



MARRAKECH

جامعة القاضي عياض

UNIVERSITÉ CADI AYYAD

كلية العلوم والتقنيات  
مراكش

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
MARRAKECH

Département des Sciences de la Terre

Licence en Sciences et Techniques  
Eau & Environnement



وكالة الحوض المائي لتانسيفت

Agence de Bassin Hydraulique du Tensift

Etude hydrologique du bassin versant du  
Tensift et recherche des solutions pour  
réduire les effets néfastes des crues  
extrêmes. Marrakech, (Maroc).

Réalisé par: SARAANE Asmaa et BEN YAHIA Roukaya

Soutenu: Le 21 Juin 2018

Devant le jury composé de :

Mr. L.HANICH : (FST- Marrakech), Encadrant.

Mr. R.BARAKATE : (ABHT-Marrakech), Encadrant.

Mr. M. JAFFAL : (FST- Marrakech), Examineur.

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2017-2018

# Remerciement :

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH, le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, nous adressons notre remerciement à nos professeurs, et particulièrement notre encadrant Mr L.HANICH pour leur aide et assistance.

Nous remercions également tous les membres de l'Agence du Bassin Hydraulique Tensift et surtout Mr R.BARAKATE, notre encadrant, pour ses précieux conseils et ses aides durant toute la période du stage.

Nous voudrions aussi remercier Mr M.JAFFAL d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin, nos vifs remerciements à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail.

## Table des matières

Remerciement .....	2
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux.....	6
Liste des photos .....	6
Introduction.....	7
Présentation de l'Agence de Bassin hydraulique du Tensift : .....	8

### Chapitre I : Présentation du bassin versant de Tensift

I- Définition d'un bassin versant.....	9
II- Généralités sur le bassin de Tensift.....	9
II-1- Situation géographique .....	9
II-2- Cadre géologique .....	10
II-3- Contexte climatique .....	11
II-4- Couverture végétale et sols .....	11
II-5- Réseau hydrographique .....	13
II-6- Eaux souterraines .....	14

### Chapitre II : Caractéristiques du bassin versant de Tensift.

I- Délimitation du bassin versant sous ArcGIS .....	16
II- Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant .....	18
II-1- Caractéristiques géométriques .....	18
II-1-1- Aire et périmètre .....	18
II-1-2- Indice de compacité de Gravelius KG .....	19
II-1-3- Rectangle équivalent .....	19
II-2- Caractéristiques du relief .....	20
II-2-1- Carte hypsométrique .....	20
II-2-2- Courbe hypsométrique .....	21
II-2-3- Indices de pente .....	23
II-3- Caractéristiques du réseau hydrographique .....	26
II-3-1- classification du réseau hydrographique selon Strahler .....	26
II-3-2- Densité de drainage .....	27
II-4- Le temps de concentration .....	28

## **Chapitre III : les méthodes d'estimation des débits des crues.**

I- Méthode hydrométéorologique : Gradex .....	30
I-1- Principe .....	30
I-2- Méthodologie .....	30
II- Méthodes empiriques .....	32
II-1- Formule de Fuller II .....	32
II-2- Formule de Mallet-Gautier .....	33
II-3- Formule de Hazan–Lazarvic .....	33
III- Méthode statistique .....	35
III-1- Le logiciel HYFRAN-PLUS .....	35
III-2- Analyse des graphes .....	36
III-3- Analyse des critères statistiques .....	37
III-4- Francou-Rodier .....	38

## **Chapitre IV : Etude des crues et recommandations pour atténuer leurs dégâts.**

I- Etude des hydrogrammes des crues .....	39
I-1- Définitions et généralités .....	39
I-2- Analyse .....	40
I-3- La crue exceptionnelle de novembre 2014 .....	43
II- Recommandations.....	44
Conclusion .....	47

## **Liste des figures**

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de Tensift .....	10
Figure 2 : Carte d'occupation de sol et de végétation du bassin versant de Tensift (AHATTAB 2016).....	12
Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Tensift .....	13
Figure 4 : Carte des nappes du bassin versant de Tensift (BRIDI 2012).....	15
Figure 5 : Carte hypsométrique du bassin versant de Tensift .....	21
Figure 6 : Courbe hypsométrique du bassin versant Tensift. ....	22
Figure 7 : carte des pentes du bassin versant de Tensift .....	25
Figure 8 : Classification du réseau hydrographique selon Strahler .....	27
Figure 9 : Ajustements graphique des données de $P_{jmax}$ et $Q_{jmax}$ selon la méthode de Gradex. ....	31
Figure 10 : Ajustement graphique des débits instantanés maxima annuels selon les lois statistiques, à la station Talmest .....	36
Figure 11 : Hyétogramme et hydrogramme de crue. ....	39
Figure 12 : Hydrogramme de la crue de 1999 à Talmest. ....	40
Figure 13 : Hydrogramme de la crue de 2008 à Talmest. ....	40
Figure 14 : Hydrogramme de la crue de 2009 à Talmest. ....	41
Figure 15 : Hydrogramme de la crue de 2013 à Talmest. ....	41
Figure 16 : Hydrogramme de la crue de 2014 à Talmest. ....	42
Figure 17 : Crues majeurs du bassin versant Tensift a la station Talmest 1999-2016.....	43

## **Liste des tableaux**

Tableau 1 : géologie du bassin versant Tensift .....	11
Tableau 2 : Caractéristiques géométriques du bassin versant Tensift. ....	20
Tableau 3 : Répartition hypsométrique du bassin versant de Tensift .....	22
Tableau 4 : formules de calcul des indices de pente .....	23
Tableau 5 : classification du relief en fonction de la dénivelée spécifique.....	24
Tableau 6 : Caractéristiques topographiques du bassin versant Tensift. ....	25
Tableau 7 : Les formules de calcul du temps de concentration .....	28
Tableau 8 : Récapitulation du calcul de temps de concentration.....	29
Tableau 9 : extrapolation des débits par la méthode Gradex .....	31
Tableau 10 : Formules de Hazan et Lazarevic .....	34
Tableau 11 : Débit de pointe pour les différentes périodes de retour.....	35
Tableau 12 : Ajustements numériques des lois statistiques pour la période de retour 100 ans. .....	37
Tableau 13 : Estimation des débits selon la loi Log Normal.....	37
Tableau 14 : Transposition du débit instantané maximum annuel .....	38
Tableau 15 : Caractéristique de la crue de 1999 à Talmest. ....	40
Tableau 16 : Caractéristique de la crue de 2008 à Talmest. ....	40
Tableau 17 : Caractéristique de la crue de 2009 à Talmest. ....	41
Tableau 18 : Caractéristique de la crue de 2013 à Talmest. ....	41
Tableau 19 : Caractéristique de la crue de 2014 à Talmest .....	42

## **Liste des photos**

Photo 1 : Inondation des locaux de la station de Talmest sur l'oued Tensift (BELKHARCHACH 2015).....	44
Photo 2 : Route inondée par l'oued Rdat, sidi rahal (BELKHARCHACH 2015). ....	44
Photo 3 : Seuil en béton .....	45
Photo 4 : Seuil en gabion .....	45

# INTRODUCTION :

Le bassin versant de Tensift est l'un des plus grands bassins du Maroc, comporte deux grandes entités morphologiques globales : un ensemble montagneux très élevé et une vaste plaine alluviale, il est caractérisé par sa grande superficie ainsi que son climat semi-aride et sa diversité géologique.

Nous visons par ce travail d'étudier les différentes caractéristiques de cette unité hydrologique, également son comportement vis-à-vis aux crues extrêmes et l'influence de la topographie sur sa réponse hydrologique.

Cette étude consiste aussi à étudier les cinq crues majeures qui ont affectés ce bassin, entre 1999 et 2016, spécialement l'évènement du Novembre 2014, qui a influencé les débits centennaux estimés, afin de proposer des solutions pour diminuer ces débits ainsi que les dégâts des crues dans la totalité du bassin.

Le traitement des données pendant la détermination des caractéristiques, l'estimation des débits et la réalisation des cartes ont été fait par des logiciels professionnels, tel que l'extension ArcMap du logiciel ArcGIS.

Compte tenu des objectifs de notre travail, nous avons choisi de le présenter en plusieurs chapitres :

- Etude morphométrique du bassin.
- Estimation de débit de crue par différentes méthodes.
- Etude des crues et proposition des solutions pour réduire leurs dégâts.

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

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

Elle compte administrativement :

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

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

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

**Extrait de la loi 10/95**

# Chapitre I : Présentation du bassin versant de Tensift.

---

## I. Définition d'un bassin versant :

Le bassin versant est une surface élémentaire hydrologiquement close, tel que chaque goutte d'eau tombée, non évaporée ou absorbée par infiltration, est acheminée par gravité en un point appelé exutoire du bassin versant.

Il est également défini d'après l'article 15 de la loi 10-95 de l'eau par :

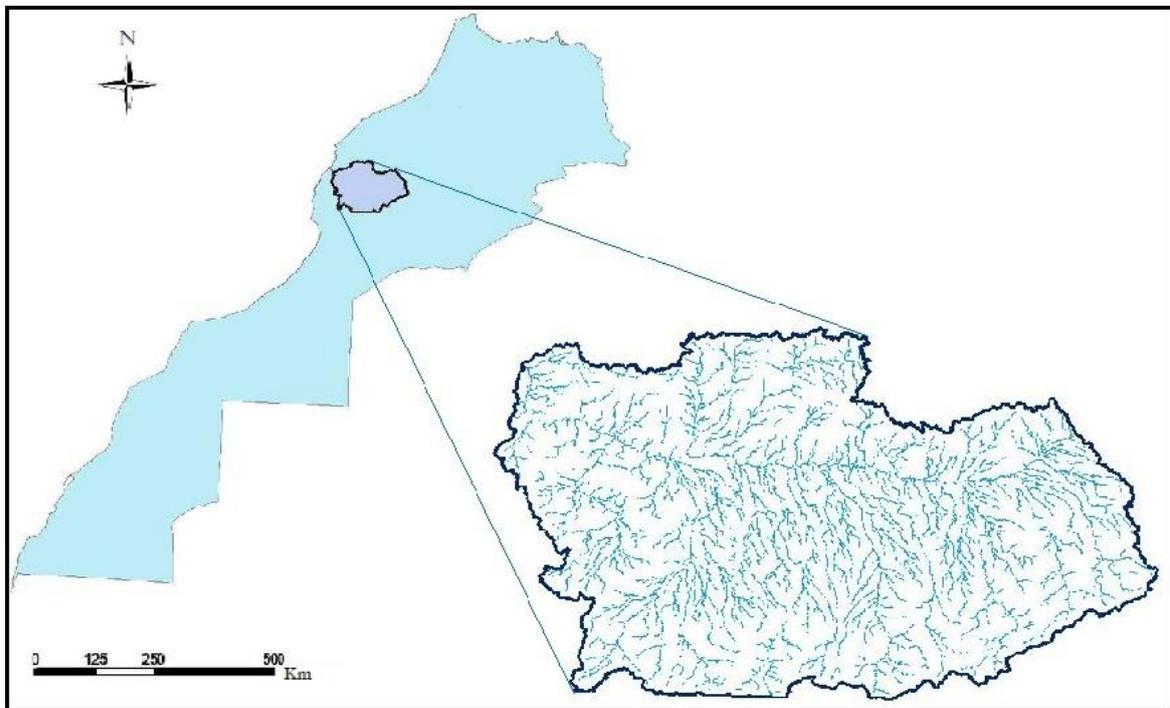
« La totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents de la source à la mer. »

## II. Généralités sur le bassin de Tensift :

### II-1- Situation géographique.

Le bassin versant de Tensift est situé au centre Ouest du Maroc entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 12' Ouest et s'étend sur une superficie de 19295 km<sup>2</sup>. Il est limité au Nord par le massif des « Jbilet », formé des montagnes de faibles altitudes, au Sud par « la chaîne du Haut Atlas », qui constitue la zone de production des eaux et se caractérise par une hydrologie de surface très active et des précipitations importantes, à l'Est par la ligne de partage des eaux, peu marquée, séparant le bassin du Tensift de celui de la Tessaout ,affluent d'Oum Errabiâ, et à l'Ouest par l'océan Atlantique où se situe son exutoire.

L'oued Tensift côtoie au Nord-Est la province d'El Kelâat Sraghna, à l'Est celle d'Azilal, au Sud-Est celle d'Ouarzazate, au Sud-Ouest les provinces d'Essaouira et au Nord-Ouest celle de Safi.



**Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de Tensift.**

## **II-2- Cadre géologique :**

L'étude géologique d'un bassin versant vise à déterminer la perméabilité des affleurements. Cette dernière influence la vitesse de montée des crues et leur volume. A savoir qu'un bassin à substratum imperméable présente une crue plus rapide et plus violente qu'un bassin à substratum perméable, soumis à une même averse.

