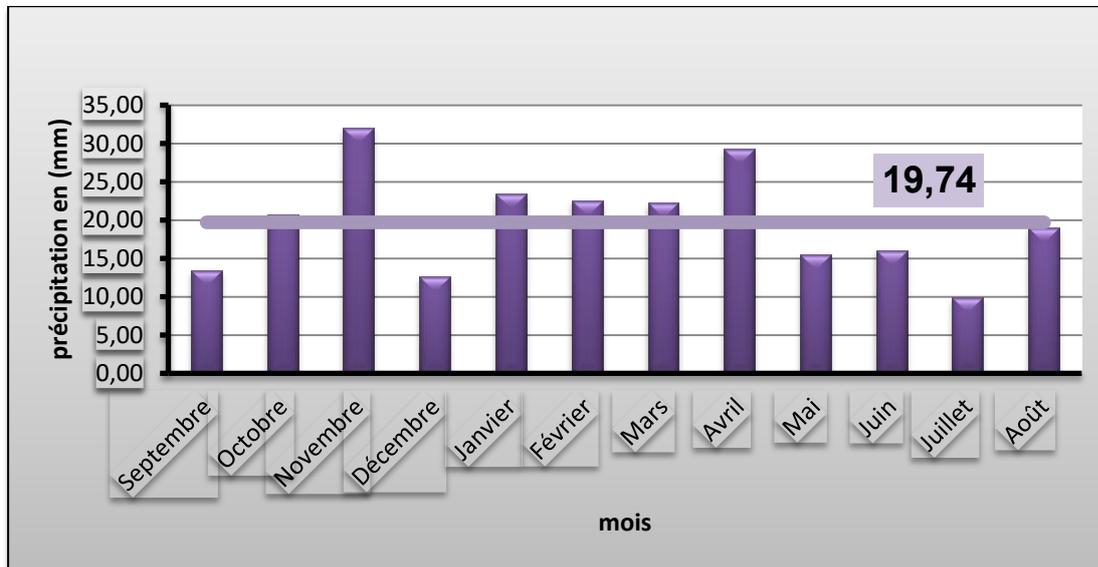


Figure 22: précipitations moyennes mensuelles de Tiouridio (mm)

Les précipitations augmentent depuis septembre jusqu'au novembre, puis diminution en décembre, augmentation en février et une faible diminution jusqu'au mois de mars, et une autre augmentation jusqu'en avril et diminution jusqu'au mois de juillet avec une augmentation au mois aout.

On peut distinguer alors :

- Une période humide qui s'étend depuis le mois d'octobre à novembre et depuis le mois janvier jusqu'au le mois avril, avec des hauteurs supérieures à 19.74mm.
- Une période sèche dans le mois de septembre, décembre, et juillet.
- Le mois le plus arrosé est novembre avec une hauteur de 31.98mm.
- Le mois le moins arrosé est juillet avec une hauteur inférieure à 10mm.

➤ **Variation saisonnière des précipitations (2001-2018) :**

Les précipitations saisonnières ont été calculées à partir des données mensuelles. ces donnés sont résumées dans le tableau suivant :

| Saisons | Automne | Hiver | Printemps | Eté |
|-----------------------|---------|-------|-----------|-------|
| Précipitation en (mm) | 66,17 | 58,69 | 67,05 | 45,02 |

Tableau 12: les pluies moyennes saisonnières à la station de Tiouridio (mm) (2001-2018)

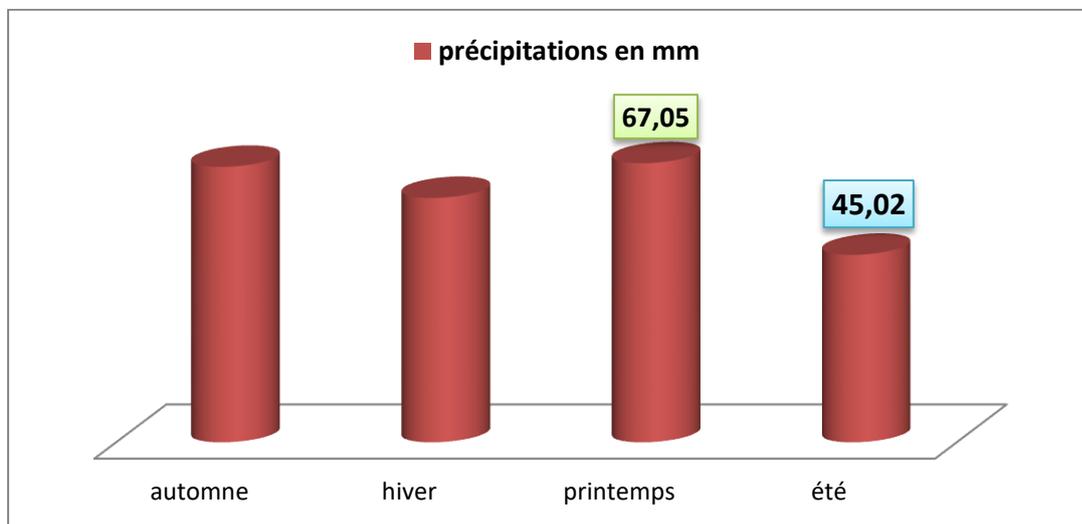


Figure 23: précipitations moyennes saisonnières de Tiouridio (mm)

L'analyse de la figure fait ressortir que : les précipitations sont plus abondantes en automne mais la plus importante c'est printemps avec des précipitations supérieures à 67mm, la saison la plus sèche est l'été avec des précipitations de 45.02mm.

➤ Variation annuelle des précipitations (2001-2018)

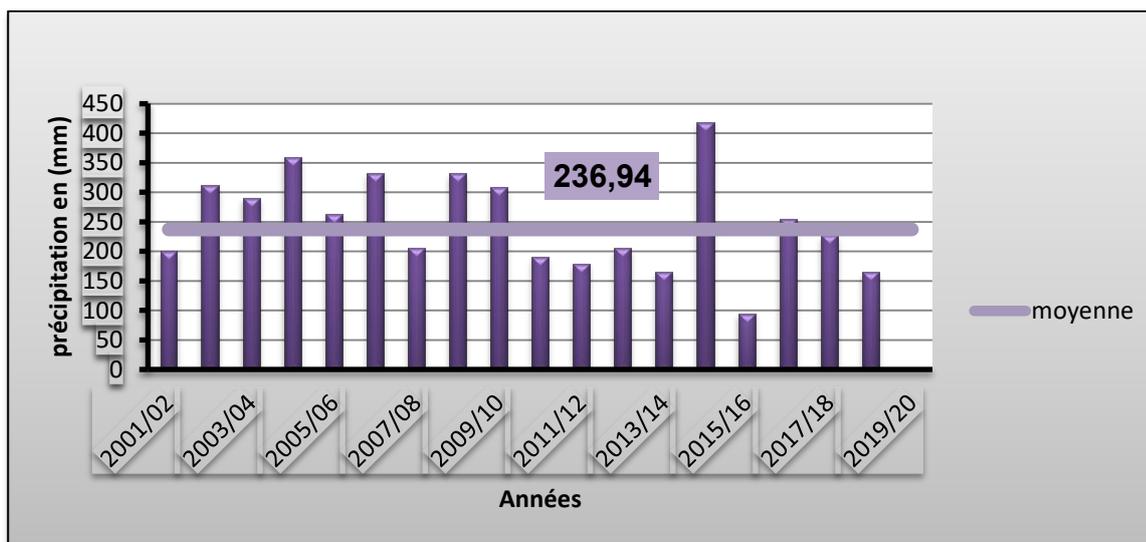


Figure 24: précipitations moyennes annuelles de Tiouridio (mm)

- Nous pouvons voir que, dans la période de 2001 à 2019, deux années ont été exceptionnellement pluvieuses, se sont les années 2004/05, 2014/15, mais la plus importante c'est année 2014/2015 avec une grande élévation arrive 417.8mm.
- La période sèche est reconnue à l'année 2015/2016 avec des précipitations inférieures à 95mm.

f. le Régime pluviométrique saisonnière du Bassin versant de l'ourika à Tazzitount (2001-2018):

Les précipitations sont calculées à partir de la somme des précipitations de chaque exutoire :

| Saison | Précipitations en mm |
|-----------|----------------------|
| Automne | 447.48 |
| Hiver | 236.93 |
| Printemps | 491.09 |
| Eté | 357.44 |

Tableau 13: les précipitations saisonnières du bassin versant de l'ourika

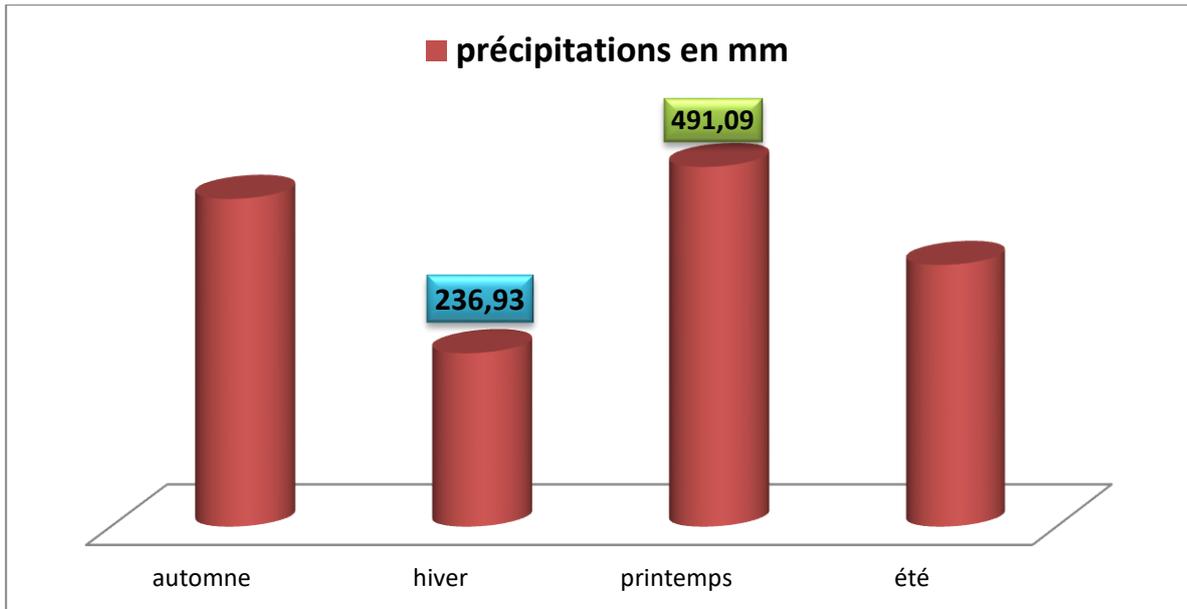


Figure 25: précipitations saisonnières de l'ourika (mm)

Le bassin versant de l'ourika enregistre le maximum des précipitations en printemps avec une hauteur de 491.09 mm et la période la plus sèche est reconnue en hiver avec une précipitation de 236.93 mm. On peut justifier cette diminution de précipitations en hiver qu'une partie reste sous forme de la neige et ne serait pas comptabilisée.

2. le régime hydrologique du bassin ourika à Tazzitount :

a. Variation mensuelle des débits : (2001-2013):

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

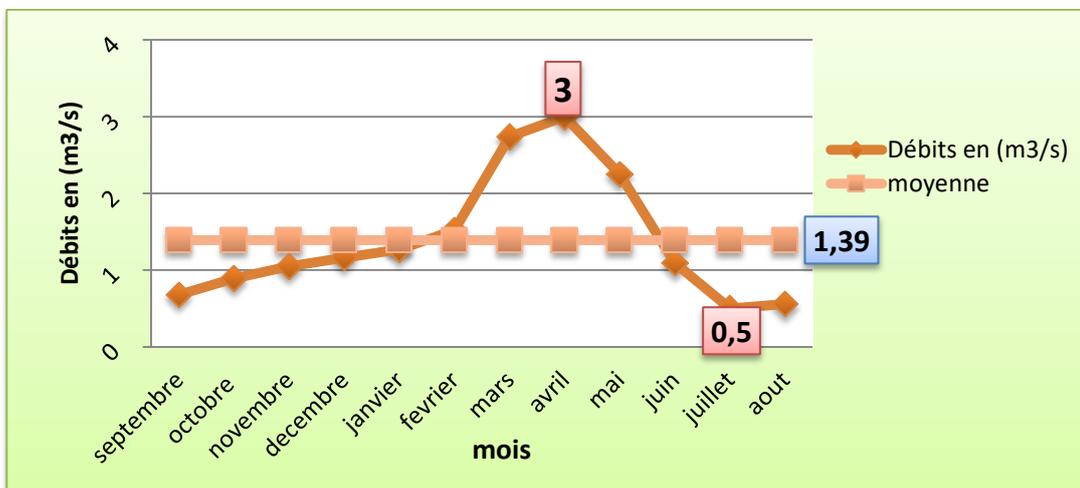


Figure 26: débits moyens mensuels de Tazzitount (m3/s).

