

École Hassania des Travaux Publics - Département Mathématique

Informatique & Géomatique MIG

Sciences de l'Information Géographique SIG

Rapport de Mini-Projet

Analyse de terrain



Réalisé par :

BOUZAFOR Mortada
OUABED Ali

Encadré par :

Pr. Abdelhamid FADIL

Sommaire :

1	Partie 1 : Prétraitement et préparation des données	4
1.1	Localiser le bassin à l'aide du fond de carte et télécharger les données.....	4
1.2	Projeter les rasters vers le système de coordonnées Lambert Nord Maroc (zone1).....	4
2	Partie 2 : Répondre aux exigences du mini-projet	6
2.1	Localisation du point exutoire du Bassin versant BOUREGRAG le plus proche au barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah.....	6
2.2	Délimiter le bassin versant (BV) drainé par le point exutoire (Barrage)	11
2.3	Calculer la superficie et le périmètre du BV	12
2.4	Calculer l'indice de compacité de Gravelius (KG) du BV en déduire la forme du BV	13
2.5	Déterminer l'altitude minimale et maximale du BV.....	14
2.6	Calculer l'altitude moyenne du BV	14
2.7	La courbe hypsométrique du Bassin versant	15
2.8	L'altitude médiane et la dénivelée utile du Bassin versant.....	17
2.9	Elaborer la carte des pentes du BV et commenter la.....	18
2.10	Déterminer la pente moyenne du BV.....	19
2.11	Donner le seuil de drainage en Km ² en considérant ce seuil égale à 1% de la superficie du bassin versant.....	20
2.12	Générer le réseau de drainage du BV (réseau hydrographique théorique) en considérant le seuil de drainage défini dans la question précédente	20
2.13	Calculer la longueur totale du réseau de drainage généré	24
2.14	Calculer l'ordre du réseau de drainage généré selon la méthode Strahler	24
2.15	Calculer le rapport de confluence du réseau de drainage	26
2.16	Déterminer la longueur du cours d'eau principal	26
2.17	Déterminer la pente moyenne du cours d'eau principal	27
2.18	Tracer le profil en long du cours d'eau principal.....	28
2.19	Calculer le temps de concentration du BV selon les différentes méthodes empiriques	30
2.20	Elaboration de la carte du bassin versant	31

Introduction

Ce travail est fait dans le cadre du mini-projet sous la partie « Analyse du terrain » inscrit dans l'élément de module Analyse spatiale.

L'eau, ressource naturelle vitale, est au cœur des fonctions écologiques, économiques et sociales essentielles sur notre planète. Elle est cruciale aussi bien dans les pays développés que dans les pays en développement, et la gestion de cette ressource représente un des défis majeurs de ce début de troisième millénaire.

Face à cette réalité, il devient impératif de développer et d'appliquer des méthodes de gestion efficaces pour réduire les risques d'inondation. Notre projet se concentre sur l'analyse hydrologique du bassin versant BOUREGREG en amont du barrage SIDI Mohamed BEN ABDELLAH. Nous avons utilisé un modèle numérique du terrain pour délimiter ce bassin versant et ainsi pour calculer ses caractéristiques, détaillées dans les sections suivantes du document.

1 Partie 1 : Prétraitement et préparation des données

1.1 Localiser le bassin à l'aide du fond de carte et télécharger les données

- Allez sur EarthExplorer, Localiser le bassin à l'aide du fond de carte, délimiter la zone pour avoir suffisamment de surface autour du bassin

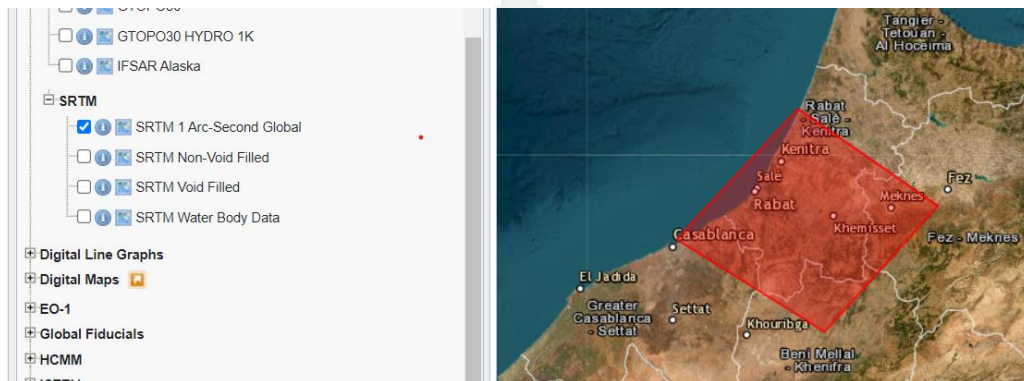


Figure 1: Localisation de bassin

- Choisir le type des rasters : SRTM-1, et télécharger les images entourant les bassin (on a pris 5), format ".tif"