La géologie du bassin versant de Tensift est très diversifiée, comme il est présenté dans le tableau suivant :

Distribution des Régions dans le Bassin de Tensift	Lithologie	Perméabilité
Le Haut Atlas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Roches éruptives et métamorphiques précambriennes (granites, diorites, dolérites, andésites et rhyolites).</li> <li>- Schistes primaires.</li> <li>- Formations secondaires rougeâtres dominées par des calcaires, des grès, des marnes et des argiles.</li> </ul>	Faible
Les Jbilet	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schistes sombres souvent lités.</li> <li>- Schistes argileux.</li> <li>- Schistes gréseux avec des bancs épais de grès ou de quartzites.</li> <li>- Formations moins étendues notamment des conglomérats, des affleurements calcaires et siliceux, des roches éruptives comme les granites et les gabbros du Précambrien.</li> </ul>	Très faible
La plaine du Haouz	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Socle primaire schisteux est recouvert par des formations secondaires et tertiaires variées, notamment des grès rouges du Permo-Trias ainsi que des calcaires, marnes et grès du Crétacé et de l'Eocène.</li> <li>- Remplissage quaternaire est assuré par des épandages alluviaux caillouteux, limoneux ou sableux, dont les plus anciens sont surmontés d'une carapace calcaire.</li> </ul>	Moyenne-haute

**Tableau 1 : géologie du bassin versant Tensift.**

### **II-3- Contexte climatique :**

Le climat du bassin versant de Tensift est aride à semi-aride en général et humide dans le haute Atlas. Les précipitations sont très irrégulières et se caractérisent par une grande variabilité spatio-temporelle, cependant la température est beaucoup plus régulière à l'échelle temporelle.

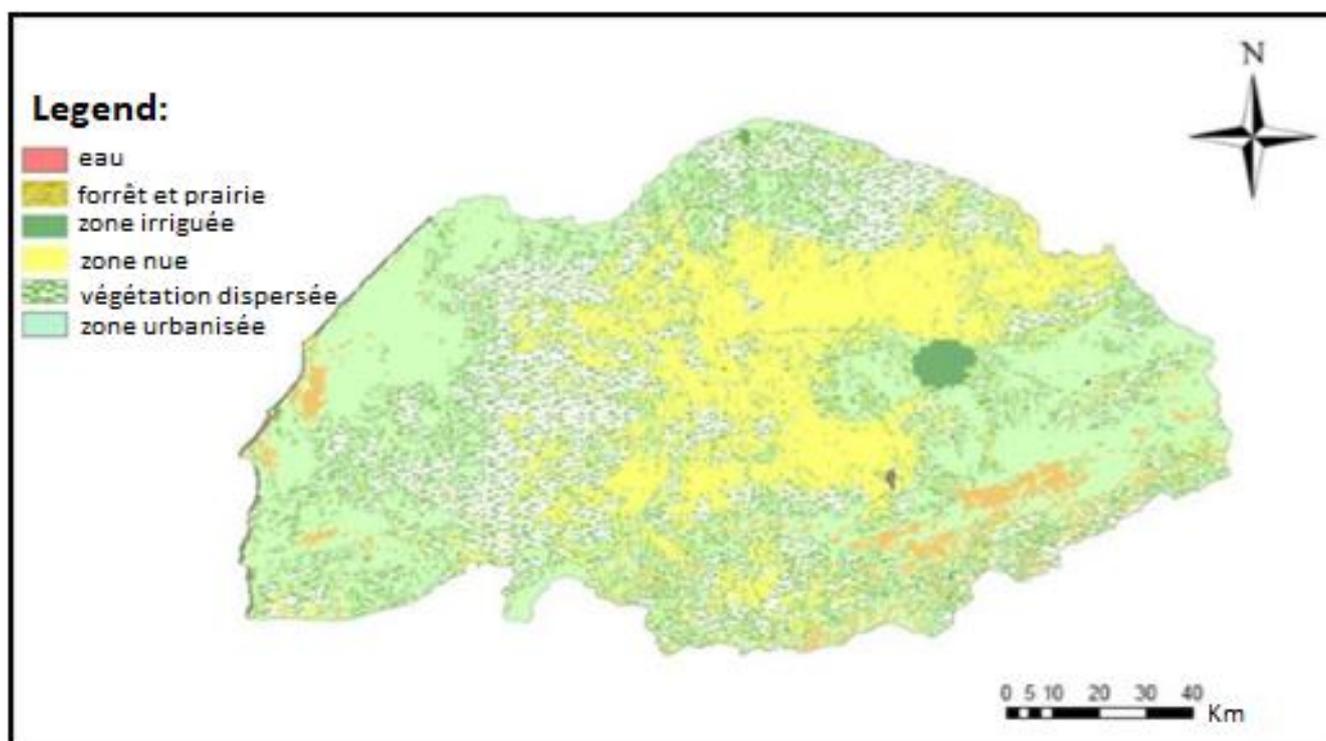
L'évaporation moyenne annuelle est minimale pendant les mois les plus froids (Décembre et Janvier).

### **II-4- Couverture végétale et sols :**

La végétation dans le bassin versant de Tensift varie selon l'altitude et la nature des terrains.

La carte ci-dessous nous permet de distingué 4 zones homogènes :

- Une région dans la partie du haut Atlas qui se caractérise par sa densité faible et ses plantes dispersées et assez faible.
- Une deuxième région dans la partie centrale entourant la zone de Marrakech avec une forte densité urbaine.
- Une troisième dans la partie Nord caractérisée par ses prairies et forêts.
- Une quatrième dans la partie ouest dans la plaine d'Essaouira qui se distingue par ses prairies et forêts et ses terres à usage agricole.



**Figure 2 : Carte d'occupation de sol et de végétation du bassin versant de Tensift (AHATTAB 2016).**

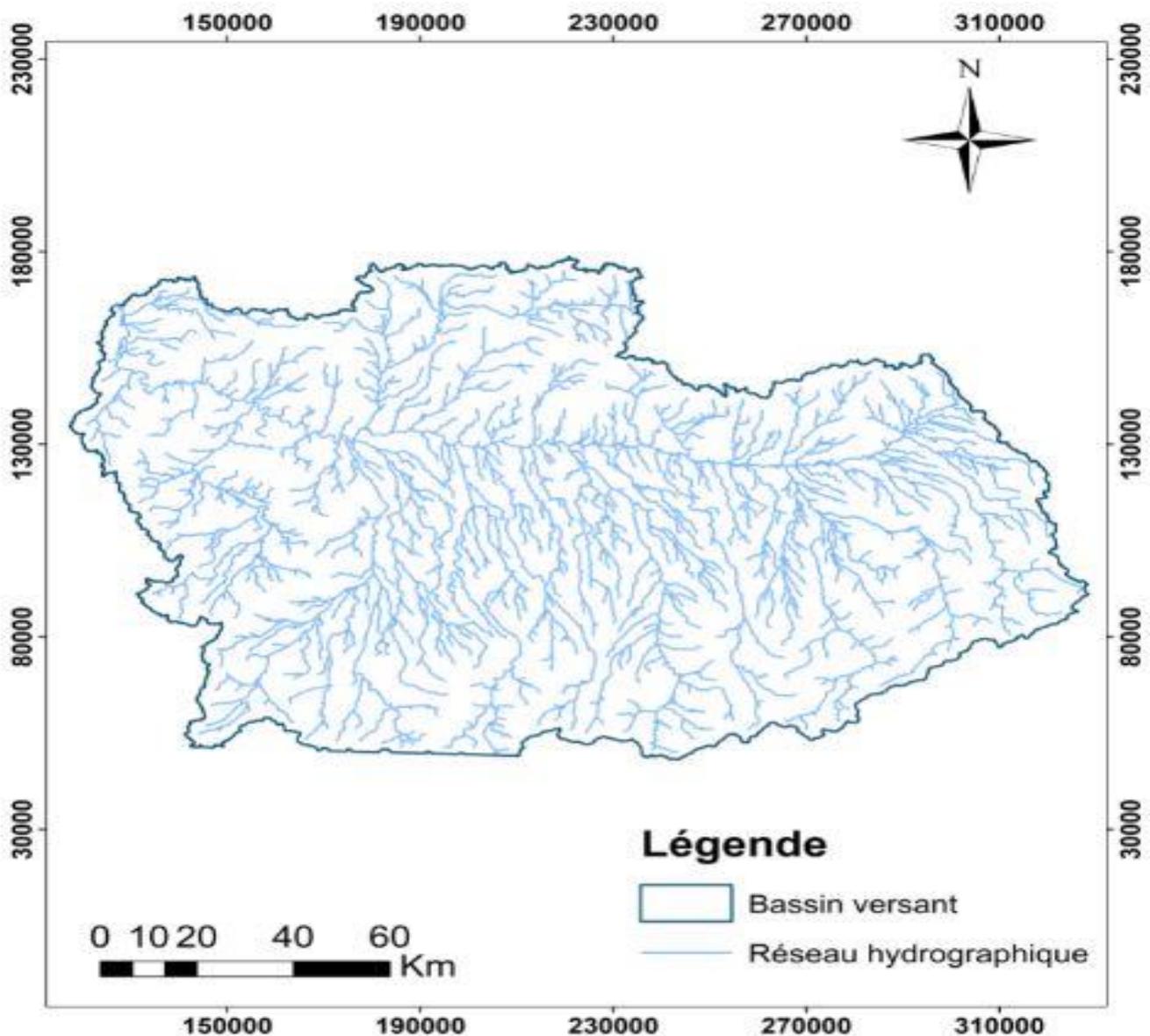
Entre les Jbilet et les montagnes de l'Atlas (la région de Marrakech-Tensift-Al Haouz) on trouve différents types de sol comme :

- Sol Isohumique appelé localement « Requane ».
- Sol Cacemagnésique appelé localement « Biad ». Ce type de sol existe au nord-ouest de N'Fis, sud-est de la région centrale et au nord d'El Kalaa d'Essraghna.
- Sol inexploité appelé « Hach » il couvre une petite partie de la zone, le long des rivières de la Plaine de Haouz et au pied des montagnes de l'Atlas.

## II-5- Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique du bassin versant comporte principalement l'Oued Tensift, ce dernier s'écoule d'Est en Ouest sur une longueur de 315 km. Il est alimenté principalement par ses affluents de la rive gauche. Les cours d'eau de la rive droite proviennent d'événements pluvieux violents et contribuent épisodiquement à son alimentation. Il en résulte un bassin versant très dissymétrique dont la rive droite ne joue qu'un rôle hydrologique secondaire.

Les principaux affluents de l'oued Tensift contribuant aux écoulements de surface sont : Oued Ghdat, Oued Zat, Oued Ourika, Oued Reraya, Oued N'fis, Assif El Mal, Oued Chichaoua, Oued Tiroula et Oued Talmest.



**Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Tensift.**

## II-6- Eaux souterraines :

Les eaux souterraines sont caractérisées par une répartition géographique inégale à cause de la diversité de la géologie du bassin versant de Tensift et l'inégale répartition géographique de la pluviométrie. Parmi les nappes les plus importantes, on distingue :

➤ La nappe du Haouz :

Limitée au Sud par la chaîne du Haut atlas et au Nord par les chaînons des Jbilets, elle s'étend d'Est en Ouest sur une superficie de 6000 km<sup>2</sup>.

Elle est alimentée par l'infiltration des eaux de crues des oueds atlasiques traversant la plaine et par le retour des eaux d'irrigation. . L'écoulement général de la nappe se fait du Sud vers le Nord, pour être drainée par l'oued Tensift.

➤ La nappe de la Bahira :

La plaine de la Bahira s'étend sur une superficie d'environ 5 000 km<sup>2</sup> ; La zone d'action de l'ABHT n'en compte que 3000 Km<sup>2</sup> renfermant les parties occidentale et centrale.

Situé à une trentaine de kilomètres au Nord de Marrakech, renfermant plusieurs nappes souterraines dont les principales sont :

- La nappe phréatique de remplissage plio-quaternaire.
- La nappe des calcaires lutétiens.
- La nappe de la formation marno-schisteuse de l'Yprésien supérieur et du Lutétien inférieur.
- La nappe des niveaux phosphatés crétacés et paléocènes.

