كلية العلوم والتقنيات - مراكش
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES - MARRAKECH
جامعة القاضي عياض
UNIVERSITÉ CADI AYYAD

UNIVERSITE CADI AAYAD

Faculté des sciences et techniques de Marrakech

Département des sciences de la terre

.....

Mémoire de Fin d'études

License Science et Techniques

Filière : Eau et Environnement

Détermination des intensités des précipitations dans le Haut Sebou par la méthode IDF (Intensité-Durée-Fréquence)

Réalisé par :

- **Amine ZAHOU**
- **Hiba ZYATI**
- **Hanane RADOUANE**

Soutenu le 19 juin 2023, devant la commission d'examen composée de :

- **Pr. Mohamed Elmehdi SAIDI**	**FSTG Marrakech (Encadrant)**
- **Pr. Jalal MOUSTADRAF**	**FSTG Marrakech (Examinateur)**

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

Tous d'abord, nous remercions le bon dieu de nous avoir donné le courage, la patience et la volonté afin d'accomplir ce travail et sans lequel n'aurait jamais le mener à bonne fin.

Nous voudrions, dans un premier temps remercier notre cher encadrant Monsieur ***MOHAMED ELMEHDI SAIDI,*** *et nous tenons compte à exprimer notre profondeur gratitude et nos sincères remerciements pour votre expertise, vos conseils et votre précieux soutien et contribution tout au long de notre projet, ainsi nous avons eu l'honneur d'être parmi vos élèves ; et de bénéficier de votre riche enseignement.*

En outre, nos remerciements vont également désigner pour les membres du jury Monsieur ***Jalal MOUSTADRAF*** *d'avoir accepté de juger notre projet.*

En fin, nous tenons à remercier chaleureusement tous nos ***parents,*** *nos proches et tous ceux qui de près ou de loin, n'ont apporté leurs sollicitudes pour achever ce travail.*

Résumé

Les bassins versants servent à stocker l'eau en plein air dans les nappes superficielles, généralement en hiver. Le bassin de Sebou est considéré comme l'un des plus importants réservoirs d'eau au Maroc, grâce à sa grande superficie de 40 000 km2 ainsi qu'à ses caractéristiques géologiques, hydrologiques et climatiques.

Cette étude porte sur la partie supérieure du bassin de Sebou, dont le climat est méditerranéen à subhumide. Cela explique l'enrichissement de la couverture végétale forestière et l'abondance des ressources en eau superficielle et souterraine. Le bassin versant du Haut Sebou est caractérisé par de faibles pentes, allant des hautes aux basses altitudes, ce qui influence le comportement hydrologique du bassin et donc le réseau hydrographique. L'objectif de ce travail est d'évaluer le risque de précipitations pluviales dû à l'augmentation de l'intensité des précipitations dans le bassin du Haut Sebou et de réfléchir aux précautions à prendre en cas de catastrophes environnementales.

À cet égard, nous avons étudié 4 stations qui reçoivent des quantités différentes de pluie, parfois similaires, en utilisant des données de précipitations journalières. Nous avons ensuite établi des graphiques résumant les variations annuelles, mensuelles et saisonnières.

Pour répondre à cette problématique, nous avons adopté la méthode IDF (Intensité-Durée-Fréquence pendant 17 ans provenant de 4 stations pluviométriques de l'aval à l'amont : Azzaba, Timdrine, M'dez et Ait khabache, situées à des altitudes différentes de 516 à 1478 m dans le Moyen Atlas.

Les résultats montrent des intensités de précipitations de différentes périodes de retour qui augmentent de Azzaba en aval à Ait Khabache en amont (de 25 à 54 mm/h comme intensité centennale).

Ces fortes intensités appellent à prendre le risque pluvial et les risques associés en considération dans les plans d'aménagement de ces régions.

Table des Matières

Liste des figures : *5*
Listes des tableaux : *6*
Introduction Générale : *7*
Partie 1 : Présentation du bassin versant Haut Sebou *8*
Chapitre 1 : Généralités : 9
Chapitre 2 : Délimitation et caractéristiques du Bassin Haut Sebou : 10
I. Délimitation du bassin versant Haut Sebou : 10
II. Les caractéristiques générales de Haut Sebou : 10
1. La morphologie : 10
2. Le réseau hydrographique : 11
3. La géologie : 12
4. L'hypsométrie : 14
5. Les pentes : 14
6. Les précipitations : 15
6.1 La variation annuelle : 16
6.2 La variation mensuelle : 17
6.3 La variation saisonnière : 18
7. Le débit : 18
7.1 La variation interannuelle : 20
7.2 La variation mensuelle : 20
7.3 La variation saisonnière : 21
8. Les ressources en eau : 22
9. La végétation : 22
Partie 2 : La méthode IDF (Intensité-Durée-Fréquence) *24*
Chapitre 1 : Présentation de la méthode IDF (Intensité-Durée-Fréquence) : 25
I. Historique de La méthode IDF : 25
II. Principe de la méthode IDF : 25
Chapitre 2 : L'outil d'Analyse fréquentielle « HYFRAN » : 27
I. Principe du programme HYFRAN : 27
II. Les lois de distribution statistiques : 28
1. La loi GEV : 28
2. Loi log-normal : 28
3. Loi de Gumbel : 28
Partie 3 : Applications de la méthode IDF dans le Haut Sebou *29*
Chapitre 1 : Haut Sebou et méthodologie de travail IDF : 30

I. Présentation des stations pluviométriques : 30
II. Les données utilisées : 31
1. Extraction des pluies maxima : 31
2. Application sur HYFRAN : 33
3. Ajustement statistiques des séries des pluies maxima : 37
4. Les paramètres de Montana et extrapolation des courbes IDF : 42
5. Les intensités centennales des pluies en (mm/h) : 45
6. Discussions et interprétation : 46
Conclusion : ***47***
Références Bibliographiques : ***48***
Annexes : ***49***

Liste des figures :

Figure 1: Découpage administratif du bassin de Sebou, ABHS 2011. 9
Figure 2: Carte Réseau hydrographique bassin haut Sebou. 12
Figure 3: Carte structurale du bassin versant du Haut Sebou. Source (Qadem, 2015). 13
Figure 4: Carte des altitudes du bassin Haut Sebou. 14
Figure 5: Carte des pentes du bassin haut Sebou. 15
Figure 6: Variabilité des précipitations annuelles des 4 stations entre 2000 et 2017. 16
Figure 7: Variabilité des précipitations moyenne mensuelles des 4 stations entre 2000 et 2017. 17
Figure 8: Variabilité des précipitations saisonnière des 4 stations entre 2000et 2017. 18
Figure 9: Variabilité mensuelle interannuelle des débits dans la station Azzaba durant17 années. 20
Figure 10: La variabilité mensuel des débits dans le bassin versant du haut Sebou. 20
Figure 11: La variabilité saisonnière des débits dans le bassin versant de haut Sebou. 21
Figure 12: Groupement végétaux dans le bassin du Haut Sebou, Qadem 2015. 23
Figure 13: Représentation schématique des courbes IDF (AMENASRIA, 2016). 26
Figure 14: Représentation du logiciel HYFRAN. 27
Figure 15: Localisation des stations pluviométriques (Qadem 2015). 30
Figure 16: Règlement du logiciel HYFRAN. 34
Figure 17: Insertion des données sur HYFRAN. 34
Figure 18: Choix des lois à tester sur HYFRAN. 35
Figure 19: Tableau de comparaison d'ajustement des lois. 35
Figure 20: Extraction des valeurs des précipitations des périodes de retour de (2, 10, 50,100ans). 36
Figure 21: Courbe de variation des précipitations en fonction de ces fréquences de non-dépassement. 37
Figure 22: Courbes IDF de la station Ait khabache de durées 1, 2, 3 et 4 jours pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans. 38
Figure 23: Courbes IDF de la station M'dez de durées 1, 2, 3 et 4 jours pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans. 39
Figure 24: Courbes IDF de la station Timdrine de durées 1, 2, 3 et 4 jours pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans. 40
Figure 25: Courbes IDF de la station Azzaba de durées 1, 2, 3 et 4 jours pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans. 41
Figure 26: Courbes IDF de la station AIT KHABACH de durées 1, 6, 12 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 10, 50, et 100 ans. 42
Figure 27: La Courbe IDF de la station M'dez de durées 1, 6, 12 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans. 43
Figure 28: La Courbe IDF de la station Timdrine de durées 1, 6, 12 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans. 44
Figure 29: Courbes IDF de la station Azzaba de durées 1, 6, 12 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 10, 50, et 100 ans. 44

Listes des tableaux :

Tableau 1: les caractéristiques de forme du bassin Haut Sebou. 11
Tableau 2: Les données hydrologiques et régimes des débits. 19
Tableau 3: Localisation des 4 stations retenues..... 30
Tableau 4: Pluie maxima de la station Ait khabache de la période 2000/2001 à 2016/2017. 31
Tableau 5: Pluie maxima de la station Azzaba de la période 2000/2001 à 2016/2017..... 31
Tableau 6: Pluie maxima de la station Pont M'dez de la période 2000/2001 à 2016/2017. 32
Tableau 7: Pluie maxima de la station Timdrine la période 2000/2000 à 2016/2017. 33
Tableau 8: Les précipitations aux périodes de retour 2 ans ,10, 50 et 100 ans obtenues par HYFRAN dans la station Ait khabache. 38
Tableau 9: Les intensités des précipitations de 1, 2, 3 et 4 jours dans la station Ait khabache. 38
Tableau 10: Hauteurs des précipitations de périodes de retour 2,10, 50 et 100 à Pont M'dez. 39
Tableau 11: Les intensités des précipitations de 1, 2, 3 et 4 jours dans la station M'dez. 39
Tableau 12: Les précipitations aux périodes de retour 2 ans ,10, 50 et 100 ans obtenues par HYFRAN dans la station Timdrine. 40
Tableau 13: Les intensités des précipitations de 1 jour, 2, 3 et 4 jours dans la station Timdrine. 40
Tableau 14: Hauteurs des précipitations de périodes de retour 2,10, 50 et 100 ans à Azzaba. 41
Tableau 15: intensités des précipitations de 1, 2, 3 et 4 jours dans la station Azzaba. 41
Tableau 16: intensités pluviométriques de durées 1, 6 et 12 heures à Ait khabache 42
Tableau 17: Les intensités pluviométriques de durées 1, 6 et 12 heures à Pont M'dez 43
Tableau 18: Les intensités pluviométriques de durées 1 heure, 6 et 12 heures à Timdrine..... 43
Tableau 19: Les intensités pluviométriques de durées 1 à 96 heures à Azzaba..... 44
Tableau 20: Intensités des pluies centennales en (mm/h) issues des données des stations pluviométriques. 45

Introduction Générale :

Les précipitations sont des phénomènes météorologiques dus à la condensation d'humidité dans l'atmosphère, ce qui donne naissance aux eaux de surface. Elles sont plus abondantes dans les régions méditerranéennes ou subhumides, tandis que dans les régions arides, elles sont faibles et rares en raison du climat.

Le Maroc est fortement vulnérable à la sécheresse. L'occurrence de périodes plus ou moins longues et successives de sécheresse est l'une des caractéristiques de l'instabilité des ressources en eau du pays, comme cela a été le cas durant les années 1944-1945, 1982-1983, 1994-1995, 1998-2000 et 2006-2007 et les successions d'années sèches 1980- 1985, 1991-1995 et 1998-2001 [1, p. 3].

Par ailleurs, le Maroc est sujet à des crues qui causent des dégâts importants aux infrastructures ainsi qu'à l'agriculture en raison de l'augmentation du taux de précipitations pendant les périodes pluvieuses.

En tant que mesure d'adaptation, le Maroc a opté pour le Plan National de Protection contre les Inondations (PNI) qui comprend un volet consacré au diagnostic des causes de ces phénomènes, ainsi qu'un autre volet portant sur les opérations de protection, dans le but de planifier les différentes mesures permettant d'y faire face [1, p. 4].

Notre sujet a pour objectif de présenter la méthode de modélisation des précipitations (IDF) et d'étudier numériquement et graphiquement sa capacité à reproduire les événements extrêmes pour différentes périodes de retour (2 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans) dans 4 stations dispersées dans le Haut Sebou. Nous avons choisi certaines stations en amont et d'autres en aval dans le but d'expliquer les différences d'intensité des précipitations par rapport à l'emplacement des stations pluviométriques.

Partie 1 :

Présentation du bassin versant du Haut Sebou

Chapitre 1 : Généralités :

Le bassin versant du Sebou est un réservoir d'eau qui alimente une grande partie du Maroc, s'étendant sur une superficie de 40 000 km². Ce bassin représente le tiers des écoulements superficiels du Maroc, avec son bassin versant supérieur situer au sud-est de Sebou, couvrant une superficie de 4 678 km² [2].

Le Haut Sebou est situé dans le Moyen-Atlas, avec une longitude comprise entre 4°05 et 5°5 à l'ouest, et une latitude entre 33° et 33°5 au nord. Il se caractérise par un drainage d'environ 10% des écoulements superficiels moyens du Maroc [3, p. 45/46].

Ce bassin est délimité par :

- Le Rif au nord
- L'océan Atlantique à l'ouest ;
- Le Moyen-Atlas et la Meseta au sud ;
- Le couloir Fès-Taza à l'est [2].

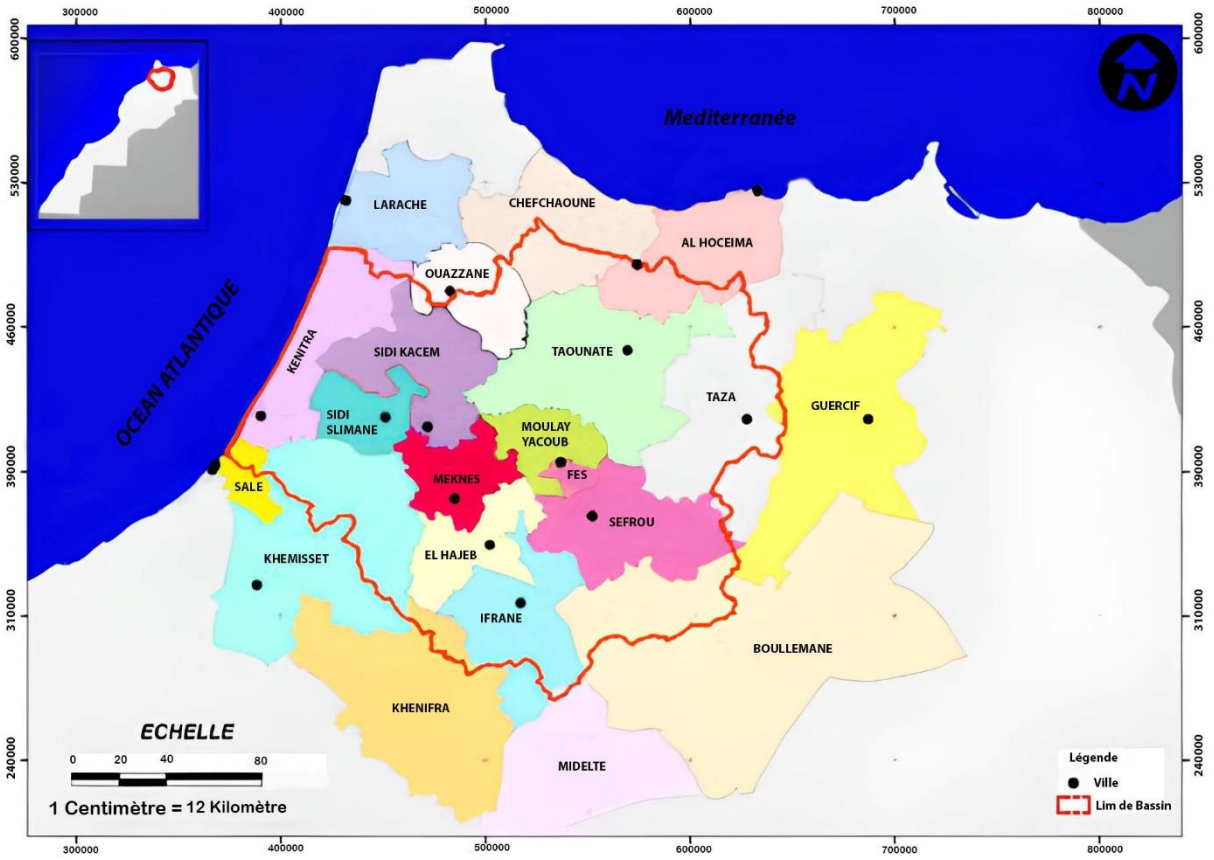


Figure 1: Découpage administratif du bassin de Sebou, ABHS 2011.

Nous allons nous concentrer sur notre zone d'étude, le Haut Sebou, qui se trouve dans le couloir Fès-Taza. Cette région est définie par un ensemble de caractéristiques géologiques, morphologiques, climatiques et hydrologiques.

Chapitre 2 : Délimitation et caractéristiques du Bassin du Haut Sebou :

I. Délimitation du bassin versant du Haut Sebou :

La délimitation d'un bassin versant est obtenue en regroupant l'ensemble des bassins versants unitaires présents en amont. Cela implique la détermination des caractéristiques morphologiques telles que la surface, le périmètre, l'indice de compacité, le rectangle équivalent, le réseau hydrographique, ainsi que les altitudes et le relief. Nous nous appuyons sur le programme Arc GIS qui facilite cette opération en utilisant des données satellitaires telles que la carte MNT (Modèle Numérique de Terrain) et les coordonnées X, Y de l'exutoire.

