

Projet de fin d'Etudes

Etude hydrologique du bassin versant du Tensift à Zaouit
Sidi Hssayn (Maroc)

Réalisé par :

NACIRI Hafssa et OUZAKRI Soukaina

Soutenu le : Le 23 Juin 2022

Devant la commission d'examen composée de:

- BARAKAT Rachid, Encadrant externe, ABHT Marrakech.
- BENKADDOUR Abdelfattah, Encadrant interne, FST Marrakech.
- SAIDI Mohamed el Mehdi, Examineur, FST Marrakech.



Remerciement

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

Ce travail est le résultat de la combinaison d'efforts de plusieurs personnes. Dans cette occasion nous exprimons nos vifs remerciements à notre encadrant de l'ABHT M. BARAKATE Rachid chef de service Communication et Coopération, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et ses aides durant toute la période du stage.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à notre professeur et encadrant M. BENKADDOUR Abdelfattah, qui a assuré notre encadrement au cours de la réalisation de ce projet, pour sa disponibilité, pour ses conseils, pour son sens critique et ses remarques pertinentes, a travers ce travail, nous espérons lui adresser notre reconnaissance.

Nous voudrions remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, au succès ce travail.

Finalement, un grand remerciement à nos familles pour leur soutien et encouragement.

A tous Merci

Table des matières

Table des matières	3
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux	6
Présentation de l'Agence de Bassin hydraulique du Tensift (ABHT).....	8
Introduction	9
Cadre général.....	10
I. Situation géographique :.....	11
II. Cadre géologique :	12
III. Cadre climatique :.....	12
IV. Réseau hydrographique :	12
Méthodologie.....	14
I. Délimitation du bassin versant sous ArcGIS :.....	15
I.1. Obtention du Model Numérique de Terrain (MNT) :.....	15
I.2. Fill :.....	15
I.3. Flow direction :.....	15
I.4. Flow accumulation :.....	15
I.5. Fonction Vectorisation (Con) :	15
I.6. Désignation d'un exutoire :.....	16
I.7. Watershed :	16
I.8. Clip :.....	16
II. Estimations des débits des crues : HYFRAN-PLUS.....	16
Résultats Et interprétations.....	17
I. Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de Tensift :	18
I.1. Caractéristiques géométriques :	18
I.2. Caractéristiques du relief :	20
I.3. Caractéristiques du réseau hydrographique :.....	27
I.4. Temps de concentration :.....	30
II. Méthodes d'estimation des débits des crues :	32
II.1. Méthodes empiriques :.....	33

Étude Hydrologique

II.2. Méthode de Gumbel :	36
II.3. Ajustement statistique :	38
III. Qualité de l'eau :.....	42
Conclusion générale	45
Références bibliographiques.....	47
Références webographies	47
Annexes	48

Liste des figures

Figure 1 : Missions de l'ABHT.	8
Figure 2 : Situation géographique du bassin versant du Tensift.	11
Figure 3 : Réseau hydrographique du bassin versant du Tensift.	13
Figure 4 : Illustration du fonctionnement de <i>Fill</i> .	15
Figure 5 : Logo du logiciel Hyfran-Plus.	16
Figure 6 : Hypsométrie du bassin versant du Tensift.	21
Figure 7 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Tensift.	22
Figure 8 : Interprétation de la courbe hypsométrique en fonction de l'âge du bassin.	23
Figure 9 : Pentes du bassin versant du Tensift.	24
Figure 10 : Classification du réseau en ordre de Strahler.	27
Figure 11 : Classification du réseau hydrographique du bassin versant du Tensift.	28
Figure 12 : Position du bassin jaugé (BV Talmest) et bassin non jaugé (BV Sidi Hssayn).	32
Figure 13 : Evolution des débits maximum instantanés en fonction des années.	36
Figure 14 : Présentation des débits et la droite de Gumbel.	38
Figure 15 : Ajustement graphique des Qimax selon la loi de Gumbel.	39
Figure 16 : Ajustement graphiques des Qimax selon la loi GEV.	39
Figure 17 : Ajustement graphiques des Qimax selon la loi Lognormal.	40
Figure 18 : Situation du point de prélèvement de l'eau étudiée.	43

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques géologiques du BV du Tensift	12
Tableau 2 : Paramètre géométrique du bassin versant du Tensift	18
Tableau 3 : Caractéristiques géométriques du bassin versant du Tensift	20
Tableau 4 : Répartition hypsométrique du bassin versant du Tensift	21
Tableau 5 : Altitudes du bassin versant du Tensift	22
Tableau 6 : Caractéristique de la pente moyenne	25
Tableau 7 : Caractéristique de la pente classique du bassin versant du Tensift	25
Tableau 8 : Caractéristique de la pente globale du bassin versant du Tensift	25
Tableau 9 : Classification des reliefs selon l'ORSTROM	26
Tableau 10 : Caractéristique du dénivelé spécifique selon ORSTOM	26
Tableau 11 : Caractéristiques de la densité de drainage	29
Tableau 12 : Caractéristique de la pente moyenne d'écoulement	30
Tableau 13: Temps de concentration selon la formule de KIRPICH	30
Tableau 14 : Temps de concentration selon la formule d'Espagnole	30
Tableau 15: Temps de concentration selon la formule Californienne	31
Tableau 16 : Temps de concentration selon la formule de Ventura	31
Tableau 17 : Temps de concentration selon la formule de Passini	31
Tableau 18: Temps de concentration selon la formule de Turazza	32
Tableau 19 : Formules empiriques convenables avec la surface du bassin.	33
Tableau 20 : Valeur du paramètre a en fonction du climat	33
Tableau 21 : Répartitions des zones d'études en fonction de la moyenne de pluies	34

Tableau 22 : Résultat de calcul obtenu par la formule de Hazen pour 2 ans	34
Tableau 23 : Valeur du paramètre a en fonction de régions	34
Tableau 24 : Valeur du paramètre N en fonction de régions	35
Tableau 25 : Résultat de calcul de débit obtenu par la formule de Fuller	35
Tableau 26 : Valeur du paramètre K en fonction de la région	35
Tableau 27 : Résultat de calcul de débit obtenu par la formule de Mallet-Gautier	35
Tableau 28 : Résultats de débits à partir obtenu par les Méthodes empiriques	36
Tableau 29 : Caractéristiques de la série de débits maximums instantanés	37
Tableau 30 : Débits obtenu par la méthode de Gumbel en fonction de T (ans)	38
Tableau 31 : Ajustement numérique des lois statistiques pour la période de retour de 100 ans	40
Tableau 32 : Estimation des débits selon la loi Lognormal	41
Tableau 33 : Récapitulatif des résultats des débits	41
Tableau 34 : Surface du BV de la station de référence et le BV du point d'étude	42
Tableau 35 : Transposition du débit par la formule de Francau-Rodier	42
Tableau 36 : Analyses chimique de l'eau de l'oued Tensift (mars, 2021)	43
Tableau 37 : Grille de classification de la qualité des eaux de surface	44
Tableau 38 : liste des débits maximums instantanés, Probabilité et période du retour	48

Présentation de l'Agence de Bassin hydraulique du Tensift (ABHT)

L'agence du bassin hydraulique créée par la loi 10-95 sur l'eau, est un établissement public doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière. Elle a pour mission l'évaluation, la planification, la gestion et de la préservation des ressources en eau du bassin hydraulique, en associant l'ensemble des acteurs de l'eau au niveau de la zone d'action.

La zone d'action de l'ABHT 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 ainsi que la partie des provinces de Kalaa des Sraghnas, de Rhamna et de Safi. Aussi bien qu'elle couvre 24800 Km², comprenant deux ensembles hydrauliques qui sont les bassins du Tensift et les bassins du Ksob-Igouzoulen.

Missions de l'ABHT :



Figure 1 : Missions de l'ABHT.

Introduction

L'étude hydrologique d'un bassin versant donné a but de mieux comprendre son fonctionnement hydrologique. Elle sert à déterminer quelques caractéristiques tels que : le réseau hydrographique, l'hypsométrie, les cartes des pentes etc. Cette étude, sert, aussi, à prévenir des crues et d'éviter toutes sortes de dommages qu'elle cause. Ceci à travers le calcul du temps de concentration et les des débits de pointe.

En fait, Les crues sont partout dans le monde, considérées comme des phénomènes particuliers, contre lesquels il faut se protéger par la prévision et la prévention. Elles peuvent être violentes et destructrices. Elles affectent les infrastructures, les terrains agricoles, les plaines en aval ainsi que le capital humain. C'est pourquoi elles sont au centre d'intérêt des scientifiques, afin de réduire les dégâts qu'elles provoquent.

Le bassin versant de Tensift, renferme des oueds souvent intermittents, ne coulent qu'en réponse directe à quelques événements précipitations. En effet, les inondations des différents oueds du bassin sont entièrement causées par les eaux pluviales. Elles résultent généralement de fortes averses localisées ou non dans l'espace.

L'historique du bassin versant du Tensift n'a pas été sans crues, il a connu plusieurs inondations catastrophiques qui l'ont marqué. A titre d'exemples :

- la catastrophe du 17 août 1995 à Ourika a provoquée plus de 200 morts et d'importants dégâts matériels (site : ledesk.ma)¹.

- la crue de l'oued Issil de 25 mars 2011 qui a engendrée pendant une courte période, l'envahissement de toute la zone Est de Marrakech et ses voies de circulation par les eaux (Saidi etal, 2013).

Actuellement, l'oued de Tensift est à sec et ne coule que lorsqu'une séquence pluviométrique s'abat sur le bassin versant. Le présent travail consiste à réaliser une étude hydrologique du bassin versant de Tensift au niveau de l'exutoire Sidi Hssayn. Les débits de crue sont calculés afin de réaliser une étude de protection contre les inondations au niveau de la région Zaouit Sidi Hssayn.

Ce rapport comporte deux grands chapitres, le premier est dédié aux généralités sur le bassin versant du Tensift, et le deuxième est consacré à l'étude hydrologique du même bassin versant.

Cadre général

Étude Hydrologique

Un bassin versant est un territoire qui draine l'ensemble de ses eaux vers un exutoire commun, cours d'eau ou mer. Le bassin versant est limité par des frontières naturelles : les lignes de crêtes ou lignes de partage des eaux. De part et d'autre de ces lignes, les eaux des précipitations et des sources, ainsi que tous les éléments dissous ou en suspension (sédiments, pollution...), s'écoulent vers des exutoires séparés.

I. Situation géographique :

Au centre ouest du Maroc se trouve le bassin versant du Tensift qui représente 2.7% de la superficie totale du Royaume. Ce bassin est borné au Nord par un massif de petites montagnes (billettes) avec des altitudes ne dépassent pas 1000m, au sud par la chaîne du haut atlas formé une bande allongée orientée sud-ouest/nord-est, caractérisée par une grande altitude plus de 4000m.

Le bassin est limité à l'est par la ligne de partage des eaux au niveau du sous bassin de Tassaout qui est un affleurement de d'Oum Er R'bia. En effet le cours d'eau principal se jette dans l'atlantique à l'ouest du bassin, Au sud de Essaouiria kdima, 33Km au sud de Safi, cette embouchure se située dans la commune rurale lamaachate à village zaouit sidi hssayn.