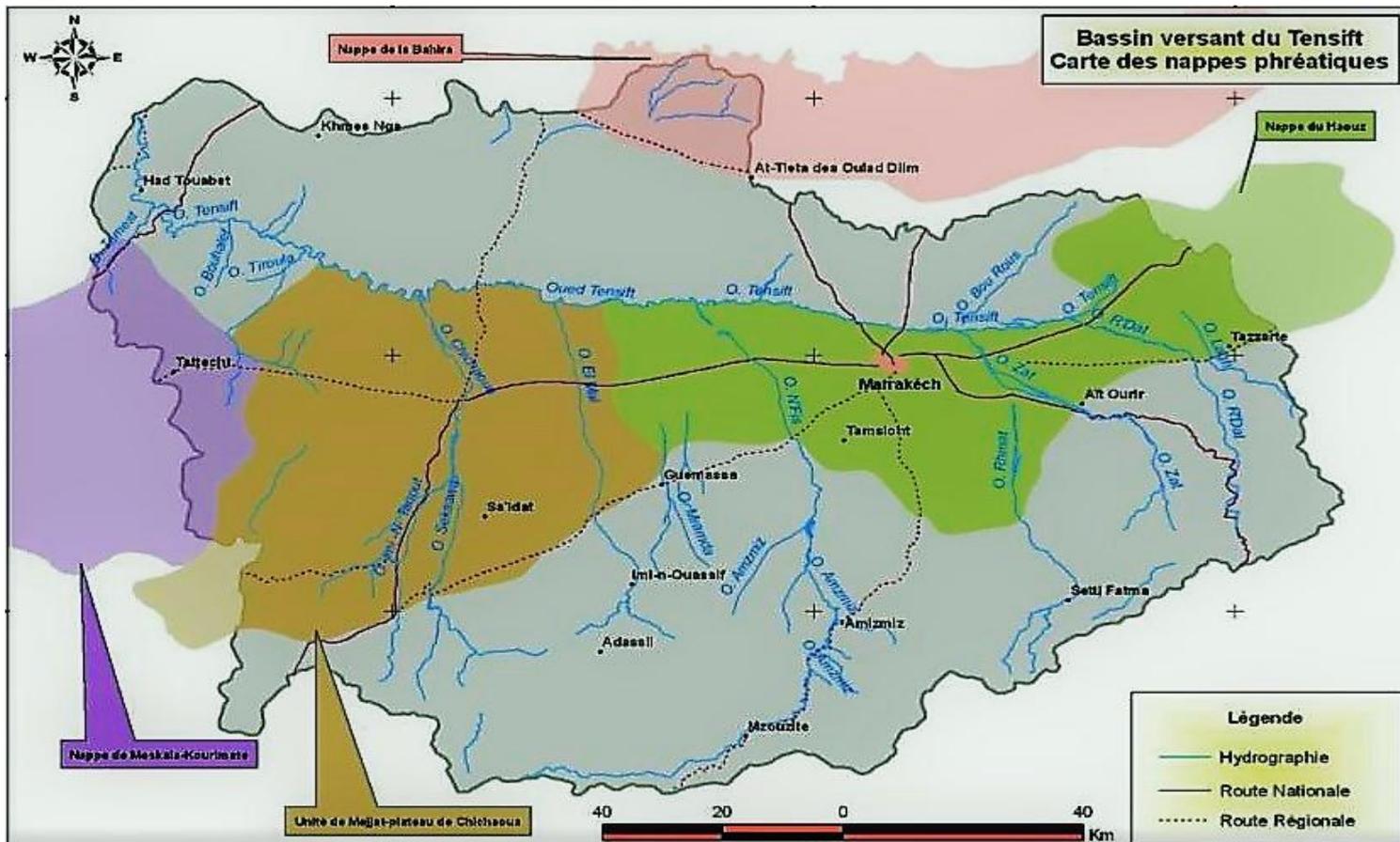
➤ La nappe de Mejjat :

Limitée au Nord par l'oued Tensift et au Sud par le Haut Atlas, elle s'étend sur une superficie de 1 000 km<sup>2</sup> environ, elle renferme deux aquifères : la nappe phréatique plio-quaternaire et la nappe éo-crétacé. Les principales alimentations de cette nappe proviennent des infiltrations directes des eaux de pluie et des eaux de crue des oueds Imintanout et Ameznas.

➤ La nappe de Meskala-Kourimate :

S'étendant sur une superficie de l'ordre de 1 600 km<sup>2</sup> et est constituée de deux aquifères superposés, l'un circulant dans les calcaires de l'Eocène, et l'autre dans des terrains dolomitiques du Crétacé d'une superficie respectivement de 100 et 1 600 km<sup>2</sup>.

La carte suivante illustre la localisation des différentes nappes sur l'ensemble du bassin versant :



**Figure 4 : Carte des nappes du bassin versant de Tensift (BRIDI 2012).**

# Chapitre II : Caractéristiques du bassin versant de Tensift.

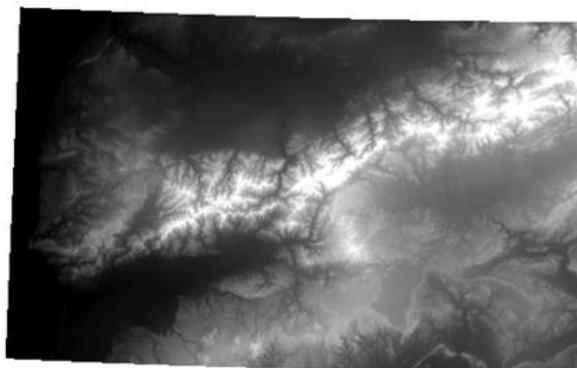
---

## I. Délimitation du bassin versant sous ArcGIS.

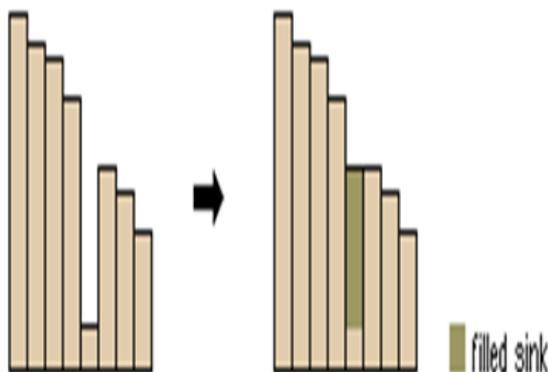
Pour délimiter ce bassin versant on s'est basé sur le modèle numérique de terrain (MNT) qui est une représentation en trois dimensions de la surface de la terre, créée à partir des données d'altitudes du terrain.

Cette délimitation a été effectuée en suivant plusieurs étapes :

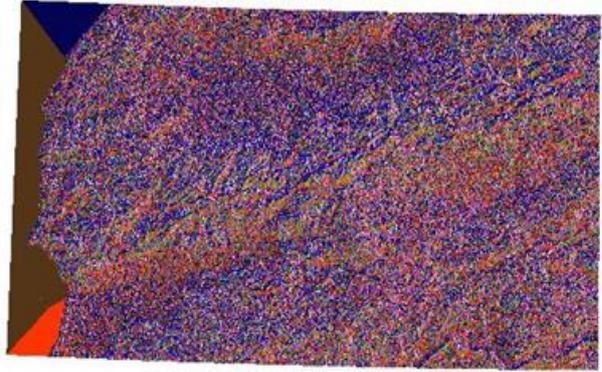
1. La première étape consiste à télécharger 12 images pour couvrir la zone d'étude puis les fusionner en une seule en utilisant la commande « **Mosaic to new raster** ».



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



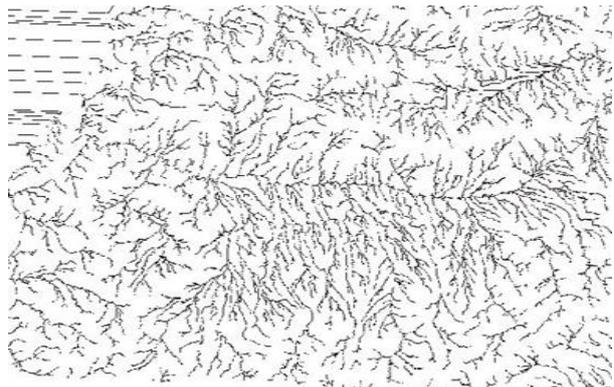
3. La commande « **Flow Direction** » (Directions des écoulements) utilisée, permet d'identifier les directions des écoulements dans la carte raster MNT.



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



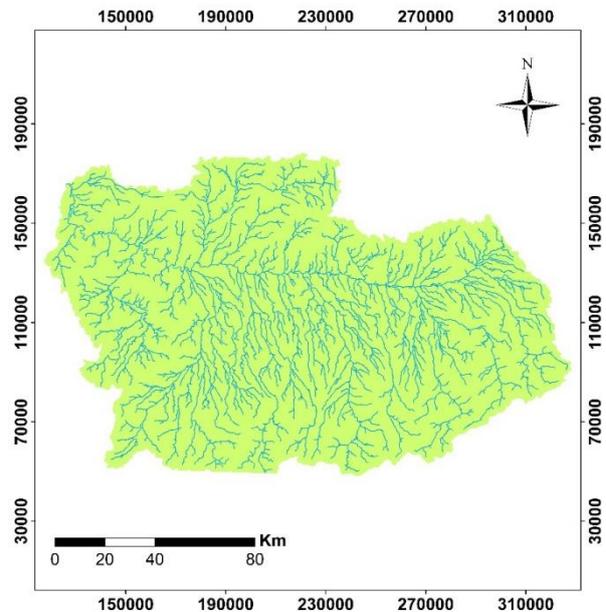
5. La fonction **Vectorisation du réseau hydrographique**, permet de générer une couche correspondant au réseau hydrographique. Le niveau de détail du réseau peut être défini par l'utilisateur en nombre de cellules : 200, 300, 500, 1000...etc. Puis il faut convertir ce réseau en forme linéaire à l'aide de « Stream to Feature ».



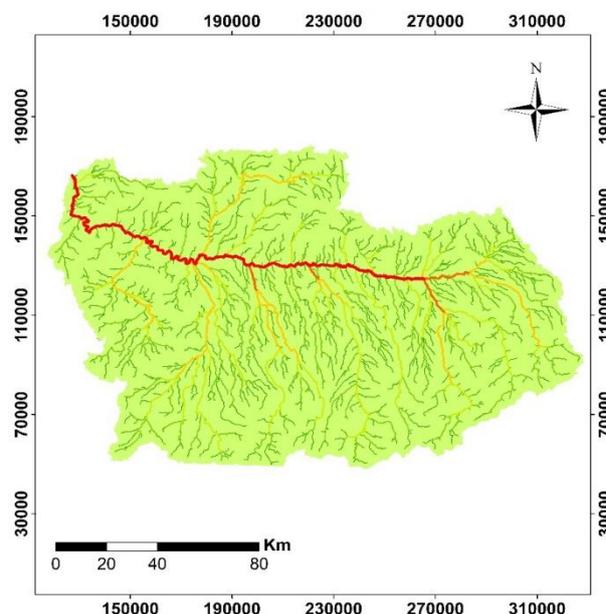
6. La fonction « **Watershed** » (Bassin versant) permet de délimiter le bassin après avoir indiqué l'exutoire sur le cours d'eau principal.



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



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



## II. Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant.

### II-1- Caractéristiques géométriques :

#### II-1-1- Aire et périmètre :

La superficie et le périmètre d'un bassin versant représentent l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, donc ils vont jouer un rôle primordial dans l'étude du bassin versant.

Le bassin versant de Tensift s'étend sur une superficie de 19295 km<sup>2</sup> et un périmètre de 943 km.

### II-1-2- Indice de compacité de Gravelius $K_G$ :

Permet de déterminer la forme du bassin et le comparer à un cercle de même surface pour lequel  $K_G = 1$ , ce paramètre est calculé par la relation suivante :

$$K_G = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

S : surface du bassin versant en  $\text{km}^2$ .

P : périmètre du bassin versant en km.

Plus l'indice de compacité est élevé plus la forme du bassin est allongé et plus le temps de rassemblement des eaux vers l'exutoire sera important.

Dans le cas de Tensift  $K_G = 1.91$  ; donc ce bassin a une forme allongée, cette forme favorise les faibles débits de pointe lors d'une averse.

### II-1-3- Rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent correspond à une transformation géométrique qui permet d'assimiler le bassin à un rectangle de longueur L et une largeur l, ayant la même surface et le même périmètre que le bassin versant. Il permet de comparer facilement les bassins entre eux.

Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes :

Longueur du rectangle équivalent :

$$Leq = KG \frac{\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{KG} \right)^2} \right]$$

Largeur du rectangle équivalent :

$$leq = KG \frac{\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{KG} \right)^2} \right]$$

Avec :

A : superficie du bassin versant.

$K_G$  : Indice de compacité de Gravelius.