II. Les caractéristiques générales du Haut Sebou :

1. La morphologie :

Les caractéristiques de forme des bassins versants sont définies comme suit :

- **La surface :** est la portion du plan délimitée par la ligne de crête ou le contour du bassin. Elle peut être mesurée à l'aide d'un planimètre ou en utilisant la méthode des petits carrés. La surface est généralement exprimée en unités de surface (par exemple, kilomètres carrés) [4].
- **Le périmètre :** est la longueur de la ligne de contour du bassin et est généralement exprimé en kilomètres. On peut mesurer le périmètre à l'aide d'un curvimètre. Dans certaines applications, on peut représenter le périmètre stylisé du bassin en lissant son contour [4].
- **L'indice de compacité** ou de Gravelius est utilisé par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant. Il correspond au rapport entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle ayant la même surface [4].
- **Le rectangle équivalent :** Cette notion a été introduite afin de pouvoir comparer les bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement [4].

Tableau 1: les caractéristiques de forme du bassin Haut Sebou.

Critère	Formule	Résultat
Surface (S)	_____	4719 ,63 Km^2
Périmètre (P)	_____	485,44 Km
Indice de Compacité (Kc)	$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28\frac{P}{\sqrt{A}}$	1,97
Réctangle équivalent	$L = \frac{K_G\sqrt{A}}{1.12}\left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{k_G}\right)^2}\right]$	220 Km
	$I = \frac{K_G\sqrt{A}}{1.12}\left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{k_G}\right)^2}\right]$	21 Km

D'après les résultats obtenus dans le tableau 1, on conclut que la forme de notre bassin versant est très allongée, avec une longueur qui est 9 fois plus grande que la largeur.

2. Le réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau naturels, artificiels, permanents ou temporaires assurant l'écoulement superficiel dans le bassin versant, il dépend de la lithologie, la structure de relief, le climat [5, p. 63].

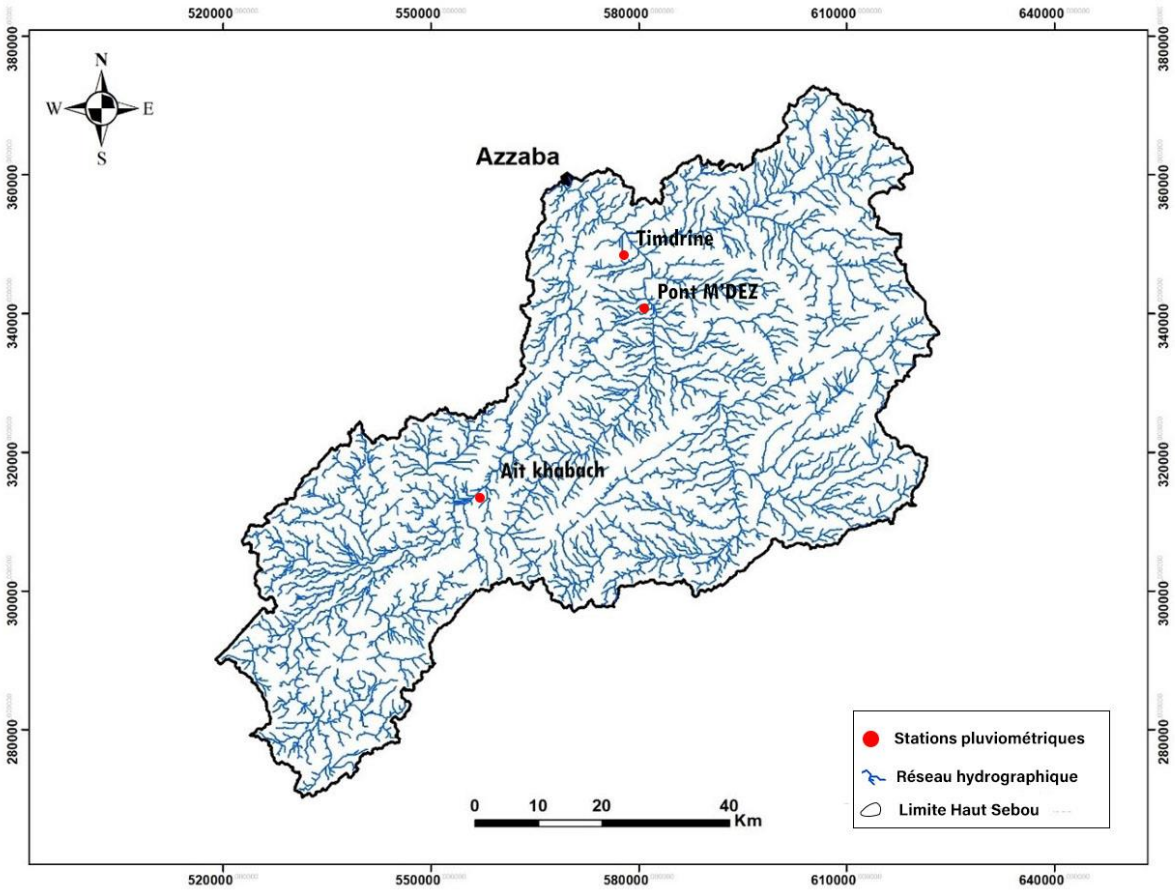


Figure 2: Carte Réseau hydrographique bassin haut Sebou.

Le réseau hydrographique montre clairement les contrastes de milieux caractérisant le bassin du Haut Sebou, dans lequel on remarque une différence entre l'amont et l'aval ainsi qu'entre les deux rives : **En amont**, un réseau d'affluents faible dans le causse, qui indique l'écoulement souterrains prédominants, **en aval**, un réseau hydrographique dense bénéficiant du môle pluviométrique du massif de Bou Iblane et du complexe des sources(Ain Sebou, Ain Timedrine et Ain Ouamander), Ceci favorise la concentration et la pérennité des écoulements superficiels.[5, p. 63]

3. La géologie :

Du point de vue géologique, le bassin versant du Haut Sebou est situé dans le Moyen-Atlas (Fig.2), en contact avec le causse moyen-atlasique au nord et le Moyen-Atlas plissé au sud. Il traverse l'Afrique du Nord d'ouest en est, s'étendant de l'Atlantique jusqu'à la Méditerranée centrale le long du parallèle 34° de latitude nord [6, p. 2].

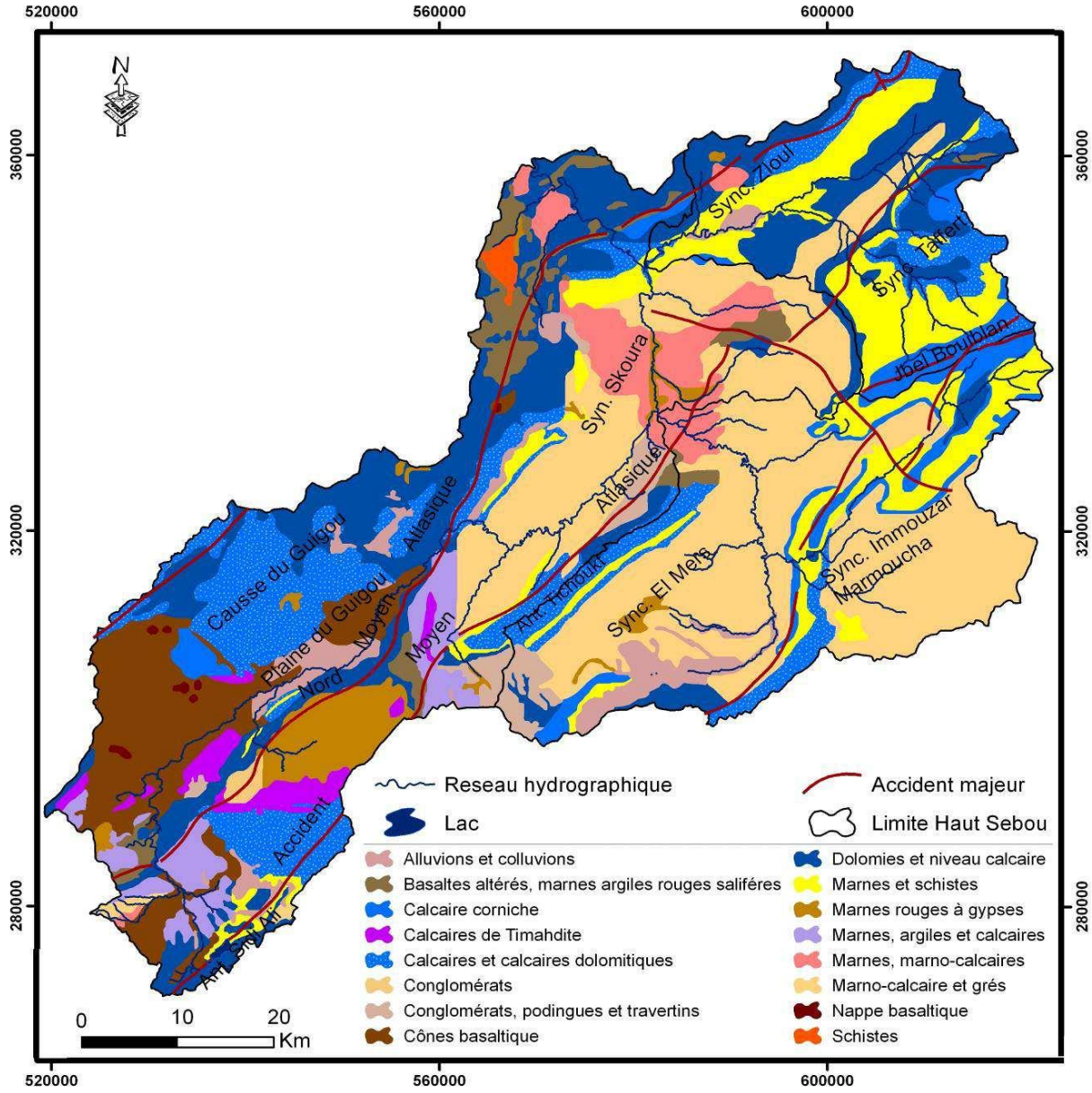


Figure 3: Carte structurale du bassin versant du Haut Sebou. Source (Qadem, 2015).

Le Moyen-Atlas est essentiellement caractérisé par des roches calcaires et la présence abondante de phénomènes karstiques. Plus précisément, dans le bassin du Haut Sebou, on trouve des affleurements de formations carbonatées tels que la dolomie et le calcaire sur la rive gauche, et du marno-calcaire et du grès sur la rive droite [6, p. 2].

En résumé, le bassin du Haut Sebou est un bassin sédimentaire qui s'est formé au cours de l'histoire géologique du Maroc,Il se caractérise par une succession de formations géologiques jurassique et triasique comprenant des schistes, des quartzites, des calcaires, des dolomies, des argiles, des basaltes, des grès et des conglomérats [6, p. 2].

4. L'hypsométrie :

Les altitudes du Haut Sebou varient entre 490 et 2000 mètres, en diminuant du sud vers le nord. Cependant, les altitudes des sous-bassins diffèrent au sein des dépressions centrales (figure 3). On peut également observer une forte hétérogénéité dans ces altitudes. En amont, le sous-bassin de Guigou est le plus élevé, avec une altitude moyenne de 1950 mètres. Cette configuration topographique favorise les chutes de neige [5, p. 48].

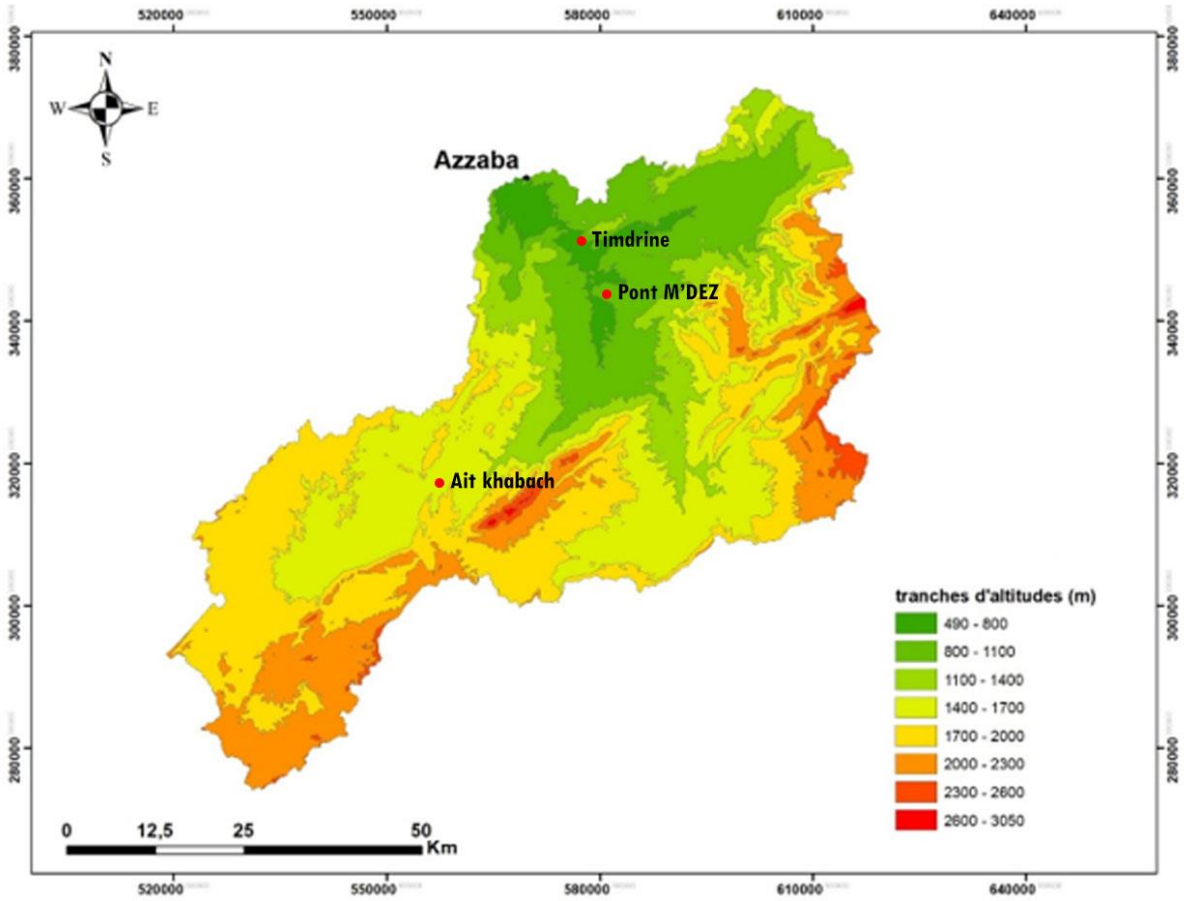


Figure 4: Carte des altitudes du bassin Haut Sebou.

5. Les pentes :

Les pentes des bassins versants sont des critères importants, car elles déterminent la vitesse d'écoulement et donc l'érosion. Ce sont des facteurs qui influencent la structure des réseaux hydrographiques, c'est-à-dire les lignes d'écoulement et de ruissellement formées par les précipitations. Dans notre zone d'étude, le Haut Sebou, les pentes varient de manière croissante en fonction du volume et de l'altitude des montagnes. Cependant, les pentes faibles donnent lieu

à la formation de vastes cuvettes et dépressions. La figure 4 montre que la majeure partie de la surface du bassin est dominée par des pentes inférieures à 16° [5, p. 63].

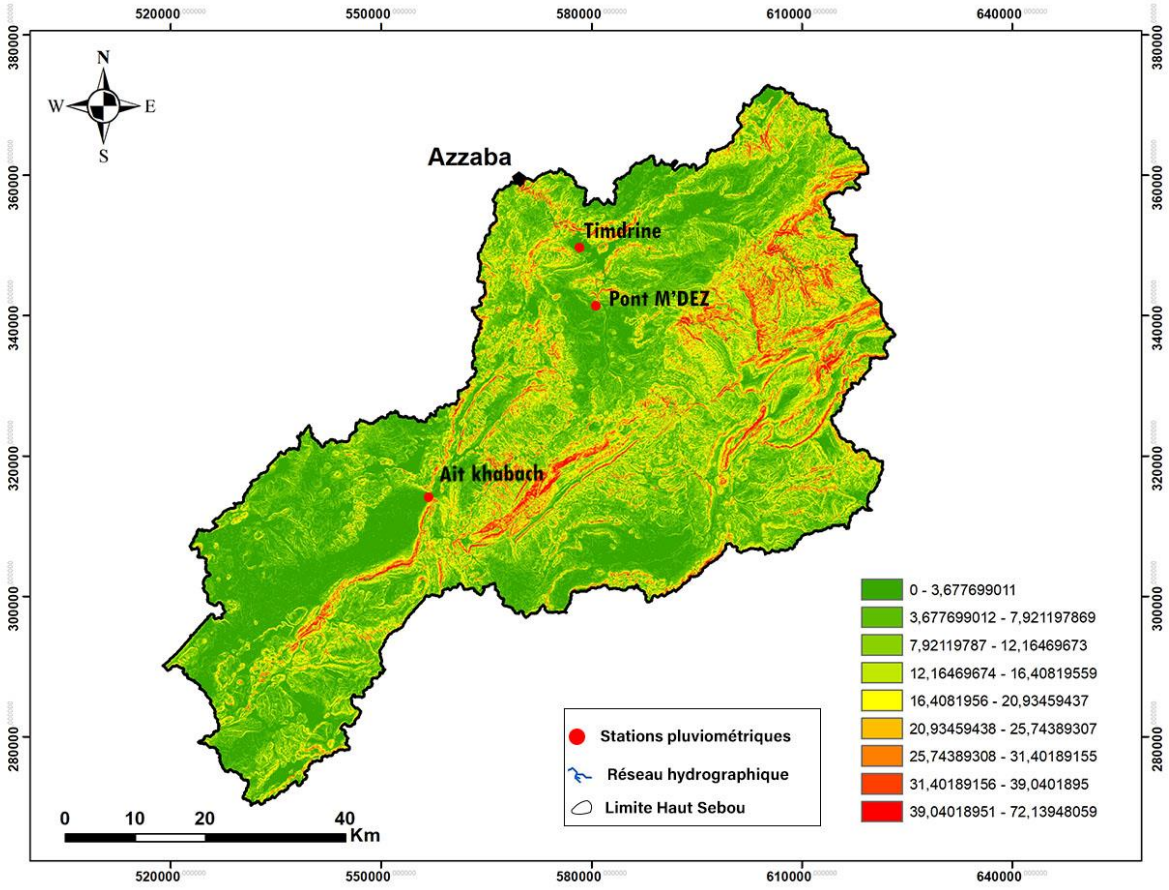


Figure 5: Carte des pentes du bassin haut Sebou.