Nous constatons une légère augmentation de débit de septembre à février, le débit maximum est atteint en avril (3 m3/s), le régime d'écoulement diminue ensuite pour reprendre un régime inférieur à 0,5 m3/s au mois de juillet et août. Le pic du débit est enregistré au mois d'avril, c'est un écoulement résultant de la combinaison des pluies et de la fonte de neige, le régime est donc **pluvio-nival**.

b. la variation annuelle des débits (2001-2013)

Les débits annuels ont été calculés à partir des données mensuelles (Figure 27).

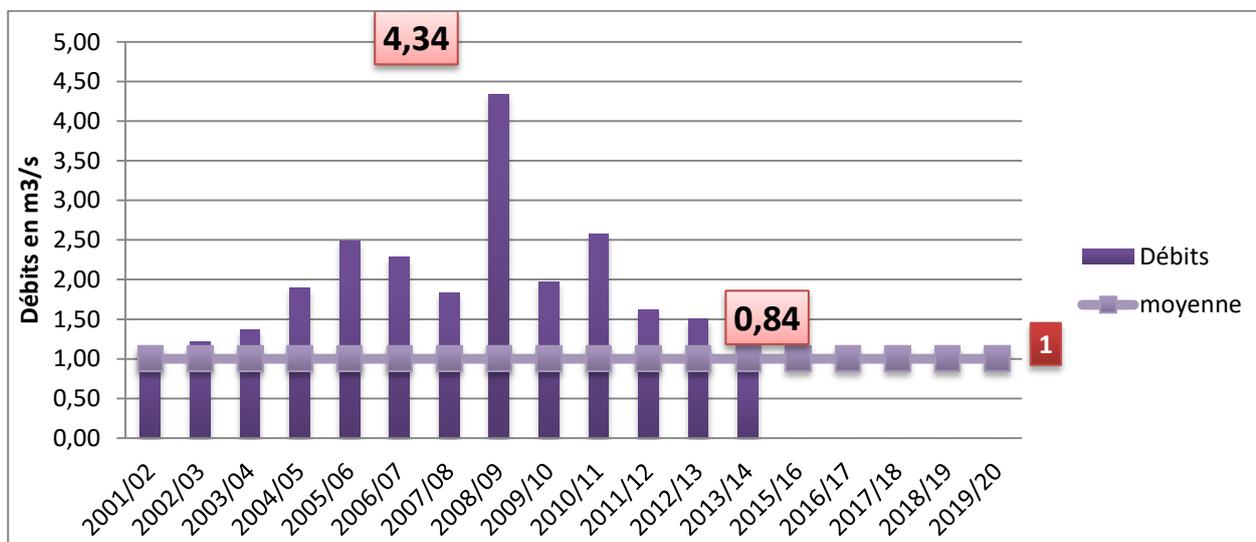


Figure 27: débits moyens annuels de Tazzitount (m3/s)

La station de tazzitount enregistre des intensités importantes dans les débits pour l'année : 2008/2009 avec une hauteur maximale de 4.34m3/s

c. Variation saisonnière des débits : (2001-2013)

Les débits saisonniers ont été calculés à partir des données mensuelles (Figure 28).

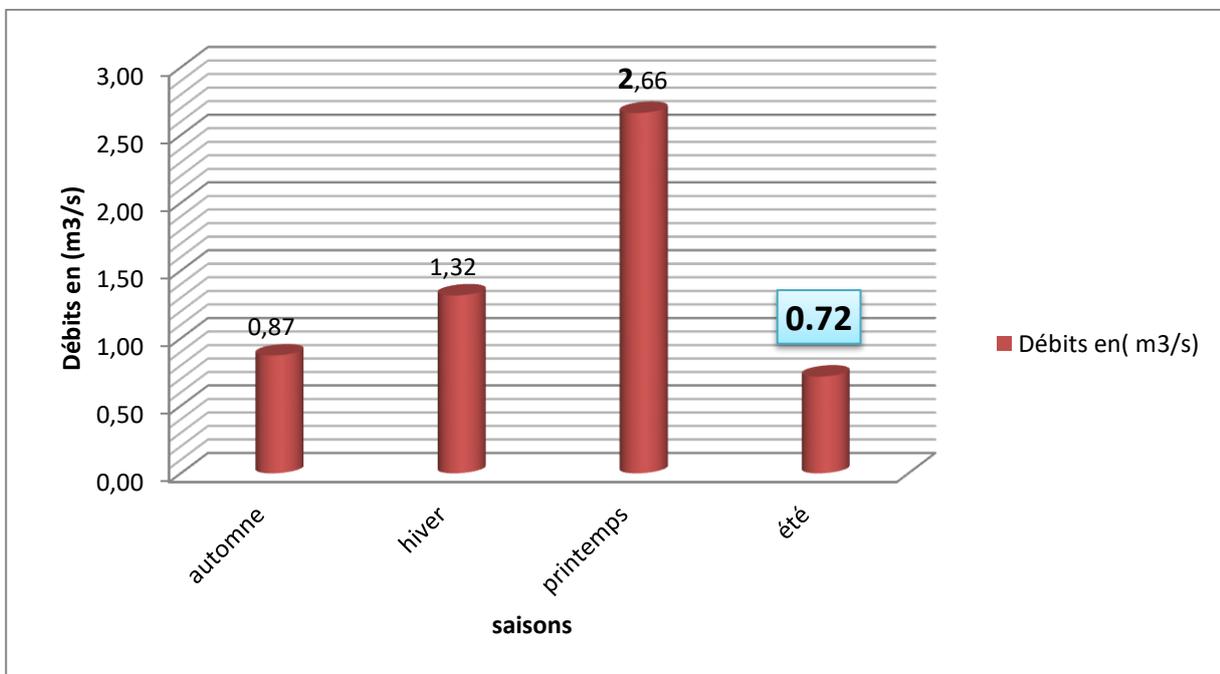


Figure 28: débits moyens saisonniers de Tazzitount (m3/s)

On remarque que les débits du printemps sont les plus élevés (2.66 m3/s), suivi par ceux de l'hiver puis d'automne avec des moyennes respectives de (1.32 m3/s) et (0.87 m3/s). Les écoulements d'automne sont les moins importants avec une moyenne de (0.72 m3/s).

3. Relation entre les pluies et les débits moyens mensuels de l'ourika à Tazzitount (2001-2014):

| Mois | Sept | Oct | nov | dec | janv | fevr | mar | avr | mai | juin | Juil | aout |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Précipitations en (mm) | 22.69 | 36.11 | 47.81 | 15.78 | 28.14 | 31.79 | 32.79 | 38.27 | 23.06 | 13.86 | 10.59 | 22.36 |
| debits en (m3/s) | 0,68 | 0,89 | 1,05 | 1,16 | 1,27 | 1,52 | 2,74 | 3 | 2,25 | 1,09 | 0,5 | 0,56 |

Tableau 14: Les pluies et les débits moyens mensuels interannuels d'Ourika à Tazzitount (2001-2014).

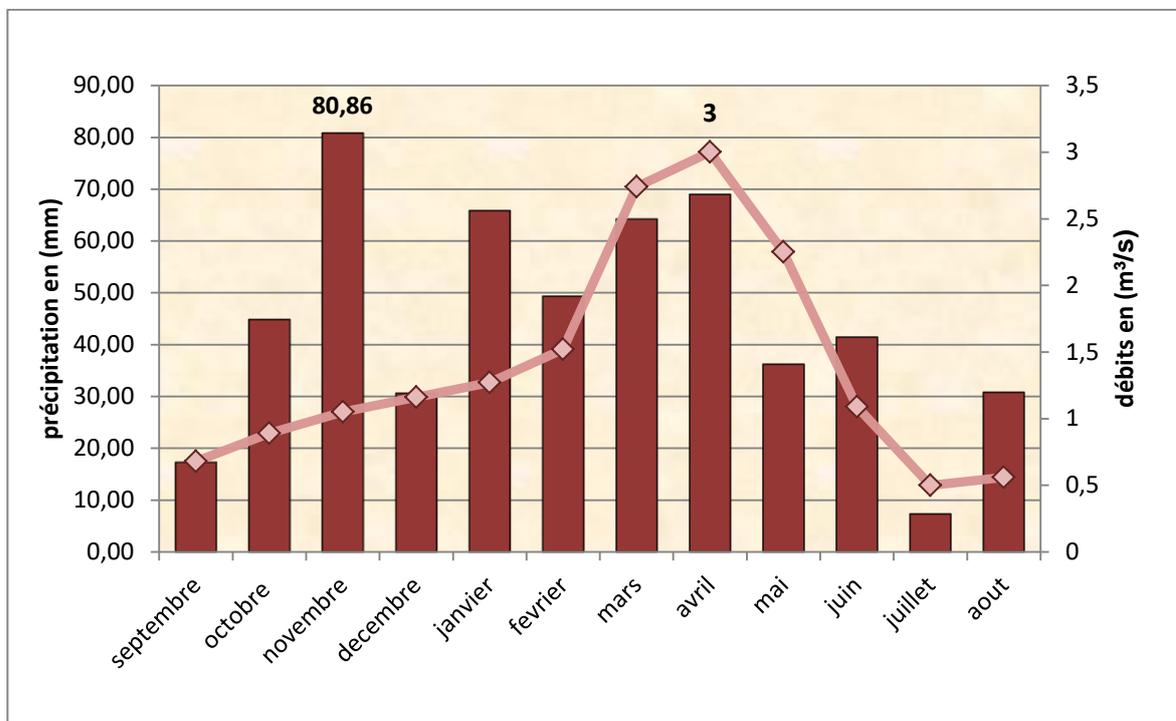


Figure 29: Histogramme montrant la relation entre les régimes de débits et de pluies à la station de Tazzitount (2001-2018)

On remarque que la courbe des débits n'est pas complètement calquée sur celle des pluies et il y a un léger déphasage entre les deux courbes : Le maximum pluviométrique est en novembre (80,86mm) alors que le maximum hydrologique parvient un mois plus tard en avril (3m³/s). Ceci est du à la rétention nivale en hiver et sa grande fonte au printemps, ce qui renforce l'écoulement pendant cette saison.

CHAPITRE 3:
MODELISATION HYDROLOGIQUE PAR
L'OUTIL HEC-HMS

1. Généralités sur la modélisation par l'outil HEC-HMS:

a. Crue :

C'est une notion importante en hydrologie, elle est causée par une augmentation brutale du niveau des eaux d'un cours d'eau. Elle se décrit par ce qu'on appelle un Hydrogramme de crue. Celui-ci peut être simple ou complexe. Globalement, ce Hydrogramme peut être décomposé en cinq éléments (Fig. 30).