Surface (Km <sup>2</sup> )	Périmètre (Km)	Indice de compacité	Rectangle équivalent	
			Longueur (Km)	Largeur (Km)
19295	943	1.9	426	45

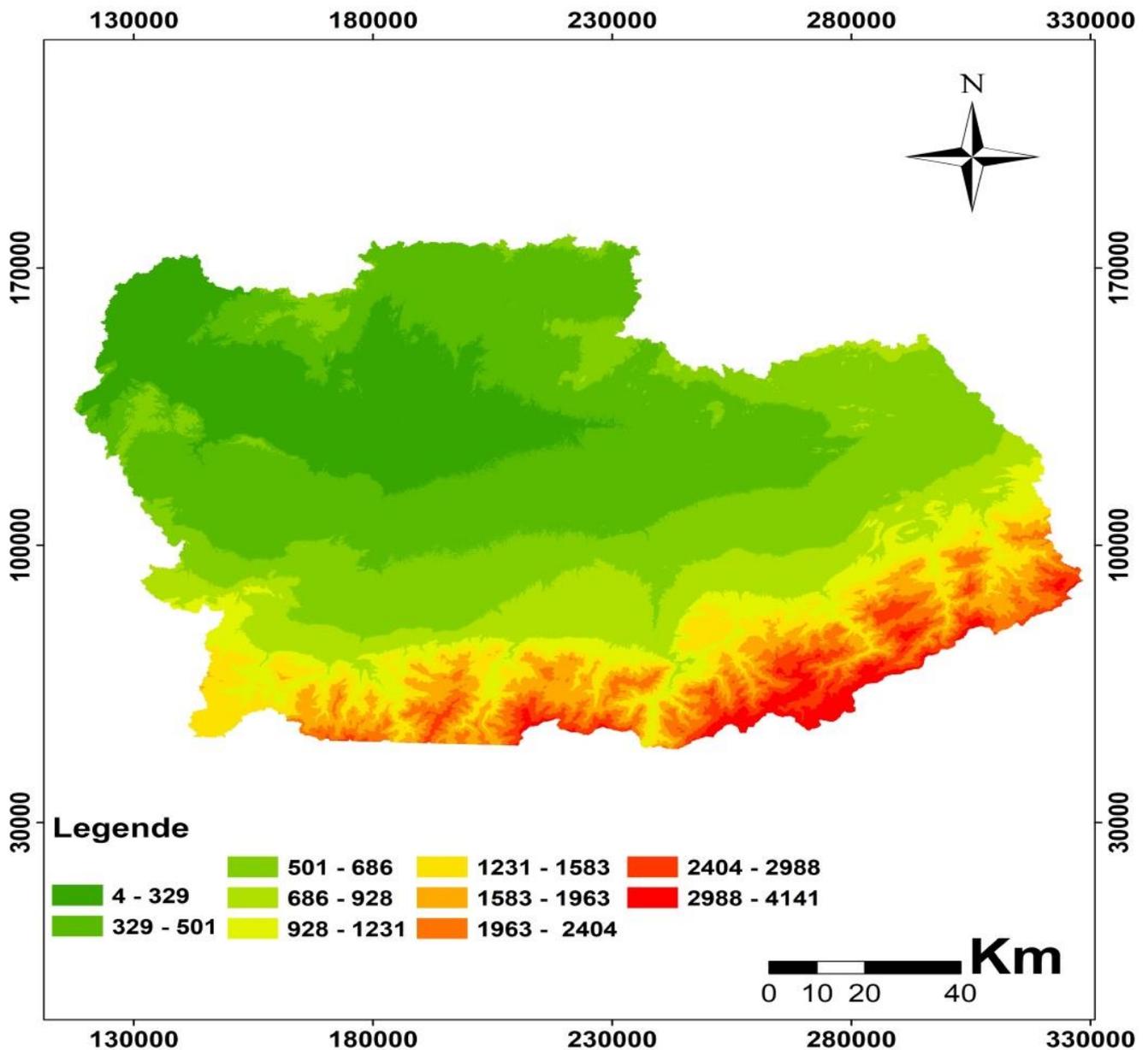
**Tableau 2 : Caractéristiques géométriques du bassin versant Tensift.**

## II-2- Caractéristiques du relief :

### II-2-1- Carte hypsométrique :

Permet de déterminer la répartition des altitudes sur l'ensemble du bassin versant, en calculant l'aire de chaque tranche d'altitude.

Cette carte montre une prédominance des terrains compris entre 4 et 500m.



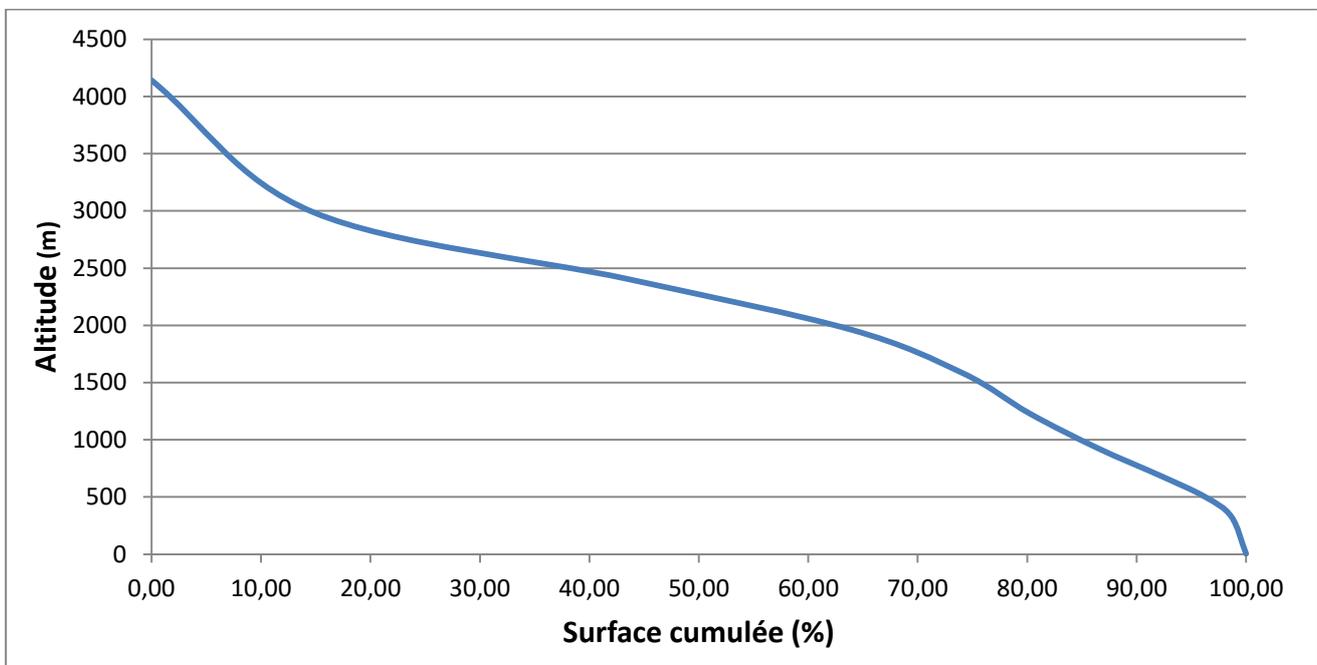
**Figure 5 : Carte hypsométrique du bassin versant de Tensift.**

### II-2-2- Courbe hypsométrique :

Le relief est illustré par la courbe hypsométrique qui permet de décrire son évolution à partir d'une classification des altitudes. Elle est obtenue en mesurant les surfaces correspondantes aux tranches d'altitudes et en leur attribuant les pourcentages de la surface totale.

Tranches d'altitudes (m)	Surface (km <sup>2</sup> )	Surface (%)	Surface cumulée (%)
4-329	2853,05	14,79	0,00
329-501	5547,93	28,75	14,79
501-686	3926,13	20,35	43,54
686-928	1970,35	10,21	63,89
928-1231	1176,50	6,10	74,10
1231-1583	1200,56	6,22	80,20
1583-1963	1109,67	5,75	86,42
1963-2404	789,00	4,09	92,17
2404-2988	462,28	2,40	96,26
2988-4141	259,53	1,35	98,65
<b>Total</b>	19295	100,00	100

**Tableau 3: Répartition hypsométrique du bassin versant de Tensift.**



**Figure 6 : Courbe hypsométrique du bassin versant Tensift.**

A partir de cette courbe on peut déduire :

➤ **L'altitude moyenne :**

Permet d'analyser les lois réglant les précipitations et le ruissellement superficiel, elle est calculée par la relation suivante :

$$H_{moy} = \frac{\sum A_i H_i}{A_t}$$

A<sub>i</sub> : L'aire comprise entre deux courbes de niveau en Km<sup>2</sup>.

H<sub>i</sub> : L'altitude moyenne entre deux courbes de niveau en m.

At : Surface totale du bassin en Km<sup>2</sup>.

➤ L'altitude maximale :

C'est l'altitude la plus fréquente (ou le mode), représentant le point le plus élevé du bassin.

➤ L'altitude minimale :

Représente le point le plus bas du bassin situé généralement à l'exutoire.

➤ L'altitude médiane :

L'altitude lue, sur la courbe hypsométrique, au point d'abscisse 50%.

### II-2-3- Indices de pente :

Les indices de pentes sont des paramètres qui nous renseignent sur la topographie du bassin versant. On distingue différents indices illustrés dans le tableau suivant :

Indice de pente	Formule de calcul	Paramètres
La pente moyenne du bassin (m/Km)	$P_{moy} = 2 \times \frac{h_{moy}}{L}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>L</b> : la longueur du cours d'eau considéré (Km).</li> <li>- <b>h<sub>moy</sub></b> : L'altitude moyenne du bassin (m).</li> </ul>
L'indice de pente classique (%)	$I_p = \frac{(H_{max} - H_{min})}{Leq}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>H<sub>max</sub></b> : l'altitude maximale du bassin (m).</li> <li>- <b>H<sub>min</sub></b> : l'altitude minimale du bassin (m).</li> <li>- <b>Leq</b> : la longueur du rectangle équivalent.</li> </ul>
Indice de pente global (%)	$I_g = \frac{Du}{Leq}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Du</b> : la dénivelée utile qui est l'altitude entre laquelle s'inscrit 90% de la surface du bassin</li> <li><b>Du = H<sub>5%</sub> - H<sub>95%</sub></b> (m)</li> </ul>

**Tableau 4 : formules de calcul des indices de pente.**

L'indice de pente global  $I_g$  permet de faciliter l'étude et classer des bassins versants d'une superficie de l'ordre de 25 Km<sup>2</sup>.

➤ Dénivelé spécifique :

La dénivelée spécifique se calcule par la formule suivante :

$$Ds = I_g \sqrt{A} \text{ (m)}$$

Contrairement à l'indice global  $I_g$ , la dénivelée spécifique  $D_s$  est indépendante de la surface et permet alors de comparer les pentes des bassins de tailles différentes.

La classification du relief en fonction de la dénivelée spécifique  $D_s$  est donnée selon l'IRD (Institut de Recherche et Développement en France) dans le tableau suivant :

Type de relief	Intervalle
Très faible	$D_s < 10$ m
Faible	$10 \text{ m} \leq D_s < 25$ m
Assez faible	$25 \text{ m} \leq D_s < 50$ m
Modéré	$50 \text{ m} \leq D_s < 100$ m
Assez fort	$100 \text{ m} \leq D_s < 250$ m
Fort	$250 \text{ m} \leq D_s < 500$ m
Très fort	$D_s \geq 500$ m

**Tableau 5 : classification du relief en fonction de la dénivelée spécifique.**

➤ **Pente moyenne de l'écoulement :**

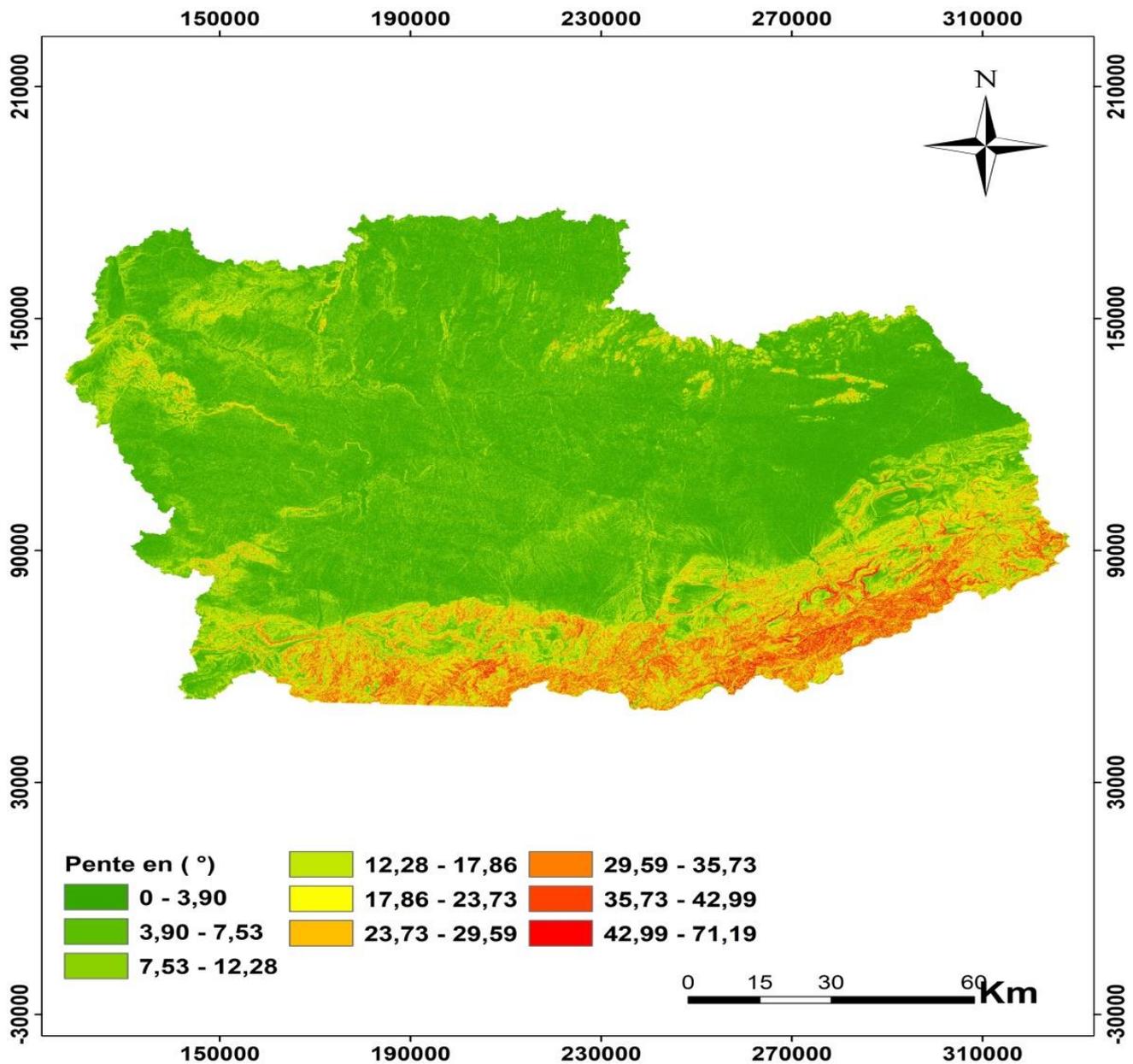
La pente de l'écoulement se calcule par la relation suivante :

$$P_{\text{moy écoulement}} = \frac{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}}{L} \left( \text{en } \frac{\text{m}}{\text{Km}} \right)$$

Avec :

- **H<sub>max</sub>** et **H<sub>min</sub>** sont respectivement les altitudes max et min le long du cours d'eau.
- **L** est la longueur du cours d'eau principal en Km.