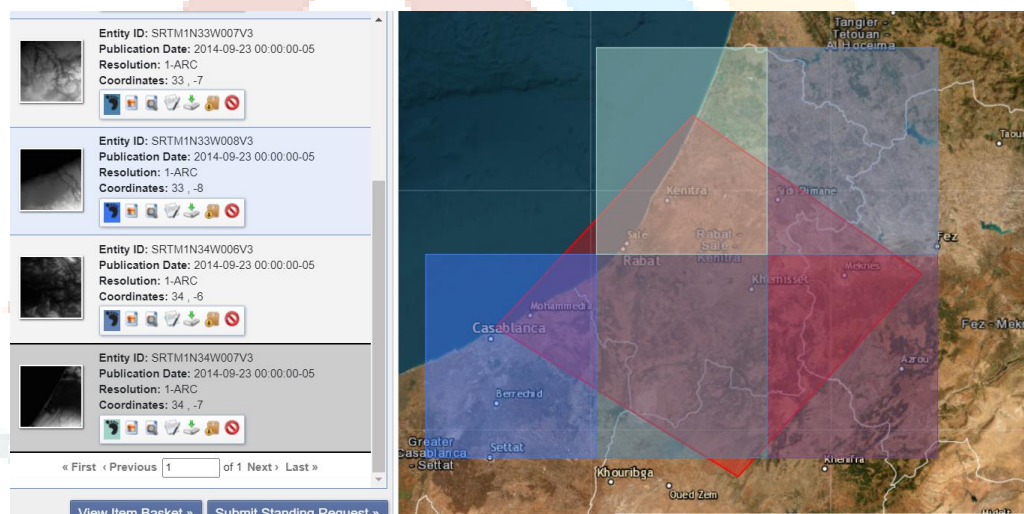


Figure 2: Téléchargement des MNT du BV sur EarthExplorer

Source : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

1.2 Projeter les rasters vers le système de coordonnées Lambert Nord Maroc (zone1)

Le MNT récupéré depuis internet est défini dans le système de coordonnées WGS1984, alors on doit les projeter vers le système de coordonnées Lambert Nord Maroc (zone1) en indiquant le nombre de bande (1) et la profondeur du pixel qui est codé sur 16 bits signé pour les rasters source.

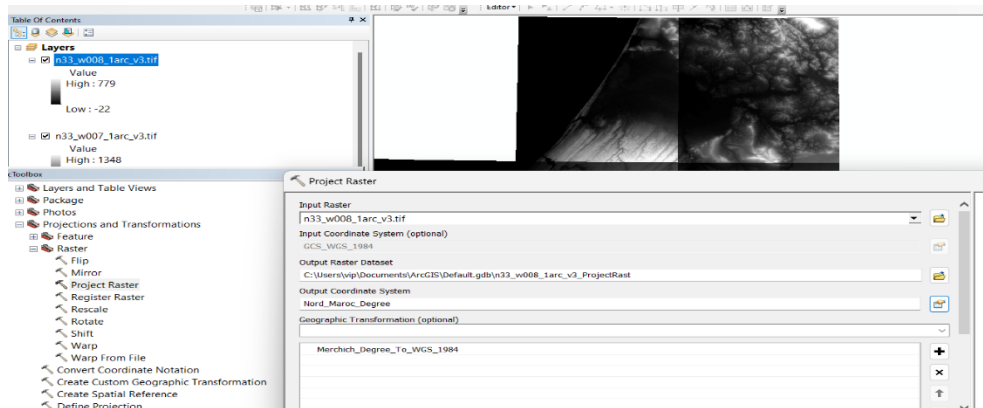


Figure 3: L'outil « Project Raster »

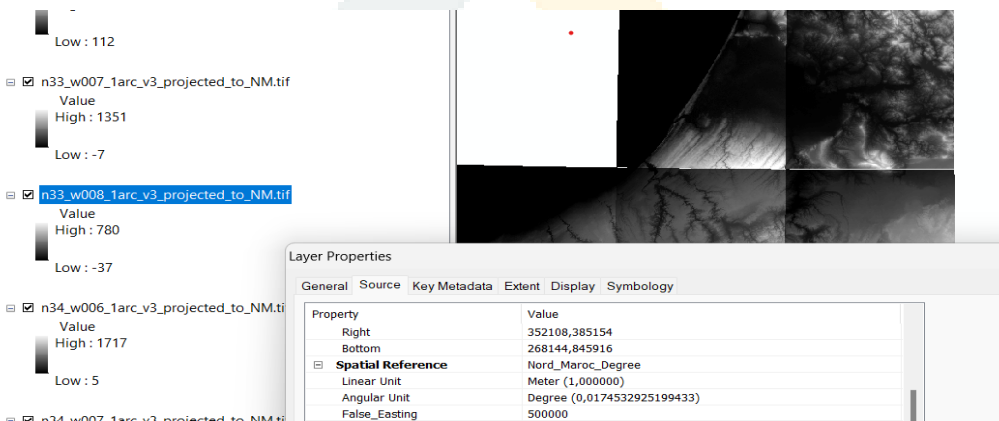


Figure 4: Output de l'outil « Project Raster »

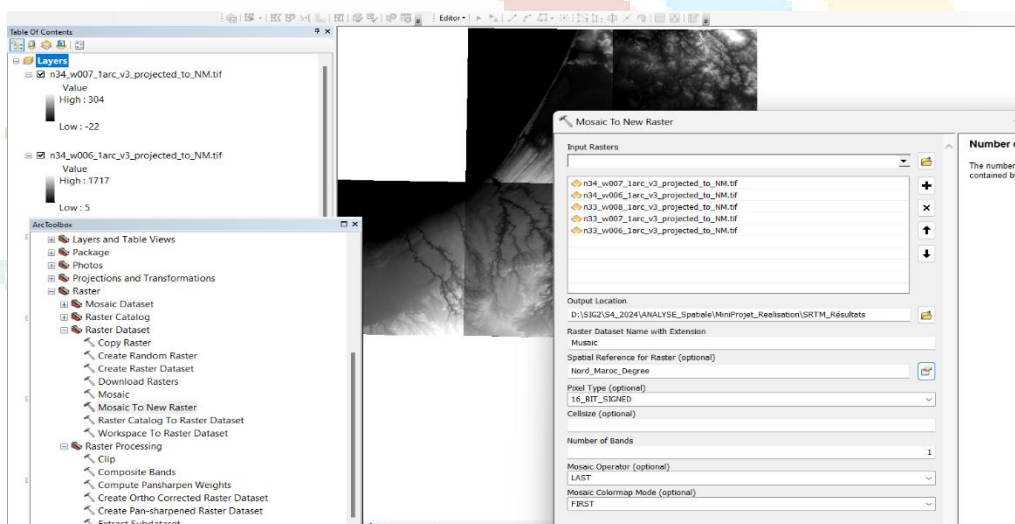


Figure 5: L'outil "mosaic to new raster"