- Le temps de montée de la crue: c'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: c'est le débit maximum observé au cours d'une crue. Il permet de définir la période de retour du phénomène, au regard des données historiques disponibles.
- Le temps de base: c'est la durée qui s'écoule entre le début de la montée du niveau d'eau et la fin du ruissellement pur de la crue
- Le temps de réponse: c'est la durée qui sépare le maximum de l'épisode pluvieux et le moment du débit de pointe.
- Le temps de concentration: c'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 de la crue

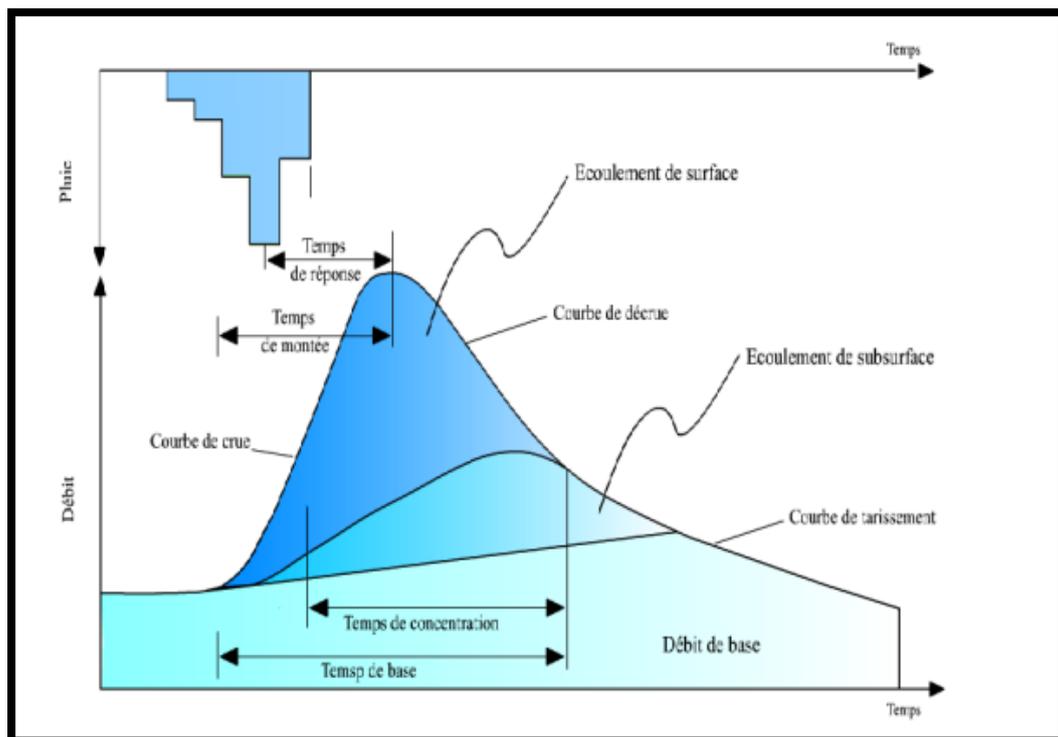
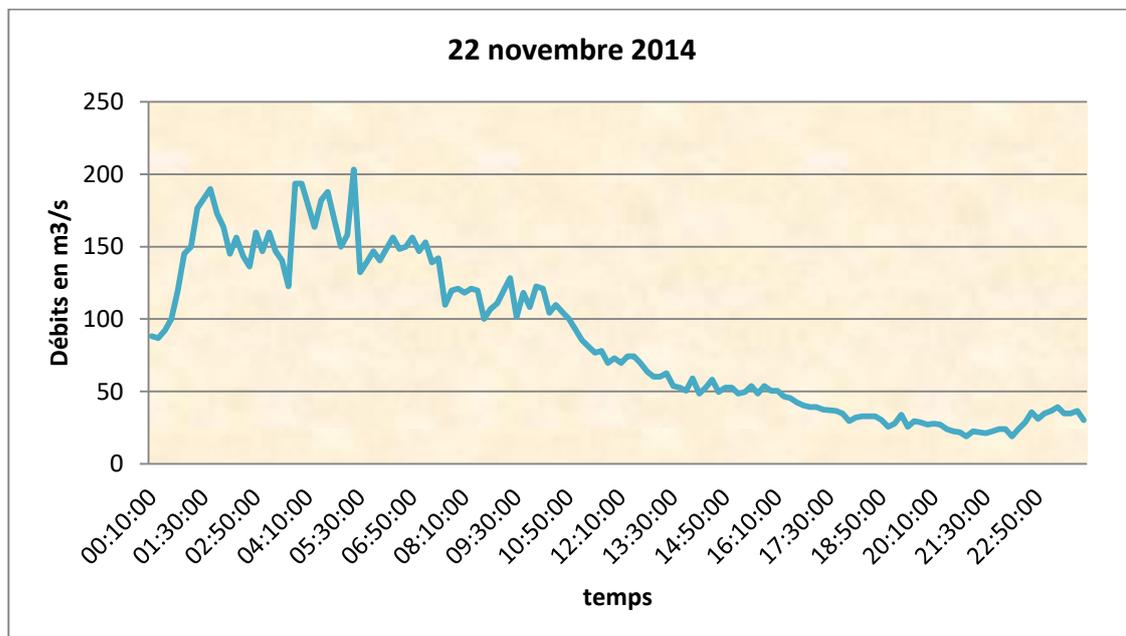
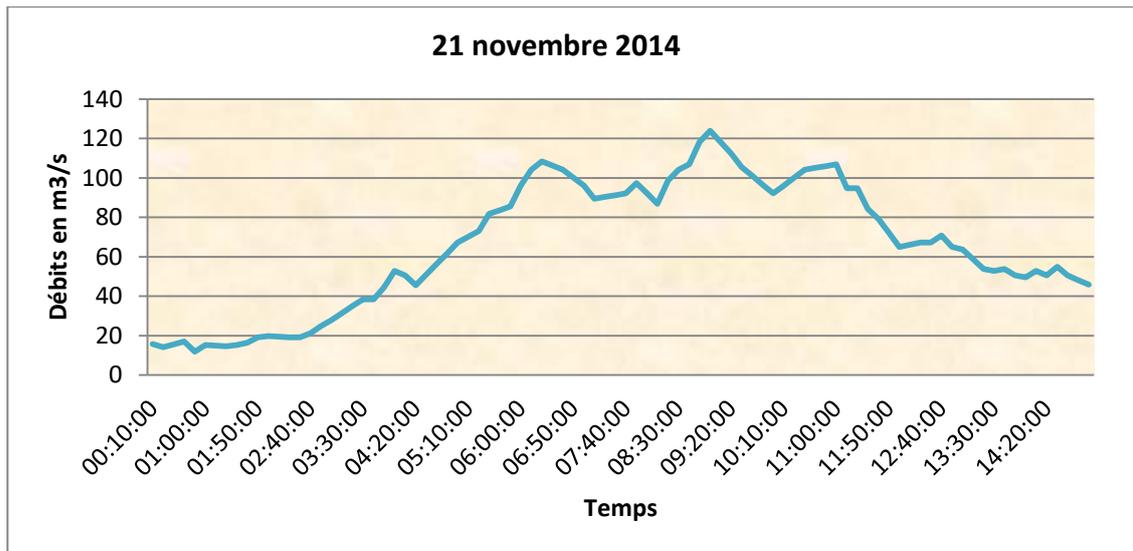


Figure 30: Répartition élémentaire d'un Hydrogramme de crue

b. Événements disponibles pour la modélisation :

En raison de l'absence de données de débits aux différentes stations de mesure, nous nous contentons de celles relatives à la station de Tazzitount. Ces débits ont été obtenus à partir des données provenant de l'agence du bassin hydraulique de Tensift. Ces données comprenaient les évolutions temporelles des niveaux d'eau de 4 événements de crue à Tazzitount. A la lumière des tracés des hydrogrammes de crues, nous constatons pour les 4 épisodes qu'ils sont de type simple pour celles du 28 novembre 2014 et 5 mai 2016, et complexe pour celles des 21 et 22 novembre avec des débits de pointe respectivement de 124, 203, 47 et 111 m³/s



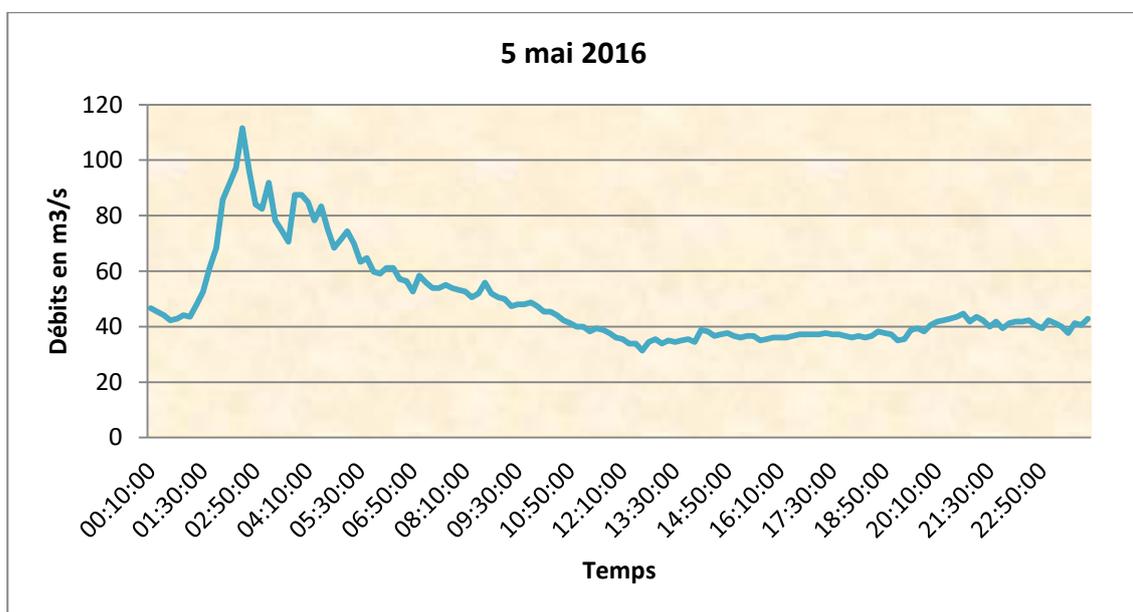
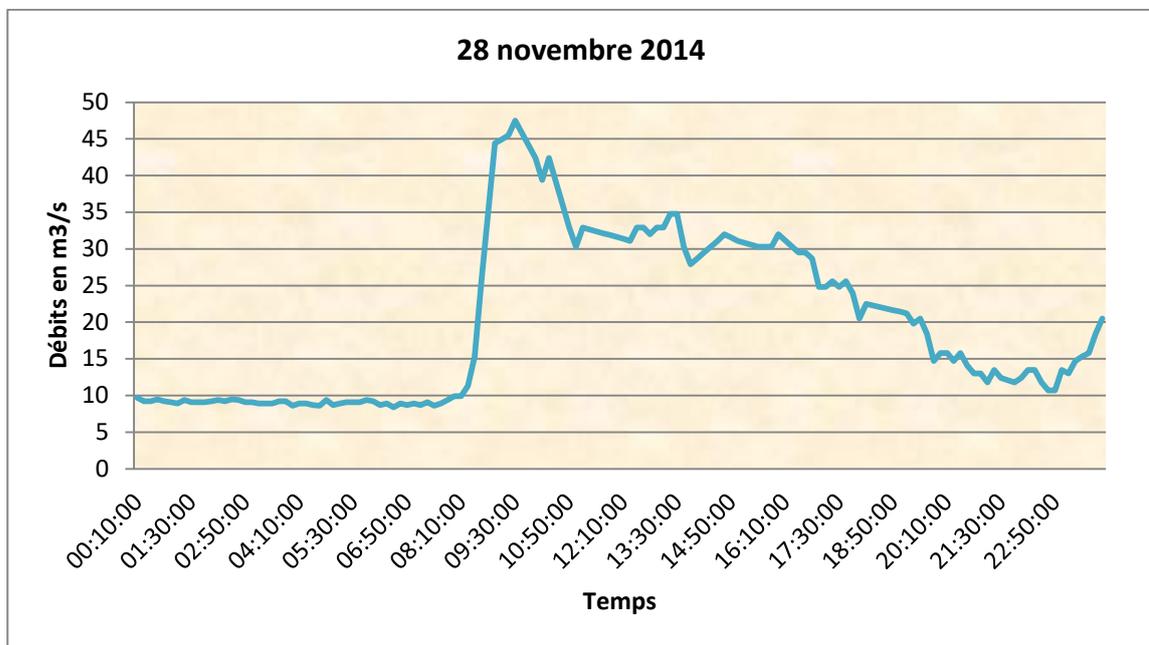


Figure 31 : Hydrogrammes des 4 événements de crue reconstitués à Tazzitount.