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



**Figure 7 : carte des pentes du bassin versant de Tensift.**

D'après la carte on constate que le bassin versant de Tensift est caractérisé par des pentes assez faibles sur la plaine mais beaucoup plus importantes sur les montagnes.

Altitudes caractéristiques (m)				Indices de pente			Dénivelée spécifique (m)	Pente de l'écoulement (m/Km)
Hmax	Hmin	Hmoy	Hmed	Ip	Ig	P (m/Km)		
4141	4	804	2143	0,0097	0,0073	5,1	1013	13,13

**Tableau 6 : Caractéristiques topographiques du bassin versant Tensift.**

## II-3- Caractéristiques du réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est un ensemble hiérarchisé et structuré des cours d'eau permanents ou temporaires, qui assurent le drainage des eaux d'un bassin versant vers l'exutoire.

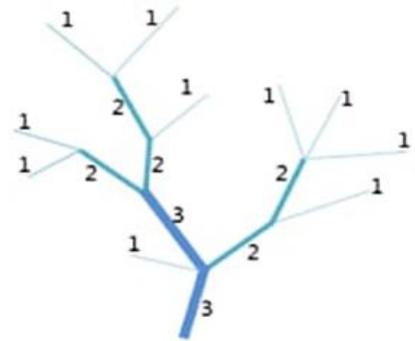
Parmi les paramètres qui peuvent décrire le réseau hydrographique on trouve :

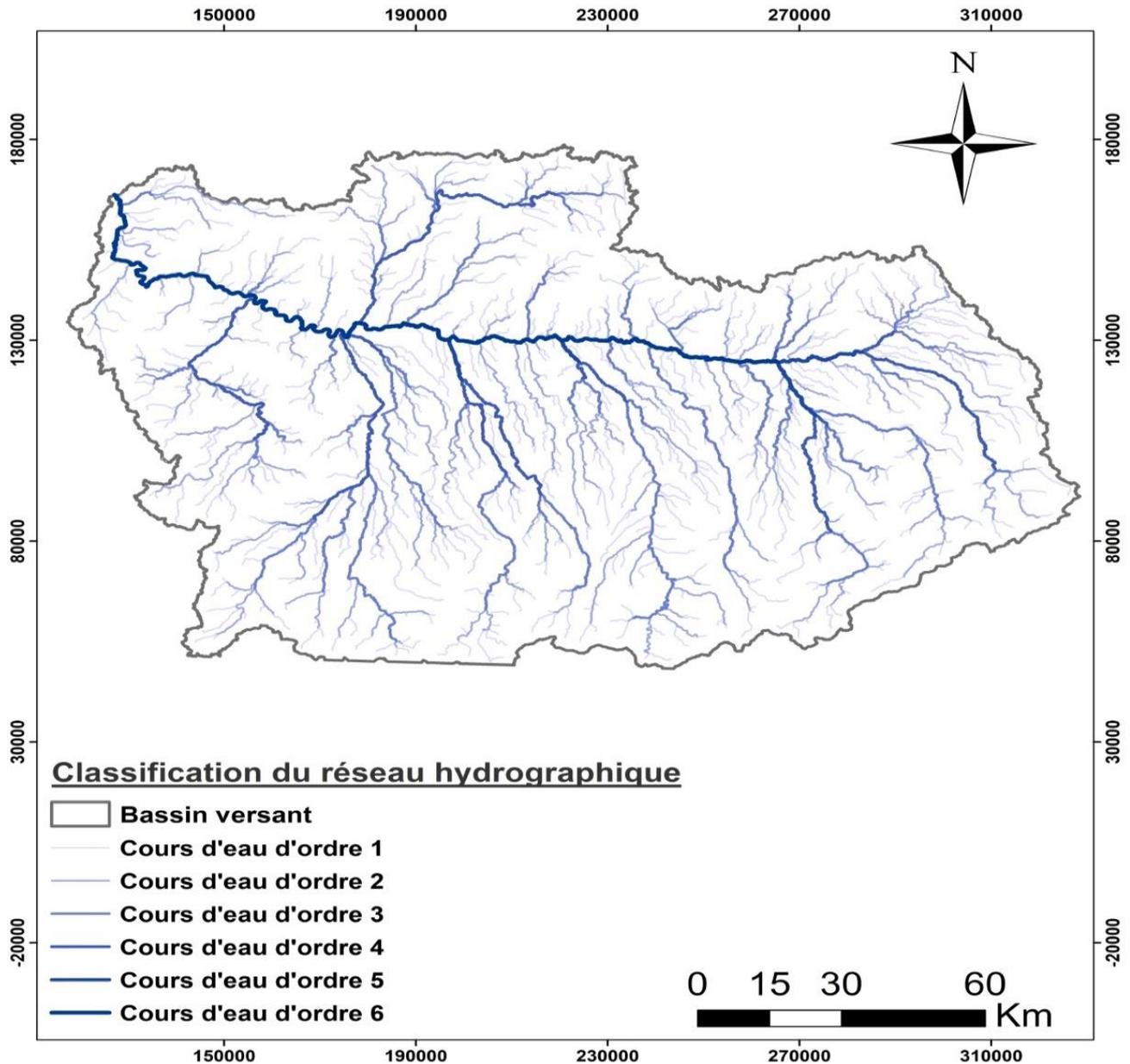
### II-3-1- classification du réseau hydrographique selon Strahler :

La classification du réseau hydrographique sert à attribuer un ordre numérique au celui-ci. Cet ordre permet d'identifier et de classer des types de cours d'eau en fonction de leur nombre d'affluents.

La classification de Strahler est la plus utilisée aujourd'hui et basée sur les principes suivants :

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





**Figure 8 : Classification du réseau hydrographique selon Strahler.**

### II-3-2- Densité de drainage :

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

$$Dd = \frac{\sum_{i=0}^n Li}{A}$$

Avec :

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

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

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

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

Le bassin versant de Tensift est caractérisé par une forte densité de drainage de l'ordre de **1.67 Km<sup>-1</sup>** ; donc il est très actif de point de vue drainage.

#### II-4- Le temps de concentration :

C'est le temps nécessaire à une goutte d'eau pour s'écouler depuis le point le plus éloigné du bassin vers l'exutoire de celui-ci. Il dépend essentiellement de la forme et la pente du bassin.

Ce paramètre est calculé en utilisant plusieurs formules :

Formules	Paramètres
<u>Giondotti :</u> $\frac{60(4\sqrt{S} + 1.5L)}{0.8\sqrt{H}} \text{ (Minute)}$	S : surface du bassin en Km <sup>2</sup> . L : longueur du cours d'eau principal en Km. H : dénivelée en m.
<u>Turrazza :</u> $\frac{60 \times 0.108 \times \sqrt[3]{SL}}{\sqrt{P}} \text{ (minute)}$	S : surface du bassin en km <sup>2</sup> . L : longueur du cours d'eau principal en km. P : pente moyenne du bassin versant en m/m.
<u>Kirpich :</u> $\frac{1}{52} \times \left(\frac{L}{\sqrt{P}}\right)^{0.77} \text{ (Minute)}$	L : longueur du cours d'eau principal (m). P : pente moyenne du bassin versant en m/m.
<u>Ventura :</u> $76.3 \times \sqrt{\frac{S}{P}} \text{ (Minute)}$	S : Superficie du bassin (Km <sup>2</sup> ). P : pente moyenne du bassin versant en (%).
<u>Espagnole :</u> $60 \times 0.3 \times \left(\frac{L}{P^{0.25}}\right)^{0.77} \text{ (Minute)}$	L : longueur du cours d'eau principal en Km. P : pente moyenne du bassin versant en m/m.
<u>Passini :</u> $64.8 \times \frac{\sqrt[3]{SL}}{\sqrt{P}} \text{ (Minute)}$	S : surface du bassin en Km <sup>2</sup> . L : longueur du cours d'eau principal en Km. P : pente moyenne du bassin versant en (%).
<u>Californienne :</u> $60 \times 0.1452 \times \left(\frac{L}{\sqrt{P}}\right)^{0.77} \text{ (Minute)}$	L : longueur du cours d'eau principal en Km. P : pente moyenne du bassin versant en m/m.

**Tableau 7 : Les formules de calcul du temps de concentration.**

**Résultats :**

	Giondotti	Turrazza	Kirpich	Ventura	espagnole	Passini	Californienne	Moyenne
Tc (minute)	2725,75	16724.07	2532.75	14988.64	4187.16	16637.22	5619.70	63415.32
Tc (heure)	45.42	278.73	42.21	249.81	69.78	277.28	93.66	151

**Tableau 8 : Récapitulation du calcul de temps de concentration.**

Le temps de concentration du bassin versant représente la moyenne des temps de concentration calculés par les formules précédentes.

La valeur du temps de concentration obtenue est très exagérée, pour cela on élimine les grandes valeurs, car elles sont influencées par la superficie du bassin.

Alors le temps de concentration du bassin versant de Tensift sera **62** heures.

# Chapitre III : les méthodes d'estimation des débits des crues.

---

## I. Méthode hydrométéorologique : Gradex.

### I-1- Principe :

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

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

### I-2- Méthodologie :

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

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

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

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

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

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

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

La série des débits des crues (1999 – 2016) à la station Talmest permet d'obtenir un coefficient de pointe moyen égale à **2.6**.

Pour le calcul, la méthode Gradex suit les étapes suivantes :

- Déterminer le rang  $r$ .
- Calculer la probabilité au non dépassement FND par la formule suivante :

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

Avec :

$R$  : le rang.

$n$  : le nombre des années de la série.

- Calculer la variable réduite  $y$  :

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

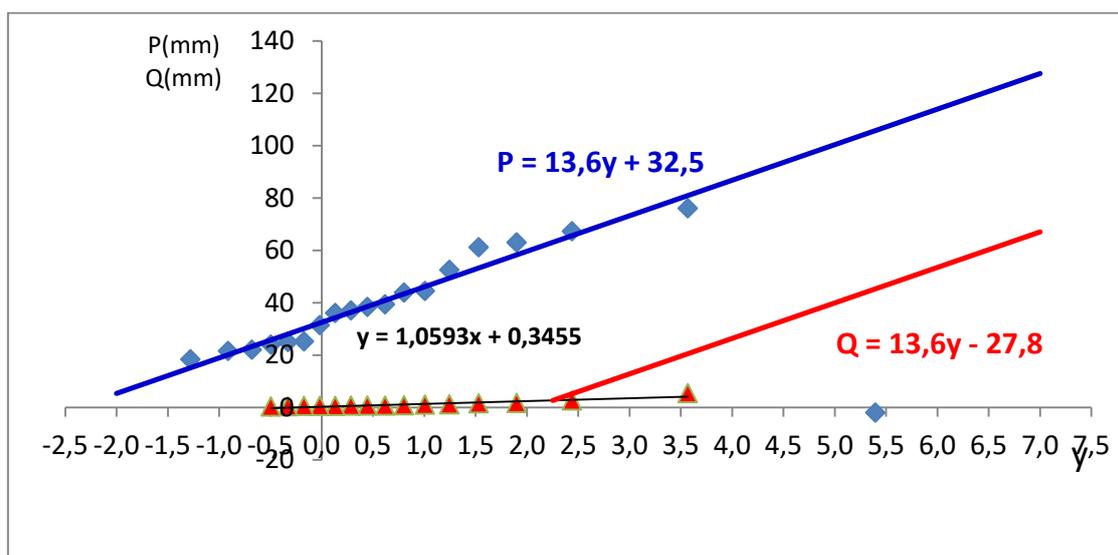
- Déterminer les paramètres d'ajustement étant :

- Le paramètre d'échelle :  $\frac{1}{a} = 0.78\sigma$   
 $\sigma$  : l'écart-type de la série des pluies.
- Le paramètre de forme :  $P_0 = \bar{P} - (1/a \times 0.577)$   
 $\bar{P}$  : La moyenne des pluies.