6. Les précipitations :

Les données pluviométriques sont obtenues à partir de mesures hydrologiques de précipitations quotidiennes effectuées dans 4 stations : "Ait khabache, Timdrine, M'dez et Azzaba". Ces stations seront au centre de notre étude afin d'établir des graphiques illustrant les variations temporelles des précipitations sur trois échelles : annuelle, mensuelle et saisonnière.

6.1 La variation annuelle :

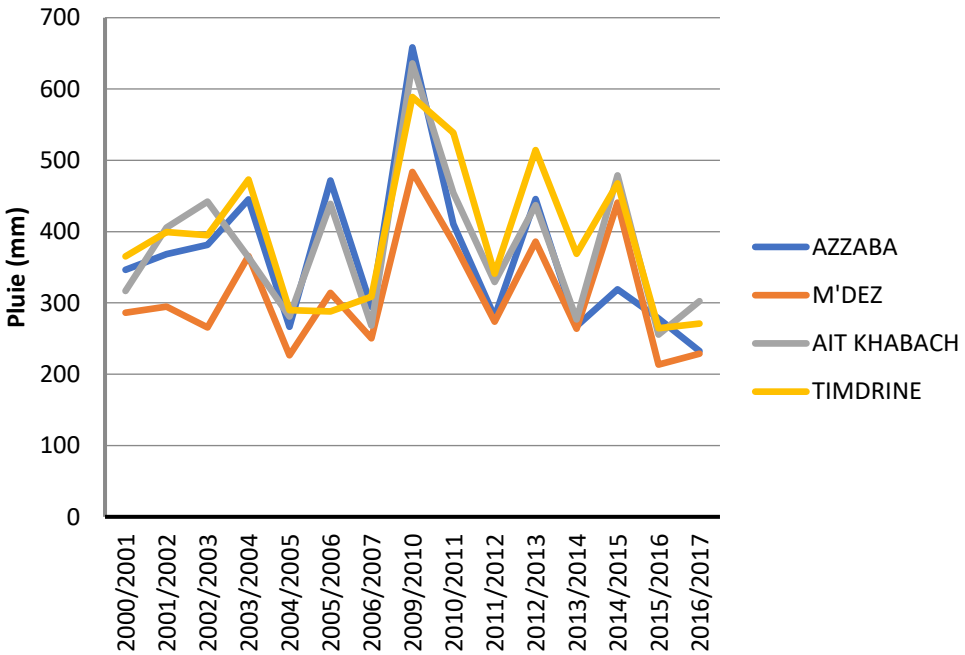


Figure 6: Variabilité des précipitations annuelles des 4 stations entre 2000 et 2017.

La figure (6) illustre une répartition marquante des précipitations annuelles pour les 4 stations sur une période de 16 ans, de 2000 à 2017. Les 4 courbes présentent une similarité approximative en ce qui concerne les quantiles des précipitations. On observe une faible variation au cours des premières années, avec des valeurs comprises entre 200 et 450 mm Ensuite, on constate une augmentation brutale pour atteindre un maximum de 658,4 mm dans la station d'Azzaba. Par la suite, les 4 courbes présentent à nouveau une faible variation, atteignant un minimum de 104,80 mm pour la station M'dez.

6.2 La variation mensuelle :

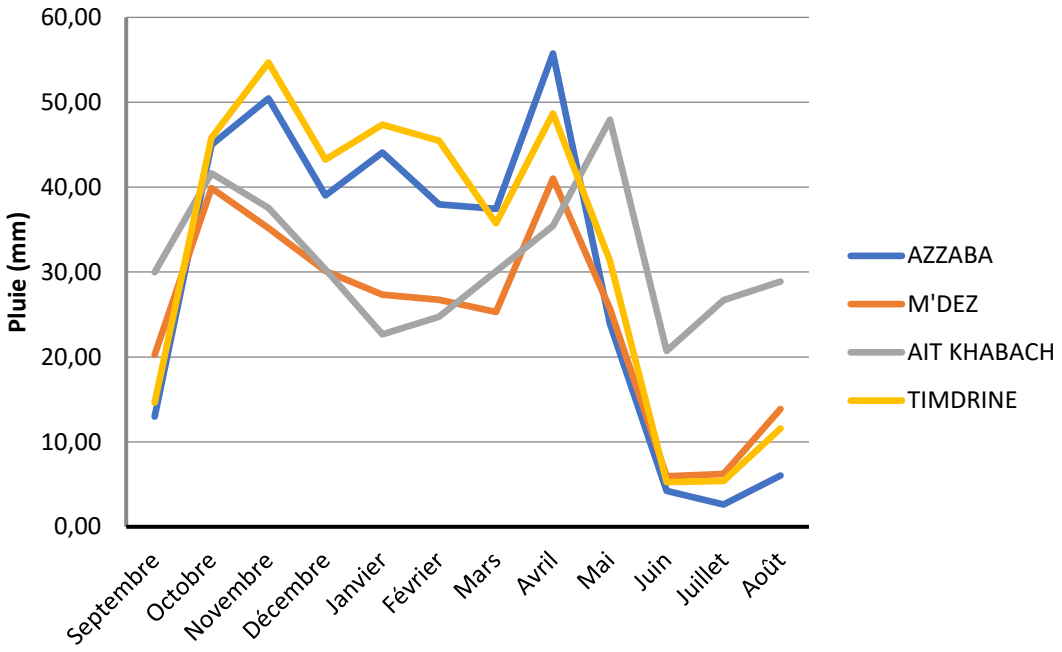


Figure 7: Variabilité des précipitations moyenne mensuelles des 4 stations entre 2000 et 2017.

L'analyse de la figure (7) met en évidence une variation instable des précipitations pour les 4 stations du bassin versant Haut Sebou sur une période de 16 ans, de 2000 à 2017. Cette analyse vise à obtenir une idée de la distribution des pluies à l'échelle mensuelle. On observe une énorme différence entre les 4 stations, ce qui dépend de leur emplacement le long du cours d'eau principal du Haut Sebou. Les observations sont les suivantes :

- Les stations situées en aval, Azzaba et Timdrine, se caractérisent par des précipitations abondantes, en particulier pendant la période de septembre à avril.
- En revanche, les stations situées en amont, M'dez et Ait Khabache, se distinguent par une faible pluviométrie observée.

6.3 La variation saisonnière :

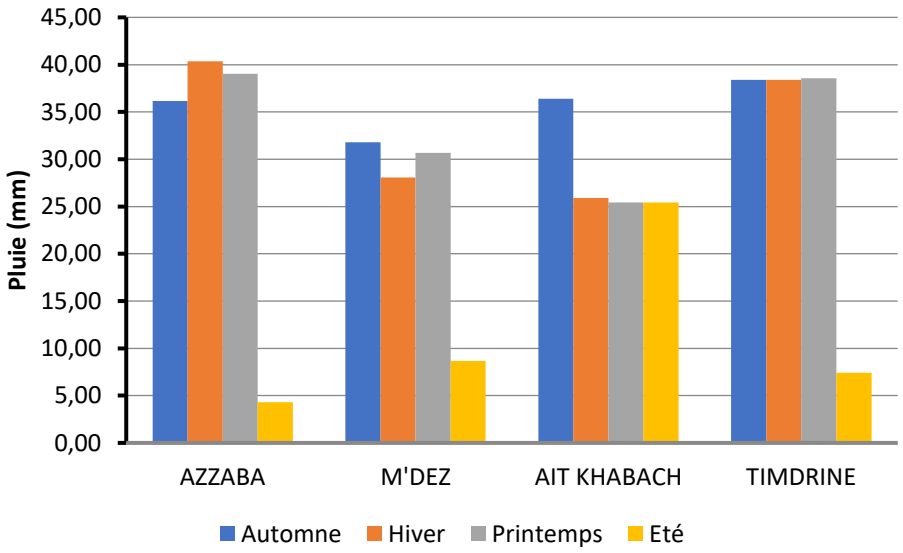


Figure 8: Variabilité des précipitations saisonnière des 4 stations entre 2000et 2017.

Au niveau saisonnier, les 4 stations reçoivent des précipitations tout au long de l'année, comme le montre la figure (8). On observe un hiver plus pluvieux, en particulier à Timdrine, où les précipitations atteignent un maximum de 146,53 mm. On remarque une similitude entre l'automne et le printemps, avec des valeurs presque identiques, tandis que les précipitations sont moins importantes pendant l'été.

7. Le débit :

Le régime hydrologique d'un cours d'eau se définit par les variations de son débit habituellement représentées par le graphe de l'écoulement mensuel moyen, calculé sur un certain nombre d'années.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes basés sur les données de débits moyens mensuels de la station d'Azzaba sur une période de 59 ans, de 1957 à 2016, afin d'établir les paramètres suivants :

- **Le coefficient de débit :** Il s'agit d'un paramètre de résistance hydraulique, obtenu en divisant le débit mensuel par le débit moyen annuel.
- **Le débit spécifique :** c'est 'une mesure de l'écoulement moyen des précipitations au sein du bassin versant d'un cours d'eau. Il est calculé en divisant le débit mensuel par la surface exprimée en litres par seconde par kilomètre carré (l/s/km2).

- **La lame d'eau écoulée :** Il s'agit du volume écoulé à l'exutoire d'un bassin versant, divisé par la surface du bassin.

Le tableau 2 présente les résultats de ces paramètres dans le Haut Sebou :

Tableau 2: Les données hydrologiques et régimes des débits.

	Débit moyenne mensuel	**Coefficient de débit**	**Débit spécifique**	**Lame d'écoulement**
Septembre	7,75	0,44	1,64	4,26
Octobre	9,3	0,53	1,97	5,27
Novembre	11,09	0,63	2,35	6,09
Décembre	16,16	0,92	3,42	9,17
Janvier	22,57	1,28	4,78	12,81
Février	28,76	1,63	6,09	14,74
Mars	32,71	1,85	6,93	18,56
Avril	30,26	1,71	6,41	16,62
Mai	23,31	1,32	4,94	13,23
Juin	14,78	0,84	3,13	8,11
Juillet	8,96	0,51	1,90	5,08
Aout	7,12	0,40	1,51	4,04
Moyenne	**17,73**	**1,00**	**3,76**	**9,83**

7.1 La variation interannuelle :

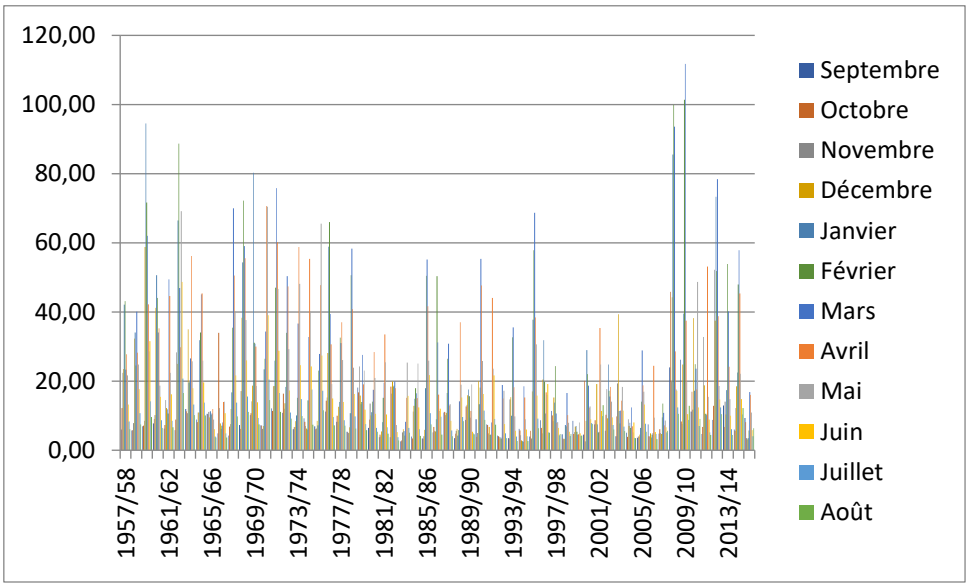


Figure 9: Variabilité mensuelle interannuelle des débits dans la station Azzaba durant17 années.

La répartition annuelle des débits sur une période de 59 ans à la station d'Azzaba permet d'identifier les années sèches et les années humides, et à partir de cela, nous pouvons déterminer principalement deux périodes : celle des hautes eaux et celle des basses eaux. Cela permet de mettre en évidence les variations saisonnières qui dépendent des conditions climatiques.

7.2 La variation mensuelle :

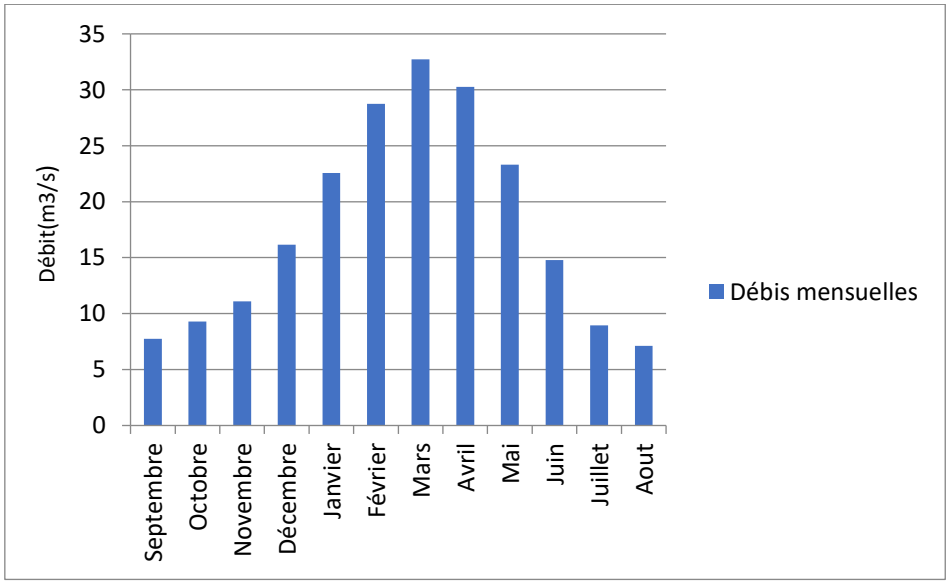


Figure 10: La variabilité mensuel des débits dans le bassin versant du haut Sebou.

La station d'Azzaba connaît une grande variabilité mensuelle, marquée par la répartition des débits mensuels. Le diagramme (figure 10) met clairement en évidence cette instabilité des volumes d'eau écoulée, et nous pouvons observer ce qui suit :

- Une augmentation des débits mensuels pendant la période hivernale (septembre-mars), avec une valeur minimale de 8 m3/s atteignant une valeur maximale de 33 m3/s.
- Une diminution progressive de ces débits pendant les mois d'été, jusqu'à atteindre une valeur minimale de 7 m3/s.

On peut conclure que l'évolution graduelle des débits mensuels reflète une période de hautes eaux, ce qui peut correspondre à une phase de précipitations abondantes, à la fonte des glaces ou à d'autres facteurs contribuant à une augmentation des débits de la rivière Azzaba.

7.3 La variation saisonnière :

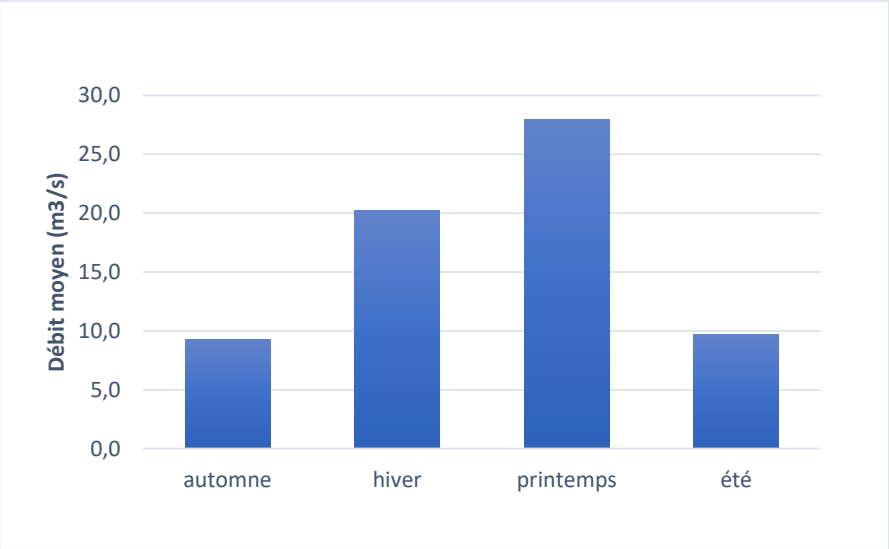


Figure 11: La variabilité saisonnière des débits dans le bassin versant de haut Sebou.