2. Modèle pluie-débit:

La modélisation hydrologique est la représentation simplifiée partielle ou totale du cycle hydrologique. Cette représentation se fait grâce à un ensemble d'équations mathématiques qui sont appelées à reproduire le système. Le modélisateur introduit généralement les facteurs qui lui semblent pertinents pour minimiser l'inexactitude liée aux hypothèses simplificatrices de la modélisation. On distingue quatre types de variables qui existent en totalité ou en partie dans chaque modèle (Fig.32):

- **Variables d'entrée** dites aussi de forçage ou de pluies, qui se caractérisent par une certaine distribution spatio-temporelle. Elles sont souvent illustrées par un hyétogramme, et qui exprime l'intensité de pluie ;
- **Variables internes** dites aussi d'état, qui sont propres au bassin versant telles que : la végétation, l'humidité de sol ...

- **Variables de sorties**, qui sont le résultat du ruissellement dont la représentation graphique finale est un Hydrogramme de crue

Le lien entre les entrées et les sorties est garanti par un ensemble d'équations mathématiques contribuant à la représentation des processus de fonctionnement du bassin versant de manière plus ou moins explicite (Coustau, 2011).

Les paramètres peuvent avoir une signification physique ou non. Ils permettent aux équations régissant le modèle de s'adapter à la réalité.

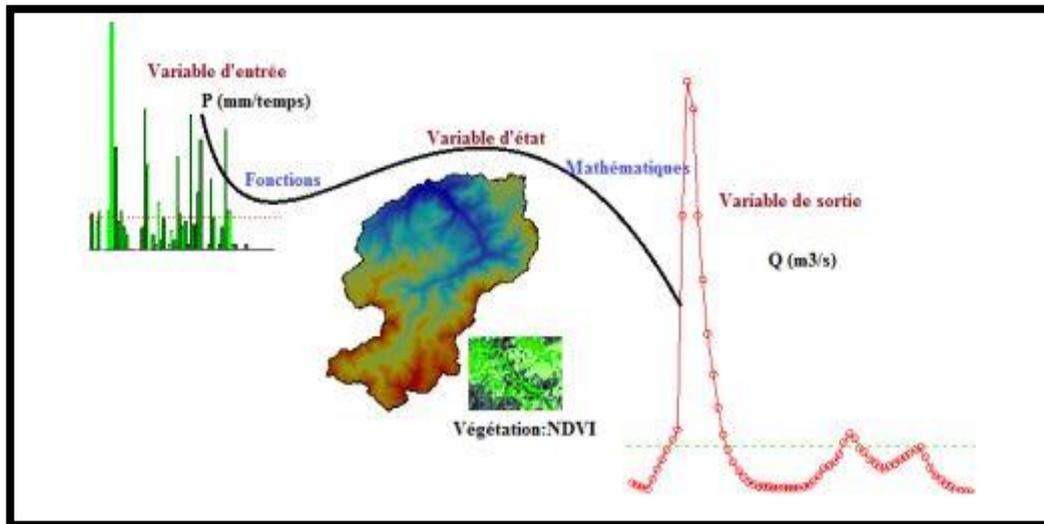


Figure 32: Variables régissant le modèle pluie-débit

3. Présentation de la plateforme HEC-HMS :

HEC-HMS est une plate-forme de modélisation permettant la combinaison d'une multitude de sous-modèles permettant de décrire différents processus hydrologiques. Ces processus sont le ruissellement direct de surface, l'infiltration dans le sol, l'évapotranspiration, les écoulements de sub-surface et souterrains (nappes phréatiques). Pour chacun des processus pouvant être impliqués dans la formation des crues à l'exutoire d'un bassin versant donné, il s'agit donc de faire un choix de modèle adapté aux conditions de ruissellement spécifiques de la zone étudiée. Aussi, nous présenterons ci-après les différents sous-modèles proposés dans la plate-forme HEC-HMS qui pourraient s'avérer pertinents compte-tenu des spécificités géomorphologiques et de l'intensité des précipitations du bassin versant.

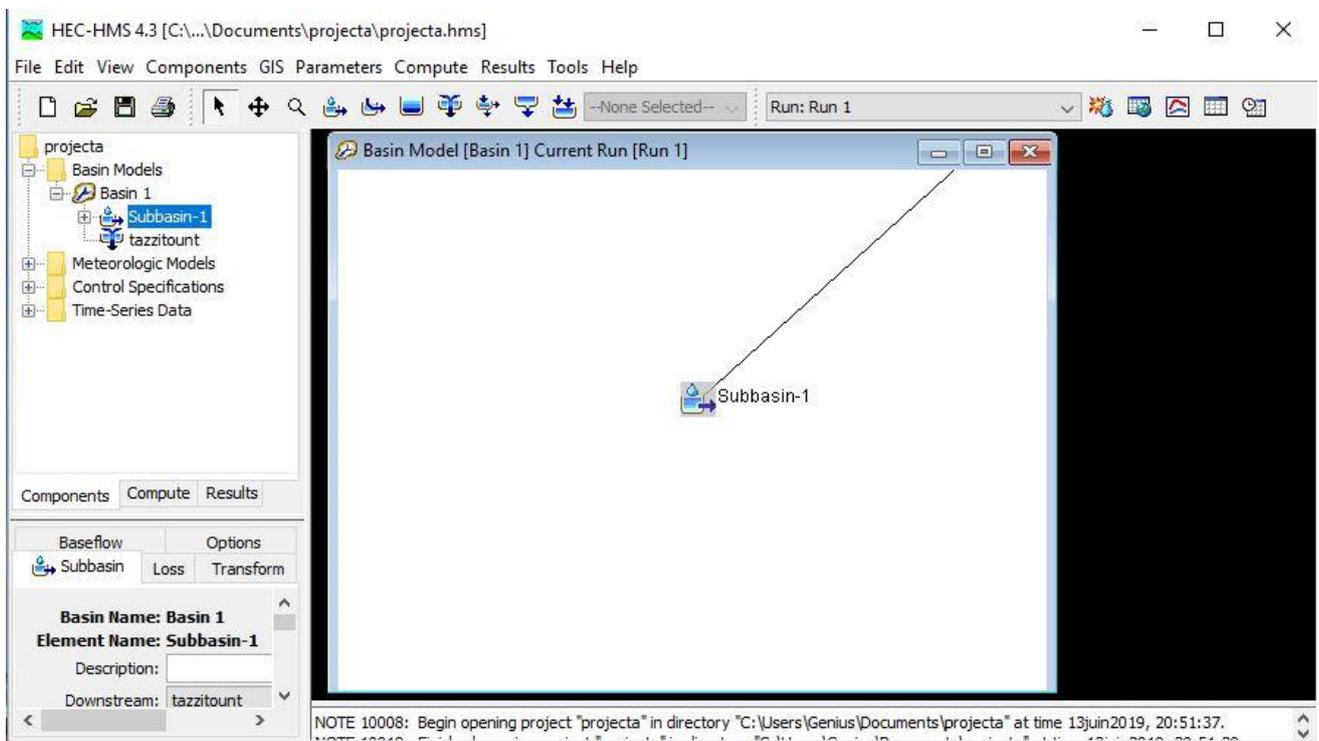


Figure 33 : interface de la plateforme HEC-HMS

Modèle du bassin :

- *Des jonctions:* C'est un élément avec une ou plusieurs entrées et une seule sortie. Le débit sortant est calculé par simple conservation du débit. Elle représente la confluence entre deux ou plusieurs cours d'eau.
- *Des sous bassins :* C'est un élément qui n'a pas d'entrée et juste une sortie. Son débit sortant est calculé par soustraction des pertes au ruissellement issu des précipitations, en ajoutant le débit de l'écoulement souterrain.

Modèles météorologiques : Les modèles météorologiques sont au même titre que le modèle de bassin indispensable à la simulation. Ils regroupent les données des précipitations et d'évapo-transpiration nécessaires au calcul de la réponse hydrologique du bassin versant. Dans notre projet, on s'est intéressé à la méthode de l'inverse distance comme méthode d'interpolation des précipitations.. Cette méthode se base sur le calcul de la pluie moyenne sur chaque sous bassin, en lui attribuant un coefficient de pondération à chaque station pluviométrique.

Spécifications de Contrôle : Les spécifications de contrôle sont la dernière composante indispensable pour effectuer une simulation. C'est à cette étape que l'on définit les instants de départ et de fin de la simulation ainsi que le pas de temps de calcul. Il est contrôlé par des paramètres, et inclut les dates et heures de début et de fin. Le pas de temps entre les mesures sera exigé lors du lancement de cette phase. L'environnement HEC-HMS offre un intervalle de temps allant d'une minute à 24h .

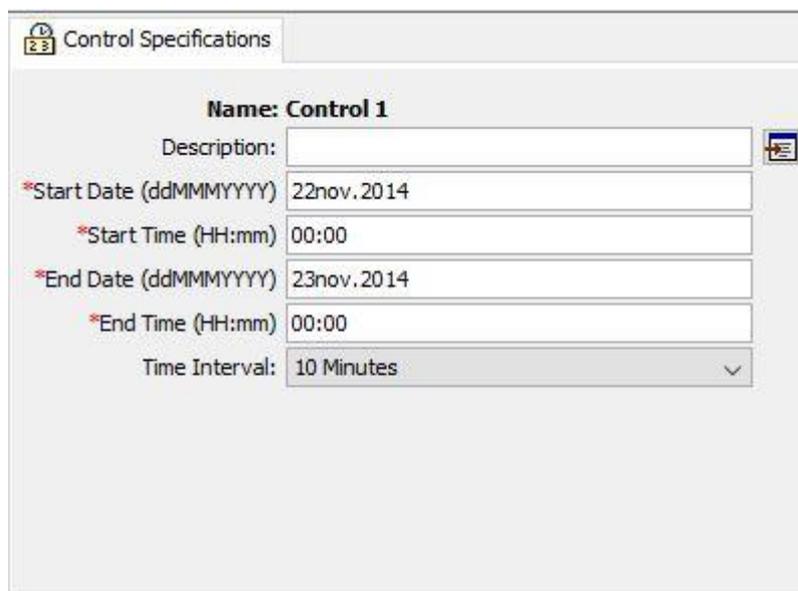


Figure 34: Temps de simulation offerts par l'outil

- **Bilan de la simulation sous HEC-HMS :** Les résultats peuvent être visualisés sous forme de tableau ou de graphes à partir de l'écran des modèles de bassin. (fig.35)

| Hydrologic Element | Drainage Area (KM2) | Peak Discharge (M3/S) | Time of Peak | Volume (MM) |
|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-------------|
| Subbasin-1 | 332 | 203,0 | 22nov.2014, 05:20 | 25,00 |
| tazzitount | 332 | 203,0 | 22nov.2014, 05:20 | 25,00 |

Figure 35: Bilan de la simulation sous HEC-HMS

a. Calibration des Paramètres :

La calibration définit un processus d'ajustement des paramètres du modèle, jusqu'au aboutir à une superposition qui parait parfaite entre les données observées et celles simulées, a été amorcé par fixer les paramètres du modèle de récession : le R_c et le T_d . Les paramètres du débit de base sont supposés constants d'un épisode à un autre, car ils dépendent essentiellement des propriétés physiques du bassin.

Débit de base : Le débit de base désigne la composante du débit dans le cours d'eau hors période de pluie et entre deux épisodes de crue, dont l'origine est généralement le stockage souterrain et les aquifères.

| | | | | | |
|----------------------------------|---------------|------|-----------|----------|---------|
| Subbasin | | Loss | Transform | Baseflow | Options |
| Basin Name: Bassin_Ourika | | | | | |
| Element Name: Subbasin-1 | | | | | |
| Initial Type: | Discharge | | | | |
| *Initial Discharge (M3/S) | 8.4 | | | | |
| *Recession Constant: | 0.85 | | | | |
| Threshold Type: | Ratio To Peak | | | | |
| *Ratio: | 0.4 | | | | |

Figure 36: Paramètres du débit de base

- **Constante de récession R_c** : ce paramètre dépend des propriétés hydrogéologiques du réservoir souterrain. Elle varie entre 0 et 1. Si sa valeur vaut 1, la contribution du module sera constante avec $Q_t=Q_0$.