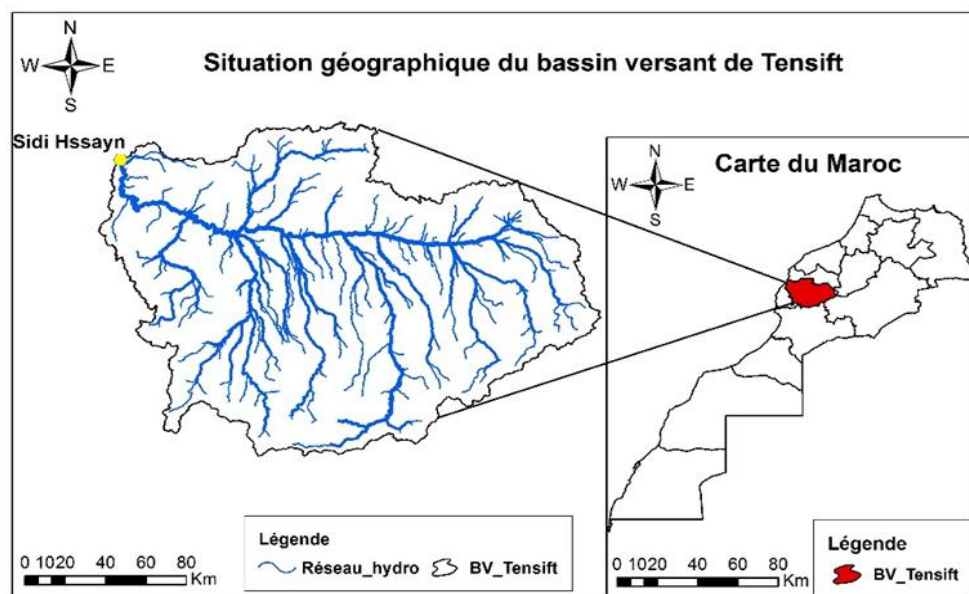


Figure 2 : Situation géographique du bassin versant du Tensift.

II. Cadre géologique :

Le bassin de Tensift est représenté par une grande diversification de lithologie car il est subdivisé en trois grands domaines.

Tableau1 : Caractéristiques géologiques du BV du Tensift (*In* : SARAANE et BEN YAHIA, 2018)

Les grands domaines	Domaine montagneux « Chaine du Haut atlas »	Domaine de Jbilette	Domaine de la partie Haouz
Lithologie	<ul style="list-style-type: none"> -Formations volcano-sédimentaires : (conglomérat à galet ou graviers précambrien, présence de laves de quartzites et de granitoïde) -Formation de schistes -Formation de grès et de conglomérat de couleur rouge brique 	<ul style="list-style-type: none"> -Formation schisteuse de couleur sombre -Série schistes argileuses -Série d'argiles et grès -Conglomérats et des calcaires ainsi que des roches éruptives 	<ul style="list-style-type: none"> -Formation schisteuse d'âge primaire -Formation variée « des grès rouges, des calcaires, marnes et grès -Série caractérisée par des alluviaux caillouteux, limoneux ou sableux superposé sur 'une carapace calcaire.
Perméabilité	Faible	Très faible	Moyenne à haute

III. Cadre climatique :

Le bassin versant du Tensift possède un climat dit semi-aride. En effet, il est caractérisé par une humidité dans la partie amont (Haut-Atlas) en raison de l'altitude qui atteint plus de 4000 m, avec des précipitations comprises entre 300 et 800 mm en moyenne annuelle (site : LMI TREMA, 2020)². Tandis que les précipitations moyennes annuelles dans la partie plaine ne dépassent que rarement 200mm. En général, les précipitations dans le bassin versant du Tensift restent irrégulières avec une grande variabilité spatiotemporelle, contrairement à la température moyenne qui est plus régulière dont la valeur est 18,5°C (site : CLIMATE-DATA.ORG)³.

IV. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique du bassin versant comporte principalement l'Oued Tensift qui traverse la plaine du Haouz, à proximité de Marrakech, et reçoit de nombreux affluents, particulièrement sur sa rive gauche, il se jette dans l'Atlantique (site : wikipedia)⁴.

Étude Hydrologique

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.

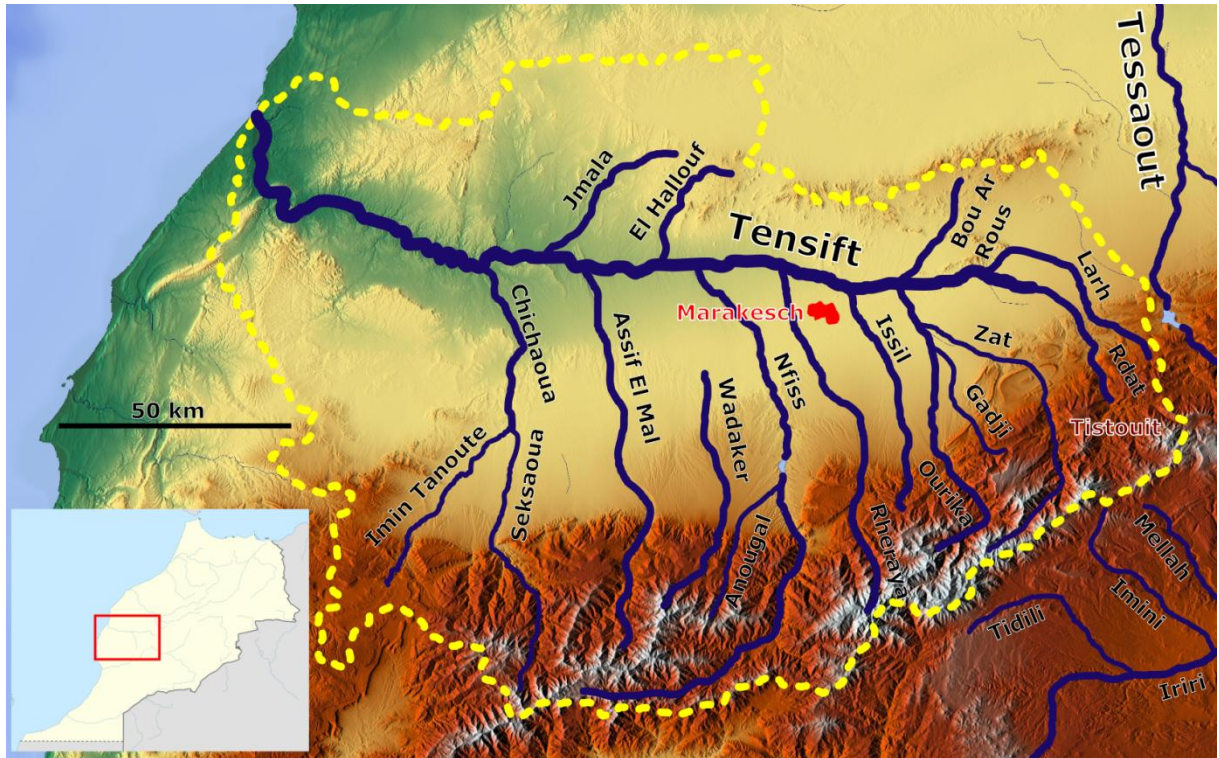


Figure 3 : Réseau hydrographique du bassin versant du Tensift (Hans Braxmeier et Peter, 2022).

Méthodologie

I. Délimitation du bassin versant sous ArcGIS :

La délimitation des bassins versants est une étape très importante, car elle permet d'en savoir plus sur la zone d'étude.

Pour faire la délimitation il faut suivre les étapes suivantes :

I.1. Obtention du Model Numérique de Terrain (MNT) :

Le **Modèle Numérique de Terrain (MNT)** est une représentation de la topographie en trois dimensions, créée à partir des données d'altitudes du terrain. Le MNT ne prend pas en compte les plantes et les bâtiments.

Pour obtenir le MNT qui couvre tout le Bassin versant de Tensift, il faut télécharger 9 images à partir du site (saidi.ma/mnt/) représentant la zone d'étude puis les fusionner dans Arc Gis en une seule image en utilisant la fonction « Mosaic to new raster ».

I.2. Fill :

La fonction fill permet de localiser les erreurs provoquées par la résolution des données et les remplir (faire une correction de l'MNT par le remplissage des dépressions en augmentant l'altitude des cellules au niveau du terrain environnant), Cette correction est nécessaire pour une meilleure délimitation du bassin.

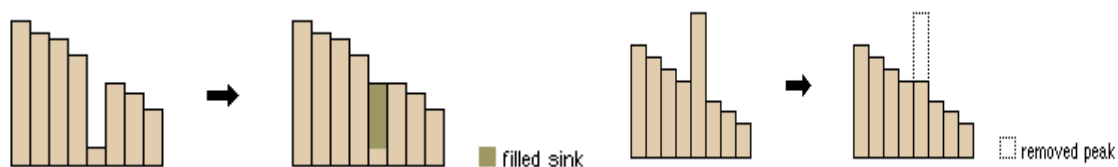


Figure 4 : Illustration du fonctionnement de **Fill** (Site : ArcGIS for Desktop)⁵.

I.3. Flow direction :

C'est une fonction qui permet d'identifier les directions des écoulements dans la carte Raster MNT.

I.4. Flow accumulation :

Permet de calculer, pour chaque cellule, la quantité d'eau accumulée dans la cellule du fait des écoulements amont. (Saidi, 2013).

I.5. Fonction Vectorisation (Con) :

Cette commande permet de générer une couche correspondant au réseau hydrographique. Le niveau de détail du réseau est défini par l'utilisateur en nombre de cellules : 200, 300, 500, 1000... (Plus le nombre est petit, plus le détail est grand).

I.6. Désignation d'un exutoire :

Cette étape consiste à placer un exutoire particulier sur le cours d'eau pour avoir une bonne délimitation.

I.7. Watershed :

La fonction Bassin versant (Water shed) permet de délimiter le bassin versant à son exutoire.

I.8. Clip :

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

À la fin il faut convertir la couche obtenue en shapefile vectorielle par l'outil Conversion Tools (from raster to polygone).

La cartographie est aussi réalisée à travers le logiciel ArcGIS. Toutes les cartes présentées dans (Résultat et interprétations) du rapport, sont réalisées par ArcGIG à travers la fenêtre « Layout view » qui permet de faire la mise en page des cartes.

II. Estimations des débits des crues : HYFRAN-PLUS

L'estimation de débit se fait par plusieurs méthodes tel que : Hyfran-Plus, Gradex, Gumbel et les méthodes empiriques.

Le logiciel HYFRAN-PLUS permet d'ajuster un nombre important de distributions statistiques à une série de données.

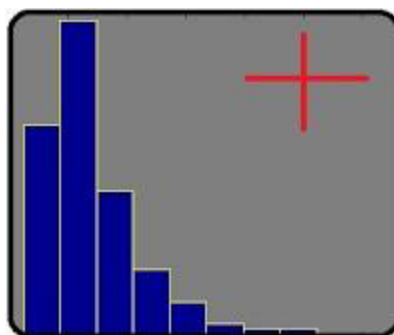


Figure 5 : Logo du logiciel Hyfran-Plus (Site : HYFRAN-guide) ⁶.

Le programme fonctionne en saisissant une série de données pluviométrique ou de débits. Après cela, il calcule automatiquement le débit avec ses périodes de retour. Ce logiciel fournit un ensemble de méthodes de calcul, par exemple : Gumbel, Normal, Lognormal, GEV, etc.

Le programme fournit également des représentations graphiques des résultats obtenus. Enfin, pour choisir l'ajustement le plus adapté, il faut faire une comparaison des résultats des différentes lois. Cette comparaison se fait soit visuellement ou à travers des critères d'information bayésien (BIC) et d'Akaike (AIC). Le meilleur ajustement c'est celui qui a les faibles BIC et AIC (données automatiquement par le logiciel).

Résultats Et interprétations

I. Caractéristiques morpho-métriques du bassin versant de Tensift :

La détermination des caractéristiques du bassin versant fournit une idée sur le fonctionnement du réseau hydrographique.

I.1. Caractéristiques géométriques :

L'ensemble des paramètres géométriques d'un bassin versant (superficie, périmètre, etc.), peuvent être calculés automatiquement à l'aide du logiciel ArcGIS.

I.1.1. Aire et périmètre :

La superficie et le périmètre sont des paramètres essentiels dans l'étude hydrologique puisqu'ils servent de connaître la limite du bassin et aussi représentent l'aire de réception des précipitations.

Tableau 2 : Paramètres géométriques du bassin versant du Tensift

Paramètre	Signification	Valeur
Surface (Km ²)	Étendue de sol dont on connaît plus ou moins ces limites	20396
Périmètre (Km)	La ligne de partage des eaux qui entoure le bassin	945
Longueur du talweg (Km)	Le plus long cours d'eau dans le bassin versant	316

I.1.2. Indice de compacité :

L'indice de compacité de GRAVELIUS (KG) est admis par hydrologues afin de caractériser la forme d'un bassin versant. Il faut comparer la forme du bassin versant à celui d'un cercle pour lequel (KG est égal à 1).