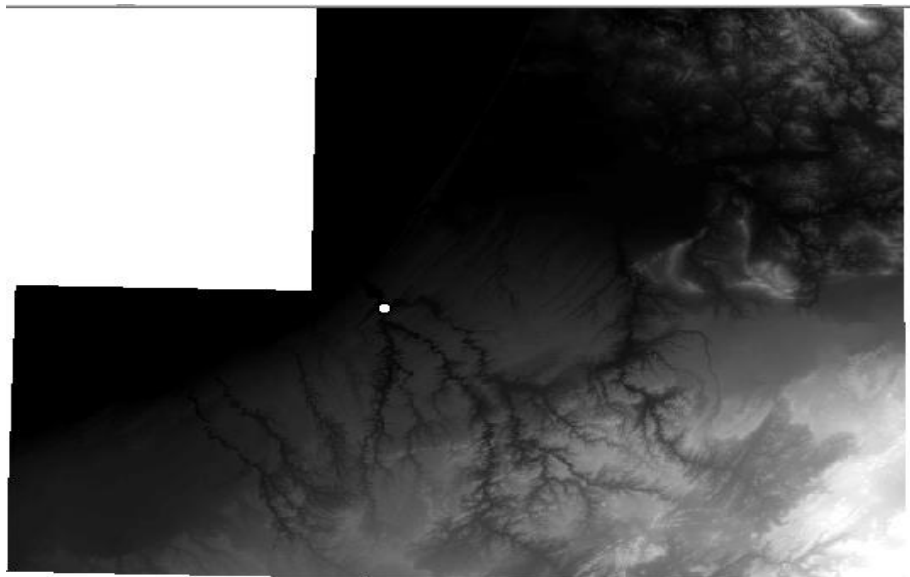


Figure 6 : Output de l'outil "mosaic to new raster"

2 Partie 2 : Répondre aux exigences du mini-projet

2.1 Localisation du point exutoire du Bassin versant BOUREGRAG le plus proche au barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah

Pour trouver la bonne localisation de l'exutoire du BV, on va suivre les étapes suivantes :

a. Ajout d'un fond de carte sur ArcMap, pour visualiser l'exutoire du BV

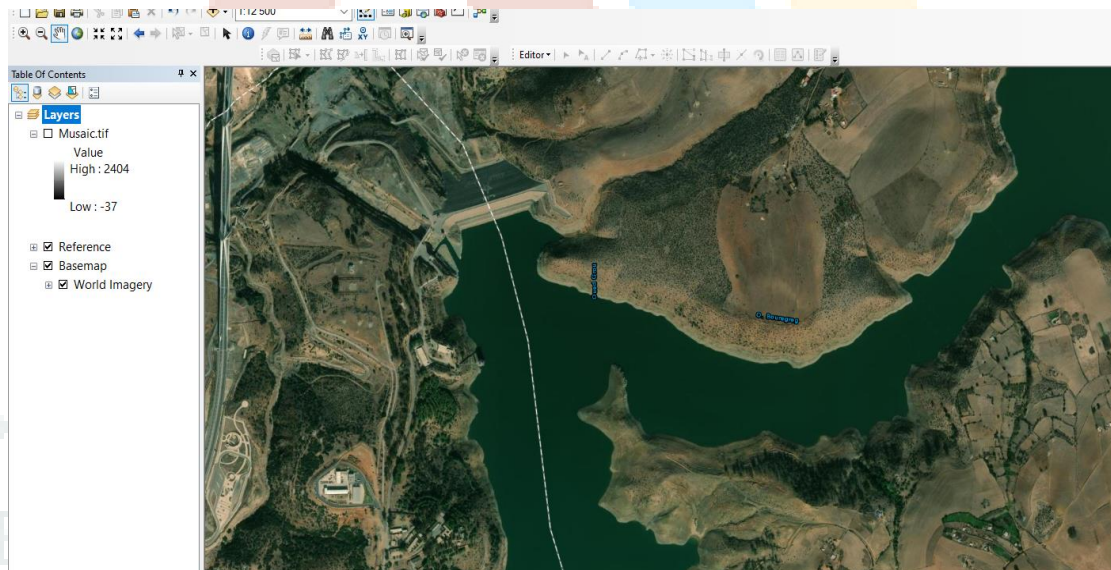


Figure 7: fond de carte d'ESRI sur ArcMap

b. Localiser l'exutoire sur le fond de carte et le stocker dans un fichier de forme

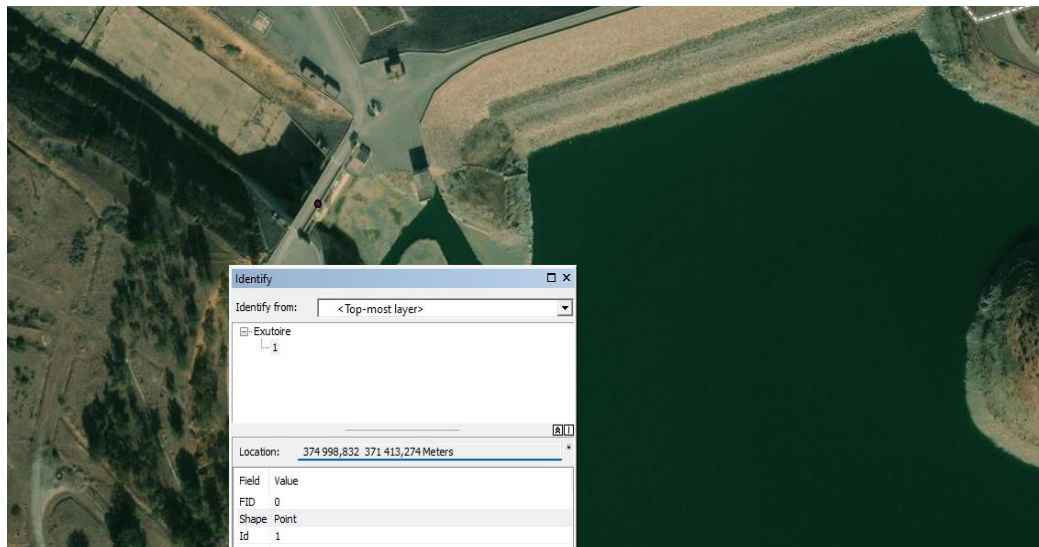


Figure 8: Premier positionnement du point exutoire sur le basemap

c. Dans cette étape on utilise les outils du toolbox "Hydrology" pour déterminer précisément le point exutoire

Étape 1: Après vérification du mosaïc, on va appliquer la fonction "Fill", pour éliminer les erreurs et les élévations soudaines que contient le raster et qui vont générer des problèmes pour la direction du flux, Les cuvettes doivent être remplies pour délimiter correctement les bassins et les cours d'eau.