On observe une répartition saisonnière bien marquée des débits dans l'histogramme de la figure 12. Le débit moyen atteint une valeur maximale de 27,9 m3/s au printemps, ainsi qu'une valeur de 20 m3/s en hiver, en raison des périodes pluvieuses. En revanche, les saisons d'été et d'automne présentent des débits plus faibles, de 9,7 m3/s et 9,2 m3/s respectivement, en raison du manque de précipitations.

8. Les ressources en eau :

Les ressources en eau sont des réservoirs naturels ou artificiels tels que les fleuves, les cours d'eau et les barrages, ainsi que les nappes d'eau souterraines. Le Haut Sebou représente 10% des ressources en eau au Maroc (ABHS) et comprend :

- Les eaux souterraines : Du point de vue théorique, les systèmes d'eau souterraine peuvent être classés en trois catégories en fonction de leur profondeur et de leur proximité par rapport au réseau de drainage (Ophori et Toth, 1990) : peu profonds, intermédiaires et régionaux. L'estimation des ressources en eau souterraine dans le Moyen-Atlas est effectuée à partir des débits mesurés dans l'oued Sebou à la station d'Azzaba. Dans le Haut Sebou, les ressources en eau souterraine sont présentes sous la forme de plusieurs nappes.[6, p. 1]

  - ✓ Les nappes du Causse du Moyen Atlas (basaltes quaternaires et calcaires et dolomies du Lias) ;
  - ✓ Les nappes du couloir de Fès-Taza (phréatique et profonde) ;
  - ✓ La nappe du Moyen Atlas plissé.

- Les eaux de surface : Elles regroupent l'ensemble des masses d'eau courantes ou stagnantes qui sont directement en contact avec l'atmosphère. Ces eaux peuvent être douces, saumâtres ou salées en fonction de leur emplacement. Le Haut Sebou, qui provient du Moyen Atlas et draine une superficie de 6000 km2, est subdivisé d'un point de vue hydrologique en trois parties : l'Oued Zloul, Guigou et l'Oued Sebou [6, p. 1]**.**

9. La végétation :

Le bassin versant est l'unité d'étude de base dans les milieux naturels, où la couverture végétale est considérée comme une couche intermédiaire entre la surface du sol qu'elle recouvre et l'atmosphère.[5, p. 196]

Dans le Haut Sebou, les forêts occupent 42% de la superficie totale, car il fait partie du Moyen Atlas qui abrite la plus grande surface forestière du Maroc. Ainsi, la végétation influence le taux d'évaporation, la capacité de rétention et la vitesse d'écoulement du bassin versant [5, p. 196].

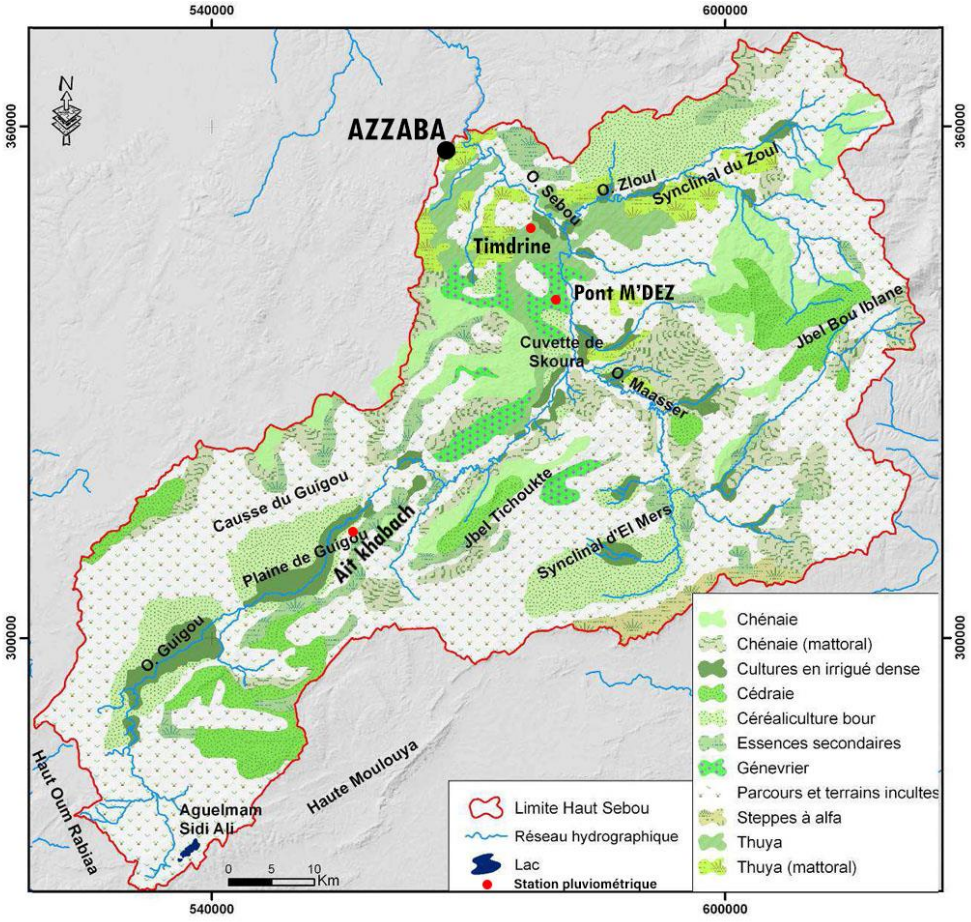


Figure 12: Groupement végétaux dans le bassin du Haut Sebou, Qadem 2015.

Partie 2 :

La méthode IDF (Intensité-Durée-Fréquence)

Chapitre 1 : Présentation de la méthode IDF (Intensité-Durée-Fréquence) :

I. Historique de La méthode IDF :

Depuis l'Antiquité, le monde a souffert énormément des risques naturels qui ont des impacts sur la population, l'environnement et les infrastructures, en raison des changements climatiques qui perturbent toute stabilité.

Les précipitations extrêmes font partie des principales causes des événements climatiques les plus dangereux, tels que les ruissellements urbains, les glissements de terrain, les crues et les inondations.

Pour faire face à ces défis, le Canada, par exemple, mène un projet avec le soutien d'Ouranos, qui consiste à mettre à jour les courbes intensité-durée-fréquence (IDF). Cette approche est basée sur une méthode classique qui utilise la loi de Gumbel pour décrire la fréquence des précipitations maximales [7, p. 13].

Cette méthode est très utile pour les climatologues car elle facilite la prévention des risques liés aux précipitations, ce qui permet de prendre les précautions nécessaires pour gérer les dangers de manière efficace.

II. Principe de la méthode IDF :

La méthode IDF (Intensité-Durée-Fréquence) est illustrée par les courbes IDF qui représentent l'évolution de l'intensité de la pluie en mm/h en fonction de la durée D (généralement de quelques minutes à quelques heures) et de la période de retour T, exprimée en termes de fréquence de non-dépassement. Ces courbes sont élaborées en se basant sur la variation de l'intensité annuelle maximale des précipitations sur un intervalle de temps donné. Elles jouent un rôle crucial dans l'estimation des précipitations pour les projets de construction et d'infrastructure [7, p. 12].

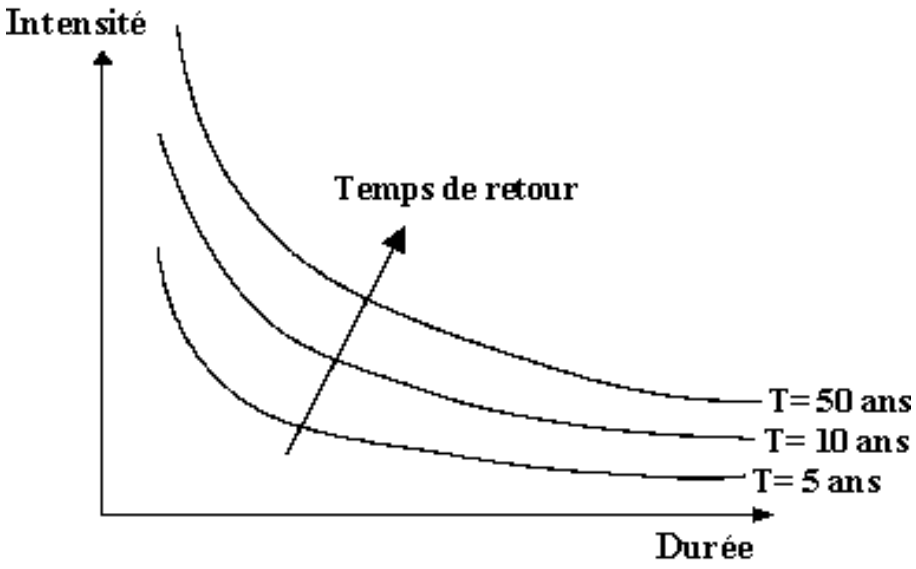


Figure 13: Représentation schématique des courbes IDF (AMENASRIA, 2016).

L'application de la méthode IDF permet d'expliquer la relation proportionnelle entre l'intensité des précipitations et la durée. En général, plus la durée des précipitations est longue, plus l'intensité est faible. Cela est souvent le cas pendant l'été.

La représentation mathématique des courbes IDF est réalisée à l'aide de la formule Montana, qui permet d'exprimer les intensités critiques en fonction de la durée.

Le bassin versant du Haut Sebou est particulièrement sujet à des précipitations extrêmes en raison de sa localisation géographique, ce qui le rend vulnérable aux risques climatiques.

Les météorologues marocains ont utilisé la méthode IDF pour estimer les intensités de précipitations dans le Haut Sebou selon des périodes spécifiques, afin d'avoir une idée des précautions à prendre en cas de risques prévisibles tels que les crues.

Pour ce faire, ils ont utilisé les données de quatre stations pluviométriques : Azzaba, Ait khabache, Timdrine et M'dez. Des analyses et interprétations ont été réalisées pour estimer les résultats probables.

Chapitre 2 : L'outil d'Analyse fréquentielle « HYFRAN » :

I. Principe du programme HYFRAN :

Le logiciel a été développé pour le système Windows dans le but de faciliter l'analyse hydrologique en simplifiant l'ajustement des distributions statistiques. Il est principalement utilisé pour analyser les précipitations maximales annuelles. Le logiciel utilise différentes lois statistiques pour établir des graphiques représentant les précipitations en fonction des fréquences de non-dépassement. Par cette approche, on peut comparer graphiquement les résultats obtenus à partir des trois lois (GEV, Gumbel, log normal à 3 paramètres).[8, p. 6/11]

Ce logiciel peut être utilisé pour analyser n'importe quelle série de valeurs extrêmes dans différents domaines, à condition que les observations soient distribuées de manière identique [8, p. 6].

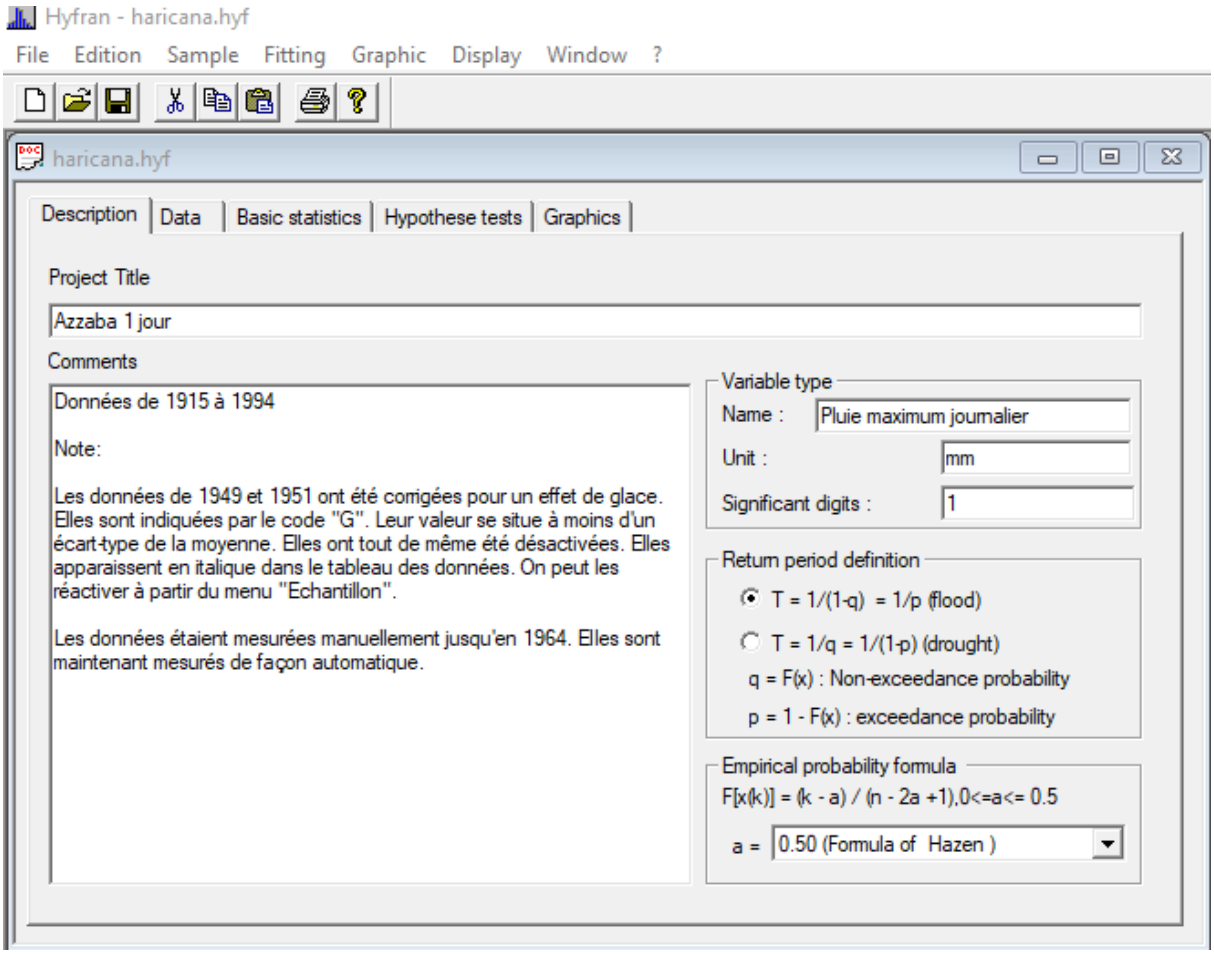


Figure 14: Représentation du logiciel HYFRAN.

II. Les lois de distribution statistiques :

1. La loi GEV :

GEV (General Extrême Value), c'est la loi généralisée des valeurs extrêmes, elle est introduite par JENKINSON (1955), elle s'agit d'une distribution à trois paramètres qui combine les trois types en une seule forme. En hydrologie, la loi GEV est parmi les distributions les plus utilisées en analyse des extrêmes. Ces valeurs extrêmes sont souvent les maximas d'une certaine quantité sur une période donnée [9, p. 2].

2. Loi log-normal :

La loi log-normale est recommandée par certains hydrologues dont Ven-Te Chow qui la justifiée par l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action due à un grand nombre de facteurs qui se multiplient. La loi log-normale est caractérisée par ses paramètres d'emplacement, d'échelle et de seuil [10].

3. Loi de Gumbel :

La loi de Gumbel (ou distribution de Gumbel), du nom d'Émil Julius Gumbel, postule que la loi double exponentielle, est utilisée par la plupart des services météorologiques officiels, pour décrire la fréquence des pluies extrêmes. En effet c'est la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de (n) valeurs. Le maximum annuel d'une variable étant considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières, cette loi doit ainsi être capable de décrire les séries de maxima annuels [11].

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

$$P = \frac{1}{a} Y + Po$$

Les paramètres d'ajustement étant :

- **Le paramètre d'échelle** : $\frac{1}{a} = 0.78 \pm \sigma$

  (**σ** est l'écart-type de la série des crues)

- **Le paramètres de forme :** $Po = P - (\frac{1}{a} * 0,577)$

Partie 3 :

Applications de la méthode IDF dans le Haut Sebou

Chapitre 1 : Le Haut Sebou et méthodologie de travail IDF :

I. Présentation des stations pluviométriques :

Les stations sont sélectionnées en concertation avec tous les experts afin de cerner la problématique de l'étude. Quatre stations ont été choisies le long du principal oued du Haut Sebou pour obtenir une idée des composantes hydrologiques, en particulier les précipitations à l'entrée de ce bassin, allant de l'amont vers l'aval : Ait khabache, M'dez, Timdrine et Azzaba.

Tableau 3: Localisation des 4 stations retenues.