L'indice de compacité influence sur l'écoulement global. Ce paramètre est calculé selon la formule suivante :

$$KG = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

- A : Surface du bassin en Km²
- P : Périmètre du bassin en Km

Étude Hydrologique

- Si KG est supérieur à 1, la forme du bassin est allongée.
- Si KG est inférieur ou proche de 1, le bassin est de forme compacte.

Pour ce cas le KG d'environt 1,85 ; donc le bassin est allongé ce qui favorise les faibles débits de pointe de crue lors des précipitations en raison du retard de l'acheminement de l'eau à l'exutoire.

I.1.3. Rectangle équivalent :

Il s'agit d'une transformation géométrique du bassin versant en un rectangle de dimensions L et l, ayant la même surface et le même périmètre que le bassin. Ce paramètre permet de comparer les bassins versant du point de vue de l'écoulement.

- Longueur du rectangle : $L_{\text{éq}} = \text{KG} \cdot \frac{\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{\text{KG}}\right)^2} \right]$

$$L_{\text{éq}} = 423 \text{ Km}$$

- Largeur du rectangle : $l_{\text{éq}} = \text{KG} \cdot \frac{\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{\text{KG}}\right)^2} \right]$

$$l_{\text{éq}} = 48 \text{ Km}$$

Avec :

- A : Surface du bassin versant en Km^2
- KG : Indice de compacité de GRAVELIUS

Le bassin versant du Tensift à une longueur égale 423km et une largeur d'environt 48km. Ces valeurs confirment l'allongement du bassin versant. Ce bassin est 8 à 9 fois plus long que large ce qui implique que l'écoulement est abattu.

I.1.4. Indice de forme de Horton (Horton, 1932) :

Le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal

$$Kh = \frac{A}{L^2}$$

Avec :

Etude Hydrologique

- A : Surface en Km²
- L : Longueur du Talweg en Km
- Kh < 1 : Bassin de forme allongée.
- Kh > 1 : Bassin de forme ramassée.

L'indice de forme de Horton Kh égale à 0,2 inférieur à 1. Ce qui signifie l'allongement du bassin, donc les résultats précédents sont confirmés.

Tableau 3 : Caractéristiques géométriques du bassin versant du Tensift

Paramètre	Valeur
Surface (Km ²)	20396
Périmètre (km)	945
Longueur du talweg (Km)	316
Indice de compacité KG	1,85
Longueur du rectangle (Km)	423
Largeur du rectangle (Km)	48
Indice de forme Kh	0,2

I.2. Caractéristiques du relief :

Le relief présente l'ensemble des irrégularités qui caractérisent la surface de la terre. Il existe trois types de relief (les montagnes, les plaines, les plateaux) avec des critères principaux tel que : les altitudes et les pentes.

Le relief influence sur le débit à cause des paramètres hydrométéorologiques tels que précipitations, température, humidité et autres.

I.2.1. Etude hypsométrie :

L'hypsométrie c'est la mesure de l'élévation des terres par rapport au niveau de la mer.

a. Carte hypsométrique :

La carte hypsométrique est une représentation de la distribution des différentes altitudes dans le bassin versant.

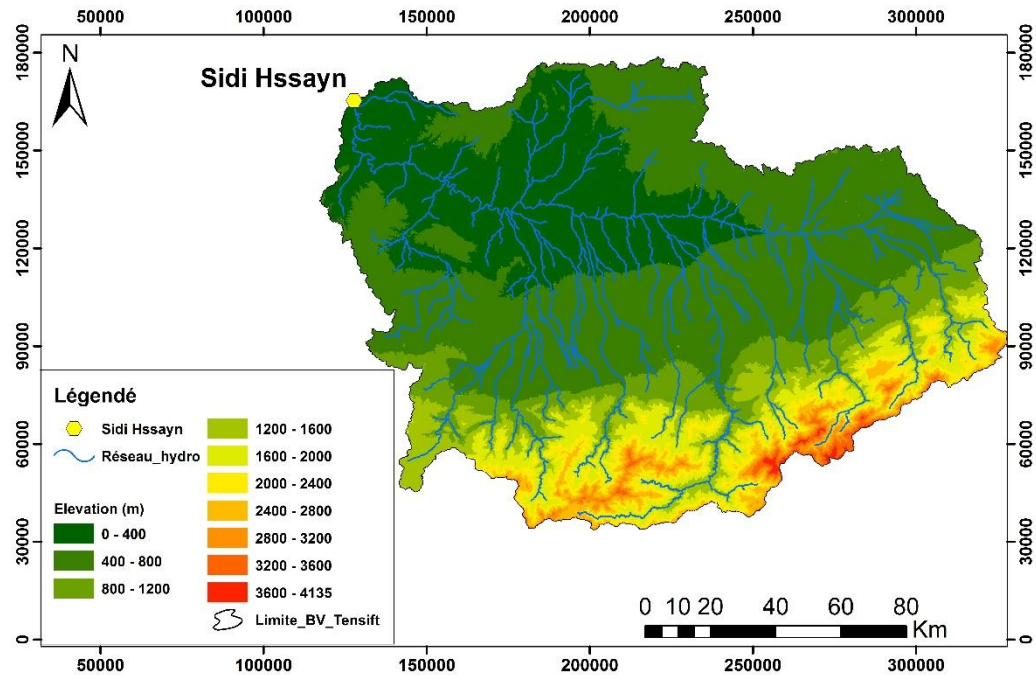


Figure 6 : Hypsométrie du bassin versant du Tensift.

D’après l’analyse de cette carte, on constate que les altitudes oscillent entre 0(au NW) et 4135m (au SE). En général on a la dominance des altitudes entre 0 et 800m.

b. Courbe hypsométrique :

La courbe hypsométrique fournis idée sur la répartition de la surface en fonction de l’altitude équivalente.

Les données de la carte (Fig.6) sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tabl. 4) :

Tableau 4 : Répartition hypsométrique du bassin versant du Tensift

Tranches d’altitudes (m)	Surface (km ²)	Surface (%)	Surface cumulée (%)
0-400	4881	24	100
400-800	8602	42	76
800-1200	1900	9	34
1200-1600	1471	7	25
1600-2000	1399	7	17
2000-2400	1005	5	11
2400-2800	650	3	6
2800-3200	314	2	2
3200-3600	135	1	1
3600-4135	38	0	0
Total	20396	100	0

Étude Hydrologique

Selon les données du tableau 4, on peut réaliser la courbe hypsométrique (fig. 7) en portant les tranches d'altitude (en Mètre) en ordonnées et en abscisse surface cumulée (%).

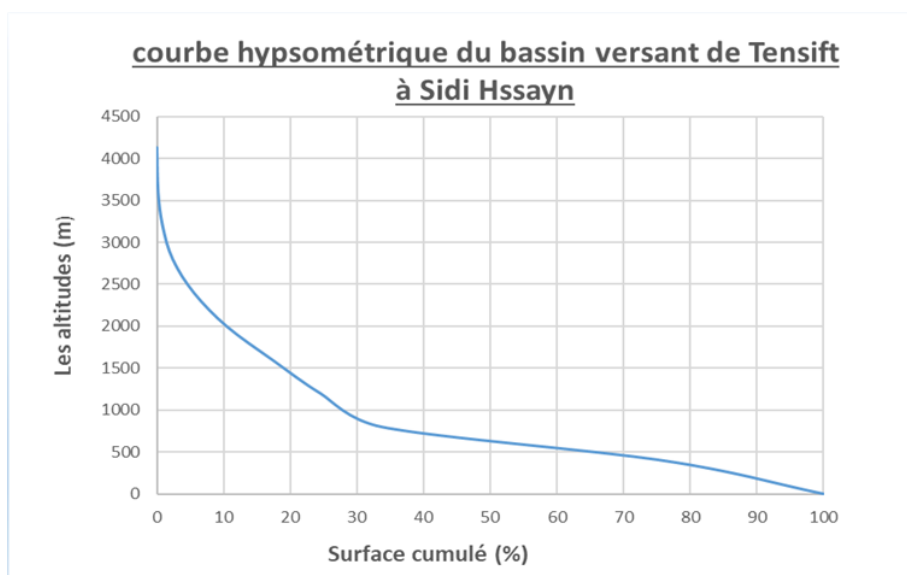


Figure 7 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Tensift.

D'après cette de la courbe hypsométrique on peut déterminer plusieurs paramètres :

- L'altitude maximale : c'est le point le plus culminat du bassin.
- L'altitude minimale : c'est le point qui a une altitude plus basse, ce genre d'altitude se localise généralement dans la partie aval du bassin versant donc à l'exutoire
- L'altitude médiane : c'est l'altitude correspond à 50% de surface cumulé
- L'altitude moyenne H est ainsi exprimée :

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

Avec :

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau en Km^2

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau en m.

A_t : Surface totale du bassin en Km^2 .

Tableau 5 : Altitudes du bassin versant du Tensift

Type d'altitude	Maximale	Minimale	Moyenne	Médiane
Valeur en (m)	4135	0	886	600

La courbe hypsométrique nous donne idée aussi sur l'âge du bassin à partir de l'allure tel que :

- **bassin jeune** : superficie faible par rapport au changement d'altitude initiale, ce qui est caractéristique des bassins abrupts.

Étude Hydrologique

- **vieux bassin** : plaine douce près d'un cours d'eau où l'altitude varie très peu malgré une superficie importante.

- **bassin « mature »** intermédiaire.

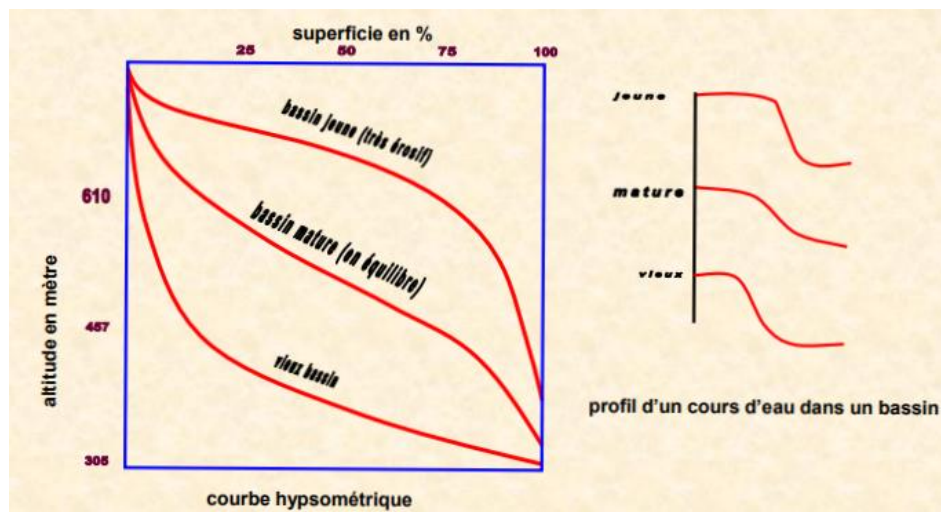


Figure 8 : Interprétation de la courbe hypsométrique en fonction de l'âge du bassin (site : f2chool.com)⁷.

- D'après l'allure de la courbe hypsométrique (Fig.7), et l'allure de la courbe (Fig.8), on conclut que le bassin versant du Tensift est un vieux bassin.

I.2.2. Étude des pentes :

La pente topographique est la tangente de l'inclinaison entre deux points d'un terrain, donc c'est l'angle entre le point et l'horizontal.

a. Carte des pentes :

La carte des pentes c'est la répartition des angles au niveau de toutes les points du bassin versant.