Le résultat d'extrapolation des débits par la méthode Gradex est exprimé dans le tableau suivant :

Temps de retour (ans)	Fréquence (F)	Fréquence au non-dépassement t (FND)	Variable réduite (y)	Débit extrapolé (mm)	Débit extrapolé (m3/s)	Débit de pointe en (m3/s)
25	0.04	0.96	3.199	15	3471	9025
50	0.02	0.98	3.902	25	5601	14565
100	0.01	0.99	4.600	34	7717	20064
1000	0.001	0.999	6.907	66	14706	38236

**Tableau 9 : extrapolation des débits par la méthode Gradex.**



**Figure 9 : Ajustements graphique des données de P<sub>jmax</sub> et Q<sub>jmax</sub> selon la méthode de Gradex.**

D'après le graphe on constate que l'extrapolation des valeurs de débits ne se fait pas de façon parallèle à la courbe des précipitations, c'est-à-dire que la quantité d'eau ruisselée est supérieure à celle tombée comme pluie, ce qui est impossible. En plus des valeurs exagérées du débit obtenues après l'extrapolation de celui-ci, pour les différentes périodes de retour.

C'est pour cela qu'on ne peut pas utiliser la méthode de Gradex pour le bassin versant de Tensift.

## II. Méthodes empiriques :

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

Il existe plusieurs formules pour le calcul des débits de pointe relatifs à chaque période de retour, parmi celles utilisées au Maroc on trouve :

### II-1- Formule de Fuller II :

On peut rencontrer différentes versions des formules de Fuller selon la région d'application. Au Maroc par exemple, Bouziane (1997) mentionne la formule suivante pour l'estimation de la crue de période de retour T:

$$Q_T = (1 + a \log(T)) \times \left[ A^{0.8} + \left( \frac{8}{3} \times A^{0.5} \right) \right] \times \frac{4}{3} \times \frac{N}{100}$$

Avec :

QT : Débit maximal pour la période de retour T en (m<sup>3</sup>/s)

A : Superficie du bassin versant en (km<sup>2</sup>)

T : Période de retour

a : Coefficient qui varie entre 0.7 à 3.5 :

- 0.7 < a < 0.8 : Pour les grands bassins versants et pour les régions bien arrosées.
- 0.8 < a < 2 : Pour les régions arides.
- 3 < a < 3.5 : Pour les oueds sahariens.

(On prend a = 0.8)

N : Coefficient régional qui varie de 80 à 100 :

- N = 80 pour la plaine.
- N = 85 pour les régions accidentées.
- N = 100 en montagne.

(On prend N = 80).

## II-2- Formule de Mallet-Gautier :

Cette formule s'exprime comme suit :

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

$Q_T$ : Débit de pointe [m<sup>3</sup>/s] pour la période de retour T

K : Coefficient qui varie de 0.5 à 6

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

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

L : Longueur du plus long talweg (Km)

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

T : Période de retour

Pan : Pluie moyenne annuelle (m)

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

## II-3- Formule de Hazan–Lazarvic :

La formule de Hazan Lazarvic donne le débit millénial en fonction de la superficie du bassin versant, selon la formule suivante :

$$Q_{1000} = K1 \times S^{K2}$$

Où :

Q(1000) : Débit de pointe en [m<sup>3</sup>/s] de récurrence 1000 ans

S : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>

Les valeurs des paramètres K1 et K2 dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie moyenne annuelle. Elles sont données dans le tableau suivant :

Zone géographique	Relation $Q_{1000} = K1 \times S^{K2}$ (m <sup>3</sup> /s)		Pluviométrie (mm)
	K1	K2	
Rif central	15.55	0.776	1000-1300
Rif occidental	9.78	0.793	800-1000
Rif oriental	7.58	0.808	600-800
Haut Atlas Saharien	9.38	0.742	200-400
Moyen Atlas	14.94	0.636	700-900
Moyen Atlas	13.51	0.613	500-700
Moyen Atlas (Karst)	13.41	0.587	400-700

**Tableau 10 : Formules de Hazan et Lazarevic.**

Nous prenons K1= 9.38 et K2 = 0.742, en se basant sur la géographie et la pluviométrie de la zone d'étude.

La transposition des débits des crues milléniales aux débits de récurrence T se fera par la formule de Fuller I :

$$Q(T) = Q_{m \max} \times (1 + a \log T)$$

- Q(T) = Débit de pointe de période de retour T.

- Qm max : moyenne des débits maxima instantanés annuels.

De ce raisonnement Qm max en 1000 ans = Q(1000) / (1+ a log 1000).

D'où :

$$Q(T) = Q_{1000}(1 + a \log T / (1 + a \log 1000))$$

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

a : Coefficient qui varie entre 0.7 à 3.5 :

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

0.8 < a < 2 : Pour les régions arides.

3 < a < 3.5 : Pour les oueds sahariens.

(On prend a = 0.8)

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

	Q <sub>25</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>50</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>100</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>1000</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Fuller II	6895	7679	8463	11067
Mallet-Gautier	5581	6885	7979	10848
Hazan-Lazarvic	8841	9846	10851	14190

**Tableau 11 : Débit de pointe pour les différentes périodes de retour.**

### III. Méthode statistique :

Cette méthode permet la prédétermination des débits maxima d'une crue et leurs périodes de retour, en se basant sur l'analyse statistique des crues précédentes, afin d'en définir les probabilités d'apparition future.

Cette prédétermination repose sur la mise en œuvre d'un modèle probabiliste fréquentiel, qui est une loi de probabilité décrivant le comportement statistique d'un processus.

L'objectif est de faire une analyse fréquentielle sur une série de débits instantanés maxima annuels enregistrés au niveau de la station Talmest, pour une période d'observation de 17 ans (1999 - 2016) ; en essayant d'ajuster à cette série une loi de probabilité théorique.

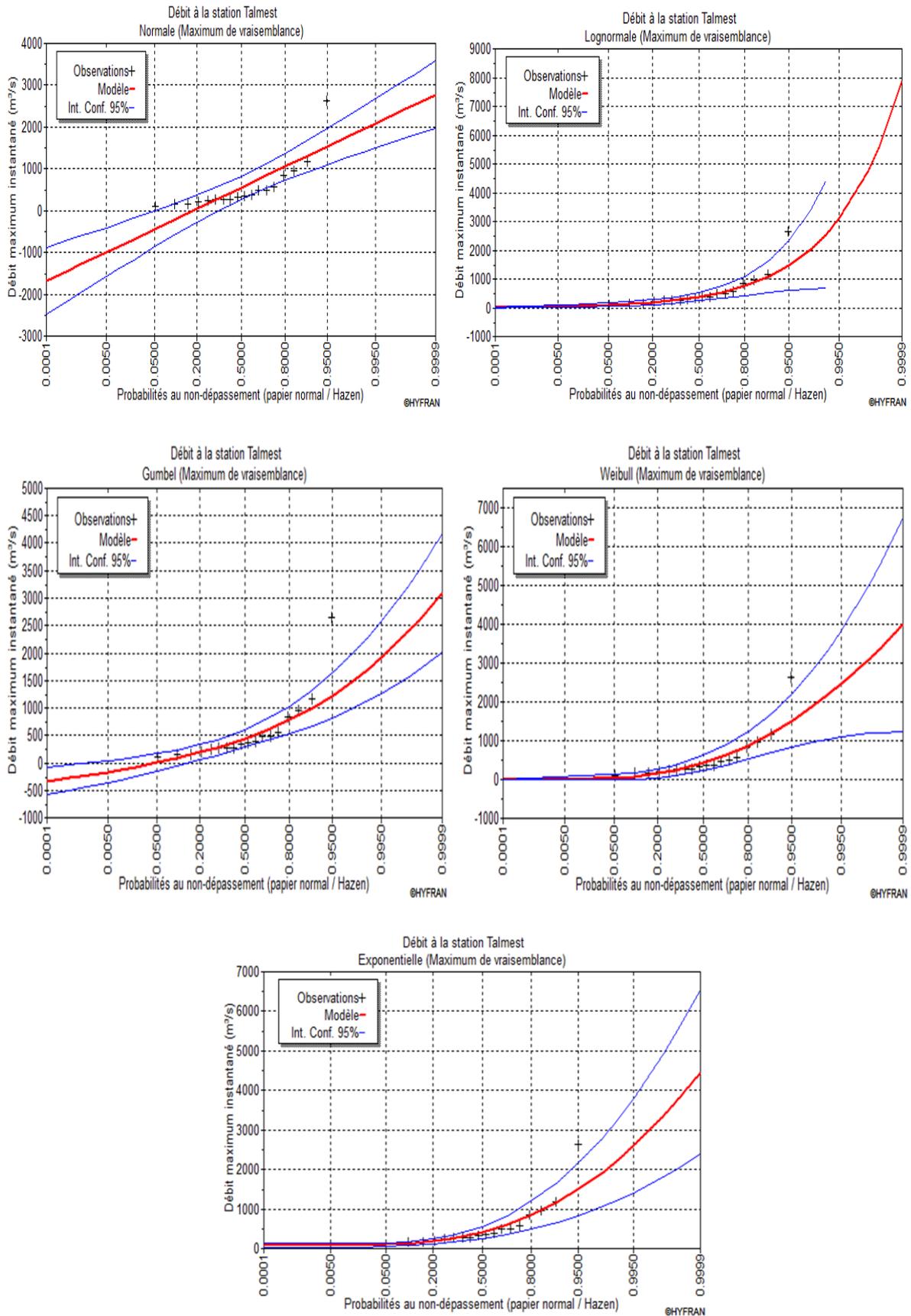
Les lois statistiques appliquées dans cette étude sont : lois Normal et Log. Normal, loi de Gumbel, loi de Weibul, et loi exponentielle.

Cette étude est réalisée par le logiciel Hyfran Plus.

#### III-1- Le logiciel HYFRAN-PLUS.

Le logiciel Hyfran Plus est élaboré par l'INRS-ETE (Institut National de Recherche Scientifique, Eau, Terre, Environnement) du Québec. Celui-ci permet d'ajuster un nombre important des lois de probabilité à une série de données, en se basant sur un système d'aide à la décision (SAD), ce dernier permet de définir la classe la plus probable à laquelle appartient la meilleure loi qui représente l'échantillon étudié en s'appuyant sur des critères statistiques.

### III-2- Analyse des graphes :



**Figure 10 : Ajustement graphique des débits instantanés maxima annuels selon les lois statistiques, à la station Talmest.**

Cette figure montre des graphiques présentant la distribution des lois statistiques. Visuellement on remarque que les lois Log Normal et exponentielle présentent les meilleurs ajustements de la variable débit instantané maxima annuel.

### III-3- Analyse des critères statistiques :

Le tableau suivant montre les valeurs observées des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC) qui permettent de comparer le degré d'ajustement.

Les meilleurs ajustements correspondent aux plus faibles valeurs de ces critères statistiques.

Lois statistiques	Débit estimé (m3/s)	BIC	AIC
Log. Normal	2539.67	262.60	260.82
Exponentielle	2264.61	263.73	261.95
Weibul	2187.94	268.15	266.37
Gumbel	1710.32	271.46	269.68
Normal	1942.24	286.09	284.31

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

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

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

Période de retour (ans)	20	50	100	1000
Débit estimé (m3/s)	1460	2040	2540	4720

**Tableau 13 : Estimation des débits selon la loi Log Normal.**

### III-4- Francou-Rodier :

La transposition des débits obtenus par l'ajustement vers le bassin versant Tensift se fait par la formule de Francou-Rodier

D'abord, on calcule le paramètre K (coefficient de Francou-Rodier) en appliquant la formule suivante :

$$K_T = 10 \times \left( 1 - \frac{\ln\left(\frac{Q_T}{10^6}\right)}{\ln\left(\frac{A_2}{10^8}\right)} \right)$$

Avec :

$Q_T$  : Débit estimé par l'ajustement pour une période de retour T (m3/s).

$A_2$ : Superficie du bassin versant Talmest (Km<sup>2</sup>).

Puis on utilise la valeur de K pour calculer le débit de crue dans le bassin versant Tensift, selon la formule ci-dessous :

$$Q_T = 10^6 \times \left( \frac{A_1}{10^8} \right)^{\left(1 - \frac{K_T}{10}\right)}$$

Avec :

$Q_T$ : Débit du bassin versant Tensift (m3/s).

$A_1$ : Superficie du bassin versant Tensift (Km<sup>2</sup>).