Les stations	Altitudes (m)	Lambert X	Lambert y
AIT KHABACH	1478	557000	314800
AZZABA	516	569650	359570
TIIDRINE	642	578700	350350
M'DEZ	725	581400	341900

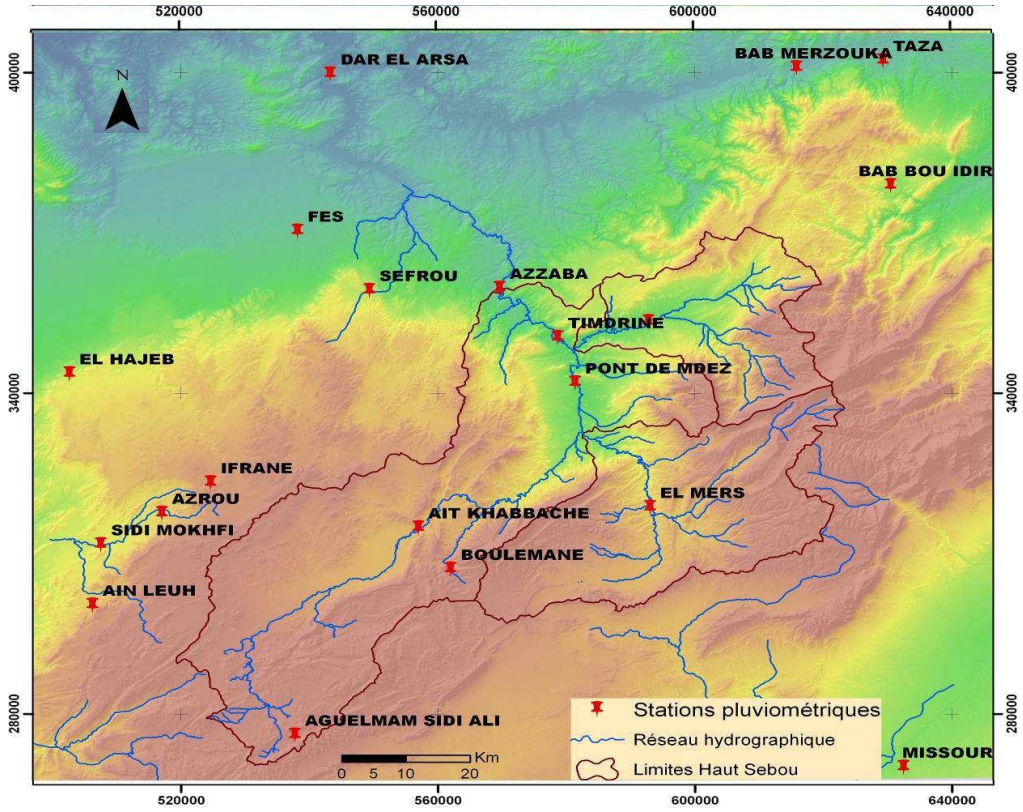


Figure 15: Localisation des stations pluviométriques (Qadem 2015).

II. Les données utilisées :

1. Extraction des pluies maxima :

A partir d'une série des pluies journalières aux 4 stations de 2000/2001 à 2016/2017, nous avons extrait des pluies maxima par année de durées 1,2,3 et 4 jours consécutifs.

Tableau 4: Pluie maxima de la station Ait khabache de la période 2000/2001 à 2016/2017.

Année	Lame précipitée 1 jour (mm)	Lame précipitée 2 jours (mm)	Lame précipitée 3 jours (mm)	Lame précipitée 4 jours (mm)
2000/2001	48,7	68,3	95,3	99,6
2001/2002	38,3	59,7	59,7	59,7
2002/2003	38,3	39,7	39,7	39,7
2003/2004	29,8	32,4	47,4	47,4
2004/2005	22	23,8	24,7	41,9
2005/2006	49	49,3	49,3	49,7
2006/2007	63,6	77,7	83,3	88,1
2007/2008	28,5	40,8	42,2	42,2
2008/2009	55,6	72,2	72,5	72,5
2009/2010	36,9	70,4	70,5	70,5
2010/2011	29,6	41,6	43,3	43,3
2011/2012	45,2	46,4	49,5	50,7
2012/2013	46	50	62,4	62,6
2013/2014	31	33	36	36
2014/2015	50	52	58	60
2015/2016	21	23	24	24
2016/2017	89,7	89,7	94,3	94,3

Tableau 5: Pluie maxima de la station Azzaba de la période 2000/2001 à 2016/2017.

Année	Lame précipitée 1 jour (mm)	Lame précipitée 2 jour (mm)	Lame précipitée 3 jour (mm)	Lame précipitée 4 jour (mm)
2000/2001	34,5	60,2	89,7	98,6
2001/2002	43,6	47,1	54,1	63,9
2002/2003	32,5	41,7	42,4	46,1
2003/2004	40,9	51,6	69,4	80,1
2004/2005	31,6	36,2	46,3	49,1
2005/2006	20,4	29,3	36,1	45,2
2006/2007	73,4	81,1	84	95,9
2007/2008	54,8	66	66	66
2008/2009	37,4	48,4	63,7	70,1
2009/2010	31,2	40,4	41,7	44,8
2010/2011	19,7	31,5	31,5	32,5
2011/2012	19,9	37,2	40,6	43,1
2012/2013	35	44	56	69
2013/2014	38	47	51	51
2014/2015	19	28	31,4	33,4
2015/2016	37	55	56	56
2016/2017	23	25	26,9	26,9

Remarque :

Dans la série des pluies journalières à la station de Azzaba, nous avons eu une valeur correspondant au 17 avril 2010 d'une hauteur de 140 mm. Cette hauteur exceptionnelle nous a poussé à vérifier sa fiabilité. Le tableau suivant montre les hauteurs de précipitations des stations voisines du Haut Sebou pendant les journées pluvieuses du 14 au 17 avril 2010 :

Avril-2010	Azzaba	Timedrine	Pont M'dez	Ait Khabach
14	9,9	11,5	11,2	12
15	9,8	5,1	14,3	18,5
16	11,5	15,5	12,4	8,8
17	140	6,1	6,2	1,5

On remarque que la hauteur exceptionnelle de 140 mm n'a pas été enregistrée dans aucune des stations voisines, ce qui jette un doute sur sa véracité. Dans un premier temps, nous avons pensé à une erreur de frappe qui voulais indiquer soit 14 ou 1,4 mm. Pour en être sûr, nous nous somme procurés les enregistrements par des satellites pendant cette journée du 17 avril 2010. Le produit satellitaire PERSIANN-CDR donne pour le pixel de la station Azzaba une hauteur de 2,05 mm et le produit GPMF donne 1,61 mm. Nous pouvons donc dire que la valeur de 1,4 mm serait la donnée correcte. C'est après cette correction que nous avons effectué l'extraction des pluies maxima de différentes durées.

Tableau 6: Pluie maxima de la station Pont M'dez de la période 2000/2001 à 2016/2017.

Année	Lame précipitée 1 jour (mm)	Lame précipitée 2 jours (mm)	Lame précipitée 3 jours (mm)	Lame précipitée 4 jours (mm)
2000/2001	51.9	87.5	135.2	138.6
2001/2002	36.7	37.9	36.7	40
2002/2003	22.5	22.5	24.3	38.5
2003/2004	52.5	62.2	72.6	82.3
2004/2005	21.4	27.7	28.9	35.1
2005/2006	26	27.6	26	37
2006/2007	58.5	69.2	58.5	58.5
2007/2008	33.4	33.4	53.5	53.5
2008/2009	30.5	37.1	42.7	43.4
2009/2010	19.2	33.6	37.9	53.1
2010/2011	30.5	42.9	46	54.5
2011/2012	26.7	35	35.6	35.6
2012/2013	32.2	34.3	48.7	48.7
2013/2014	43	47	48	48
2014/2015	90	99.1	101.9	101.9
2015/2016	26	33	35	35
2016/2017	40	40	41	41

Tableau 7: Pluie maxima de la station Timdrine la période 2000/2000 à 2016/2017.

Année	Lame précipitée 1 jour (mm)	Lame précipitée 2 jours (mm)	Lame précipitée 3 jours (mm)	Lame précipitée 4 jours (mm)
2000/2001	46,9	77,6	118,5	126,4
2001/2002	58,6	64,3	76,6	78,2
2002/2003	25,9	30,2	34,5	36,3
2003/2004	51,6	66,4	80,5	90,9
2004/2005	25,4	36,2	43,5	40,5
2005/2006	31,6	33,3	37,2	46
2006/2007	64,7	72,2	87	101,1
2007/2008	46,7	65	65	65
2008/2009	39,5	44	47,6	59,3
2009/2010	30,9	38,1	43	51,7
2010/2011	41,3	54,5	64,6	65,5
2011/2012	24,6	31,2	41,1	49,5
2012/2013	37,7	51,1	55,9	56,7
2013/2014	51	57	60	66
2014/2015	50	50	50	50
2015/2016	43	62	63	63
2016/2017	20	22	33	33

2. Application sur HYFRAN :

Après le traitement des précipitations maximales sur une période de 4 jours pour les 4 stations, nous avons utilisé le logiciel HYFRAN qui nous permet de déterminer la meilleure loi d'ajustement parmi les options suivantes : Gumbel, GEV, Log normale et Log normale à 3 paramètres (Likehood).

L'application de ces 4 lois sur les données annuelles maximales nous permet d'obtenir les résultats d'ajustement pour différentes périodes : 1 jour, 2 jours, 3 jours et 4 jours. Nous avons opté pour la loi Log normale car elle est considérée comme la plus précise selon HYFRAN.

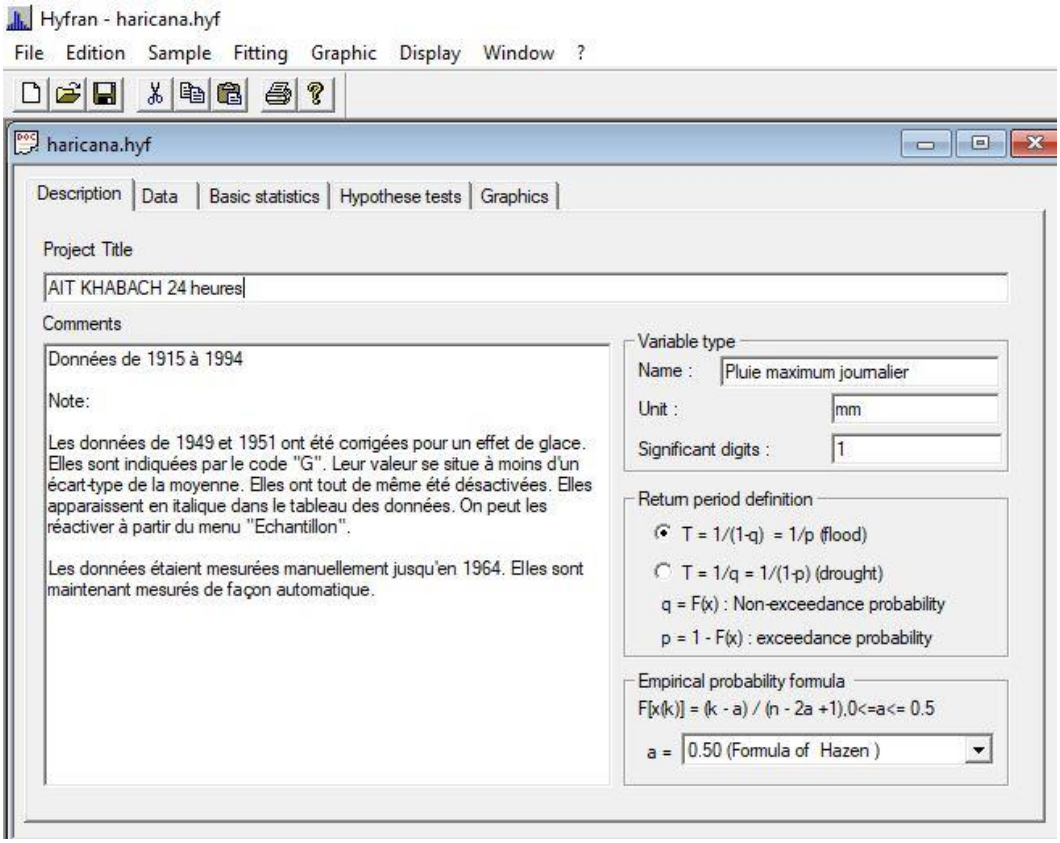
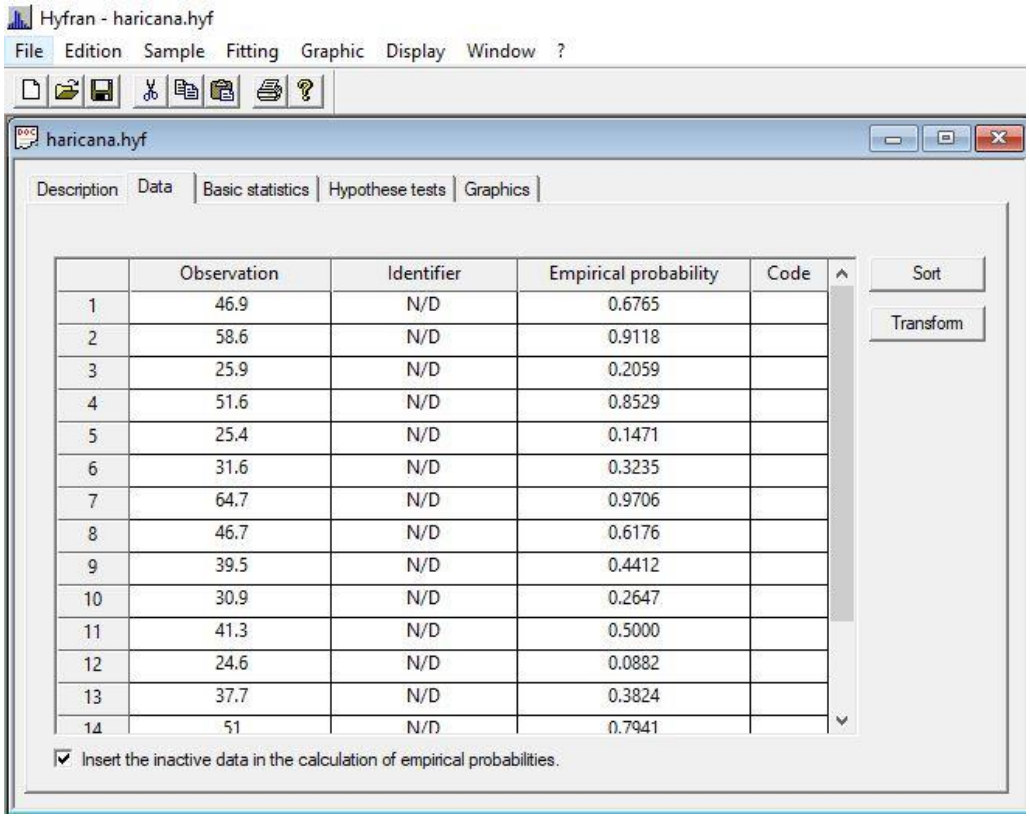


Figure 16: Règlement du logiciel HYFRAN.



	Observation	Identifier	Empirical probability	Code
1	46.9	N/D	0.6765	
2	58.6	N/D	0.9118	
3	25.9	N/D	0.2059	
4	51.6	N/D	0.8529	
5	25.4	N/D	0.1471	
6	31.6	N/D	0.3235	
7	64.7	N/D	0.9706	
8	46.7	N/D	0.6176	
9	39.5	N/D	0.4412	
10	30.9	N/D	0.2647	
11	41.3	N/D	0.5000	
12	24.6	N/D	0.0882	
13	37.7	N/D	0.3824	
14	51	N/D	0.7941	

Figure 17: Insertion des données sur HYFRAN.

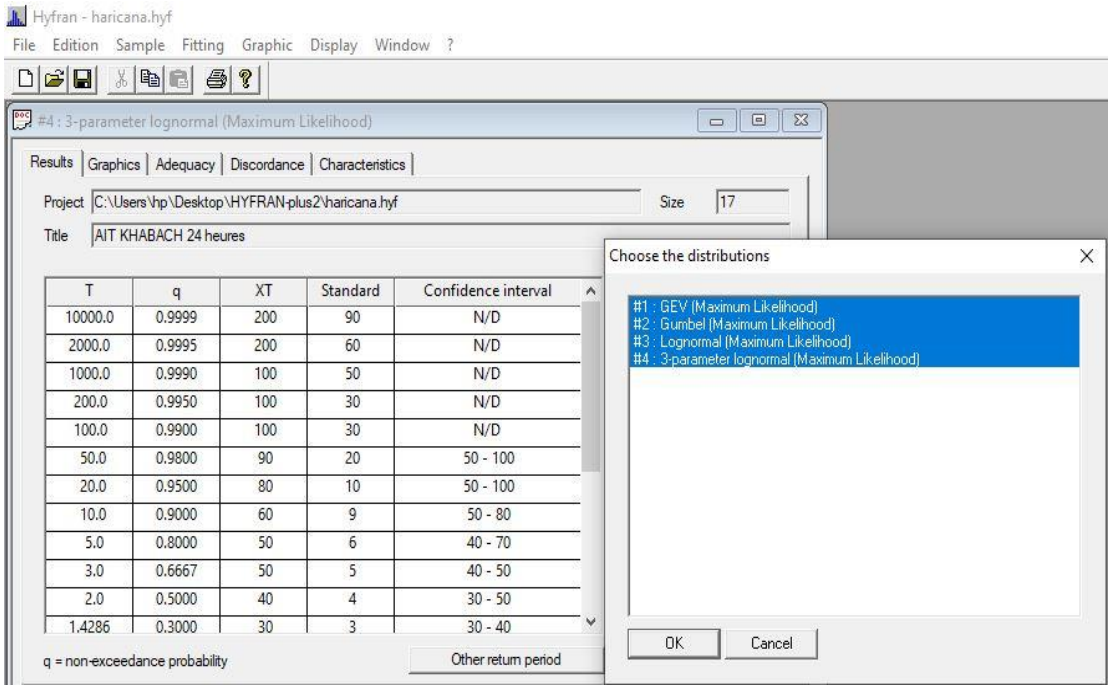


Figure 18: Choix des lois à tester sur HYFRAN.