Fonction de production : Elle est appelée aussi fonction de pertes. Le bassin versant en tant qu'entité hydrologique peut être réparti en zones perméables et imperméables (USACE, 2010), en sol sec et un autre humide et par conséquent la réponse hydrologique quant au ruissellement ne sera pas la même.

| | | | | | |
|---------------------------------|------|------|-----------|----------|---------|
| Subbasin | | Loss | Transform | Baseflow | Options |
| Basin Name: OURIKA | | | | | |
| Element Name: Subbasin-1 | | | | | |
| Initial Abstraction (MM) | | | | | |
| *Curve Number: | 70 | | | | |
| *Impervious (%) | 11,5 | | | | |

Figure 37: Paramètres de production

- **Le pourcentage d'imperméable :** il désigne la portion de la surface du bassin considérée comme étanche et directement connectée au réseau de drainage. Ce pourcentage est déduit lors de l'élaboration de la carte d'occupation du sol.

- **CN** : sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration , Il est déterminé pour un composé hydrologique de sol à partir de tables Service de Conservation des Ressources Naturelles (NRCS).

Fonction de Transfert : Le transfert se passe au niveau des versants, et il traduit la transformation de l'excédent des précipitations en débit.

Figure 38: Paramètres de transfert

- **Temps de concentration T_c** : résume le processus de translation de la pluie nette le long du réseau hydrographique.
- **Coefficient de stockage S_C** : représente le phénomène de stockage provisoire de la pluie nette dans le bassin versant.

4. Cas du modèle non spatialisé (Global) :

Le schéma du modèle non spatialisé est illustré dans la figure 36. La constante de récession R_c est fixée à 0.8 et le ratio à 0.4. Le débit de base est légèrement variable de 47,5 et 203,3 m³/s (tableau 15). Les paramètres de production et de transfert ont été aussi calibrés vue de reproduire l'allure de l'hydrogramme observé. Cependant, la réussite du processus de calage entre les données observées et les données simulées est conditionnée par la compréhension du rôle que joue chaque paramètre à part, sans oublier l'interdépendance entre ces paramètres. Pour les 3 épisodes, nous avons réussi à bien reproduire l'allure générale de l'hydrogramme de crue avec sa pointe, mais avec des valeurs de CN très écartées arrive à 86,9. Les paramètres de transfert ont subi aussi une réduction temporelle.

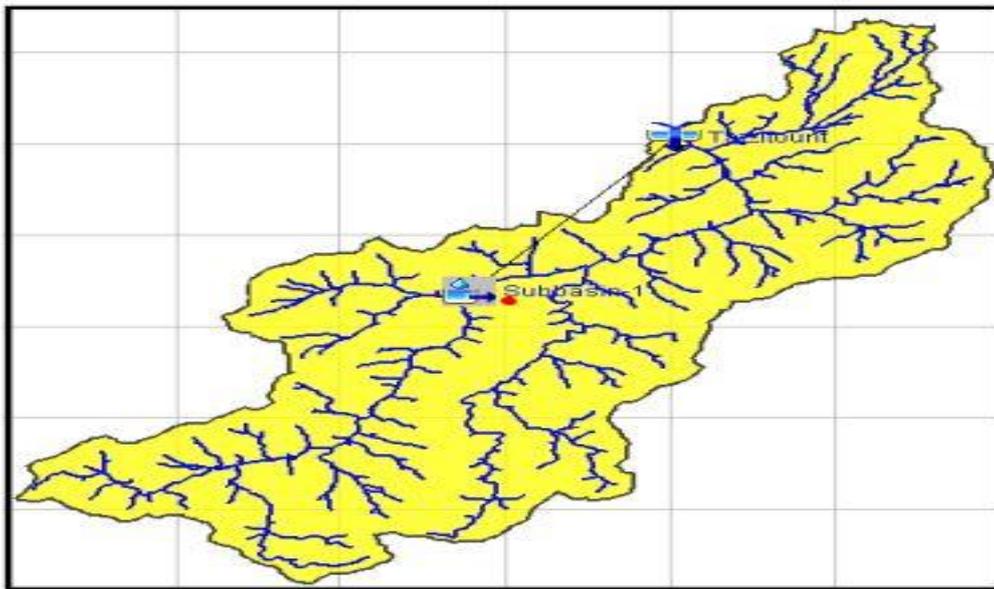


Figure 39: Schéma du modèle Global

a. Calage et discussion des résultats :

Le calage consiste à attribuer aux paramètres les valeurs numériques conduisant à minimiser l'écart entre réponses calculées et réponses observées. Les deux éléments les plus importants de cette procédure sont:

- l'évaluation de la qualité des simulations par l'adoption d'une mesure de performance et
- la méthode de modification des paramètres si la proximité entre les valeurs observées et calculées est insuffisante.

Le plus petit pas de temps disponible pour les épisodes de crue est de 10 minutes.

Les hydrogrammes de crue obtenus par le modèle pour les 3 événements sont représentés comme suivant:

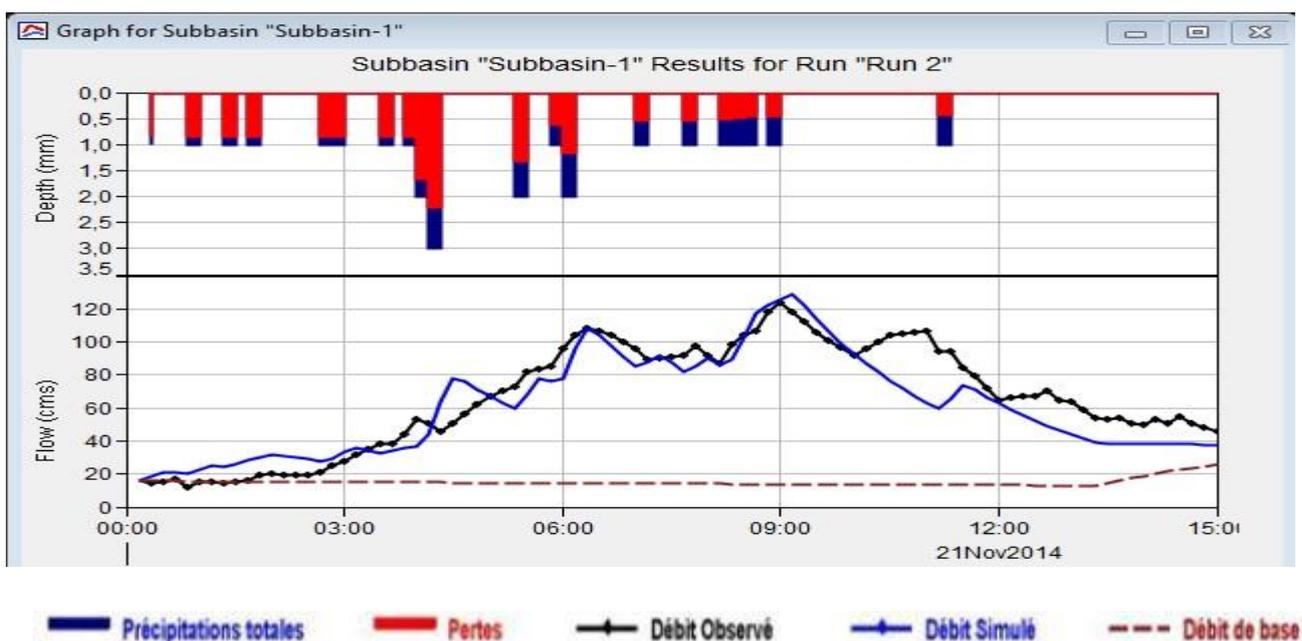


Figure 40 : Tracé de l'épisode du 21 novembre 2014

Le 3^{ème} pic de la courbe observé vers 11 :00 n'est pas été simulé car les précipitations dans cet intervalle du temps est absentes .cette différence peut être expliquée par le fait que la courbe simulé ne prend en compte que les précipitations de l'exutoire de tazzitount, tandis que la courbe observée prend en considération toutes les précipitations de l'amont jusqu'à l'exutoire.



Figure 41 : Tracé de l'épisode du 22 novembre 2014

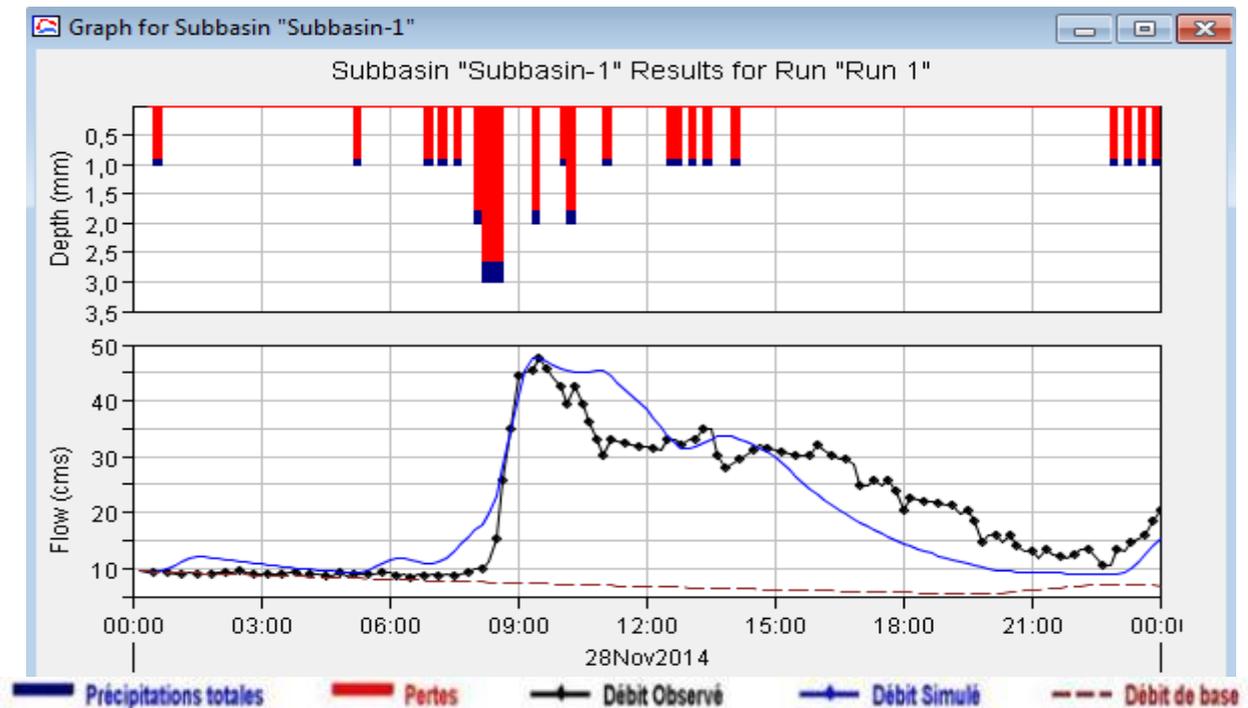


Figure 42: Tracé de l'épisode du 28 novembre 2014

b. Présentation des paramètres à calibrer :

Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée. C'est le processus de choix de jeux de valeurs des paramètres. Notamment les quatre paramètres : Ceux de production le CN, le % d'imperméabilité, et ceux de transfert le Tc et le St. Celui-ci indique le temps de stockage de l'eau au niveau des réservoirs, avant qu'elle soit lâchée. Ces paramètres ont été calibrés manuellement afin d'aboutir à une simulation meilleure.

| <u>Episode</u> | <u>CN</u> | <u>Impe %</u> | <u>T_c</u> <u>(h)</u> | <u>S_c</u> <u>(h)</u> | <u>R_c %</u> | <u>Ratio</u> <u>%</u> | <u>Débits</u> <u>pointe</u> <u>observé</u> | <u>Débit</u> <u>pointe</u> <u>simulé</u> | <u>Nash</u> |
|------------------|-------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------|--------------------------|--|--|-------------|
| <u>22nov2014</u> | <u>86,9</u> | <u>11,15</u> | <u>0,3</u> | <u>2</u> | <u>0,07</u> | <u>0,13</u> | <u>203,3</u> <u>m3/s</u> | <u>203,9</u> <u>m3/s</u> | <u>0,62</u> |
| <u>21nov2014</u> | <u>85,5</u> | <u>14</u> | <u>0,22</u> | <u>2</u> | <u>0,8</u> | <u>0,1</u> | <u>123,9</u> <u>m3/s</u> | <u>124</u> <u>m3/s</u> | <u>0,74</u> |
| <u>28nov2014</u> | <u>68</u> | <u>10,8</u> | <u>0,9</u> | <u>3,1</u> | <u>0,5</u> | <u>0,2</u> | <u>47,5</u> <u>M3/s</u> | <u>47,8</u> | <u>0,81</u> |

Tableau 15 : Les paramètres à calibrer de 3 épisodes

Nous essaierons donc de fixer préférentiellement ceux qui ont le moins d'influence sur l'allure générale de l'hydrogramme, essentiellement pour la fonction de transfert à savoir, le coefficient de stockage (S_c), et le temps de concentration et pour la fonction de production, le ratio et la constante de récession.

c. La validation des ces paramètres par l'épisode de 5 mai 2016 :

Notre modèle possède cinq paramètres non directement mesurables sur le terrain. Le but de la calibration est alors de trouver les valeurs de ces paramètres pour permettre de simuler au mieux le comportement hydrologique du bassin versant.