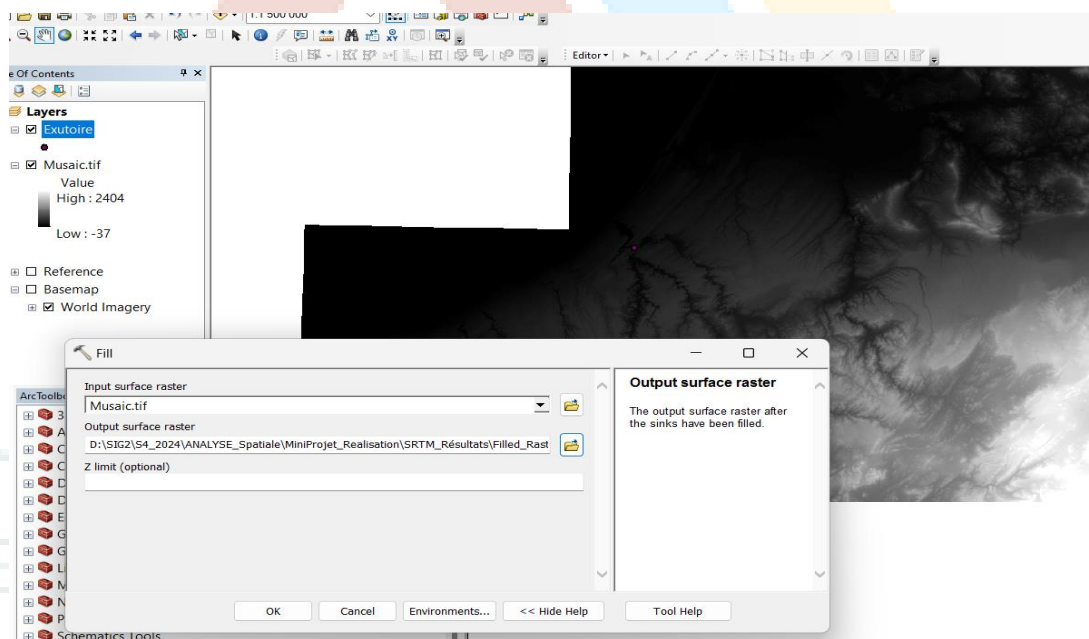


Figure 9: L'outil « Fill »

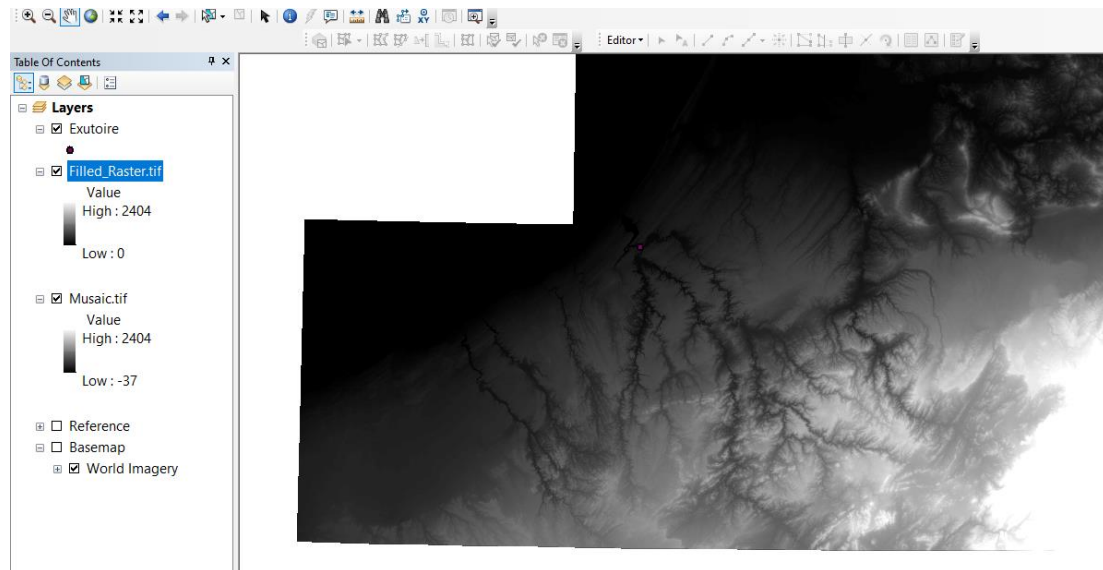


Figure 10: Output de l'outil « Fill »

Étape 2: on continue le traitement sur la couche corrigée ; “Filled_raster.tif”, On applique l'outil “flow_direction”, L'outil de direction de flux prend une surface en entrée et crée un raster de direction de flux à partir de chaque pixel vers son voisin de plus grande pente descendante.