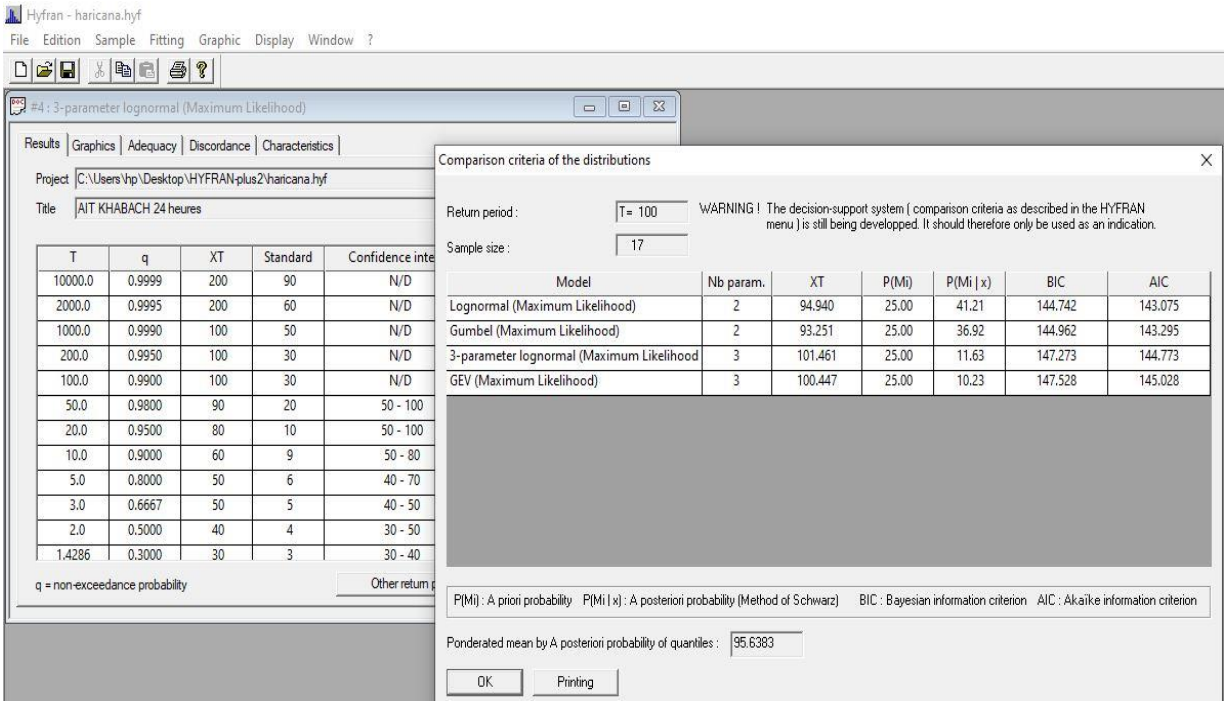


Figure 19: Tableau de comparaison d'ajustement des lois.

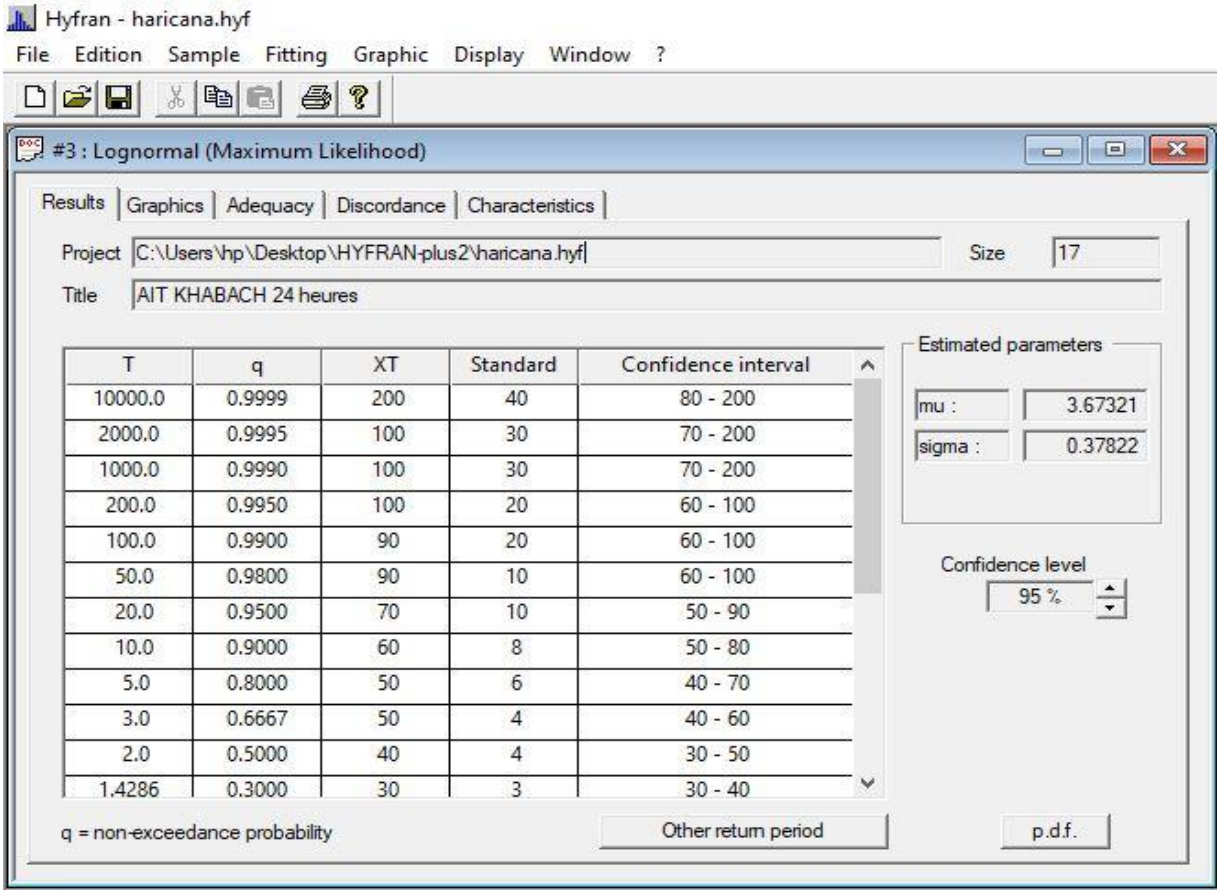


Figure 20: Extraction des valeurs des précipitations des périodes de retour de (2, 10, 50,100ans).

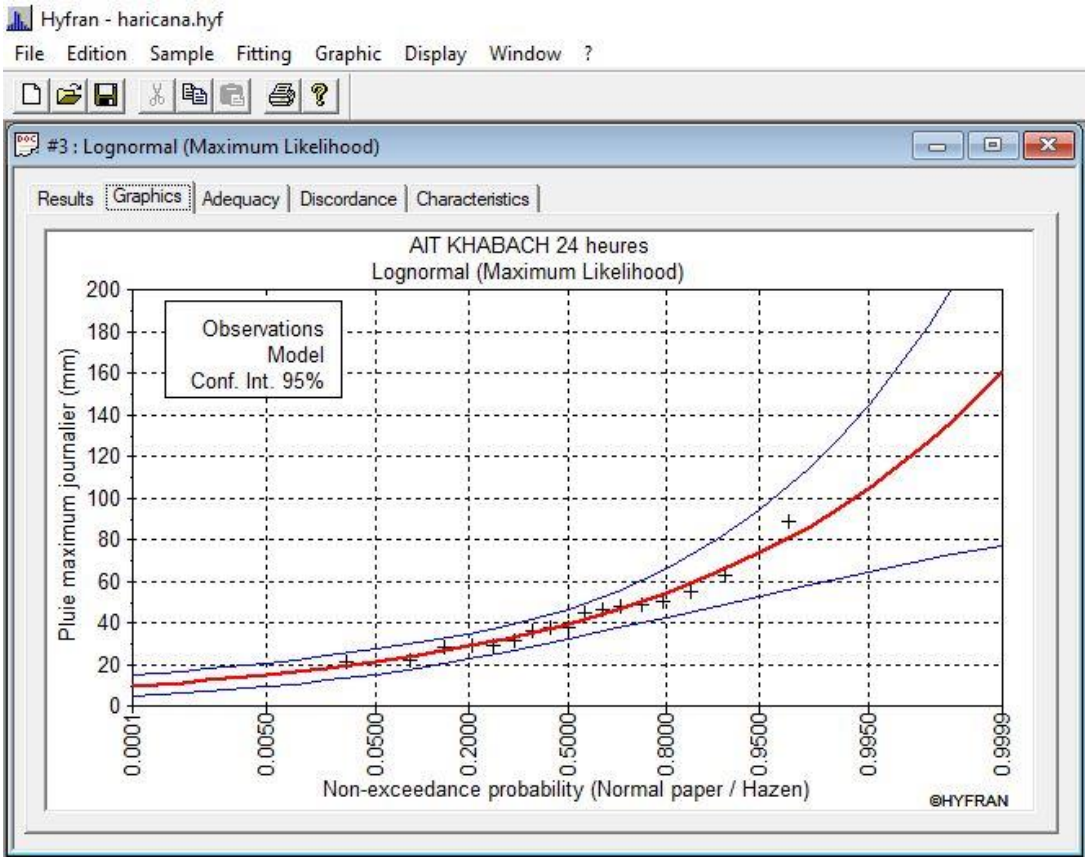


Figure 21: Courbe de variation des précipitations en fonction de ces fréquences de non-dépassement.

3. Ajustement statistiques des séries des pluies maxima :

À partir des résultats obtenus par le traitement des données des précipitations maximales des 4 stations, nous sommes en mesure de construire des courbes d'intensité, de durée et de fréquence pour chaque station en utilisant la loi la plus précise, à savoir la loi Log normale.

Le calcul des intensités des précipitations et le traçage des courbes IDF ont été faits sur le tableur Excel.

- **Station AIT KHABACH :**

Tableau 8: Les précipitations aux périodes de retour 2 ans ,10, 50 et 100 ans obtenues par HYFRAN dans la station Ait khabache.

	Précipitations(mm)			
Période	24 Heures	48 Heures	72 Heures	96 Heures
2ans	39,7	47,7	53,9	54,2
10ans	64,5	79,3	83,4	87,5
50ans	86,3	108,0	104,0	117,0
100ans	95,6	120,0	111,0	129,0

Tableau 9: Les intensités des précipitations de 1, 2, 3 et 4 jours dans la station Ait khabache.

	Intensité(mm/h)			
Période	24 Heures	48 Heures	72 Heures	96 Heures
2ans	1.65	0.99	0.75	0.56
10ans	2.68	1.65	1.16	0.91
50ans	3.59	2.25	1.44	1.22
100ans	3.98	2.5	1.54	1.34

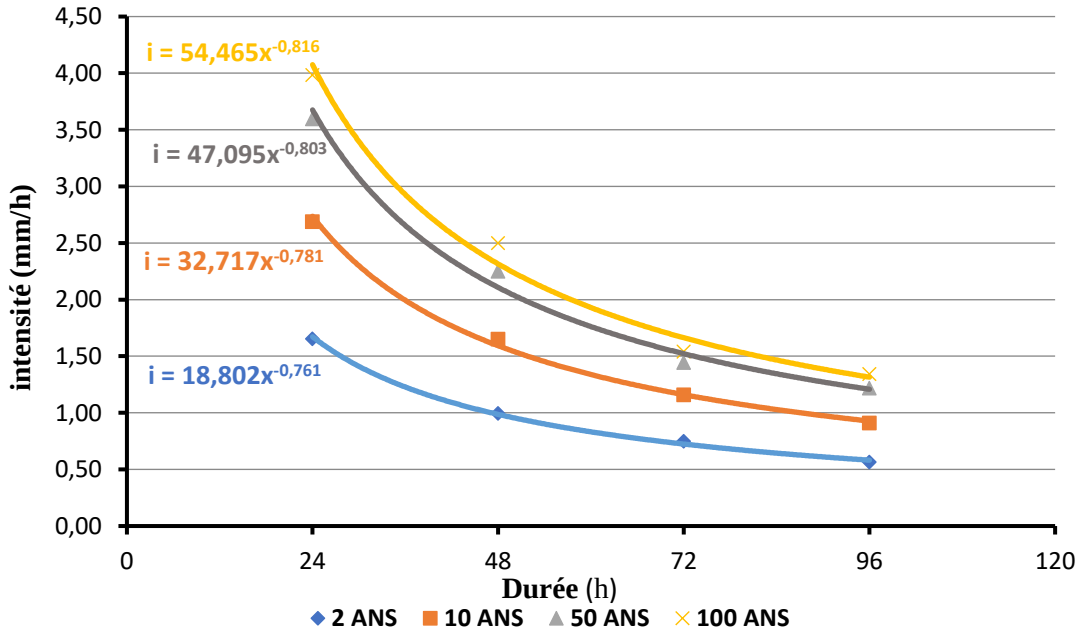


Figure 22: Courbes IDF de la station Ait khabache de durées 1, 2, 3 et 4 jours pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans.

- **Station M'DEZ :**

Tableau 10: Hauteurs des précipitations de périodes de retour 2,10, 50 et 100 à Pont M'dez.

	Précipitations(mm)			
Période	24 Heures	48 Heures	72 Heures	96 Heures
2ANS	32,3	38,9	44,2	48,7
10ANS	60,1	71,3	85,4	83,7
50ANS	92,0	112,0	139,0	150,0
100 ANS	115,0	133,0	167,0	205,0

Tableau 11: Les intensités des précipitations de 1, 2, 3 et 4 jours dans la station M'dez.

	Intensité (mm/h)			
Période	24 Heures	48 Heures	72 Heures	96 Heures
2ANS	1,35	0,81	0,61	0,51
10ANS	2,50	1,49	1,19	0,87
50ANS	3,83	2,33	1,93	1,56
100 ANS	4,79	2,77	2,32	2,14

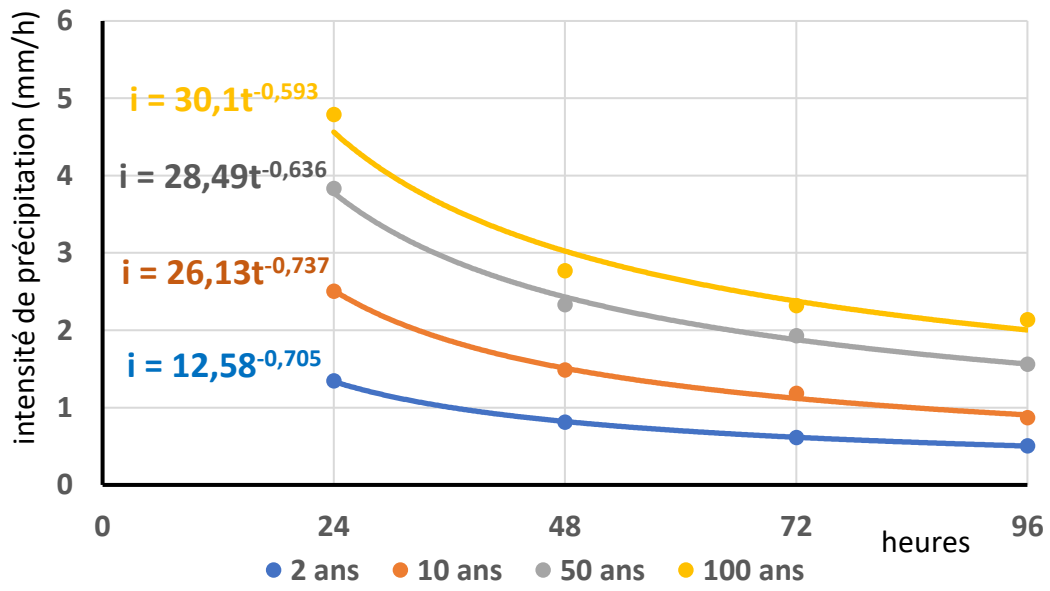


Figure 23: Courbes IDF de la station M'dez de durées 1, 2, 3 et 4 jours pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans.

- **Station TIMDRINE :**

Tableau 12: Les précipitations aux périodes de retour 2 ans ,10, 50 et 100 ans obtenues par HYFRAN dans la station Timdrine.

	Précipiations (mm)			
Période	24 Heures	48 Heures	72 Heures	96 Heures
2 ANS	38,5	47,5	55,4	59,7
10 ANS	59,4	75,4	87,1	94,2
50 ANS	77,1	99,6	114,0	124,0
100 ANS	84,5	110,0	126,0	137,0

Tableau 13: Les intensités des précipitations de 1 jour, 2, 3 et 4 jours dans la station Timdrine.

	Intensité (mm/h)			
Période	24 Heures	48 Heures	72 Heures	96 Heures
2 ANS	1,60	0,99	0,77	0,62
10 ANS	2,48	1,57	1,21	0,98
50 ANS	3,21	2,08	1,58	1,29
100 ANS	3,52	2,29	1,75	1,43

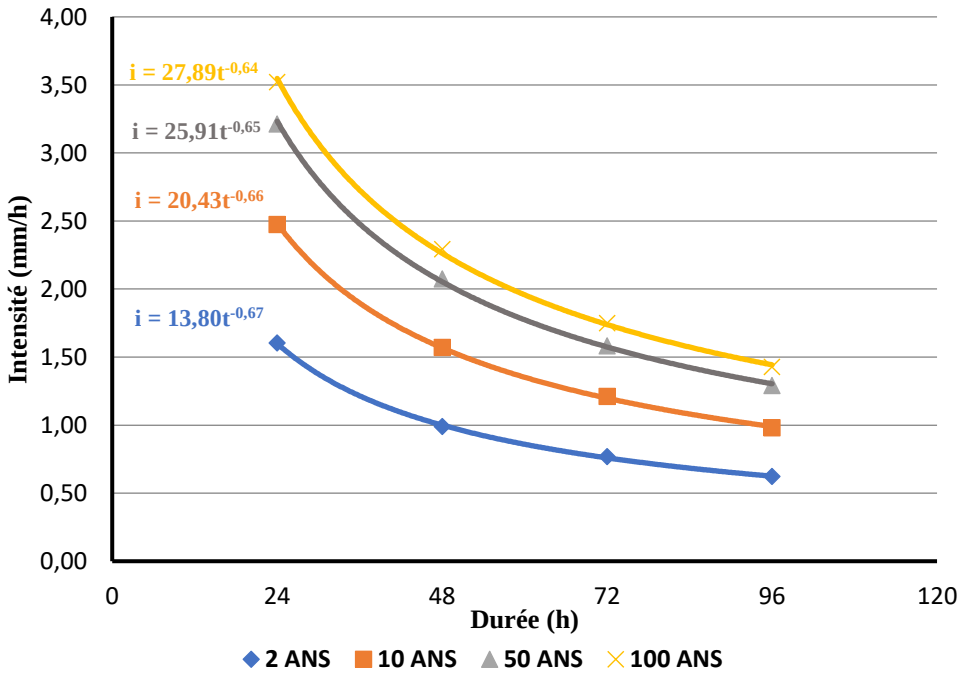


Figure 24: Courbes IDF de la station Timdrine de durées 1, 2, 3 et 4 jours pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans.