L'identification de la valeur des paramètres du modèle hydrologique va donc dépendre de la fonction objective utilisée qui quantifie l'écart entre la variable observée et la variable simulée par le modèle.

La fonction objective la plus utilisée en hydrologie est celle du critère de Nash :

$$Nash = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_m)^2}$$

Où Q_{obs}, Q_{calc}, Q_m sont respectivement les débits observés et simulés sur un pas de temps et la moyenne des débits observés. Plus le Nash est proche de 1, plus la simulation est proche de l'observation.

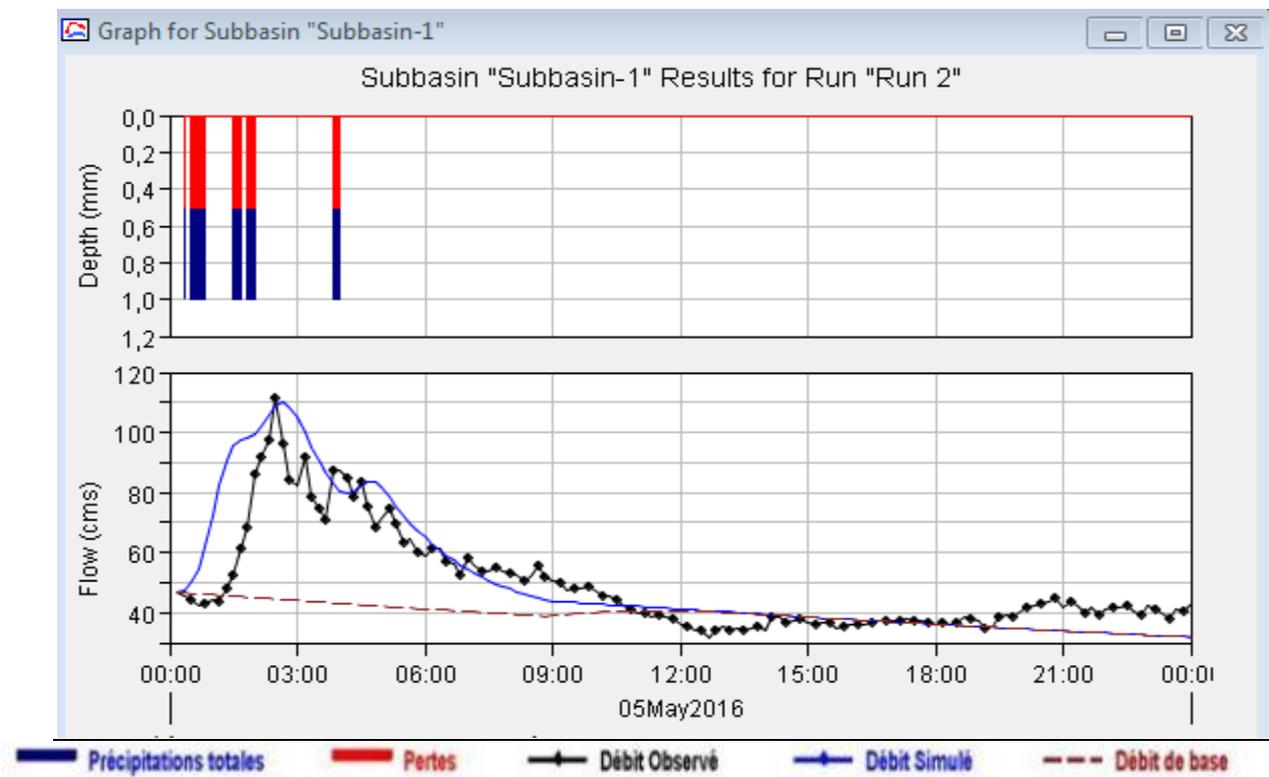


Figure 43: Tracé de l'épisode du 05 mai 2016

| Episode | C_n | Impe % | T_c (h) | S_c (h) | R_c % | Ratio % | Débits pointe observé | Débit pointe simulé | Nash |
|----------|-------|--------|-----------|-----------|---------|---------|-----------------------|---------------------|-------|
| 5mai2016 | 85,9 | 50 | 1,1 | 1,9 | 0,8 | 0,25 | 111,6 | 110 | 0,614 |

Tableau 16 : Les paramètres à calibrer l'épisode de 5 mai2016

Le tableau détermine certaines caractéristiques retenues par les hydrogrammes observé et calculé et après l'analyse de ces caractéristiques on constate qu'ils sont presque égaux, ce qui montre que le calage de modèle est bien réalisé.

d. Les avantages et les limites du logiciel HEC-HMS:

➤ Les avantages :

- Diversité dans les formalismes proposés : la variété remarquable de ces méthodes de calcul, offre à l'utilisateur l'opportunité du choix en fonction de ses moyens, ses finalités et de son expérience.
- Diversité dans les combinaisons modulaires possibles : ce critère est garanti par le principe de tâches séparées qui le distingue des autres modèles, et qui lui confie une caractéristique incroyable : « plusieurs modèles en un modèle ».

- ·Aptitude de calibration et nature des résultats issus : pour plusieurs modèles la calibration est effectuée par un autre programme, d'autres peuvent même la faire, mais avec un choix limité de fonctions objectives et d'optimisation. En plus, ces modèles ne peuvent afficher à la fin que les valeurs des paramètres calibrés, l'hydrogramme simulé et observé et la variation de la fonction objective. En revanche, le HEC-HMS avec ses deux fonctions d'optimisation, ses sept fonctions objectives sans oublier ses graphes explicatifs et analytiques, avec tout ceci, il accorde à la calibration une précision inédite, et à la modélisation une exploitation au bout des choses.

➤ **Les limites :**

- Tous les formalismes utilisent des valeurs constantes des paramètres c'est-à-dire qu'ils sont indépendants du temps, alors que pour de longues durées ces paramètres peuvent changer pour diverses motifs. il y a une alternative que le développeur propose à ceci c'est de diviser une longue simulation en plusieurs et de changer manuellement les paramètres entre les simulations Cette contrainte est loin de détériorer nos résultats, car nous avons opté pour une modélisation événementielle.
- ·Tous les modules ne sont pas accouplés, c'est-à-dire que chaque partie du modèle est calculée indépendamment de l'autre, mais l'erreur liée à ce problème est minimisée par l'utilisation de courts temps de calcul . Cette limite touche en particulier les modèles continus de HEC-HMS qui intègrent des facteurs étroitement liés comme l'évapotranspiration, la fonte de neige et l'infiltration. Par conséquent les erreurs sont liées à cet inconvénient est à rejeter dans notre cas.
- ·La représentation de la structure du bassin : représentée dans le HEC-HMS, par un arbre ramifié qui rend son assimilation difficile. Un élément ne peut avoir qu'une seule sortie de débit, l'élément de diversion ne peut pas piquer le débit d'un endroit et le verser dans un autre.

Toutes ces limites de représentation sont gênantes, mais dans notre cas, leurs effets sont neutralisés, parce que notre bassin est très simplifié (un élément de « Subbassin », et un exutoire).

Conclusion:

Le principal objectif de ce projet était de tester l'application d'un modèle hydrologique par l'outil Hec-Hms utilisé pour simuler et prévoir les crues de bassin versant à Tazzitount. Les données hydrométéorologiques mises à notre disposition par l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift, nous ont permis d'observer une variabilité spatiale et temporelle des précipitations. Nous nous sommes efforcés tout d'abord de caractériser les principaux facteurs physico-géographiques agissant sur l'écoulement.

L'étude morphométrique nous a permis de caractériser la forme, les altitudes moyennes et les altitudes les plus fréquentes de notre bassin. La superficie et le périmètre stylisé, a permis de quantifier des paramètres tels que : le coefficient de compacité, la densité de drainage.

L'étude géologique et structurale a permis la description lithologique qui montre que la série est un complexe cristallin.

De l'étude climatologique ressort que le bassin est caractérisé par une saison pluvieuse en hiver et au printemps et un été chaud et sec avec une moyenne de 264 mm/an. Par ailleurs l'étude hydrologique montre que le réseau hydrographique est relativement dense avec une longueur totale de **38** km.

Pour la modélisation hydrologique, nous avons tenté une modélisation pluie-débit par la plateforme Hec-Hms, qui est un modèle de type global, dont les paramètres d'entrées sont les précipitations et les débits dans un pas de temps de 10 minutes, les paramètres internes propres au bassin versant telles que le coefficient de stockage, le temps de concentration ..., et le paramètre de sortie qui est représenté par l'hydrogramme de crue simulé. Les résultats obtenus par l'application de ce modèle Hec-Hms s'avèrent intéressants et appréciables à savoir :

- la valeur du critère de Nash pour la calibration est acceptable. Elle est de 70% comme valeur moyenne des périodes de simulation,
- La validation a donné un résultat similaire avec un Nash de 0,76 confirmant un calage satisfaisant du modèle.

Enfin, il est nécessaire de développer une chaîne de traitement automatisée des données pour être en mesure de fournir une application de prévision, utilisant des sorties de modèles météorologiques.

LISTE DES ILLUSTRATIONS:

Les figures

| | |
|---|----|
| Figure1: la situation géographique du sous-bassin versant d l'Ourika à Tazzitount,..... | 7 |
| Figure 2: Vue à 3 dimensions du bassin versant de l'Ourika à Tazzitount..... | 9 |
| Figure 3 : Carte hypsométrique du bsin versant de l'Ourika..... | 10 |
| Figure 4 : Hydrogramme hypsométrique..... | 10 |
| Figure 5: la carte des pentes | 11 |
| Figure 6: Le réseau hydrographique du bassin versant de l'Ourika à Tazzitount..... | 12 |
| Figure 7: Esquisse géologique du bassin de l'Ourika..... | 13 |
| Figure 8: carte d'occupation du sol (DREF, 2010)..... | 14 |
| Figure 9: la répartition des terrains imperméable (Selon ABHT)..... | 15 |
| Figure 10: précipitations moyennes mensuelles d'Amenzal (mm)..... | 17 |
| Figure 11: précipitations moyennes saisonnières d'Amenzal (mm)..... | 18 |
| Figure 12: précipitations moyennes annuelles d'Amenzal (mm)..... | 19 |
| Figure 13: précipitations moyennes mensuelles de Tazzitount..... | 20 |
| Figure 14: précipitations moyennes annuelles de tazzitount (mm)..... | 21 |
| Figure 15: précipitations moyennes annuelles de tazzitount(mm)..... | 21 |
| Figure 16: précipitations moyennes mensuelles de Tourcht (mm)..... | 22 |
| Figure17: Les pluies moyennes saisonnière interannuelles à la station de Tourcht(2001-2018)..... | 23 |
| Figure 18: précipitations moyennes annuelles de Tourcht(mm)..... | 23 |
| Figure 19: précipitations moyennes mensuelles d'Agouns(mm)..... | 24 |
| Figure 20: précipitations moyennes saisonnières d'Agouns (mm)..... | 25 |
| Figure 21: précipitations moyennes annuelles d'Agouns (mm)..... | 25 |
| Figure 22: précipitations moyennes mensuelles de Tourdio (mm)..... | 26 |
| Figure 23: précipitations moyennes saisonnières de Tiouridio (mm)..... | 27 |
| Figure 24: précipitations moyennes annuelles de Tiouridio (mm)..... | 27 |
| Figure 25: précipitations saisonniers de l'ourika (mm)..... | 28 |
| Figure 26: débits moyens mensuels de Tazzitount (m3/s)..... | 29 |
| Figure 27: débits moyens annuels de Tazzitount (m3/s)..... | 29 |
| Figure 28: débits moyens saisonniers de Tazzitount (m3/s)..... | 30 |
| Figure 29: Histogramme montrant la relation entre les régimes de débits et de pluies à la station de Tazzitount (2001-2018)..... | 31 |
| Figure 30: Répartition élémentaire d'un Hydrogramme de crue..... | 33 |
| Figure 31: hydrogrammes des 4 événements de crue reconstitués à Tazzitount..... | 35 |
| Figure 32: Variables régissant le modèle pluie-débit..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Figure 33: Interface de la plateforme Hec-Hms..... | 37 |
| Figure 34: Temps de simulation offerts par l'outil..... | 38 |
| Figure 35: Bilan de la simulation sous HEC-HMS..... | 38 |
| Figure 36: Paramètres du débit de base..... | 39 |
| Figure 37: Paramètres de production..... | 39 |
| Figure 38: Paramètres de transfert..... | 40 |
| Figure 39: Schéma du modèle Global..... | 41 |
| Figure 40: Tracé de l'épisode du 21 novembre 2014..... | 41 |
| Figure 41: Tracé de l'épisode du 22 novembre 2014..... | 42 |
| Figure 42: Tracé de l'épisode du 28 novembre 2014..... | 42 |
| Figure 43: Tracé de l'épisode du 05 mai 2016..... | 43 |