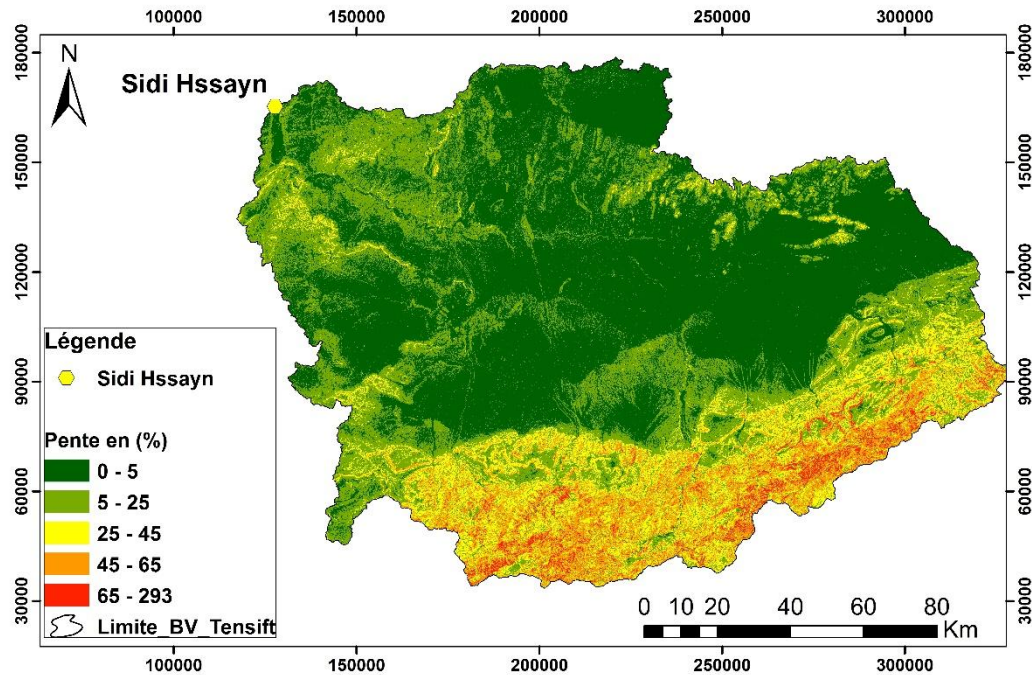


Figure 9 : Pentés du bassin versant du Tensift.

La pente joue un rôle primordial puisqu'elle favorise la vitesse d'écoulement ainsi que l'érosion car la pente conditionne les formes des filets d'eau ainsi que les lignes d'écoulement. D'après l'étude de la carte on a la dominance des pentes assez faible varie entre 0% et 25%.

b. Indices de pentes :

Ces indices ont pour but de caractériser la pente du bassin versant et de permettre Comparez et catégorisez.

Pente moyenne du bassin :

La pente moyenne est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. C'est une bonne indication sur le temps de concentration T_c - et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

$$pmoy = 2 \frac{hmoy}{L}$$

Avec :

- ***pmoy*** : Pente moyenne du bassin (m/Km)
- ***L*** : Longueur du cours d'eau principal talweg (Km)

Étude Hydrologique

- **hmoy**: Altitude moyenne du bassin (m)

Tableau 6 : Caractéristique de la pente moyenne

Paramètre	<i>hmoy</i> (m)	<i>L</i> (Km)	<i>pmoy</i> (m/km)
Valeur	886	316	5,6

La pente moyenne du bassin versant est d'environ 5,6 m/Km ce qui confirme les résultats de la carte.

Indice de pente classique :

Cet indice se calcule d'après le rectangle équivalent. Il est défini par la formule suivante :

$$I_p = \frac{(H_{max} - H_{min})}{Leq}$$

Avec :

- *Hmax* : Altitude maximale du bassin (m)
- *Hmin* : Altitude minimale du bassin (m)
- *Leq* : Longueur du rectangle équivalent (m)

Tableau 7 : Caractéristique de la pente classique du bassin versant du Tensift

Paramètre	<i>Hmax</i> (m)	<i>Hmin</i> (m)	<i>Leq</i> (m)	<i>I_p</i>
Valeur	4135	0	423 × 10 ³	0,0097

Indice de pente global :

I_g influence sur le type de relief donc sur la capacité de ruissèlement. Cet indice est déterminé à partir la courbe hypsométrique et le rectangle équivalent, Pour le calculer on utilise la formule suivante :

$$I_g = \frac{Du}{Leq}$$

Avec :

- *Du* : Dénivelée utile correspond à l'altitude qui a 90% de la surface cumulée. Tel que $Du = H(5\%) - H(95\%)$
- *Leq* : Longueur du rectangle équivalent (m)

Tableau 8 : Caractéristique de la pente globale du bassin versant du Tensift

Paramètre	<i>H</i> (5%)	<i>H</i> (95%)	<i>Du</i> (m)	<i>Leq</i> (m)	<i>I_g</i>
Valeur	2500	225	2275	423 × 10 ³	0,00537

Tableau 9 : Classification des reliefs selon l'ORSTOM

Intervalle	Type du relief
$Ig < 0.002$	Relief très faible
$0.002 < Ig < 0.005$	Relief faible
$0.005 < Ig < 0.01$	Relief assez faible
$0.01 < Ig < 0.02$	Relief modéré
$0.02 < Ig < 0.05$	Relief assez fort
$0.05 < Ig < 0.5$	Relief fort
$0.5 < Ig$	Relief très fort

La valeur de Ig est d'ordre 0,00537, et d'après la classification des reliefs selon ORSTOM (Tabl.9), on peut conclure que le relief du bassin versant du Tensift est assez faible.

Dénivelé spécifique :

Le dénivelé spécifique permet de comparer les pentes des bassins de tailles différentes.

$$Ds = Ig \sqrt{A}$$

Avec :

- Ig : Indice de pente global
- A : Surface en m^2

Paramètre	$A (m^2)$	Ig	$Ds(m)$
Valeur	20396×10^3	0,00537	0,768

Tableau 10 : Caractéristique du dénivelé spécifique selon ORSTOM

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

D'après la classification d'ORSTOM (Tabl.10), et la valeur de Ds qui est d'environ 24,25m le relief est faible.

I.3 Caractéristiques du réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est un ensemble hiérarchisé des cours d'eau qui participent à l'écoulement de l'eau dans le bassin versant. Le développement du réseau hydrographique est largement lié à l'évolution d'un groupe de facteurs géologiques, climatiques, topographiques etc.

I.3.1. Classification des cours d'eau :

La classification de Strahler est la méthode la plus adaptée parmi plusieurs d'autres classifications. Selon Strahler, tout cours d'eau dépourvu d'un tributaire est considéré comme affluent de premier ordre. La confluence entre deux affluents d'ordre 1 forme un cours d'eau d'ordre plus élevé des deux (site : hydrologie-2.org) ⁸.

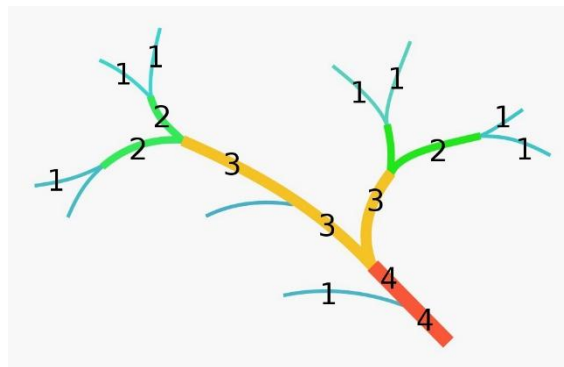


Figure 10 : Classification du réseau en ordre de Strahler (site : Wikipédia) ⁹.

Le réseau hydrographique du bassin versant du Tensift est formé par des affluents de 5 ordres, constitué de 630 segments. La figure ci-dessous (Fig. 11) permet de visualiser l'organisation spéciale du réseau hydrographique du bassin versant du Tensift.

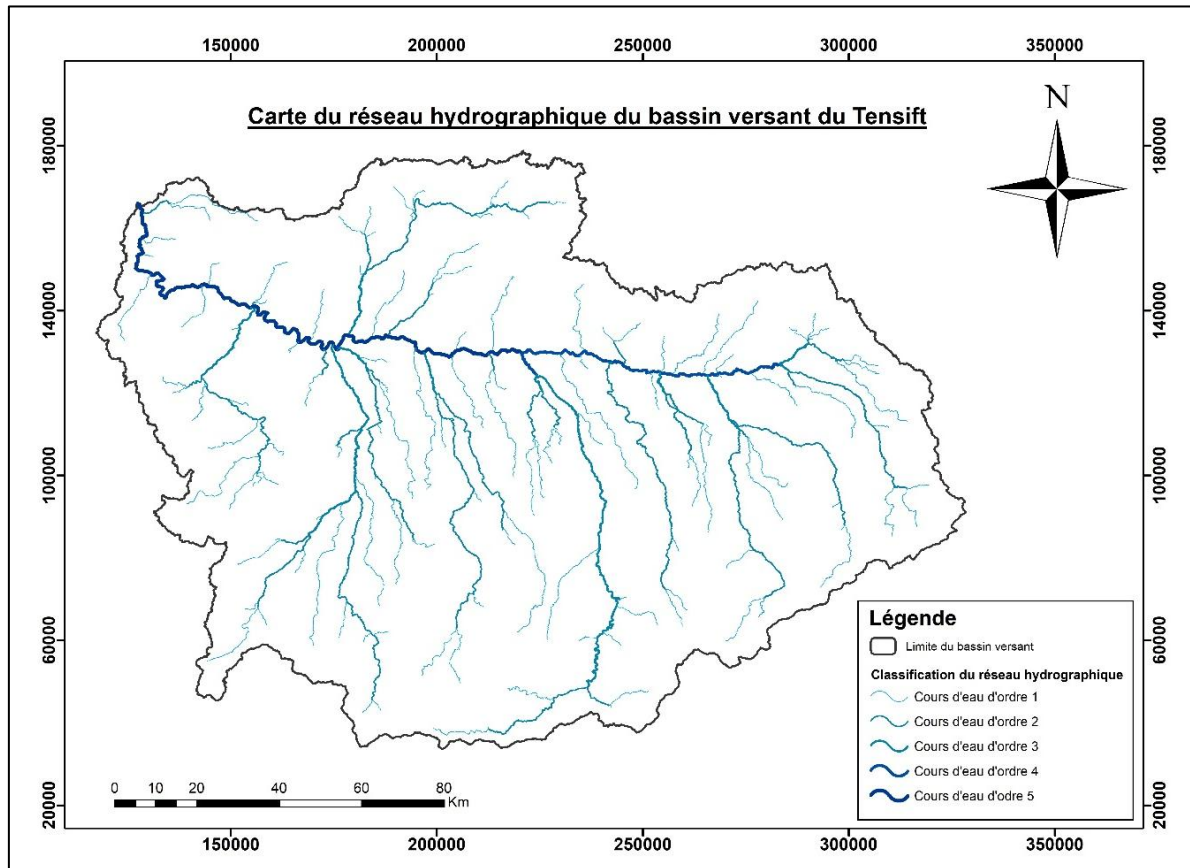


Figure 11 : Classification du réseau hydrographique du bassin versant du Tensift

I.3.2. Densité de drainage :

C'est un paramètre qui caractérise l'organisation du réseau hydrographique et le degré de drainage du bassin versant. Ce dernier permet d'indiquer l'efficacité du drainage de la zone à étudier ainsi de fournir des informations sur la dynamique des bassins versants et les types de ruissellement de surface. Pourtant, il dépend de la géologie et la topographie du bassin versant ainsi que certaines conditions climatiques.

Il correspond au rapport de la somme des longueurs des cours d'eau en unité de surface du même bassin.

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

Avec :

Dd : Densité de drainage en Km/Km²

Li : Somme des longueurs des cours d'eau d'ordre i

Etude Hydrologique

A : Superficie du bassin versant

Dans le cas du bassin versant de Tensift, nous avons :

Tableau 11 : Caractéristiques de la densité de drainage

Li (Km)	A (Km ²)	Dd (Km/Km ²)
3111	20396	0,15

La Densité de drainage (Dd) est d'ordre 0,15Km/Km². La valeur de Dd est faible, cela est impossible dans le bassin versant de Tensift puisqu'on a une grande superficie 20396 Km². La valeur est faible à cause du réseau hydrographique qui n'est pas bien marqué par arc gis.