- **Station AZZABA :**

Tableau 14: Hauteurs des précipitations de périodes de retour 2,10, 50 et 100 ans à Azzaba.

	Précipitations (mm)			
Période	24 Heures	48 Heures	72 Heures	96 Heures
2ans	32,5	42,6	48,7	53,5
10ans	52,7	64,7	76,5	85
50ans	70,4	84,6	102	113
100ans	78	93,2	113	125

Tableau 15: intensités des précipitations de 1, 2, 3 et 4 jours dans la station Azzaba.

	Intensité (mm/h)			
Période	24 Heures	48 Heures	72 Heures	96 Heures
2ans	1,35	0,89	0,68	0,56
10ans	2,20	1,35	1,06	0,89
50ans	2,93	1,76	1,42	1,18
100ans	3,25	1,94	1,57	1,30

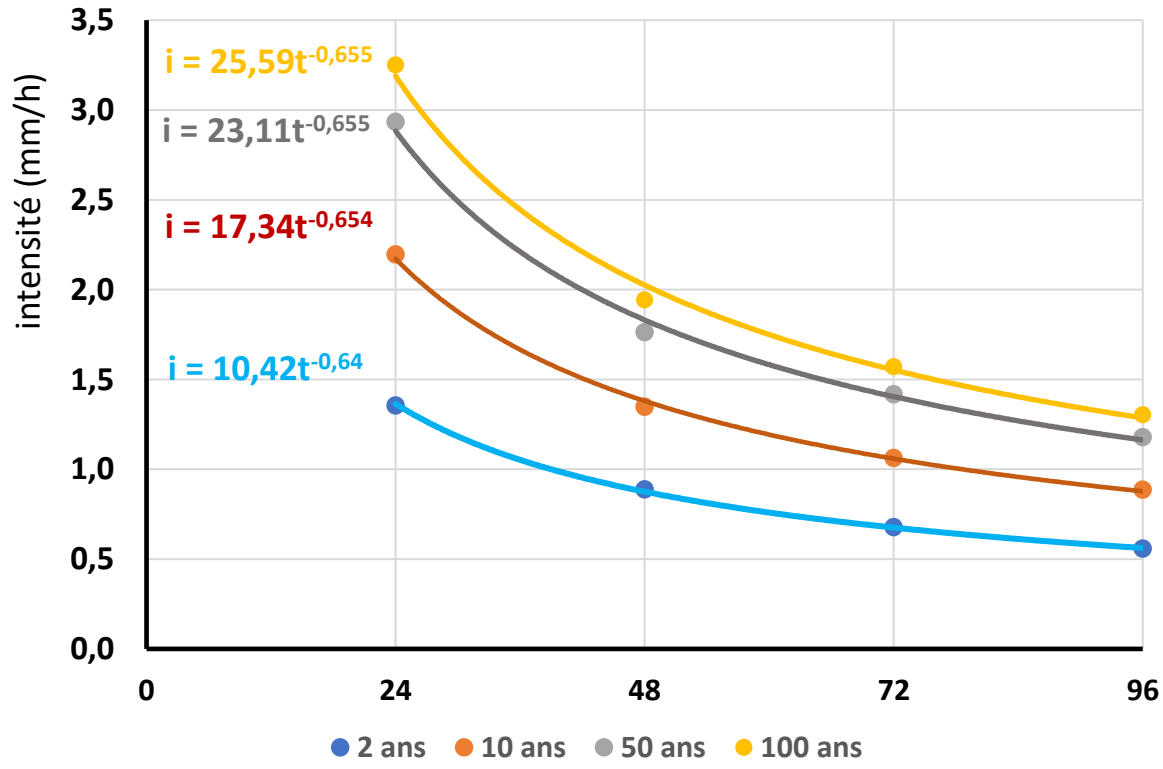


Figure 25: Courbes IDF de la station Azzaba de durées 1, 2, 3 et 4 jours pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans.

4. Les paramètres de Montana et extrapolation des courbes IDF :

La représentation mathématique des courbes IDF est fait par la formule Montana pour exprimer les intensités critiques en fonction de la durée tel que :

- **Formule de Montana :**

$$i = \frac{a}{t^b}$$

Avec : - i : intensité maximale de la pluie [mm/h].

- t : durée de la pluie [minute par heures].
- T : intervalle de récurrence (ou temps de retour) [années].
- a, b : constantes locales.

Pour déterminer les intensités pluviométriques et les courbes IDF de durées 1 heure,6 et 12 heures, on est basée sur la formule de Montana.

- **Station AIT KHABACHE :**

Tableau 16: intensités pluviométriques de durées 1, 6 et 12 heures à Ait khabache

	Intensité(mm/h)						
Période	1h	6h	12h	24h	48h	72h	96h
2 ANS	18,80	4,81	2,84	1,65	0,99	0,75	0,56
10 ANS	32,71	8,07	4,70	2,69	1,65	1,16	0,91
50 ANS	47,10	11,17	6,40	3,60	2,25	1,44	1,22
100 ANS	54,47	12,62	7,17	3,98	2,50	1,54	1,34

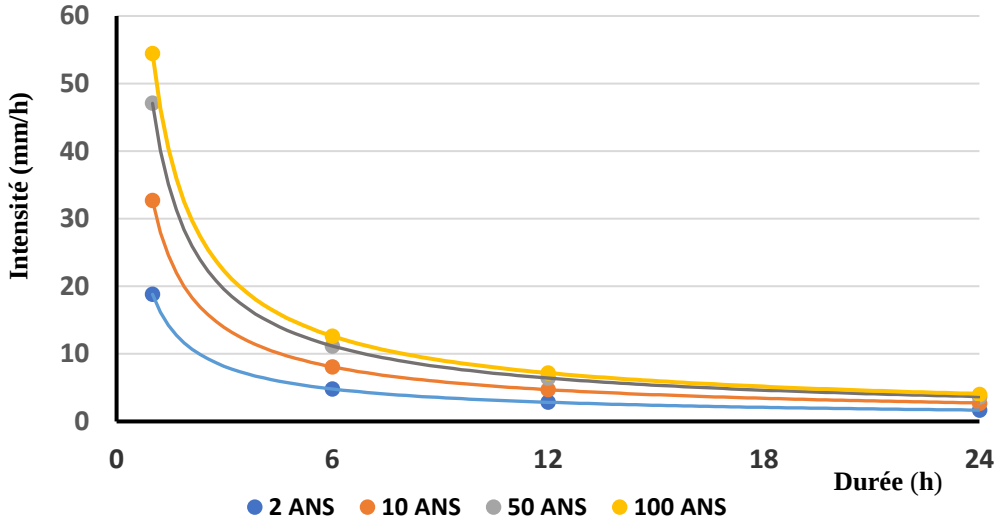


Figure 26: Courbes IDF de la station AIT KHABACH de durées 1, 6, 12 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 10, 50, et 100 ans.

- **Station Pont M'DEZ :**

Tableau 17: Les intensités pluviométriques de durées 1, 6 et 12 heures à Pont M'dez

	Intensité (mm/h)						
Période	1 h	6 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
2 ANS	12,58	3,56	2,18	1,35	0,81	0,61	0,51
10 ANS	26,13	6,98	4,19	2,50	1,49	1,19	0,87
50 ANS	28,49	9,12	5,87	3,83	2,33	1,93	1,56
100 ANS	30,10	10,40	6,90	4,79	2,77	2,32	2,14

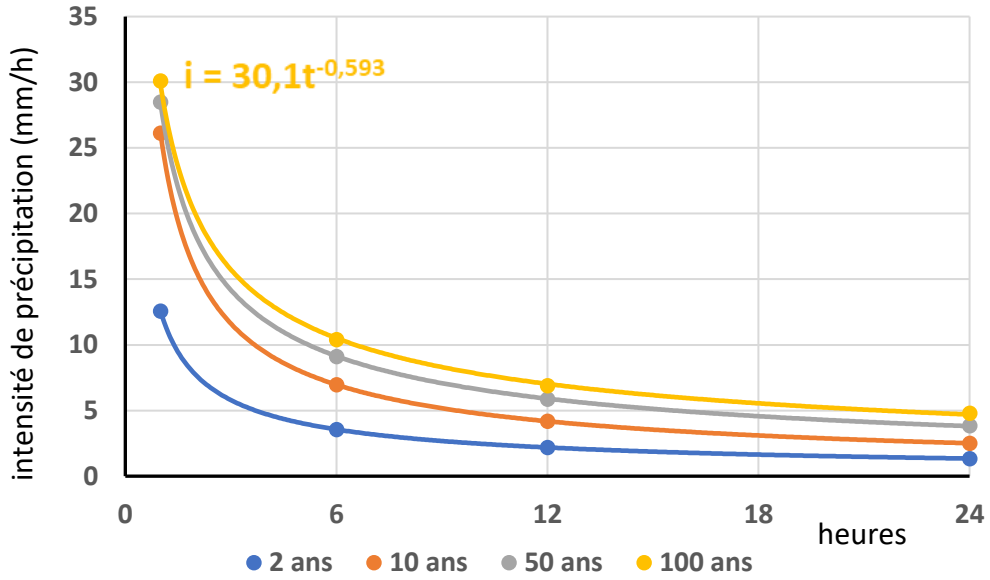


Figure 27: La Courbe IDF de la station M'dez de durées 1, 6, 12 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans.

- **Station TIMDRINE :**

Tableau 18: Les intensités pluviométriques de durées 1 heure, 6 et 12 heures à Timdrine

	Intensité(mm/h)						
Période	1h	6h	12h	24h	48h	72h	96h
2 ANS	13,80	4,15	2,61	1,60	0,99	0,77	0,62
10 ANS	20,43	6,26	3,96	2,48	1,57	1,21	0,98
50 ANS	25,91	8,08	5,15	3,21	2,08	1,58	1,29
100 ANS	27,89	8,86	5,69	3,52	2,29	1,75	1,43

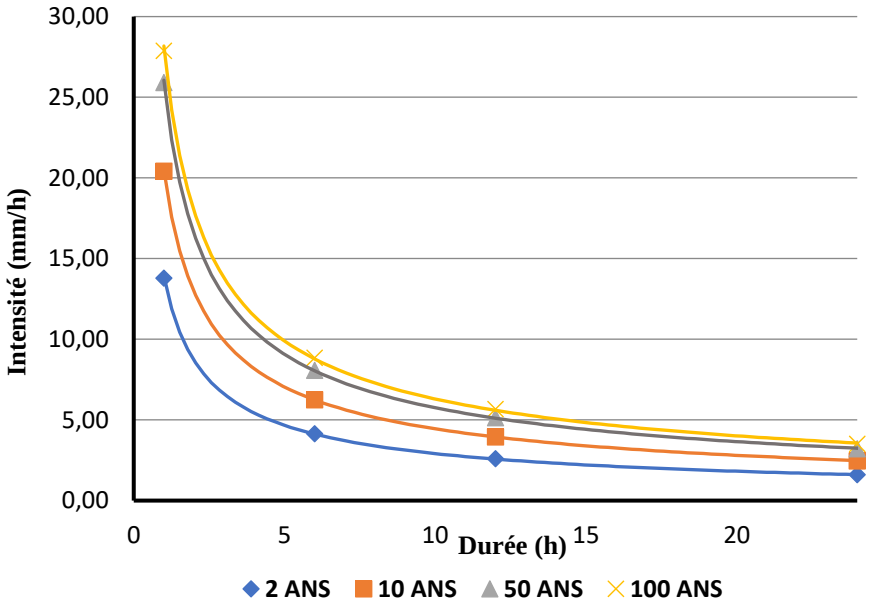


Figure 28: La Courbe IDF de la station Timdrine de durées 1, 6, 12 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans.

- **Station AZZABA :**

Tableau 19: Les intensités pluviométriques de durées 1 à 96 heures à Azzaba.

	Intensité(mm/h)						
Période	1h	6h	12h	24h	48h	72h	96h
2ans	10,42	3,31	2,12	1,35	0,89	0,68	0,56
10ans	17,42	5,37	3,41	2,20	1,35	1,06	0,89
50ans	23,11	7,14	4,53	2,93	1,76	1,42	1,18
100ans	25,59	7,91	5,02	3,25	1,94	1,57	1,30

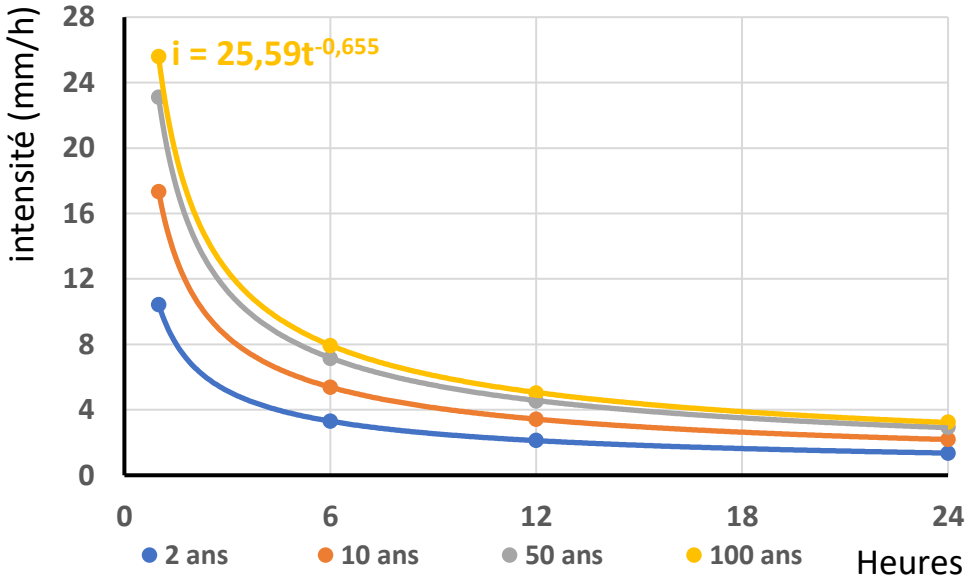


Figure 29: Courbes IDF de la station Azzaba de durées 1, 6, 12 et 24 heures pour les périodes de retour de 2, 10, 50, et 100 ans.

5. Les intensités centennales des pluies en (mm/h) :

Tableau 20: Intensités des pluies centennales en (mm/h) issues des données des stations pluviométriques.

Station	Azzaba	Timdrine	M'dez	Ait khabache
Intensité (mm/h)	**25,59**	**27,89**	**30,10**	**54,47**

Les intensités de précipitation centennales correspondent aux précipitations dont la probabilité d'apparition sur une année est de 1/100. Elles augmentent de l'aval du bassin versant à Azzaba jusqu'à l'amont à Ait Khabach ou on enregistre la plus forte intensité horaire probable (54,47 mm/h). Ces intensités augmentent donc avec l'altitude et il y a une très bonne corrélation entre ces altitudes et les intensités horaires des précipitations (fig. 30). Ces intensités augmentent en effet avec l'altitude en raison de l'élévation rapide de l'air (sous l'effet oraographique). Cet air se refroidit rapidement et précipite pendant une courte durée. Par ailleurs, aux hautes altitudes, l'atmosphère a souvent une plus grande instabilité, ce qui signifie que les mouvements verticaux de l'air sont plus forts.

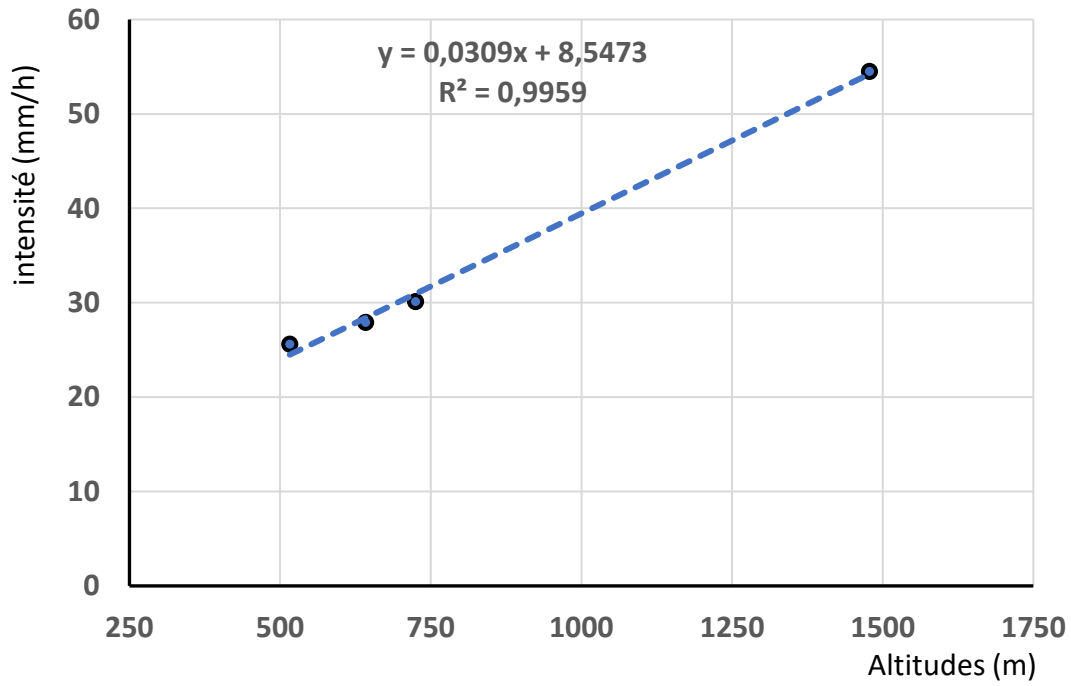


Figure 30 : Corrélation entre les altitudes des stations et l'intensité centennale de leurs précipitations horaires

6. Discussions et interprétation :

Après avoir entré les données des précipitations maximales sur une durée de 1 jour, 2 jours, 3 jours et 4 jours pour les 4 stations dans HYFRAN en utilisant différents intervalles de retour des événements pluvieux, nous avons choisi la loi d'ajustement la plus précise (Log normale) afin d'obtenir les hauteurs de précipitations pour chaque station en millimètres.