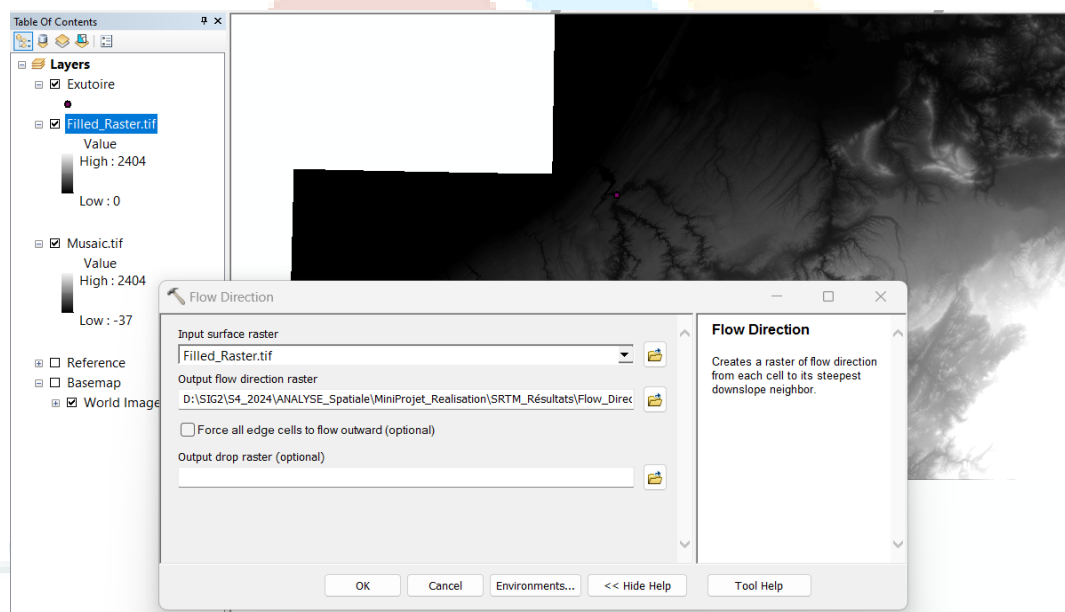


Figure 11: L'outil “Flow Direction”

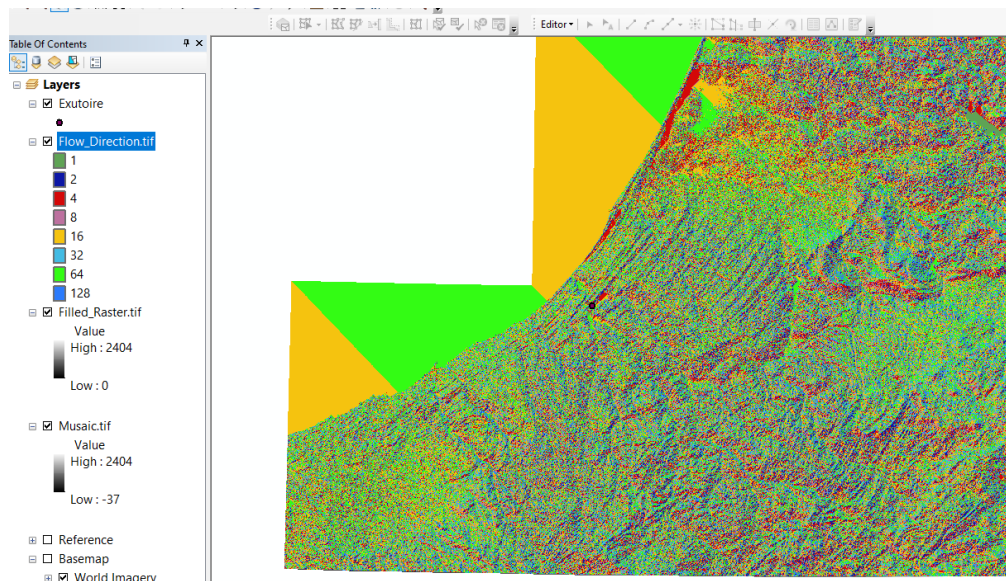


figure12: Output de l'outil "Flow Direction"

Étape 3: Pour bien ajuster la position choisie initialement, on génère la couche d'accumulation de flux.

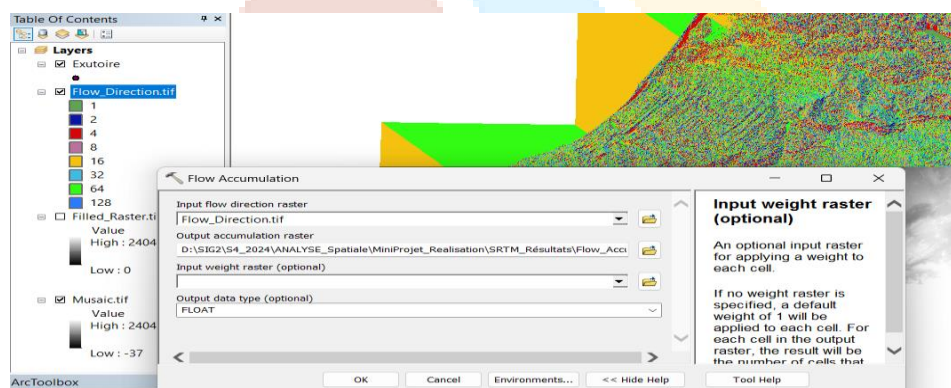


Figure13: L'outil "Flow Accumulation"

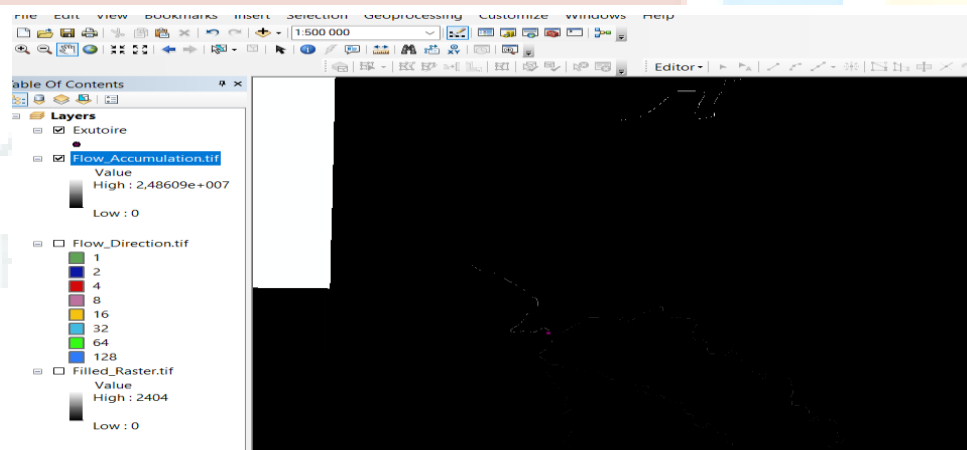


Figure14: Output de l'outil "Flow Accumulation"

Étape 4: On déplace le point exutoire choisie initialement et qui est stocké dans le fichier de forme, vers le plus proche pixel blanc du flow accumulation puisque la bonne position de l'exutoire est sur le pixel le plus proche de plus grande valeur.