1.3.3. Coefficient de torrentialité :

Le coefficient de torrentialité est estimé par la formule suivante :

$$Ct = Dd * Fi$$

Avec :

Dd : Densité de drainage

Fi : Fréquence des cours d'eau d'ordre 1

- Le calcul de Fi se fait par la manière suivante : $Fi = \frac{N1}{S}$

N1 : Nombre des cours d'eau d'ordre 1

S : Superficie du bassin versant

Le coefficient de torrentialité est égal à 0,012. Le Ct est étroitement lié à la densité de drainage. Il donne une idée sur le comportement du réseau de drainage c'est-à-dire comment l'eau provenant des cours d'eau d'ordre inférieur arrive à la rivière principale. (AMY, 2008).

1.3.4. Pente moyenne de l'écoulement :

$$Pmoy\ d'\text{écoulement} = \frac{Hmax - Hmin}{L}$$

Avec :

- Hmax : Altitude maximale en (m)
- Hmin : Altitude minimale en (m)
- L : Longueur du cours d'eau principal talweg (Km)

Pente moyenne d'écoulement fournis une idée sur la vitesse de l'eau pour arriver à l'exutoire traversant le talweg.

Étude Hydrologique

Plus que la pente moyenne d'écoulement est forte, l'écoulement accélère. Mais plus que la pente douce ou nulle l'eau va prendre beaucoup de temps pour arriver à l'exutoire, il va s'infiltrer dans le sol.

Tableau 12 : Caractéristique de la pente moyenne d'écoulement

Paramètre	<i>Hmax</i>	<i>Hmin</i>	<i>L</i>	<i>Pmoy d'écoulement</i>
Valeur	4135	0	316	13,08

I.4. Temps de concentration :

C'est la durée nécessaire pour arrivées les gouttes d'eau du point de précipitation jusqu'à l'exutoire, on peut calculer ce paramètre par plusieurs formules :

a. Formule de Kirpich :

$$Tc = 0,0195 \times L^{0,77} \times p^{-0,385}$$

Avec :

L : Longueur du drain principal

p : Pente moyenne en m/m

Tableau 13: Temps de concentration selon la formule de KIRPICH

L(m)	P (m/m)	Tc (min)	Tc(h)
316000	$5,6 \times 10^{-3}$	2464,57	41,07

b. Formule Espagnole :

$$Tc = 60 \times 0,3 \times \left(\frac{L}{p^{0,25}}\right)^{0,77}$$

Avec :

L=Longueur du drain principal (Km)

p=Pente moyenne du bassin en m/m

Tableau 14 : Temps de concentration selon la formule d'Espagnole

L (km)	P (m/m)	Tc (min)	Tc (h)
316	$5,6 \times 10^{-3}$	4106,81	68,41

c. Formule californienne :

$$Tc = 60 \times 0,1452 \times \left(\frac{L}{p^{0,5}}\right)^{0,77}$$

Etude Hydrologique

Avec :

L=Longueur du drain principal en Km

p=Pente moyenne du bassin en m/m

Tableau 15: Temps de concentration selon la formule Californienne

L (km)	P (m/m)	Tc (min)	Tc (h)
316	$5,6 \times 10^{-3}$	5392,92	89,8

d. Formule de Ventura :

$$Tc = 76,3 \times \left(\frac{S}{p}\right)^{0,5}$$

Avec :

S=Superficie du bassin en Km²

P=Pente moyenne du bassin en %

Tableau 16 Temps de concentration selon la formule de Ventura

S(Km ²)	P(%)	Tc (min)	Tc (h)
20396	0,56	14561,39	242,68

e. Formule de Passini :

$$Tc = 64,8 \times \left(\frac{S}{L}\right)^{0,333} \times p^{-0,5}$$

Avec :

S=Superficie du bassin en Km²

L=Longueur du drain principal en Km

P=Pente moyenne du bassin en %

Tableau 17 : Temps de concentration selon la formule de Passini

S(Km ²)	L (km)	P(%)	Tc (min)	Tc (h)
20396	316	0,56	346,86	5,78

f. Formule de Turazza :

$$Tc = 60 \times 0,108 \times \left(\frac{S}{L}\right)^{0,333} \times p^{-0,5}$$

Avec :

S=Superficie du bassin en Km²

L=Longueur du drain principal en Km

Étude Hydrologique

P=Pente moyenne du bassin en m/m

Tableau 18 : Temps de concentration selon la formule de Turazza

S(Km ²)	L (km)	P (m/m)	Tc (min)	Tc (h)
20396	316	$5,6 \times 10^{-3}$	346,86	5,78

- Le temps de concentration du bassin versant est équivalent à la moyenne des temps de concentration calculés par les formules kirpich, espagnole et californienne car les autres formules sont exagérées. Le temps de concentration du bassin versant de Tensift est **66,43h** équivalent à 2jours et demi.

II. Méthodes d'estimation des débits des crues :

Le calcul des débits de pointe est une étape essentielle, car elle conditionne le dimensionnement des évacuateurs de crue. Ce calcul se fait selon plusieurs méthodes tel que : méthodes empiriques, méthode hydrométéorologique de Gradex, ajustement statistique et Gumbel.

Les données utilisées dans le calcul des débits sont les pluies journalières, les débits journaliers et les débits instantanés. Ces données proviennent de la station de Talmest (bassin jaugé) car c'est la plus proche station à Zaouit Sidi Hssayn (bassin non jaugé).

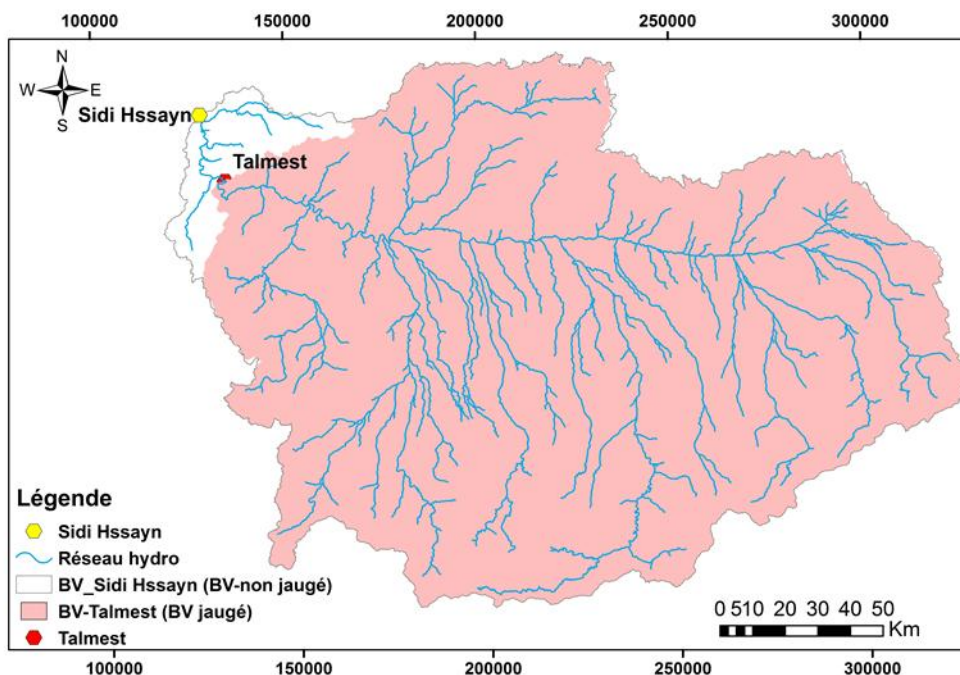


Figure 12 : Position du bassin jaugé (BV Talmest) et bassin non jaugé (BV Sidi Hssayn).

II.1. Méthodes empiriques :

Ce sont des méthodes qui sont appliquées lorsqu'on n'a pas des données complètes sur les débits des crues dans la région étudiée. Pour obtenir les débits à des périodes de retours différentes on a plusieurs formules à appliquer selon la surface du bassin versant :

Tableau 19 : Formules empiriques convenables avec la surface du bassin

Surface(km ²)	Formules convenables
S>100	Hazen
	Fuller 2
	Mallet Gautier
S<100	Rationnelle
	Burkilli
	MacMath
25<S<100	Fuller 2
	Mallet Gautier
10<S<25	Rationnelle
	Burkil
1<S<10	Rationnelle
	Mallet Gautier
	Fuller 2

La surface du bassin versant du Tensift est d'environ 20396 Km² qui est largement supérieur à 100 Km². Les formules adéquates sont : Hazen, Fuller 2 et Mallet-Gautier.

II.1.1. Formule de Hazen :

La formule de Hazen fournit le débit de 1000 ans en fonction de la surface. Le calcul se fait par l'équation suivante :

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

Avec :

- Q(T) : Débit de pointe en m³/s d'une période de retour T.
- a : Coefficient qui varie entre 0.7 à 3.5 selon le climat :

Tableau 20 : Valeur du paramètre a en fonction du climat

Types de climat	Humide	Aride	Saharien
La valeur de a	0,7<a<0,8	0,8<a<2	3<a<3,5

- S : surface du bassin en km².
- Q(1000) = K1S^{K2}.

Étude Hydrologique

Le coefficient k1 et K2 varie en fonction de la zone d'étude ainsi que la moyenne de pluie.

Tableau 21 : Répartitions des zones d'études en fonction de la moyenne de pluies

Intervalle Pluviométrique	Paramètres pour calculer Q (1000)		Zone d'étude
	K1	K2	
1000-1300	15.55	0.776	Rif central
800-1000	9.78	0.793	Rif occidental
600-800	7.58	0.808	Rif oriental
200-400	9.38	0.742	Haut Atlas Saharien
700-900	14.94	0.636	Moyen Atlas
500-700	13.51	0.613	Moyen Atlas
400-700	13.41	0.587	Moyen Atlas (Karst)

La pluie moyenne est égale 247,1 (donné par ABHT), cette valeur est située dans l'intervalle 200 – 400(Tabl.21).

Donc $Q(1000) = 9,38 * 20396^{0,742} = 14787,17 \text{ m}^3/\text{s}$

Tableau 22 : Résultat de calcul obtenu par la formule de Hazen pour 2 ans

Paramètre	K1	K2	a	Q (1000) (m3/s)	S(km ²)	Q (m3/s)
Valeur	9.38	0.742	2	14787,17	20396	3384,27

II.1.2. Formule de Fuller :

La formule de Fuller est changée à partir de la région étudiée. Pour faire le calcul il faut appliquer la relation de 1997 au Maroc suivant :

$$Q(T) = (1 + a \text{Log}(T)) \left[A^{0,8} + \left(\frac{8}{3} \times A^{0,5} \right) \right] \times \frac{4}{3} \times \frac{N}{100}$$

Avec :

- Q(T) : Débit maximal pour la période de retour T en (m3/s)
- A : Superficie du bassin versant en (km²)
- T : Période de retour
- a : Coefficient qui varie entre 0.7 à 3.5

Tableau 23 : Valeur du paramètre a en fonction de régions

La valeur de a	0.7 < a < 0.8	0.8 < a < 2	3 < a < 3.5
Types de régions	Pour les grands bassins versants et pour les régions bien arrosées	Pour les régions arides	les oueds sahariens

Étude Hydrologique

Puisqu'on a un bassin aride à semi- aride en prend a d'ordre 0,8.

- N : Coefficient régional qui varie de 80 à 100 :

Tableau 24 : Valeur du paramètre N en fonction de régions

La valeur de N	N = 80	N = 85	N = 100
La région	La plaine.	Les régions accidentées.	Montagne.

D'après le résultat de l'étude hypsométrie (relief assez faible) qui peut être une plaine, et d'après le tableau 34, en conclu que N est égale 80.

Tableau 25 : Résultat de calcul de débit obtenu par la formule de Fuller

Paramètre	a	N	A(Km ²)	Q(2) (m3/s)
Valeur	0,8	80	20396	4214 ,06

II.1.3. Formule de Mallet-Gautier :

La formule s'écrit par la manière suivante :

$$Q(T) = 2 \times K \left[\text{Log}(1 + a + Pm) \times \frac{A}{\sqrt{L}} \right] \times \sqrt{1 + 4 \log(T) - \log(A)}$$

Avec :

- Q(T) : Débit de pointe en [m³/s]
- T : Période de retour en (ans)
- K : Paramètre varie entre 0.5 et 6

Tableau 26 : Valeur du paramètre K en fonction de la région

Valeur de k	K=0.5	K=6
Région	Grands bassins versant	Petits bassins versants de fortes pentes.