Le tableau 14 représente les résultats de la transposition des débits obtenus par l'ajustement :

Temps de retour (ans)	Q selon la loi Log Normal en (m3/s)	Francou-Rodier	
		$K_T$	$Q_T$ (m3/s)
20	1460	2.4	1503
50	2040	2.7	1942
100	2540	3.05	2620
1000	4720	3.8	4977

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

Avec :

$$A_1 = 19295 \text{ Km}^2$$

$$A_2 = 18500 \text{ Km}^2$$

Conclusion :

D'après les résultats obtenus par les trois méthodes d'estimation de crue (Gradex, les formules empiriques et l'ajustement statistique), on peut conclure que la dernière méthode est la plus fiable.

# Chapitre IV : Etude des crues et recommandations pour atténuer leurs dégâts.

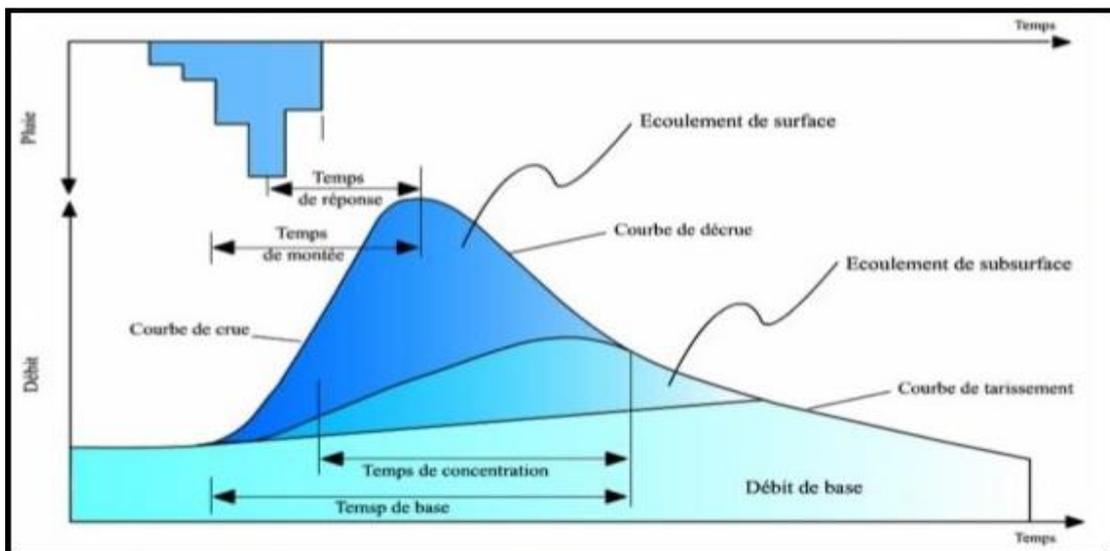
## I. Etude des hydrogrammes des crues :

### I-1- Définitions et généralités :

Une crue est un phénomène hydrologique qui s'exprime par une augmentation brutale du niveau des eaux d'un cours d'eau. Elle produit des débits exceptionnels dépassant largement les normes habituelles et se caractérise par son hydrogramme : courbe en cloche dissymétrique représentant les variations du débit en fonction du temps.

L'hydrogramme d'une crue simple fait apparaître cinq secteurs :

- **Temps de montée** : c'est la durée qui s'écoule entre le début de la montée du niveau d'eau et la pointe de la crue.
- **Temps de base** : la durée entre le début de la montée du niveau d'eau et la fin du ruissellement pur (ou superficiel) de la crue.
- **Temps de réponse** : la durée qui sépare le maximum de l'épisode pluvieux et le moment du débit de pointe.
- **Temps de concentration** : on l'estime à la durée entre la fin de la pluie et la fin du ruissellement (superficiel) de la crue.
- **La pointe de la crue ou débit de pointe** : est le débit maximum observé au cours d'une crue.



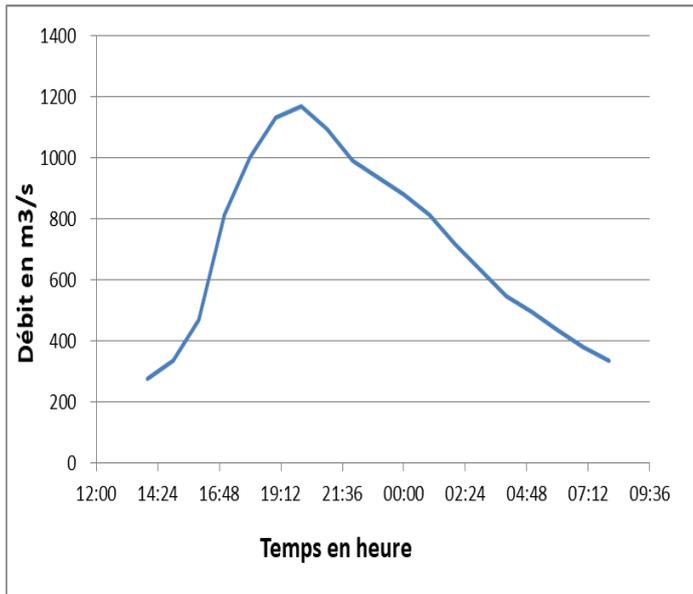
**Figure 11 : Hyétogramme et hydrogramme de crue.**

## I-2- Analyse :

Dans cette partie nous allons analyser les hydrogrammes des crues qui ont affectés le bassin versant de Tensift durant la période 1999-2016, pour cela nous avons choisi cinq crues importantes du point de vue débit de pointe et qui sont représentatives de ce bassin dans la station Talmest, avec **un intervalle de temps de 19 heures qui représente les heures où le débit atteignait le maximum durant la crue.**

Le but de cette analyse est d'étudier le comportement des crues dans le bassin versant Tensift.

### 1. La crue d'octobre 1999 :

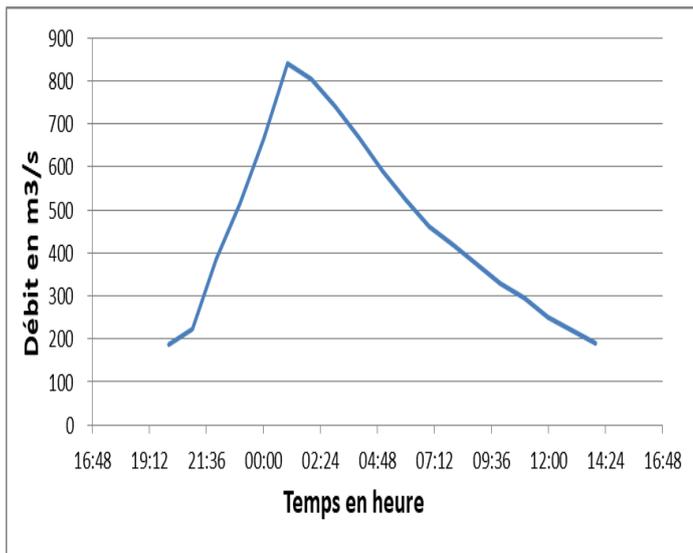


**Figure 12 : Hydrogramme de la crue de 1999 à Talmest.**

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	29/10/1999 14:00
date fin	30/10/1999 08:00
débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	1170,8
débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	709,1
volume 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	46
temps de base (heures)	18
temps de montée (heures)	6

**Tableau 15 : Caractéristique de la crue de 1999 à Talmest.**

### 2. La crue de novembre 2008 :

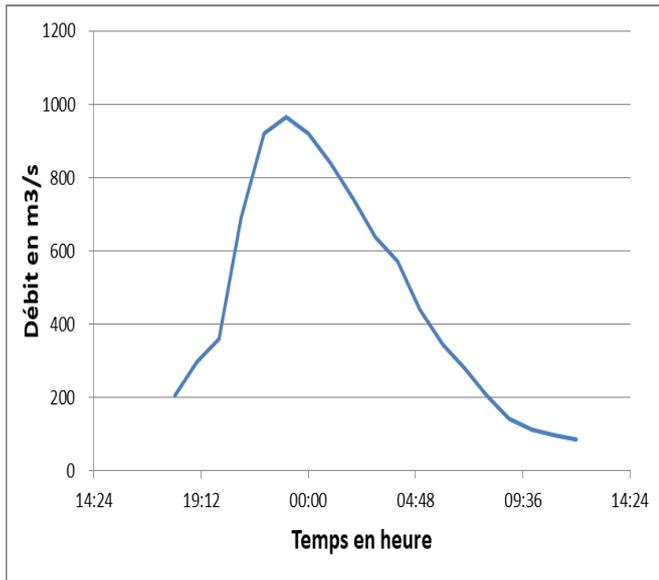


**Figure 13 : Hydrogramme de la crue de 2008 à Talmest.**

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	01/11/2008 20:00
date fin	02/11/2008 14:00
débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	840,0
débit moyen (m <sup>3</sup> /s)	457,0
volume 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	30
temps de base (heures)	18
temps de montée (heures)	5

**Tableau 16 : Caractéristique de la crue de 2008 à Talmest.**

### 3. La crue de décembre 2009 :

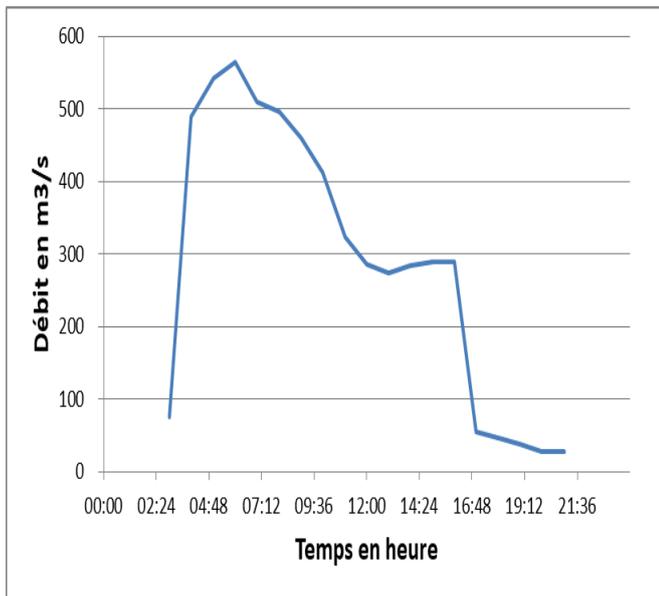


**Figure 14 : Hydrogramme de la crue de 2009 à Talmest.**

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	24/12/2009 18:00
date fin	25/12/2009 12:00
débit de pointe (m3/s)	963,4
débit moyen (m3/s)	465,7
volume 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	25
temps de base (heures)	15
temps de montée (heures)	5

**Tableau 17 : Caractéristique de la crue de 2009 à Talmest.**

### 4. La crue de septembre 2013 :

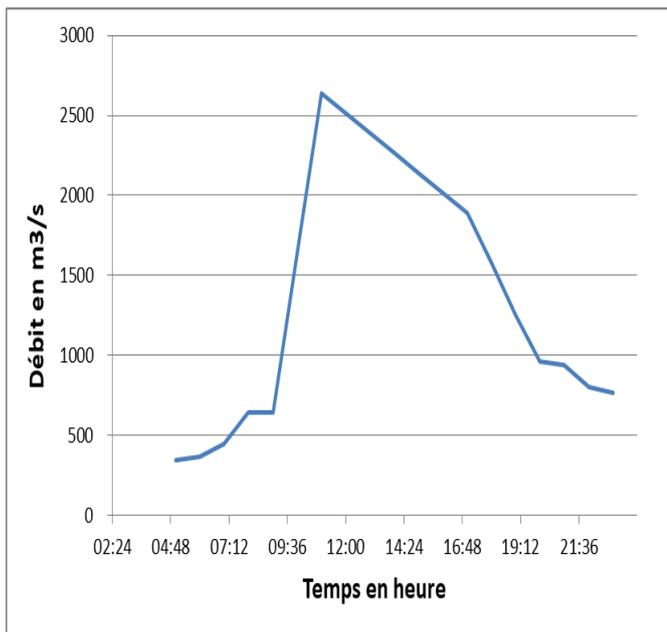


**Figure 15 : Hydrogramme de la crue de 2013 à Talmest.**

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	18/09/2013 03:00
date fin	18/09/2013 21:00
débit de pointe (m3/s)	564,4
débit moyen (m3/s)	288,8
volume 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	9
temps de base (heures)	9
temps de montée (heures)	3

**Tableau 18 : Caractéristique de la crue de 2013 à Talmest.**

## 5. La crue de novembre 2014 :



**Figure 16 : Hydrogramme de la crue de 2014 à Talмест.**

CARACTERISTIQUES DE LA CRUE	
date début	29/11/2014 05:00
date fin	29/11/2014 23:00
débit de pointe (m3/s)	2640,0
débit moyen (m3/s)	1382,2
volume 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	75
temps de base (heures)	15
temps de montée (heures)	6

**Tableau 19 : Caractéristique de la crue de 2014 à Talмест.**

- Le volume se calcul par la formule suivante :

$$V = Q_M \times t_b.$$

Avec :