Les tableaux:

| | |
|---|----|
| Tableau.1: Caractéristiques morphologique du bassin versant de l'Ourika à Tazzitount | 8 |
| Tableau2 : Répartition de la surface du bassin par tranche d'altitude..... | 10 |
| Tableau 3: Pluies moyennes mensuelles interannuelles à la station d'Amenzal (2001/2018)..... | 17 |
| Tableau 4: Pluies moyennes saisonnières interannuelles à la station d'Amenzal (2001/2018)..... | 18 |
| Tableau 5: Les pluies moyennes mensuelles interannuelles à la station d'Amenzal (2001-2018) | 19 |
| Tableau 6: Les pluies moyennes saisonnières interannuelles à la station d'Amenzal (2001/02-2019/20)..... | 20 |
| Tableau 7: Les pluies moyennes mensuelles interannuelles à la station d'Amenzal (20012018)..... | 22 |
| Tableau 8: Les pluies moyennes saisonnières interannuelles à la station de Tourcht (2001-2018)... | 22 |
| Tableau 9: les pluies moyennes mensuelles à la station d'Agouns (mm) (2001-2018)..... | 24 |
| Tableau 10: les pluies moyennes saisonnières à la station d'Agouns (mm) (2001-2018)..... | 26 |
| Tableau 11: les pluies moyennes mensuelles à la station de Tiouridio (mm) (2001-2018)..... | 22 |
| Tableau 12: les pluies moyennes saisonnières à la station de Tiouridio (mm) (2001-2018)..... | 23 |
| Tableau 13: les précipitations saisonnières du bassin versant de l'ourika..... | 24 |
| Tableau 14: Les pluies et les débits moyens mensuels interannuels d'Ourika à Tazzitount (2001-2014)..... | 30 |
| Tableau 15 : Les paramètres à calibrer de 3 épisodes..... | 43 |
| Tableau 16 : Les paramètres à calibrer l'épisode de 5 mai2016..... | 44 |

Références et bibliographiques:

Ahbari, A. 2013. Le bassin de Rhéraya: Modélisation pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique. Mémoire de fin d'études de Master. Université de Cadi Ayad , Faculté des sciences et techniques Marrakech, 101 p.

El Bahtari J., El Bahri F., 2008. Caractérisation et évaluation d'un système de prévision et d'Alerte au Crues: Exemple du "SPAC" du bassin de l'Ourika (Haut-Atlas, Maroc), Mémoire de fin d'études, Université de Cadi Ayyad, Faculté des sciences et technique Marrakech, 82 p.

Morabbi A., 2014. Modélisation Hydrologique des crues dans le bassin versant de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). Mémoire de fin d'études de Master, Université de Cadi Ayyad, Faculté des sciences et technique Marrakech, 63 p.

Saidi M. E., Daoudi L., Aresmouk M. L., Blali A., 2003. Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard : exemple de la crue du 17 aout 1995 dans la vallée de l'Ourika. Sécheresse n°2, vol. 14, mars 2003, pp.107-114.

Manuel d'utilisation du logiciel HEC-HMS

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optsee/bei/2/g24/essai2.htm .pg31-32>

Annexes:

21 Nov. 2014

| Temps | débit (m3/s) |
|----------|--------------|
| 00:10:00 | 15,8 |
| 00:20:00 | 14,1 |
| 00:30:00 | 15,6 |
| 00:40:00 | 17,1 |
| 00:50:00 | 11,8 |
| 01:00:00 | 15,3 |
| 01:10:00 | 15 |
| 01:20:00 | 14,7 |
| 01:30:00 | 15,3 |
| 01:40:00 | 16,4 |
| 01:50:00 | 19,1 |
| 02:00:00 | 19,8 |
| 02:10:00 | 19,45 |
| 02:20:00 | 19,1 |
| 02:30:00 | 19,1 |
| 02:40:00 | 21,2 |
| 02:50:00 | 24,8 |
| 03:00:00 | 27,9 |
| 03:10:00 | 31,43 |
| 03:20:00 | 34,96 |
| 03:30:00 | 38,5 |
| 03:40:00 | 38,5 |
| 03:50:00 | 44,4 |
| 04:00:00 | 52,8 |
| 04:10:00 | 50,6 |
| 04:20:00 | 45,5 |
| 04:30:00 | 50,925 |
| 04:40:00 | 56,35 |
| 04:50:00 | 61,775 |
| 05:00:00 | 67,2 |
| 05:10:00 | 70,15 |
| 05:20:00 | 73,1 |
| 05:30:00 | 81,8 |
| 05:40:00 | 83,65 |
| 05:50:00 | 85,5 |
| 06:00:00 | 96,1 |
| 06:10:00 | 104,2 |
| 06:20:00 | 108,3 |
| 06:30:00 | 106,25 |
| 06:40:00 | 104,2 |
| 06:50:00 | 100,15 |
| 07:00:00 | 96,1 |
| 07:10:00 | 89,5 |
| 07:20:00 | 90,36 |
| 07:30:00 | 91,22 |

22 Nov. 2014

| Temps | Débits (m3/s) |
|----------|---------------|
| 00:10:00 | 88,1 |
| 00:20:00 | 86,8 |
| 00:30:00 | 92,1 |
| 00:40:00 | 100,1 |
| 00:50:00 | 119,6 |
| 01:00:00 | 145,1 |
| 01:10:00 | 149,9 |
| 01:20:00 | 176,5 |
| 01:30:00 | 183,1 |
| 01:40:00 | 189,7 |
| 01:50:00 | 172,8 |
| 02:00:00 | 163,6 |
| 02:10:00 | 145,1 |
| 02:20:00 | 156,2 |
| 02:30:00 | 143,6 |
| 02:40:00 | 136,3 |
| 02:50:00 | 159,9 |
| 03:00:00 | 146,7 |
| 03:10:00 | 159,9 |
| 03:20:00 | 146,7 |
| 03:30:00 | 140,4 |
| 03:40:00 | 122,5 |
| 03:50:00 | 193,5 |
| 04:00:00 | 193,5 |
| 04:10:00 | 178,55 |
| 04:20:00 | 163,6 |
| 04:30:00 | 182,2 |
| 04:40:00 | 187,8 |
| 04:50:00 | 169,1 |
| 05:00:00 | 149,9 |
| 05:10:00 | 158 |
| 05:20:00 | 203,3 |
| 05:30:00 | 132,2 |
| 05:40:00 | 139,45 |
| 05:50:00 | 146,7 |
| 06:00:00 | 140,4 |
| 06:10:00 | 148,3 |
| 06:20:00 | 156,2 |
| 06:30:00 | 148,3 |
| 06:40:00 | 149,9 |
| 06:50:00 | 156,2 |
| 07:00:00 | 146,7 |
| 07:10:00 | 153 |
| 07:20:00 | 139 |
| 07:30:00 | 142 |

28 Nov. 2014

| temps | Débit m3/s |
|----------|------------|
| 00:10:00 | 9,7 |
| 00:20:00 | 9,2 |
| 00:30:00 | 9,2 |
| 00:40:00 | 9,5 |
| 00:50:00 | 9,2 |
| 01:00:00 | 9,1 |
| 01:10:00 | 8,9 |
| 01:20:00 | 9,4 |
| 01:30:00 | 9,1 |
| 01:40:00 | 9,1 |
| 01:50:00 | 9,1 |
| 02:00:00 | 9,2 |
| 02:10:00 | 9,4 |
| 02:20:00 | 9,2 |
| 02:30:00 | 9,5 |
| 02:40:00 | 9,4 |
| 02:50:00 | 9,1 |
| 03:00:00 | 9,1 |
| 03:10:00 | 8,9 |
| 03:20:00 | 8,9 |
| 03:30:00 | 8,9 |
| 03:40:00 | 9,2 |
| 03:50:00 | 9,2 |
| 04:00:00 | 8,6 |
| 04:10:00 | 8,9 |
| 04:20:00 | 8,9 |
| 04:30:00 | 8,7 |
| 04:40:00 | 8,6 |
| 04:50:00 | 9,4 |
| 05:00:00 | 8,7 |
| 05:10:00 | 8,9 |
| 05:20:00 | 9,1 |
| 05:30:00 | 9,1 |
| 05:40:00 | 9,1 |
| 05:50:00 | 9,4 |
| 06:00:00 | 9,2 |
| 06:10:00 | 8,7 |
| 06:20:00 | 8,9 |
| 06:30:00 | 8,4 |
| 06:40:00 | 8,9 |
| 06:50:00 | 8,7 |
| 07:00:00 | 8,9 |
| 07:10:00 | 8,7 |
| 07:20:00 | 9,1 |
| 07:30:00 | 8,6 |

crue-5mai2016

| Temps | débit (m3/s) |
|----------|--------------|
| 00:10:00 | 46,7 |
| 00:20:00 | 45,4 |
| 00:30:00 | 44,1 |
| 00:40:00 | 42,3 |
| 00:50:00 | 42,9 |
| 01:00:00 | 44,1 |
| 01:10:00 | 43,5 |
| 01:20:00 | 48 |
| 01:30:00 | 52,6 |
| 01:40:00 | 61,2 |
| 01:50:00 | 68,4 |
| 02:00:00 | 85,8 |
| 02:10:00 | 91,5 |
| 02:20:00 | 97,2 |
| 02:30:00 | 111,6 |
| 02:40:00 | 96,3 |
| 02:50:00 | 84,1 |
| 03:00:00 | 82,4 |
| 03:10:00 | 91,9 |
| 03:20:00 | 78,3 |
| 03:30:00 | 74,45 |
| 03:40:00 | 70,6 |
| 03:50:00 | 87,5 |
| 04:00:00 | 87,5 |
| 04:10:00 | 84,9 |
| 04:20:00 | 78,3 |
| 04:30:00 | 83,3 |
| 04:40:00 | 75,2 |
| 04:50:00 | 68,4 |
| 05:00:00 | 71,4 |
| 05:10:00 | 74,4 |
| 05:20:00 | 69,9 |
| 05:30:00 | 63,3 |
| 05:40:00 | 64,7 |
| 05:50:00 | 59,8 |
| 06:00:00 | 59,1 |
| 06:10:00 | 61,2 |
| 06:20:00 | 61,2 |
| 06:30:00 | 57,1 |
| 06:40:00 | 56,4 |
| 06:50:00 | 52,6 |
| 07:00:00 | 58,4 |
| 07:10:00 | 55,8 |
| 07:20:00 | 53,9 |
| 07:30:00 | 53,9 |