Figure15: déplacer le point exutoire

Étape 5: l'utilisation de l'outil "con" pour bien visualiser les lignes de drainage.

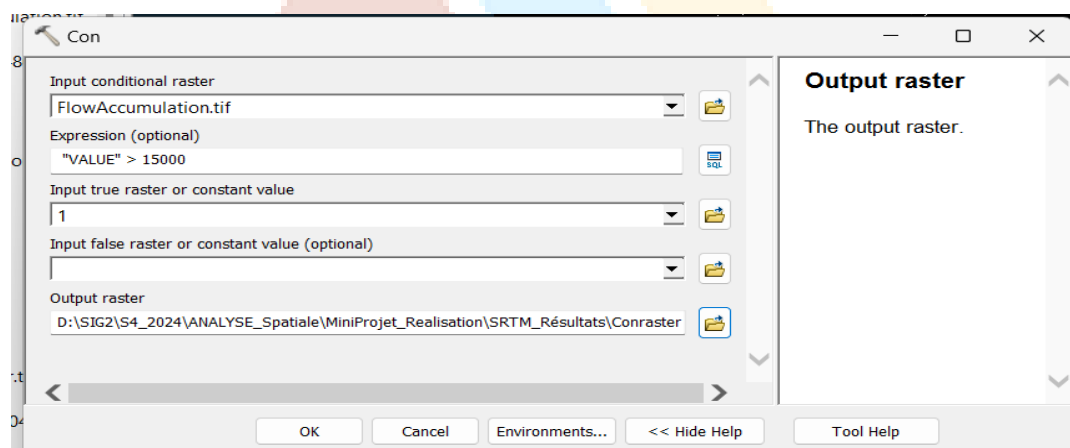


Figure 16: L'outil «Con »

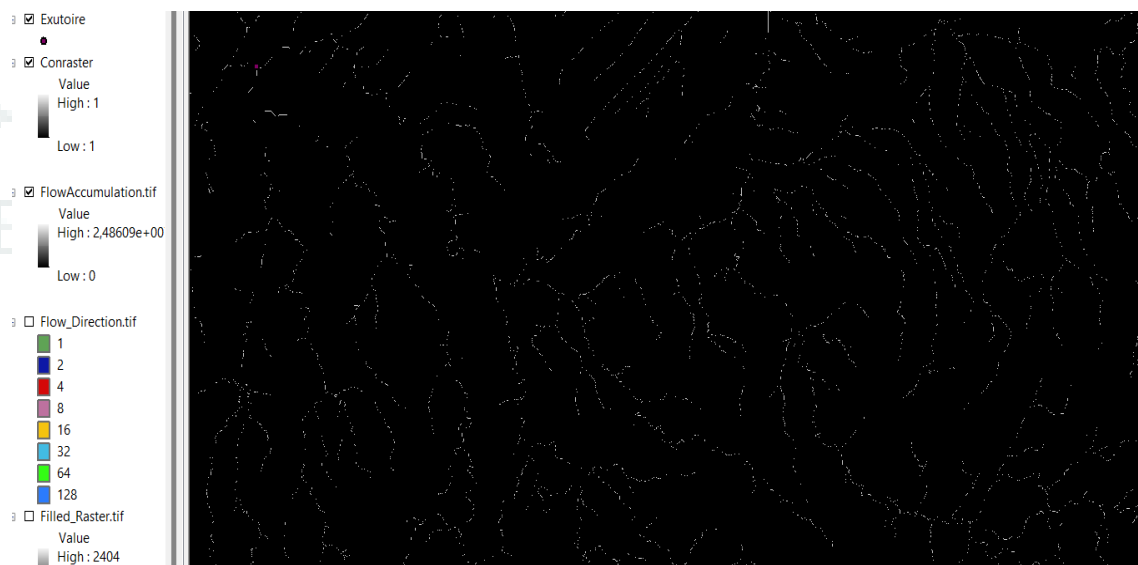


Figure 17: Output de l'outil « Con »

Étape 6: l'utilisation de stream to feature, pour générer le couches polylines des cours d'eau éventuelles :

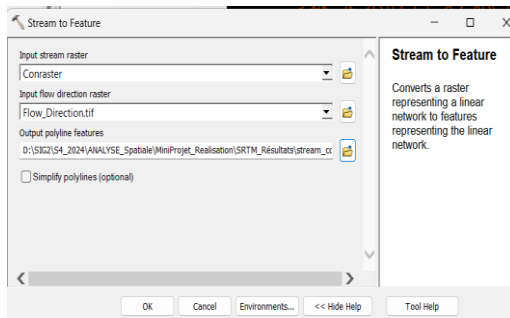


Figure18: L'outil «Stream to Feature»

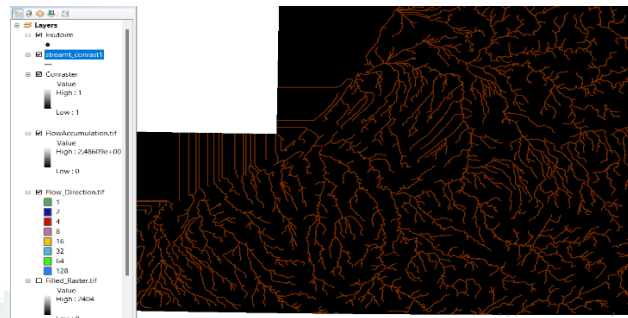


Figure19: Output de l'outil «Stream to Feature»

On corrige la position du point exutoire à l'intérieur du pixel de tel sorte qu'il passe sur le résultat de Stream to feature.