Puisqu'on a un bassin assez grand en prend K d'ordre 2.

- a : Paramètre varie entre de 20 à 30 .Au Maroc a = 20
- L : Longueur du plus long talweg (Km)
- A : Superficie du bassin versant (Km²)
- Pm : Pluie moyenne annuelle (mm)

Tableau 27 : Résultat de calcul de débit obtenu par la formule de Mallet-Gautier

Paramètres	K	a	L	A	Pm	Q (2) m3/s
Valeur	2	20	316	20396	247,1	14105,95

Tableau 28 : Résultats de débits à partir obtenu par les Méthodes empiriques

T (ans)	Hazen (m ³ /s)	Fuller (m ³ /s)	Mallet-Gautier (m ³ /s)
2	3384	4214	14105
5	5065	5295	19916
10	6337	6113	23371
20	7609	6931	26377
50	9290	8012	29891
100	10562	8830	32296

D’après le tableau ci-dessus (Tabl.28), on peut remarquer que les résultats obtenus sont exagérés, donc on ne peut pas les prendre en considération.

II.2. Méthode de Gumbel :

Pour calculer le débit de crues de projet à zaouit Sidi Hssayn, il est nécessaire d'obtenir le débit maximum instantané de chaque année à TALMEST (entre les années 1970 à 2020). La source de ces débits utilisés est l’ABHT.

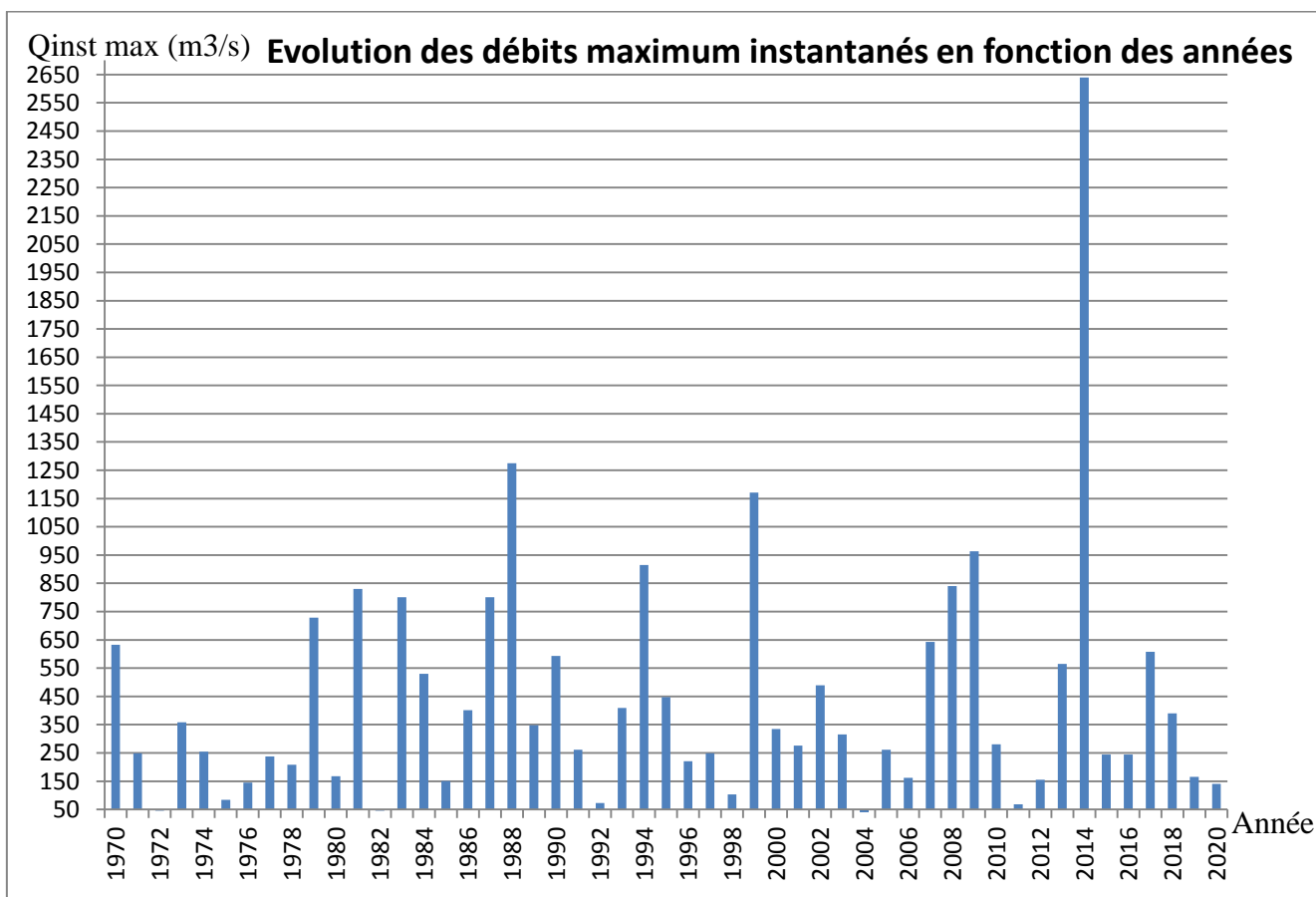


Figure 13 : Evolution des débits maximum instantanés en fonction des années.

Étude Hydrologique

Le graphe ci-dessus (Fig.13), représente l'évolution des débits maximum instantanés mesurés au niveau de la station TALMEST entre les années 1970-2020.

Tableau 29 : Caractéristiques de la série de débits maximums instantanés

Max	2640,000
Min	16,820
MOYENNE = $\sum Q_i/n$	441,925
ECARTYPE σ	434,604
MEDIANE	280,000
Le paramètre de forme Q_0	246,328
Le paramètre d'échelle $1/a$	338,991
Le nombre d'années (n)	51

Pour calculer la probabilité (Fréquence) qui va nous informer sur la période du retour T, il faut classer les débits du plus grand au plus petit (Rang). (Annexe 1).

Chercher l'ajustement statistique en appliquant la loi de Gumbel :

La fonction de Gumbel s'écrit :

$$\begin{aligned} \mathbf{FND} &= e^{-e^{-y}} \\ -\mathbf{LnFND} &= e^{-y} \\ \mathbf{Ln}(-\mathbf{Ln}(\mathbf{FND})) &= -y \\ y &= -\mathbf{Ln}(-\mathbf{Ln}(\mathbf{FND})) \end{aligned}$$

Avec :

FND : fréquence au non-dépassement.

Y : Droite de Gumbel

Les paramètres d'ajustement étant :

- Paramètre d'échelle $\frac{1}{a} = 0,78 * \sigma$ Avec σ est l'écart-type de la série des crues.
- Paramètre de forme $Q_0 = Q_{moy} - (\frac{1}{a} * 0,577)$, Q_{moy} est la moyenne des crues.

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

$$y = a(Q - Q_0) \text{ Ou } Q = \frac{1}{a} * y + Q_0$$

Les autres paramètres :

- Probabilité de crue $\mathbf{P=F}$
- Période du retour $\mathbf{T} = \frac{1}{F}$
- Fréquence au non-dépassement $\mathbf{FND} = 1 - F$

Tableau 30 : Débits obtenu par la méthode de Gumbel en fonction de T (ans)

T (ans)	Fréquence	FND	Y	Q (m3/s)
2	0,5	0,5	0,367	370
5	0,2	0,8	1,500	754
10	0,1	0,9	2,250	1009
20	0,05	0,95	2,970	1253
50	0,02	0,98	3,902	1569
100	0,01	0,99	4,600	1805

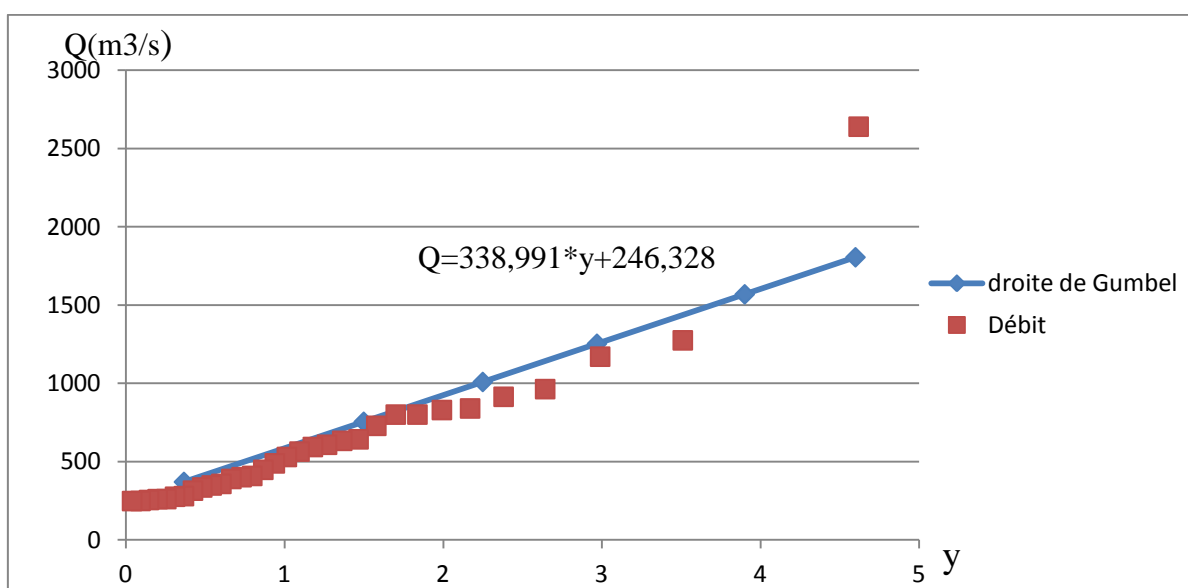


Figure 14 : Présentation des débits et la droite de Gumbel.

La droite de Gumbel passe par la majorité des débits, donc la loi de Gumbel est valable.

II.3. Ajustement statistique :

La méthode d'ajustement statistique est également une méthode d'estimation et de prédétermination de débit maximal de crues ainsi que sa période de retour. Cette méthode repose principalement sur l'analyse des crues précédentes dont l'objectif est de déterminer les probabilités de leur occurrence dans le futur. La prédétermination est basée sur la réalisation d'un modèle fréquentiel qui est une loi de probabilité qui décrit le comportement statistique d'un processus.

Le but est d'effectuer une analyse fréquentielle de la série des débits instantanés maximums annuels enregistrés au niveau de la station Talmest pour une période d'observation de 51 ans (du 1970 jusqu'au 2020), en essayant d'ajuster à la série les lois de probabilité

théorique. Pour, les lois utilisées dans cette étude sont Gumbel, Lognormal et GEV, réalisées à l'aide du logiciel HyfranPlus.