En utilisant la relation entre l'intensité et la hauteur des précipitations, I = H(mm) / D(heure), nous avons établi des tableaux d'intensités, ce qui a permis de construire les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence).

Les courbes IDF des 4 stations sont décroissantes. Cette diminution progressive s'explique par la relation inversement proportionnelle entre l'intensité et la durée, ce qui signifie que l'intensité des précipitations diminue avec l'augmentation de la durée. Cela influence la pente des courbes, qui devient plus importante lors des périodes de retour faibles.

Pour calculer les intensités de pluie pour de courtes durées spécifiques (1 heure, 6 heures et 12 heures), nous avons utilisé la formule de Montana (I = a/t^b). Ensuite, nous avons extrapolé les courbes IDF de type puissance pour chaque intervalle de retour, ce qui nous donne une idée des valeurs d'intensités qui diminuent progressivement avec le temps pour chacune des 4 stations étudiées, l'interprétation de ces courbes montre l'instabilité des intensités en allant de l'amont vers l'aval

Les résultats montrent clairement une corrélation entre les intensités des précipitations et l'altitude. Azzaba en aval peut recevoir 25,59 mm/h comme intensité centennale, et en amont à une altitude de 1478 m, Ait khabache recevrait une intensité de 54,47 mm/h. Les deux stations intermédiaires M'dez et Timdrine enregistrent respectivement des intensités de 30,1 et 27,89 mm/h.

Conclusion :

D'après l'étude et l'analyse des données des précipitations quotidiennes des 4 stations appartenant au Haut Sebou, nous avons obtenu des résultats graphiques et numériques qui donnent une idée globale sur l'intensité des précipitations.

L'approche IDF, largement reconnue comme l'une des méthodes les plus efficaces pour étudier et anticiper les risques liés aux précipitations, a été adoptée dans le but d'estimer les intensités des précipitations de chaque station, qui diffèrent selon plusieurs critères, notamment la localisation et l'altitude.

En amont, la station d'Ait Khabach enregistre des valeurs élevées d'intensité pour différentes périodes de retour. L'intensité horaire centennale pourrait atteindre 54 mm/h, ce qui indique une grande probabilité d'occurrence de risques liés aux précipitations en haute altitude. Ces intensités baissent régulièrement vers l'aval, où on a retrouvé à Azzaba à l'exutoire, une intensité, pour la même période de retour de 100 ans, de 25 mm/h.

Pour faire face aux différentes contraintes rencontrées dans la gestion des ressources en eau, le Maroc doit élaborer des mesures structurelles telles que la construction de barrages en amont, l'amélioration des réseaux d'assainissement, le renforcement des connaissances dans le domaine hydrométéorologique et la mise en place de systèmes automatiques de prévision, d'annonces et d'alertes des crues au niveau des grands bassins et des zones vulnérables aux inondations. Également, des mesures non structurelles, telles que les études, les sensibilisations ou les prévisions qui aideront à réduire les dangers dommageables sur le plan socio-économique.

Références Bibliographiques :

[1] R. Bouaicha et A. Benabdelfadel, « Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc », *Sécheresse*, vol. 21, nº 1e, p. 1-5, 2010.

[2] « Accueil - ABHS, Situation administrative, géographique et socio-démographique », 15 octobre 2014. https://www.abhsebou.ma/ (consulté le 12 juin 2023).

[3] A. Qadem, S. Lebaut, A. Brahim, M. Laaouane, et L. Manceau, « Spatialisation des ressources en eau dans le bassin versant du Haut Sebou (Maroc) », in *Colloque international" eau et climat-Regards croises nord/sud"*, 2012.

[4] « COURS BASSIN VERSANT ». http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/1C.htm (consulté le 12 juin 2023).

[5] A. Qadem, « Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut Sebou (Maroc) », *Géographie Univ. Lorraine*, 2015.

[6] S. Lebaut, A. Qadem, B. Akdim, E. Gille, et M. Laaouane, « Estimation des réserves en eau souterraine régulatrices dans la partie moyen-atlasique du fleuve Sebou (Maroc) », *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, vol. 384, p. 169-173, 2021.

[7] I. Soukrate et S. Zahir, « Aptitude des réanalyses pluviométriques à estimer les intensités des précipitations avec la méthode IDF. Cas du bassin versant de Tensift (Maroc) », 2019. [En ligne]. Disponible sur: http://saidi.ma/memoires/Soukrate-Zahir-2019.pdf

[8] S. El Adlouni et B. Bobée, « Hydrological frequency analysis using HYFRAN-PLUS software (Version-V2. 1) », *Users Guide Available Softw. DEMO*, 2015.

[9] B. Nasri, « Estimation des événements extrêmes par un modèle GEV-B-Splines. Étude de cas: précipitations extrêmes à la station Randsburg en Californie. », PhD Thesis, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 2013.

[10] « Hydrologie générale : Analyse fréquentielle ». https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/annexes/AnalFrequ.html (consulté le 12 juin 2023).

[11] « Loi de Gumbel », *Wikipédia*. 10 avril 2023. Consulté le: 12 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_de_Gumbel&oldid=203150401

Annexes :

- **Station Ait Khabache:**

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
2000/2001	13,5	111,4	5	58,4	39,4	1,1	18,6	8,1	34,2	3,8	0	23,4
2001/2002	59,3	26,4	9,7	82,8	0	22	31,6	103	53,7	0	1,1	15,9
2002/2003	20,7	19,6	88,6	23	26,6	10,5	68,3	45,8	33,6	32,6	45,4	27,2
2003/2004	0	74,3	53,1	51,2	0	29,2	15,6	40,3	71,5	25	3,7	0
2004/2005	28,5	31,1	39,5	29,6	5	37,9	15,4	0,4	13,2	59,5	8,3	12,3
2005/2006	3,2	67,7	36,6	17,7	46,4	38,6	32,1	53,8	93	17,5	20,1	12,4
2006/2007	6,3	14,3	6,7	24,2	10,2	18,7	14,6	119,6	35,6	2,6	7,6	8,1
2007/2008	22,3	66,1	47	2,2	42,2	61,4	2,2	9,9	62,5	0	13,1	11,3
2009/2010	126,6	2	14,4	66,1	49,4	66,4	40,4	72,9	16,4	9,6	123,8	47,9
2010/2011	40,5	47,7	27,6	35,1	6,8	19,7	37,3	25,6	112,1	23,8	4	74,1
2011/2012	3,2	49	66,7	10,7	35,8	2,3	34,4	25	9,4	11,1	55,7	25,9
2012/2013	10,3	90,8	60,2	13	23	10	44	19	59	35	60	13
2013/2014	65	11	43	10	31	25	15	3	10	37	23	4
2014/2015	51	26	67	14	29	17	77	17	114	31	18	18
2015/2016	27	22	4	0	8,6	36	28	3	40	15	43	29
2016/2017	2	7	32	47	9	0	7	21	9	28	0,5	139,8

- **Station Pont M'dez:**

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
2000/2001	11,40	152,10	16,40	30,70	31,80	2,30	12,60	6,10	19,10	1,50	0,00	2,10
2001/2002	8,80	31,00	9,60	61,50	8,30	6,90	27,10	92,50	31,60	1,00	0,00	16,60
2002/2003	3,80	22,90	31,80	22,90	31,20	22,70	29,30	56,80	16,10	18,10	1,50	8,50
2003/2004	0,00	71,10	85,90	53,30	1,50	20,80	31,00	51,90	38,50	6,70	0,00	5,20
2004/2005	20,70	48,20	49,30	39,10	6,00	22,10	10,60	2,90	2,90	17,00	0,00	7,90
2005/2006	1,20	41,90	32,80	22,50	44,60	43,00	17,30	37,00	31,70	16,70	25,60	0,00
2006/2007	0,00	21,60	10,70	9,80	6,40	23,10	15,50	118,30	32,80	0,00	10,80	1,20
2007/2008	17,30	43,70	32,50	6,50	54,20	55,50	7,60	6,50	51,10	0,00	1,40	0,00
2008/2009	83,60	19,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10
2009/2010	92,70	0,40	18,60	42,20	35,20	45,20	49,50	92,80	29,60	7,40	8,40	61,70
2010/2011	16,60	63,00	16,50	31,50	17,90	14,30	26,50	83,80	79,00	4,70	7,90	23,30
2011/2012	3,00	28,90	64,50	15,40	37,60	8,00	25,70	69,80	4,40	5,80	3,10	7,60
2012/2013	36,00	83,00	74,10	7,00	56,00	35,00	52,00	10,00	16,00	5,00	3,00	9,00
2013/2014	24,00	0,00	55,00	18,00	73,00	34,00	28,00	7,00	2,00	8,60	13,00	1,00
2014/2015	9,00	20,00	52,00	104,70	42,00	34,80	55,60	32,90	54,60	7,60	10,90	16,50
2015/2016	16,20	20,40	11,50	0,00	9,00	61,00	35,00	5,00	22,40	1,00	12,00	20,00
2016/2017	0,00	11,00	37,00	47,20	10,30	26,10	7,00	24,00	5,00	0,00	8,00	53,00

- **Station Timdrine:**

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
2000/2001	11,40	152,10	16,40	30,70	31,80	2,30	12,60	6,10	19,10	1,50	0,00	2,10
2001/2002	8,80	31,00	9,60	61,50	8,30	6,90	27,10	92,50	31,60	1,00	0,00	16,60
2002/2003	3,80	22,90	31,80	22,90	31,20	22,70	29,30	56,80	16,10	18,10	1,50	8,50
2003/2004	0,00	71,10	85,90	53,30	1,50	20,80	31,00	51,90	38,50	6,70	0,00	5,20
2004/2005	20,70	48,20	49,30	39,10	6,00	22,10	10,60	2,90	2,90	17,00	0,00	7,90
2005/2006	1,20	41,90	32,80	22,50	44,60	43,00	17,30	37,00	31,70	16,70	25,60	0,00
2006/2007	0,00	21,60	10,70	9,80	6,40	23,10	15,50	118,30	32,80	0,00	10,80	1,20
2007/2008	17,30	43,70	32,50	6,50	54,20	55,50	7,60	6,50	51,10	0,00	1,40	0,00
2008/2009	83,60	19,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10
2009/2010	92,70	0,40	18,60	42,20	35,20	45,20	49,50	92,80	29,60	7,40	8,40	61,70
2010/2011	16,60	63,00	16,50	31,50	17,90	14,30	26,50	83,80	79,00	4,70	7,90	23,30
2011/2012	3,00	28,90	64,50	15,40	37,60	8,00	25,70	69,80	4,40	5,80	3,10	7,60
2012/2013	36,00	83,00	74,10	7,00	56,00	35,00	52,00	10,00	16,00	5,00	3,00	9,00
2013/2014	24,00	0,00	55,00	18,00	73,00	34,00	28,00	7,00	2,00	8,60	13,00	1,00
2014/2015	9,00	20,00	52,00	104,70	42,00	34,80	55,60	32,90	54,60	7,60	10,90	16,50
2015/2016	16,20	20,40	11,50	0,00	9,00	61,00	35,00	5,00	22,40	1,00	12,00	20,00
2016/2017	0,00	11,00	37,00	47,20	10,30	26,10	7,00	24,00	5,00	0,00	8,00	53,00

- **Station Azzaba:**

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
2000/2001	44,9	128	35,5	47,5	53,5	12,9	14,8	1,1	6,2	0	0,2	1,8
2001/2002	25,5	9,5	19	94,3	3,7	4	42,8	143,8	19,4	4,8	0	1,7
2002/2003	0	29,4	67,7	36,4	93,5	29,9	48,6	58,7	11,8	5,3	0,1	0
2003/2004	0	80,3	99,2	87,3	17	22,4	31,4	67,7	39,1	0	0,6	0
2004/2005	0	50,8	65,4	44,6	7,5	32,9	43,2	6,9	0	13,7	0	1,3
2005/2006	1,8	55,6	59,5	30,6	78,5	79,7	53,6	46,1	27,9	15,2	23,2	0
2006/2007	6,8	18	7,6	43,2	26,8	24,1	27,3	127,3	13,2	0	0	0,1
2007/2008	8	53,3	30,5	17,2	66	49,6	2,6	11	49,1	0	0	0
2009/2010	50,7	5	30	57,7	75,1	85,8	60,2	206,8	28,8	4,1	3,7	50,5
2010/2011	5,6	66,7	31,7	31,9	63	24,4	23	64,8	86,6	10,2	0	2,8
2011/2012	3	25,3	79,6	17,2	19,1	10,5	28,4	77,8	6,7	0,4	7,2	5,1
2012/2013	10,6	118	94	17	55	40	83	10	11	2	0	5
2013/2014	31	0	60	16	69	45,4	16	10	5	7	7	1
2014/2015	2	15	80,6	25,3	50	47	54,1	17	19	2	0	7
2015/2016	12	40	10	0	16	67	51	20	52	3	0	7
2016/2017	6	25	37	58,3	11,8	32	19	23	7	0	0	13,4

•

- Station Ait khabache :

Mois	Précipitations(mm)
Septembre	32,78
Octobre	47,00
Novembre	37,26
Décembre	31,84
Janvier	23,05
Février	26,36
Mars	31,18
Avril	33,45
mai	46,79
Juin	22,45
Juillet	25,36
Août	27,98

Saisons	Précipitations(mm)
Automne	39,02
Printemps	27,08
Hiver	37,14
Eté	25,26

Année	Précipitations(mm)
2000/2001	316,9
2001/2002	405,5
2002/2003	441,9
2003/2004	363,9
2004/2005	280,7
2005/2006	439,1
2006/2007	268,5
2007/2008	340,2
2009/2010	635,9
2010/2011	454,3
2011/2012	329,2
2012/2013	437,3
2013/2014	277
2014/2015	479
2015/2016	255,6
2016/2017	302,3

- Station Pont M'DEZ :

Mois	Précipitations(mm)
Septembre	21,52
Octobre	33,44
Novembre	37,96
Décembre	28,14
Janvier	28,27
Février	29,52
Mars	25,99
Avril	39,98
Mai	25,74
Juin	6,53
Juillet	6,99
Août	14,43

Saisons	Précipitations(mm)
Automne	30,98
Printemps	28,64
Hiver	30,57
Eté	9,32

Année	Précipitations(mm)
2000/2001	286,10
2001/2002	294,90
2002/2003	265,60
2003/2004	365,90
2004/2005	226,70
2005/2006	314,30
2006/2007	250,20
2007/2008	276,30
2008/2009	104,80
2009/2010	483,70
2010/2011	385,00
2011/2012	273,80
2012/2013	386,10
2013/2014	263,60
2014/2015	440,60
2015/2016	213,50
2016/2017	228,60

- Station Timdrine:

Mois	Précipitations(mm)
Septembre	21,52
Octobre	33,44
Novembre	37,96
Décembre	28,14
Janvier	28,27
Février	29,52
Mars	25,99
Avril	39,98
mai	25,74
Juin	6,53
Juillet	6,99
Août	14,43

Saisons	Précipitations(mm)
Automne	30,98
Printemps	28,64
Hiver	30,57
Eté	9,32

Année	Précipitations(mm)
2000/2001	365,1
2001/2002	399,6
2002/2003	395
2003/2004	473,1
2004/2005	289,9
2005/2006	287,9
2006/2007	308,8
2007/2008	353
2009/2010	588,8
2010/2011	538,4
2011/2012	341
2012/2013	514,3
2013/2014	369
2014/2015	467,5
2015/2016	264,6
2016/2017	271

- Station Azzaba :

Mois	Précipitations(mm)
Septembre	17,56
Octobre	44,76
Novembre	50,59
Décembre	43,49
Janvier	46,54
Février	39,24
Mars	36,47
Avril	53,11
mai	22,83
Juin	4,40
Juillet	2,54
Août	5,69

Saisons	Précipitations(mm)
Automne	37,64
Printemps	43,09
Hiver	37,47
Eté	4,21

Année	Précipitations(mm)
2000/2001	346,4
2001/2002	368,5
2002/2003	381,4
2003/2004	445
2004/2005	266,3
2005/2006	471,7
2006/2007	294,4
2007/2008	287,3
2009/2010	658,4
2010/2011	410,7
2011/2012	280,3
2012/2013	445,6
2013/2014	267,4
2014/2015	319
2015/2016	278
2016/2017	232,5