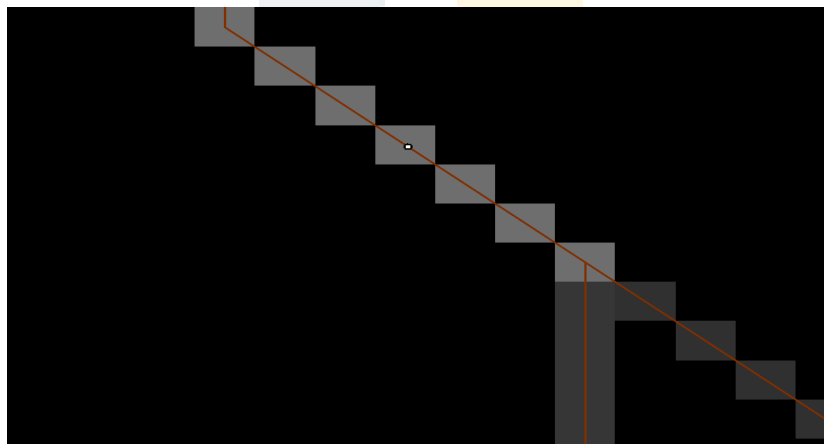
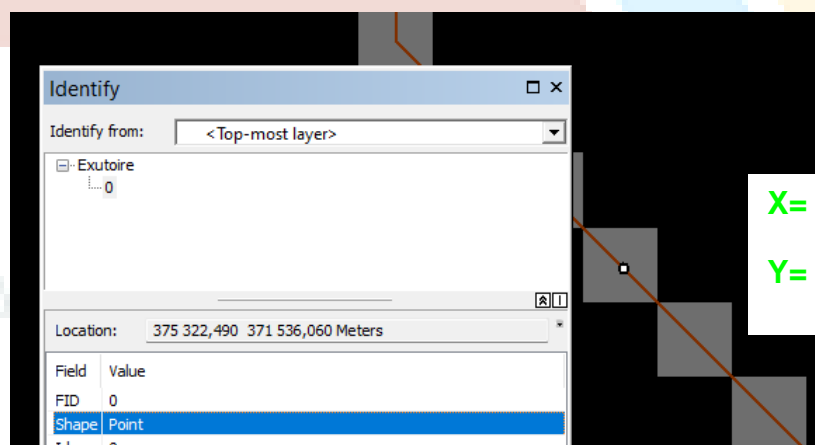


Figure 20: Correction de la position du point exutoire

Finalement, on détermine les coordonnées de notre point exutoire



X= 375 322, 490 m

Y= 371 536, 060 m

Figure 21: les coordonnées du point exutoire

2.2 Délimiter le bassin versant (BV) drainé par le point exutoire (Barrage)

Après avoir localisé le point exutoire, on utilise l'outil de génération du bassin Watershed à partir de la direction de flux et le point exutoire

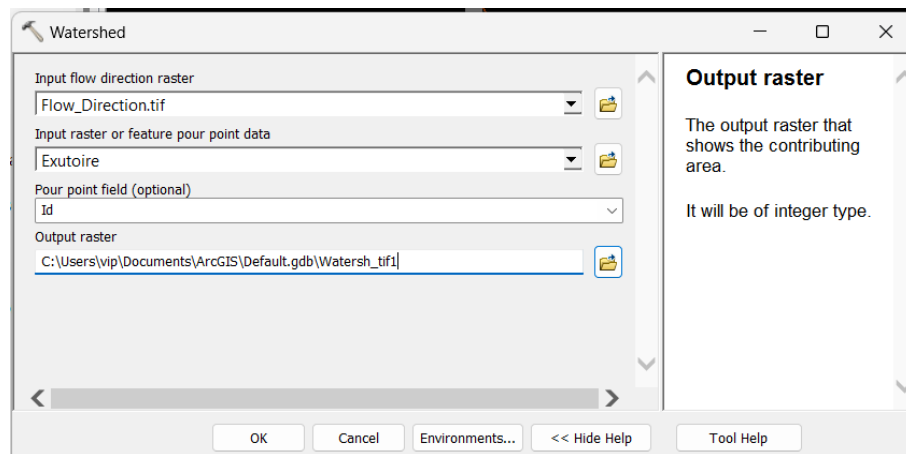


Figure 22: L'outil "Watershed"

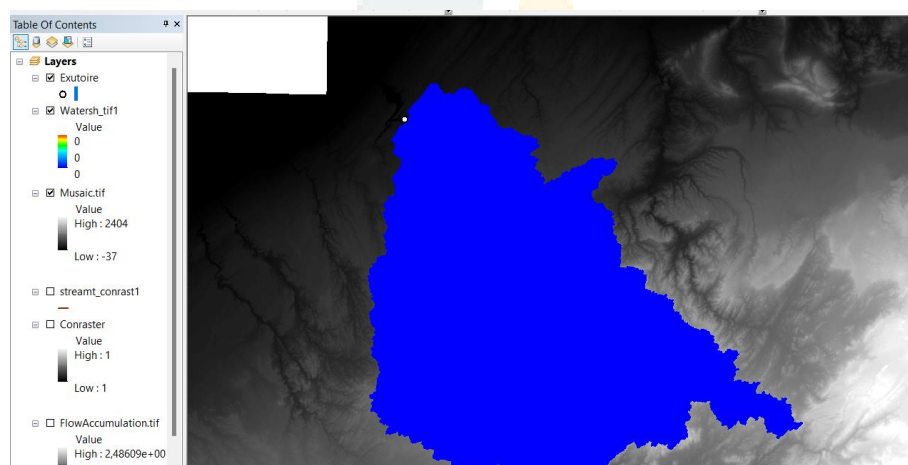


Figure 23 : Output de l'outil "Watershed"

2.3 Calcule de la superficie et le périmètre du BV

Pour calculer la surface et le périmètre du BV, on utilise le calculateur de la géométrie, mais avant on convertit le résultat vers une couche vecteur en utilisant : "Raster to polygon" puis on calcul les deux paramètres surface et périmètre.