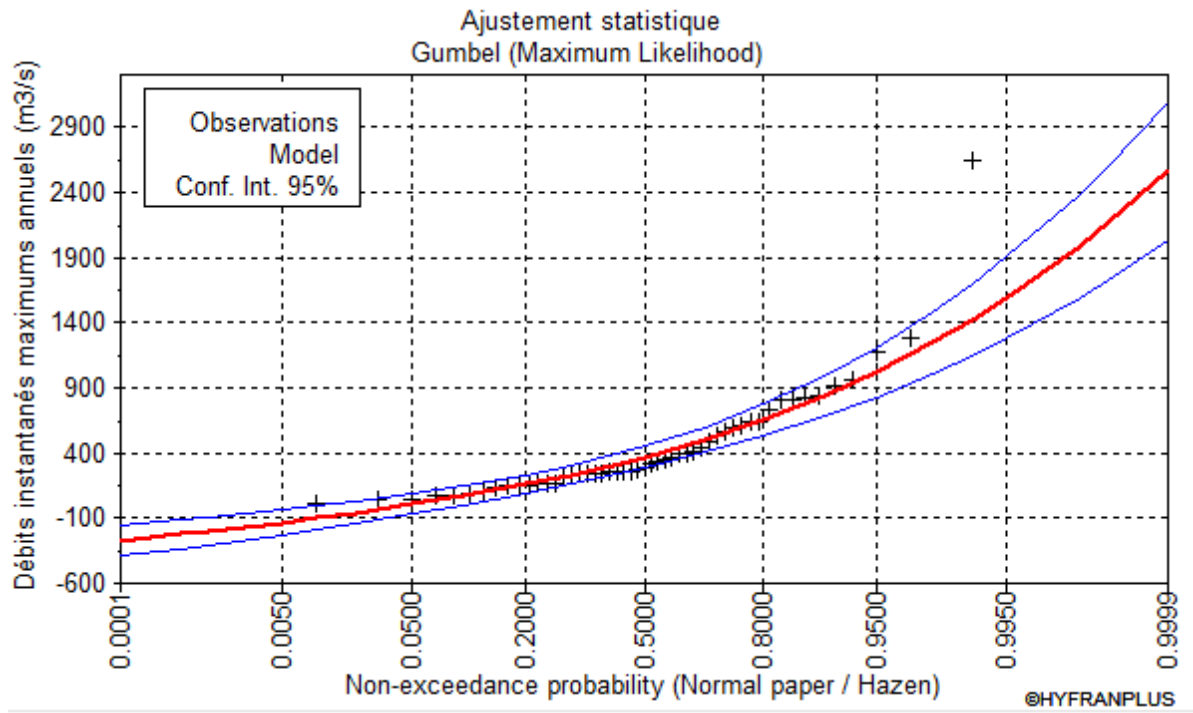


Figure 15 : Ajustement graphique des Qimax selon la loi de Gumbel.

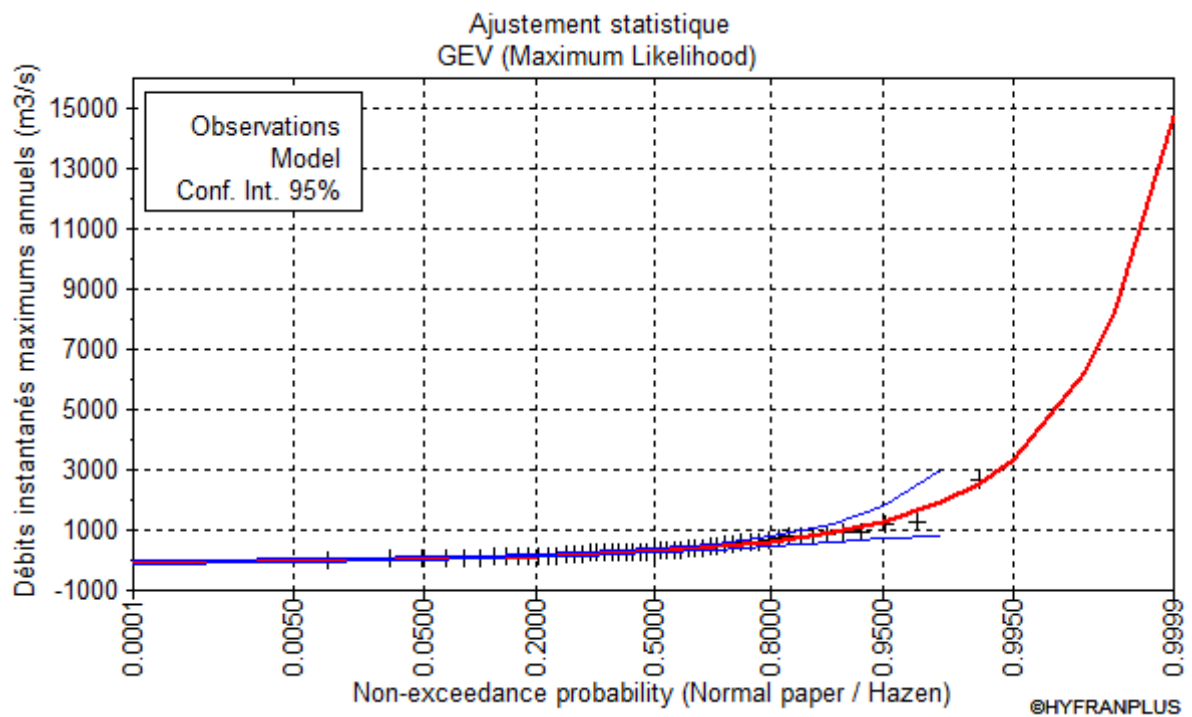


Figure 16 : Ajustement graphiques des Qimax selon la loi GEV.

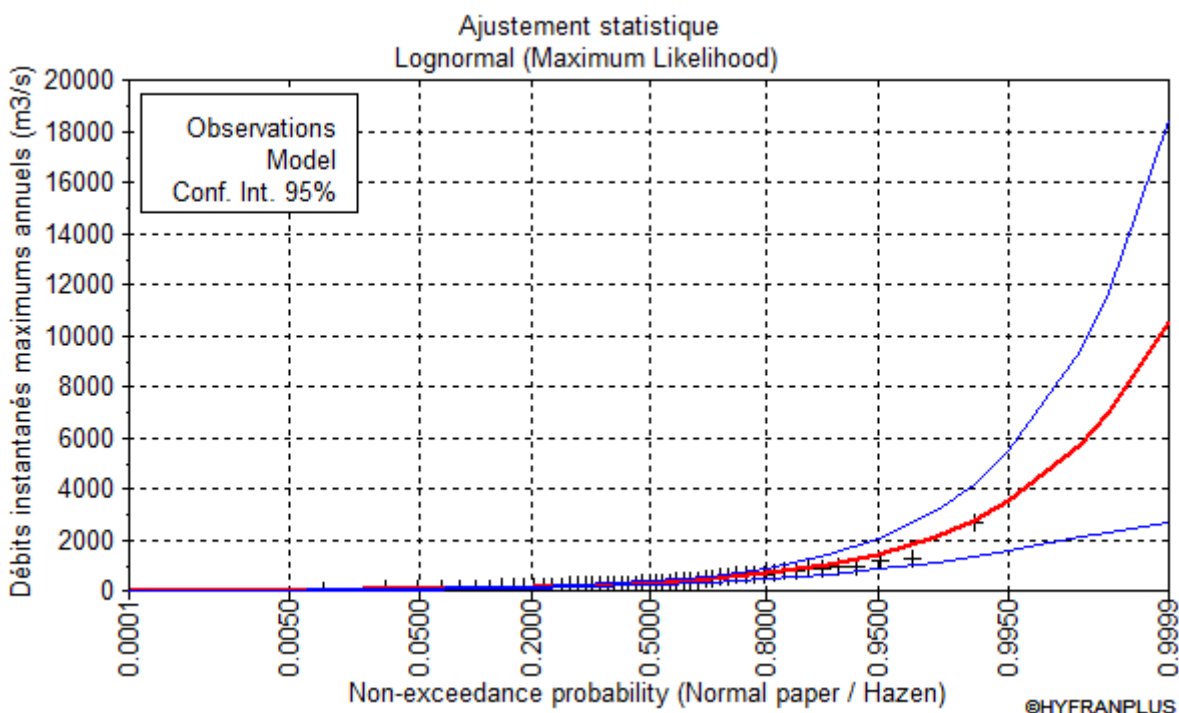


Figure 17 : Ajustement graphiques des Qimax selon la loi Lognormal.

Ces figures montrent clairement et visuellement que les lois GEV et Lognormal sont les meilleurs ajustements. En raison de la superposition de la variable débit instantané maximum sur la courbe.

Pour choisir la loi adéquate, il faut comparer le degré d’ajustement des trois lois à travers les paramètres BIC et AIC qui sont des critères statistiques. Le meilleur ajustement correspond aux plus faibles BIC et AIC.

Tableau 31 : Ajustement numérique des lois statistiques pour la période de retour de 100 ans

Modèle	Débits en m ³ /s	BIC	AIC
Lognormal	2770	728.263	724.400
GEV	2538	731.274	725.478
Gumbel	1418	738.113	734.249

Puisque BIC et AIC de la loi Lognormal sont les faibles, donc l’ajustement le plus adéquat est celui du Lognormal.

Le tableau ci-dessous (Tabl.33), comporte les débits avec leurs périodes de retour selon la loi Lognormal.

Tableau 32 : Estimation des débits selon la loi Lognormal

T (Période de retour en ans)	Débits (m3/s)
100	2770
50	2130
20	1440
10	1020
5	667
2	298

Le tableau suivant (Tabl.34) représente un récapitulatif des résultats de calcul des débits par les différentes méthodes mentionnées précédemment.

Tableau 33 : Récapitulatif des résultats des débits

	T=2 ans	T=5 ans	T=10 ans	T=20 ans	T=50 ans	T=100 ans
Méthode empirique	7234	10092	11940	13639	15731	17229
Gumbel	370	754	1009	1253	1569	1805
Log Normal	298	667	1020	1440	2130	2770

D'après la comparaison des données du tableau ci-dessus (Tabl.34), nous concluons que Log Normal est la loi la mieux adaptée pour l'estimation du débit.

On peut donc faire une transposition de se débit utilisent la formule de **Francou-Rodier** pour obtenir le débit de crue à Zaouit Sidi Hssayn.

Cette transposition se fait par les étapes suivantes :

1. Calcule du paramètre K (Coefficient de Francou-Rodier) :

$$K = 10 * \left(\frac{1 - \left(\frac{\ln(Q_t/10^6)}{\ln(S/10^8)} \right)}{\ln(S/10^8)} \right)$$

Avec :

- Q_t : Qimax issus de la station de référence TALMEST (m3/s) :
 - S : Surface du bassin versant de TALMEST (km²) :
2. Utilisation de la valeur de coefficient de Francou-Rodier K pour calculer le débit de crue dans le bassin du point étudié (Sidi Hssayn).

$$Q_{tp} = 10^6 (S_p/10^8)^{(1-0,1K)}$$

Avec :

- Qtp : Débit de pointe pour T de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans m³/s.
- Sp : Surface du bassin versant du point étudié (Sidi Hssayn) km².

-Application numérique :

Données :

Tableau 34 : Surface du BV de la station de référence et le BV du point d'étude

Surface du bassin versant de la station de référence (bassin jaugé)	18500Km ²
Surface du bassin versant du point étudié	20396 Km ²

Ce qui donne les résultats suivants :

Tableau 35 : Transposition du débit par la formule de Francou-Rodier

T (ans)	Q de station TALMEST selon la loi Log Normal en (m ³ /s)	Francou-Rodier	
		K	Q du point étudié (m ³ /s)
2	298	0,555	327
5	667	1,492	725
10	1020	1,986	1103
20	1440	2,387	1551
50	2130	2,843	2284
100	2770	3,149	2961

Après l'application de la formule Francou-Rodier on obtient les résultats du (Tab.36) ces valeurs sont les débits de pointes pour des périodes différentes tel que : 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour la zone de Zaouit Sidi Hssayn.

III. Qualité de l'eau :

La qualité de l'eau fait référence aux propriétés chimiques, physiques et biologiques des eaux (eaux de surface et eaux souterraines). Elle est fréquemment utilisée pour désigner un ensemble de critères (normes) utilisés pour évaluer la qualité de l'eau destinée à différents usages (consommation humaine, agriculture, industrie et autres).

Les données de qualité disponible sont relatives à un seul prélèvement effectué au niveau de la station Talmest (X : 133800 ; Y : 147750). L'échantillon est prélevé au niveau de l'Oued Tensift au mois de mars 2021 C'est la station la plus proche à Zaouit Sidi Hssayn (zone d'étude). Les données utilisées dans ce travail proviennent de l'ABHT.