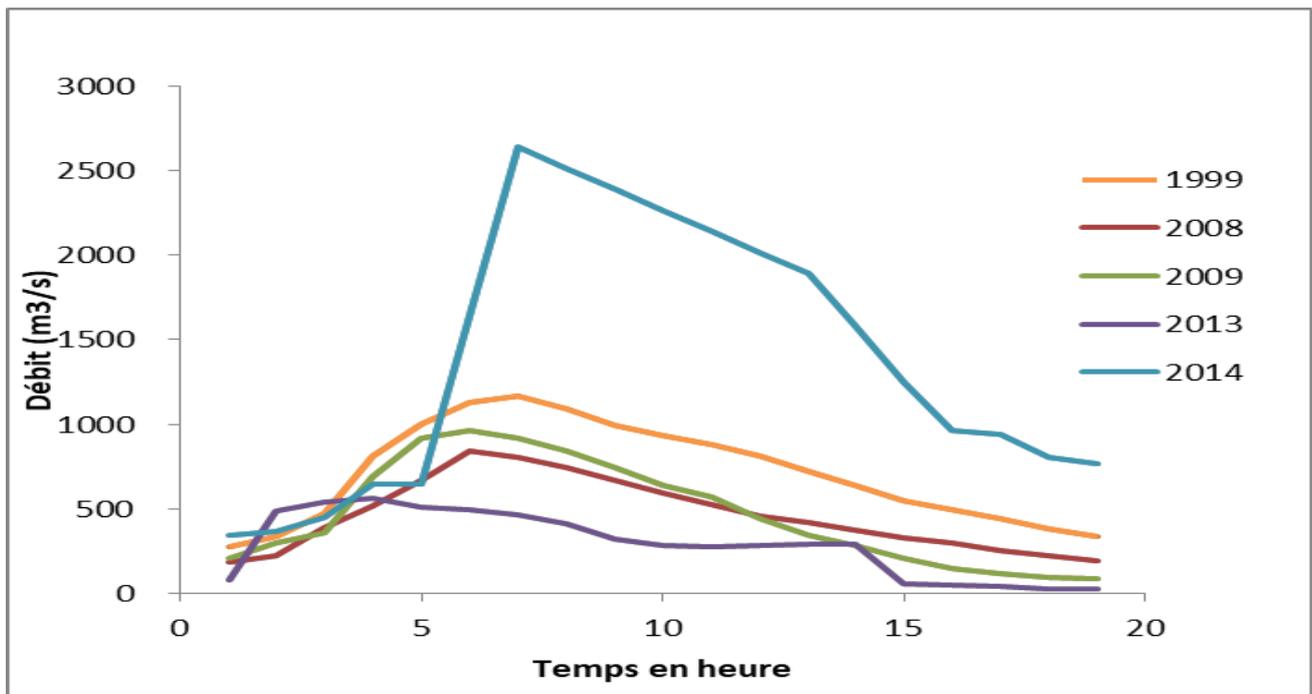
V : Volume (m<sup>3</sup>).

Q<sub>M</sub> : Débit moyen instantané (m<sup>3</sup>/s).

t<sub>b</sub> : Temps de base (s).

D'après l'allure des hydrogrammes et leurs caractéristiques représentées dans les tableaux précédents, on remarque que les crues du bassin versant Tensift sont caractérisées par des hydrogrammes aigues et pointues, avec des débits de pointe élevés, ainsi qu'un temps de montée égale  $\frac{1}{3}$  temps de base ; c'est-à-dire que ces crues montent rapidement et régressent lentement, ce qui est du à la grande superficie du bassin ainsi que la dominance des faibles pentes au niveau de celui-ci.

En comparant les débits de pointe des crues de cette période, on constate que le débit maximum enregistré c'était celui de l'année 2014, ce qui est illustré dans la figura ci-dessous :



**Figure 17 : Crues majeurs du bassin versant Tensift a la station Talmest 1999-2016.**

### I-3- La crue exceptionnelle de novembre 2014 :

Le bassin de Tensift a connu du 22 au 30 novembre 2014 une séquence pluviométrique d'une grande ampleur, selon des observateurs des stations et des responsables de l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift, les débits des crues de cette période n'ont jamais été observés auparavant.

Les débits les plus importants et d'une très rare fréquence ont été enregistrés dans les stations de plaine, qui collectent les eaux issues des sous bassins montagneux, par exemple dans la station Talmest, le débit a atteint 2640 m<sup>3</sup>/s.

Cette crue a provoqué d'importants dégâts sur les niveaux humain, environnemental et infrastructurels de l'ensemble du bassin versant ; l'enclavement de plusieurs localités ainsi que la submersion de terrains agricoles. Selon l'Agence de Bassin Hydraulique de Tensift, des dommages ont été également enregistrés au niveau de certaines stations hydrométriques, et de certains barrages. Cet événement a aussi impacté le système de prévision et d'alerte contre les crues par :

- Des problèmes de coupure de communication dans les stations.
- Les pluviomètres pour certaine station n'ont pas fonctionné.
- Inondation des locaux de la station de Talmest sur l'oued Tensift.
- Certains seuils de recharge artificielle sur l'oued Zat ont été également impactés.
- Route inondée par l'oued Rdat, sidi rahal.



**Photo 1 : Inondation des locaux de la station de Talmest sur l'oued Tensift (BELKHARCHACH 2015).**



**Photo 2 : Route inondée par l'oued Rdat, sidi rahal (BELKHARCHACH 2015).**

## **II. Recommandations :**

Après les énormes dégâts causés par la crue de 2014 sur la quasi-totalité du bassin versant, notamment les bassins de plaine comme Talmest, diminuer le débit de ces crues avant qu'elles atteignent l'exutoire est devenu nécessaire; Pour cela on a pu recourir à plusieurs techniques en amont du bassin versant:

- **Construction des micro-barrages:**

Ce sont des aménagements construits en pierres, en terre ou en béton, destinés en partie à créer une réserve d'eau mais surtout à la retenir le temps suffisant pour qu'elle puisse lentement s'infiltrer et alimenter la nappe phréatique, et encore à l'arrêter, sinon freiner l'écoulement précoce des eaux, pour éviter la vidange précoce.

- **Réalisation des recharges artificielles des nappes :**

La recharge artificielle des nappes est un procédé permettant de stocker dans le sous-sol de grands volumes d'eau excédentaires, pour qu'elle soit prélevée et utilisée pendant les périodes déficitaires (sécheresses prolongées). Cette technique consiste à introduire de l'eau dans des formations perméables du sous-sol par Plusieurs dispositifs, dont chacun est adapté à un contexte hydrogéologique et climatique particulier (nappe superficielle, nappe profonde, nappe côtière, nappe en milieu poreux, nappe en milieu fissuré, etc.).

Ces dispositifs peuvent être des :

- bassins d'infiltration (de plusieurs hectares);
- tranchées d'infiltration (de quelques kilomètres de longueur)
- seuils (petits barrages) à travers des lits des cours d'eau, permettant de freiner l'écoulement de l'eau (1 à 3 m de hauteurs et favoriser l'infiltration) ;
- puits ;
- forages ;
- Khéttaras
- etc.



**Photo 3 : Seuil en béton**



**Photo 4 : Seuil en gabion**

Dispositifs de recharge artificielle des nappes.

- **La construction des barrages écrêteurs de crue :**

Les barrages écrêteurs de crues sont implantés au niveau du thalweg et ont pour objet de stocker, temporairement un certain volume dans le lit du cours d'eau, de façon à diminuer le débit de pointe de la crue en aval.

Les barrages écrêteurs de crue concernent à la fois le lit majeur et le lit mineur. Ils interceptent le cours d'eau transversalement. Un **pertuis** au pied de l'ouvrage assure la transparence pour de faibles crues, mais permet de vidanger petit à petit le réservoir une fois celui-ci plein, c'est-à-dire, en temps de fortes pluies. Un **déversoir de sécurité** situé sur la partie supérieure permet l'évacuation rapide des volumes d'eau en période de crues exceptionnelles, et **une revanche** (rehaussement du remblai égal à la différence entre la crête de l'ouvrage et la cote des plus hautes eaux, fixée pour la crue de projet sélectionnée) empêche la submersion totale de l'ouvrage.

- **Le boisement :**

La végétation forestière joue un rôle important pour la conservation de l'eau ; les feuilles interceptent la pluie, réduisant ainsi la quantité d'eau qui atteint la terre, les racines stabilisent le sol et forment des conduits qui accélèrent l'infiltration aussi. Les substances organiques provenant des racines et des feuilles améliorent la structure des sols en accroissant à la fois le taux d'infiltration et la capacité de rétention d'eau. Et par la transpiration, la végétation élimine une partie de l'eau contenue dans le profil du sol, libérant ainsi une partie de la capacité de rétention pour de nouvelles précipitations.

D'une façon générale, la couverture forestière réduit les débits de pointe en assurant une infiltration maximale, ce qui accroît l'écoulement souterrain aux dépens de l'écoulement superficiel.

## Conclusion :

Le bassin versant de Tensift s'étend sur une superficie de 19295 km<sup>2</sup>, avec une altitude qui varie entre 4 et 4141 m, il est caractérisé par des substratums imperméables en amont et plus perméables en aval. Du point de vue morphologique le bassin est allongé (KG=1.9), les pentes sont assez faibles au niveau de la plaine mais beaucoup plus importantes sur les montagnes. Le temps de rassemblement des eaux vers l'exutoire est de l'ordre de 62 heures. Les précipitations du bassin sont très irrégulières et caractérisées par une variabilité spatio-temporelle.

L'ensemble de ces caractéristiques est propice au déclenchement des crues brutales. Les crues de Tensift sont caractérisées par des débits de pointe très élevés. Ils ont atteint pour certaines crues majeures qui ont affectées ce bassin (entre 1999 et 2016) 963,1170, et même 2640 m<sup>3</sup>/s pour la crue 2014, cette valeur n'a jamais été enregistrée auparavant. Ces crues sont par ailleurs caractérisées par une montée rapide lors d'une averse, ce qui donne des hydrogrammes pointus et aigus, avec des volumes d'eau importants, assez dangereux pour les dégâts qu'ils peuvent occasionner.

L'estimation des débits de crues s'est fondée sur trois méthodes :

La méthode de Gradex qui consiste à relier les débits de crue aux précipitations, et les méthodes empiriques en utilisant les formules de FULLER II, Mallet-Gautier et Hazan-Lazarvic ; les débits obtenus par ces deux méthodes pour une période de retour de cent ans sont respectivement 20000 et 10800 m<sup>3</sup>/s, ces valeurs sont énormes pour une telle période de retour, c'est pour cela qu'on a eu recours à la méthode statistique afin d'obtenir des résultats logiques, cette méthode a pour objectif d'ajuster à une série de débits instantanés maxima annuels (1999-2016) des lois statistiques dont Log Normal est la loi la mieux adaptée pour l'estimation du débit et les périodes de retour des crues.

La crue de 2014 a marqué l'histoire du bassin versant Tensift par ses énormes dégâts et son influence sur l'estimation des débits sur lesquels se base les études de dimensionnement, on trouve par exemple les débits de pointe qui ont des périodes de retour de 1000 et 500 ans après cet événement, seront de 200 et 100 ans. Pour cela, nous avons pensé à des solutions afin de réduire les effets destructifs de ce genre de crues, citons par exemple :

- Construction des micro-barrages.
- Réalisation des recharges artificielles des nappes.
- La construction de barrages écrêteurs de crue.
- Le boisement.

## Bibliographie

- AHATTAB J. (2016)-réadaptation des méthodes d'estimation de crues aux données hydrologiques extrêmes récentes des bassins versants de Tensift et Essaouira. Thèse FACULTE DES SCIENCES SEMLALIA – MARRAKECH, 237 p.
- BELKHARCHACH Z. (2015)- Les inondations sur la plaine de Tensift (Maroc). Etude dynamique et statistique et conséquences géographiques des crues de l'oued. . Mémoire de fin d'études, Master en Sciences Et Techniques « Eau et Environnement ». FSTG, Marrakech, 74p.
- BRIDI K. (2012)- Impact des changements climatiques sur l'environnement du bassin versant du Tensift. Mémoire de fin d'études, Master en Sciences Et Techniques «Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux». FST, Fes, 86p.
- Riad S. (2003) - Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles a partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse Univ. Agadir, 154p.
- SOUABNI O. (2015)- Etude hydrologique dans le cadre du dimensionnement d'un barrage collinaire - cas du site Ardouz - Haut Atlas – Maroc. Mémoire de fin d'études, Master en Sciences Et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux, FST Fès, 72p.
- Marc Barbet (2001)- synthèse des méthodes simples de régionalisation. Rapport de recherche No R-600, Hydro-Québec 71p. <http://espace.inrs.ca/1132/1/R000600.pdf>
- <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/59590>
- <https://fr.scribd.com/document/373536550/252543363-Recharge-Nappe-EHTP>
- <http://www.fao.org/docrep/68738F/68738f05.htm>
- <https://geograchid.blogspot.com/2016/05/fichier-kml-telecharger-mnt-dem-maroc.html>