| | | | | | | | |
|----------|---------|----------|-------|----------|------|----------|------|
| 07:40:00 | 92,1 | 07:40:00 | 109,7 | 07:40:00 | 8,9 | 07:40:00 | 55,1 |
| 07:50:00 | 97,4 | 07:50:00 | 119,6 | 07:50:00 | 9,4 | 07:50:00 | 53,9 |
| 08:00:00 | 92,1 | 08:00:00 | 121 | 08:00:00 | 9,9 | 08:00:00 | 53,2 |
| 08:10:00 | 86,8 | 08:10:00 | 118,2 | 08:10:00 | 9,9 | 08:10:00 | 52,6 |
| 08:20:00 | 98,7 | 08:20:00 | 121 | 08:20:00 | 11,3 | 08:20:00 | 50,6 |
| 08:30:00 | 104,2 | 08:30:00 | 119,6 | 08:30:00 | 15,3 | 08:30:00 | 51,9 |
| 08:40:00 | 106,9 | 08:40:00 | 100,1 | 08:40:00 | 25,6 | 08:40:00 | 55,8 |
| 08:50:00 | 118,2 | 08:50:00 | 106,9 | 08:50:00 | 35 | 08:50:00 | 51,9 |
| 09:00:00 | 123,9 | 09:00:00 | 111 | 09:00:00 | 44,4 | 09:00:00 | 50,6 |
| 09:10:00 | 118,15 | 09:10:00 | 119,6 | 09:10:00 | 45 | 09:10:00 | 50 |
| 09:20:00 | 112,4 | 09:20:00 | 128,2 | 09:20:00 | 45,5 | 09:20:00 | 47,3 |
| 09:30:00 | 105,5 | 09:30:00 | 101,4 | 09:30:00 | 47,5 | 09:30:00 | 48 |
| 09:40:00 | 101,034 | 09:40:00 | 118,2 | 09:40:00 | 45,8 | 09:40:00 | 48 |
| 09:50:00 | 96,568 | 09:50:00 | 108,3 | 09:50:00 | 44,1 | 09:50:00 | 48,7 |
| 10:00:00 | 92,1 | 10:00:00 | 122,5 | 10:00:00 | 42,4 | 10:00:00 | 47,3 |
| 10:10:00 | 96,13 | 10:10:00 | 121 | 10:10:00 | 39,4 | 10:10:00 | 45,4 |
| 10:20:00 | 100,16 | 10:20:00 | 104,2 | 10:20:00 | 42,4 | 10:20:00 | 45,4 |
| 10:30:00 | 104,2 | 10:30:00 | 109,7 | 10:30:00 | 39,2 | 10:30:00 | 44,1 |
| 10:40:00 | 105,1 | 10:40:00 | 104,9 | 10:40:00 | 36,1 | 10:40:00 | 42,3 |
| 10:50:00 | 106 | 10:50:00 | 100,1 | 10:50:00 | 32,9 | 10:50:00 | 41,2 |
| 11:00:00 | 106,9 | 11:00:00 | 92,8 | 11:00:00 | 30,3 | 11:00:00 | 40 |
| 11:10:00 | 94,7 | 11:10:00 | 85,5 | 11:10:00 | 32,9 | 11:10:00 | 40 |
| 11:20:00 | 94,7 | 11:20:00 | 81,15 | 11:20:00 | 32,6 | 11:20:00 | 38,3 |
| 11:30:00 | 84,3 | 11:30:00 | 76,8 | 11:30:00 | 32,4 | 11:30:00 | 39,4 |
| 11:40:00 | 79,3 | 11:40:00 | 78,1 | 11:40:00 | 32,1 | 11:40:00 | 38,8 |
| 11:50:00 | 72,1 | 11:50:00 | 69,6 | 11:50:00 | 31,9 | 11:50:00 | 37,7 |
| 12:00:00 | 64,9 | 12:00:00 | 73,1 | 12:00:00 | 31,6 | 12:00:00 | 36,1 |
| 12:10:00 | 66,05 | 12:10:00 | 69,6 | 12:10:00 | 31,4 | 12:10:00 | 35,5 |
| 12:20:00 | 67,2 | 12:20:00 | 74,3 | 12:20:00 | 31,1 | 12:20:00 | 33,9 |
| 12:30:00 | 67,2 | 12:30:00 | 74,3 | 12:30:00 | 32,9 | 12:30:00 | 33,9 |
| 12:40:00 | 70,8 | 12:40:00 | 69,6 | 12:40:00 | 32,9 | 12:40:00 | 31,3 |
| 12:50:00 | 64,9 | 12:50:00 | 63,7 | 12:50:00 | 32 | 12:50:00 | 34,4 |
| 13:00:00 | 63,7 | 13:00:00 | 60,3 | 13:00:00 | 32,9 | 13:00:00 | 35,5 |
| 13:10:00 | 58,75 | 13:10:00 | 60,3 | 13:10:00 | 32,9 | 13:10:00 | 33,9 |
| 13:20:00 | 53,8 | 13:20:00 | 62,6 | 13:20:00 | 34,8 | 13:20:00 | 35 |
| 13:30:00 | 52,8 | 13:30:00 | 53,8 | 13:30:00 | 34,8 | 13:30:00 | 34,4 |
| 13:40:00 | 53,8 | 13:40:00 | 52,8 | 13:40:00 | 30,3 | 13:40:00 | 35 |
| 13:50:00 | 50,6 | 13:50:00 | 50,6 | 13:50:00 | 27,9 | 13:50:00 | 35,5 |
| 14:00:00 | 49,6 | 14:00:00 | 59,2 | 14:00:00 | 28,7 | 14:00:00 | 34,4 |
| 14:10:00 | 52,8 | 14:10:00 | 48,5 | 14:10:00 | 29,5 | 14:10:00 | 38,8 |
| 14:20:00 | 50,6 | 14:20:00 | 52,8 | 14:20:00 | 30,3 | 14:20:00 | 38,3 |
| 14:30:00 | 54,9 | 14:30:00 | 58,2 | 14:30:00 | 31,1 | 14:30:00 | 36,6 |
| 14:40:00 | 50,6 | 14:40:00 | 49,6 | 14:40:00 | 32 | 14:40:00 | 37,2 |
| 14:50:00 | 48,2 | 14:50:00 | 52,8 | 14:50:00 | 31,6 | 14:50:00 | 37,7 |
| 15:00:00 | 45,8 | 15:00:00 | 52,8 | 15:00:00 | 31,1 | 15:00:00 | 36,6 |
| | | 15:10:00 | 48,5 | 15:10:00 | 30,8 | 15:10:00 | 36,1 |
| | | 15:20:00 | 49,6 | 15:20:00 | 30,6 | 15:20:00 | 36,6 |
| | | 15:30:00 | 53,8 | 15:30:00 | 30,3 | 15:30:00 | 36,6 |
| | | 15:40:00 | 48,5 | 15:40:00 | 30,3 | 15:40:00 | 35 |
| | | 15:50:00 | 53,8 | 15:50:00 | 30,3 | 15:50:00 | 35,5 |

| | | | | | |
|----------|-------|----------|------|----------|------|
| 16:00:00 | 50,6 | 16:00:00 | 32 | 16:00:00 | 36,1 |
| 16:10:00 | 50,6 | 16:10:00 | 31,2 | 16:10:00 | 36,1 |
| 16:20:00 | 46,5 | 16:20:00 | 30,3 | 16:20:00 | 36,1 |
| 16:30:00 | 45,5 | 16:30:00 | 29,5 | 16:30:00 | 36,6 |
| 16:40:00 | 42,4 | 16:40:00 | 29,5 | 16:40:00 | 37,2 |
| 16:50:00 | 40,3 | 16:50:00 | 28,7 | 16:50:00 | 37,2 |
| 17:00:00 | 39,4 | 17:00:00 | 24,8 | 17:00:00 | 37,2 |
| 17:10:00 | 39,4 | 17:10:00 | 24,8 | 17:10:00 | 37,2 |
| 17:20:00 | 37,5 | 17:20:00 | 25,6 | 17:20:00 | 37,7 |
| 17:30:00 | 37,05 | 17:30:00 | 24,8 | 17:30:00 | 37,2 |
| 17:40:00 | 36,6 | 17:40:00 | 25,6 | 17:40:00 | 37,2 |
| 17:50:00 | 34,8 | 17:50:00 | 24 | 17:50:00 | 36,6 |
| 18:00:00 | 29,5 | 18:00:00 | 20,5 | 18:00:00 | 36,1 |
| 18:10:00 | 32 | 18:10:00 | 22,5 | 18:10:00 | 36,6 |
| 18:20:00 | 32,9 | 18:20:00 | 22,3 | 18:20:00 | 36,1 |
| 18:30:00 | 32,9 | 18:30:00 | 22,1 | 18:30:00 | 36,6 |
| 18:40:00 | 32,9 | 18:40:00 | 21,9 | 18:40:00 | 38,3 |
| 18:50:00 | 30,3 | 18:50:00 | 21,7 | 18:50:00 | 37,7 |
| 19:00:00 | 25,6 | 19:00:00 | 21,4 | 19:00:00 | 37,2 |
| 19:10:00 | 27,9 | 19:10:00 | 21,2 | 19:10:00 | 35 |
| 19:20:00 | 33,9 | 19:20:00 | 19,8 | 19:20:00 | 35,5 |
| 19:30:00 | 25,6 | 19:30:00 | 20,5 | 19:30:00 | 38,8 |
| 19:40:00 | 29,5 | 19:40:00 | 18,4 | 19:40:00 | 39,4 |
| 19:50:00 | 28,7 | 19:50:00 | 14,7 | 19:50:00 | 38,3 |
| 20:00:00 | 27,2 | 20:00:00 | 15,8 | 20:00:00 | 40,6 |
| 20:10:00 | 27,9 | 20:10:00 | 15,8 | 20:10:00 | 41,8 |
| 20:20:00 | 27,2 | 20:20:00 | 14,7 | 20:20:00 | 42,3 |
| 20:30:00 | 24 | 20:30:00 | 15,8 | 20:30:00 | 42,9 |
| 20:40:00 | 22,5 | 20:40:00 | 14,1 | 20:40:00 | 43,5 |
| 20:50:00 | 21,8 | 20:50:00 | 13 | 20:50:00 | 44,7 |
| 21:00:00 | 19,1 | 21:00:00 | 13 | 21:00:00 | 41,8 |
| 21:10:00 | 22,5 | 21:10:00 | 11,8 | 21:10:00 | 43,5 |
| 21:20:00 | 21,8 | 21:20:00 | 13,5 | 21:20:00 | 42,3 |
| 21:30:00 | 21,2 | 21:30:00 | 12,4 | 21:30:00 | 40 |
| 21:40:00 | 22,5 | 21:40:00 | 12,1 | 21:40:00 | 41,8 |
| 21:50:00 | 24 | 21:50:00 | 11,8 | 21:50:00 | 39,4 |
| 22:00:00 | 24 | 22:00:00 | 12,4 | 22:00:00 | 41,2 |
| 22:10:00 | 19,1 | 22:10:00 | 13,5 | 22:10:00 | 41,8 |
| 22:20:00 | 24 | 22:20:00 | 13,5 | 22:20:00 | 41,8 |
| 22:30:00 | 28,7 | 22:30:00 | 11,8 | 22:30:00 | 42,3 |
| 22:40:00 | 35,7 | 22:40:00 | 10,7 | 22:40:00 | 40,6 |
| 22:50:00 | 31,1 | 22:50:00 | 10,7 | 22:50:00 | 39,4 |
| 23:00:00 | 34,8 | 23:00:00 | 13,5 | 23:00:00 | 42,3 |
| 23:10:00 | 36,6 | 23:10:00 | 13 | 23:10:00 | 41,2 |
| 23:20:00 | 39,4 | 23:20:00 | 14,7 | 23:20:00 | 40 |
| 23:30:00 | 34,8 | 23:30:00 | 15,3 | 23:30:00 | 37,7 |
| 23:40:00 | 34,8 | 23:40:00 | 15,8 | 23:40:00 | 41,2 |
| 23:50:00 | 36,6 | 23:50:00 | 18,4 | 23:50:00 | 40,6 |
| 24:00:00 | 30,3 | 24:00:00 | 20,5 | 24:00:00 | 42,9 |