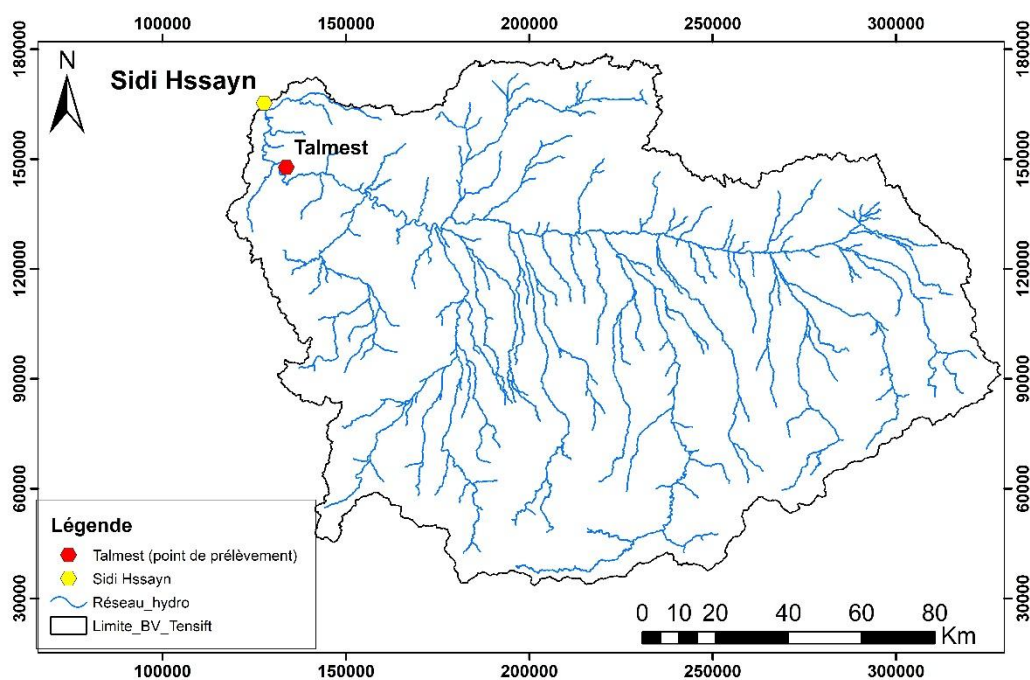


Figure 18 : Situation du point de prélèvement de l'eau étudiée.

Tableau 36 : Analyses chimique de l'eau de l'oued Tensift (mars, 2021)

Qualité des eaux superficielles / bassin de Tensift								
Stations primaires								
Point de prélèvement	N°IRE	O ₂ dissous	DBO ₅	DCO	NH ₄ ⁺	PT	CF	Qualité globale
		Mg O ₂ /l	Mg O ₂ /l	Mg O ₂ /l	Mg NH ₄ ⁺ /l	Mg PT/l	UFC/100ml	
Station de Talmest	1 89/43	9,20	1,66	9,4	0,635	0,686	6200	Mauvaise

Afin d'évaluer la qualité globale de l'eau de l'Oued Tensift au niveau de la station Talmest, les données des résultats (Tab. 37) sont confrontées à la grille de qualité (Tab. 38).

Tableau 37 : Grille de classification de la qualité des eaux de surface (Arrêté n° 1275-01 définissant la grille de qualité des eaux de surface)

Etat de qualité	O ₂ dissous (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DCO (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Phosphate (mg/l)	Coliformes Fécaux (CF/100ml)
Excellente	> 7	< 3	< 30	< 0.1	< 0.1	< 20
Bonne	5-7	3-5	30-35	0.1-0.5	0.1-0.3	20-2 000
Moyenne	3-5	5-10	35-40	0.5-2	0.3-0.5	2 000-20 000
Mauvaise	3	10-25	40-80	2-8	0.5-3	> 20 000
Très mauvaise	< 1	> 25	> 80	> 8	> 3	-

Concernant la pollution liée aux substances d'origine organique, la qualité de l'eau est excellente. La quantité d'oxygène dissous est de 9,2 mg/l. Cette quantité est largement supérieure à la norme qui est de 7mg/l. En effet, c'est une eau courante et superficielle. Cet oxygène dissous aura comme origine l'atmosphère et de l'activité photosynthétique de la phlore aquatique. La Demande Biochimique en Oxygène pendant 5 jours (DBO5) est de l'ordre de 1,66 mg/l. Cette valeur est inférieure à 3mg/l. Ainsi, cette est considérée d'excellente qualité relativement à la DBO5. La Demande Chimique en Oxygène (DCO) est de 9,4 mg/l, cette valeur également inférieure à la norme qui est de 30mg/l.

Du point de vue biologique, la qualité de l'eau est moyenne. La quantité des Coliformes Fécaux (CF) est de 6200 UFC/100ml. Cette quantité se trouve dans l'intervalle [2000-20000]. Le NH₄⁺ est de 0,635mg/l, cette valeur également situé entre 0.5-2. Il est aussi considéré de moyenne qualité.

La quantité du phosphate est d'environ 0,686 mg/l. cette valeur varie entre 0.5 -3. Cette eau est de mauvaise qualité relativement à ce phosphate. Ce phosphate peut être provient du déchet solide, des lixiviats, les eaux usées et de ruissellement des eaux d'une zone phosphaté (même s'elle est très loin).

La qualité totale de l'eau dans la zone de Telmest est mauvaise même si on a trois éléments d'état excellent car la quantité de l'élément PT ne respecte pas les normes d'eau potable. L'eau peut devient toxique et provoquer des maladies telles que l'ostéoporose.

Conclusion générale

Le bassin versant de Tensift est l'un des bassins les plus grands au Maroc. Sa Superficie est d'environ de 20396 Km². Son périmètre est de 945km. Ce bassin a une forme allongée qui est déterminée à l'aide de l'indice de compacité ($KG = 1,85$). D'après la valeur du rectangle équivalent dont la longueur est de 423km et la largeur d'environ 48km, on conclut que ce bassin versant est plus long que large. Ceci est, également confirmé par l'indice de Horton ($Kh = 0,2$).

Les altitudes et les pentes sont les principaux critères du relief. On a la dominance des altitudes entre 0m et 800m. La majorité des pentes varie de 0 à 25%. Les calculs des indices des pentes, révèlent que la majorité des reliefs du bassin versant du Tensift sont assez faibles.

Ce bassin est caractérisé par un climat régulier semi-aride avec une moyenne de précipitations de l'ordre de 247 mm de nature irrégulière (Données de l'ABHT). La nature du relief influence sur le temps de concentration qui a d'ordre de 75,5h. Cette valeur correspond à la durée nécessaire à une goutte d'eau pour atteindre l'exutoire. D'autre part le bassin versant du Tensift est composé de trois niveau de perméabilité (faible, très faible et moyenne) à cause de des différent types de sols qui jouent un rôle primordial dans l'infiltration de l'eau et l'alimentation des nappes phréatique.

L'analyse fréquentielle des débits et pluies maximums journaliers à un rôle très important dans l'estimation de risque d'apparition d'une crue donnée pour une période de retour. A cet effet, l'estimation des débits est fondée sur trois méthodes :

- Les méthodes empiriques basées sur les formules de FULLER II, Mallet-Gautier et Hazan, cette méthode donne des résultats, relativement, exagérés.
- La méthode de Gumbel, cette méthode se fait de la manière manuelle. Le débit obtenu par cette méthode pour une période de retour (T) de cent ans est d'ordre 1805m³/s.
- La méthode de l'ajustement statistique. Dans ce cas, les calculs sont réalisés l'aide du logiciel HyfranPlus qui est basé sur trois lois (GEV, Gumbel et Lognormal). Les débits correspondent à un période de retour de cent ans (obtenus à l'aide de

Etude Hydrologique

ces trois lois trois loi sont : 2538 m³/s (GEV), 1418 m³/s (Gumbel) et 2770 m³/s (Lognormal).

D'après la comparaison de ces trois lois et la dernière méthode, on trouve que Lognormal est la loi la mieux adaptée pour l'estimation du débit de crues.

En ce qui concerne, la qualité de l'eau dans la région de Sidi Hssayn, en dépit de la rareté des donnée analytique, l'eau pourrait être considérée d'excellente qualité relativement à la pollution liée aux substances d'origine organique (oxygène dissous, la DBO5 et la DCO). Du point de vue biologique, la qualité de l'eau est moyenne.

Cependant, la qualité globale de l'eau est considérée comme du fait de la présence en quantité notable des phosphates (La concentration qui dépasse largement, les normes de potabilité).

Références bibliographiques

Amroussi Y. et Gbouri I., (2018) - Etude hydrologique Du Bassin versant De Chichaoua, Rapport de PFE, Institut des techniciens Spécialisés des Travaux Public, Marrakech, 51p..

El Alaoui El Fels A., (2012) - Application de l'algorithme génétique à la modélisation des crues, rapport de PFE Master, Université Cadi Ayyad, FSTM, 69p..

Haida S., Snoussi M., Latouche C. et Probst J., (1996) - Géodynamique actuelle du bassin versant de l'Oued Tensift (Maroc) : érosion mécanique et bilan des transports solides fluviaux, Science Géologique, bulletins et mémoires, pp : 7-23.

Saidi M., Bouloumou Y., Ed-Daoudi S. et Aresmouk M., (2013) – Les crues de l'ouad Issil en amont de Marrakech (Maroc), un risque naturel récurrent, European Scientific Journal, Vol.9, pp : 189-208.

Saraane A., Ben Yahya R., (2018) - Etude hydrologique du bassin versant du Tensift et recherche des solutions pour réduire les effets néfastes des crues extrêmes. Marrakech, (Maroc), Rapport de PFE LST EE, Université Cadi Ayyad, FSTM, 48p.

Références webographies

1 : <https://ledesk.ma/encontinu/ourika-est-passe-a-cote-dune-catastrophe-naturelle/>

2 : <https://www.lmi-trema.ma/contexte/le-bassin-versant-du-tensift/>

3 : <https://fr.climate-data.org/afrique/maroc/marrakech/marrakech-4746/>

4 : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tensift>

5 : <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm>

6 : <https://sites.google.com/site/hyfranguide/>

7 : <https://f2school.com/wp-content/uploads/2020/04/Bassin-versant-Cours-03.pdf>

8 : http://hydrologie2.org/Hydrotheque/Hydrologie_Generale/02_bassinversant/Exercice_HG0202/HG0202_corrige.pdf

9 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Strahler

Annexes

Tableau 38 : liste des débits maximums instantanés, Probabilité et période du retour :

Rang	Débit max instantané	Fréquence	FND	Période du retour (T)
1	2640,000	0,010	0,990	102
2	1275,000	0,029	0,971	34
3	1170,832	0,049	0,951	20,4
4	963,448	0,069	0,931	14,571
5	914,449	0,088	0,912	11,333
6	840,000	0,108	0,892	9,273
7	830,000	0,127	0,873	7,846
8	801,000	0,147	0,853	6,8
9	800,714	0,167	0,833	6
10	729,000	0,186	0,814	5,368
11	642,775	0,206	0,794	4,857
12	633,000	0,225	0,775	4,435
13	608,000	0,245	0,755	4,08
14	593,660	0,265	0,735	3,778
15	564,424	0,284	0,716	3,517
16	530,000	0,304	0,696	3,290
17	489,004	0,324	0,676	3,091
18	447,970	0,343	0,657	2,914
19	409,000	0,363	0,637	2,757
20	401,000	0,382	0,618	2,615
21	389,603	0,402	0,598	2,488
22	358,000	0,422	0,578	2,372
23	348,000	0,441	0,559	2,267
24	335,100	0,461	0,539	2,170
25	314,950	0,480	0,520	2,082
26	280,000	0,5	0,5	2
27	275,953	0,520	0,480	1,925
28	261,000	0,539	0,461	1,855
29	260,752	0,559	0,441	1,789
30	255,000	0,578	0,422	1,729
31	249,000	0,598	0,402	1,672
32	248,506	0,618	0,382	1,619
33	244,770	0,637	0,363	1,569
34	244,770	0,657	0,343	1,522
35	238,000	0,676	0,324	1,478
36	220,891	0,696	0,304	1,437
37	208,000	0,716	0,284	1,397
38	167,000	0,735	0,265	1,36
39	165,139	0,755	0,245	1,325
40	161,692	0,775	0,225	1,291
41	155,000	0,794	0,206	1,259
42	151,000	0,814	0,186	1,229
43	145,000	0,833	0,167	1,2
44	141,000	0,853	0,147	1,172
45	103,672	0,873	0,127	1,146
46	83,600	0,892	0,108	1,121
47	72,800	0,912	0,088	1,097
48	68,000	0,931	0,069	1,074
49	46,000	0,951	0,049	1,052
50	45,900	0,971	0,029	1,030
51	16,820	0,990	0,010	1,010