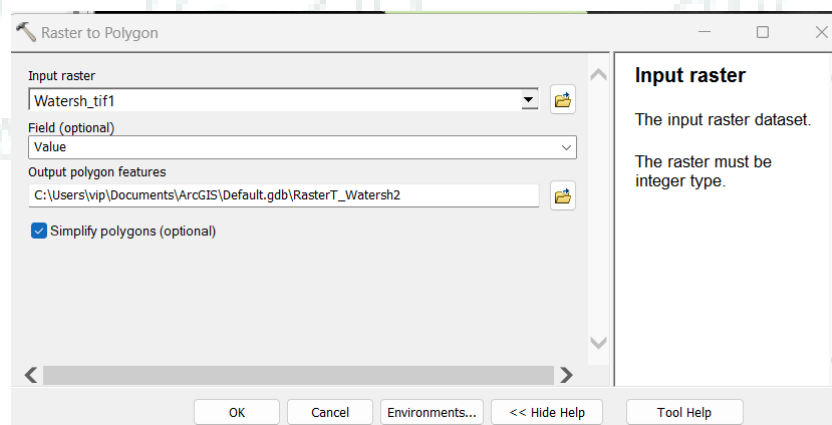


Figure 24: L'outil « Raster to Polygon »

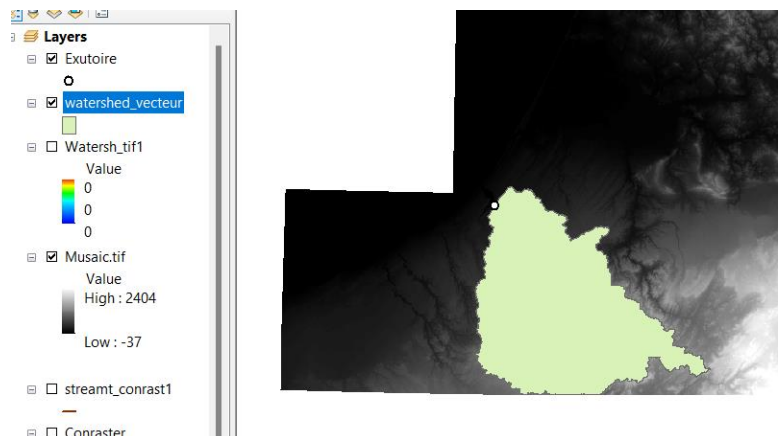


Figure25 : Output de l'outil « Raster to Polygon »

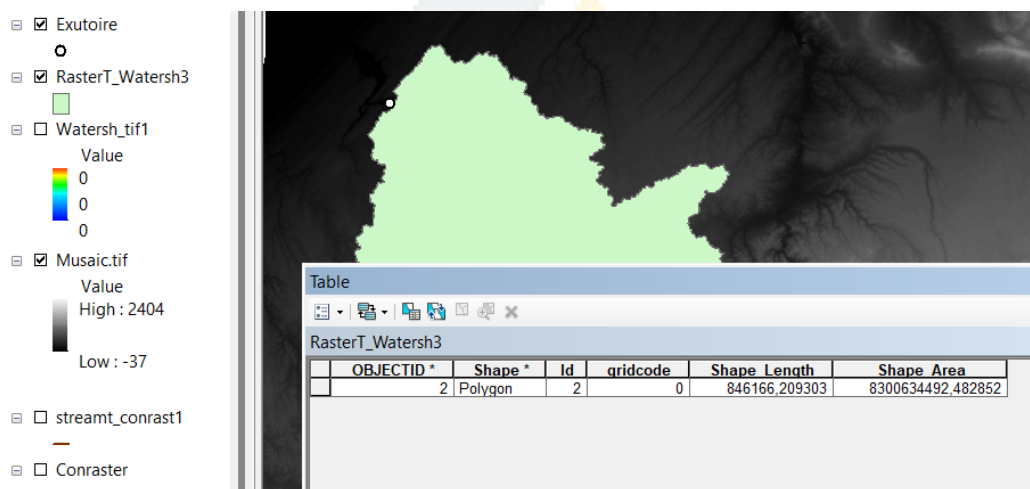


Figure26 : Création et calcul des champs "Surface et Périmètre "

- **Surface : 8300634492.483 m² = 8300.634 km²**
- **Périmètre : 846166.209 m = 846.166 km**

2.4 Calculer l'indice de compacité de Gravelius (KG) du BV en déduire la forme du BV

Indice de compacité de Gravelius (1914) KG, défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Où :

- KG est l'indice de compacité de Gravelius
- A : surface du bassin versant [km²]
- P : périmètre du bassin [km]

Résultat :

L'indice de compacité de Gravelius du BV BOUREGRAG en Amont du barrage SMBA est : **2.600**

- **Conclusion : le bassin est de forme allongée.**

2.5 Déterminer l'altitude minimale et maximale du BV

On utilise l'outil " Extract By Mask " pour avoir le MNT de la zone du BV seulement

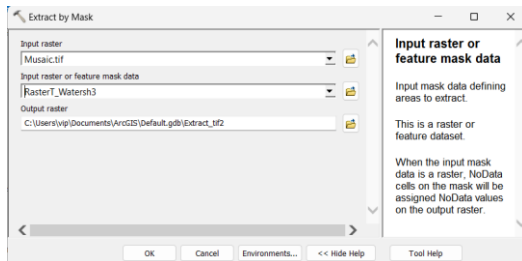


Figure 27: L'outil " Extract By Mask "

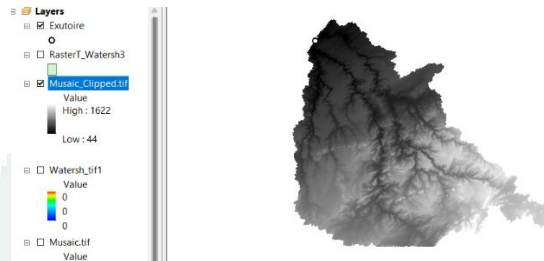


Figure 28: Output de l'outil " Extract By Mask "

- L'Altitude maximale du bassin versant du barrage Sidi Mohamed ben Abdellah est : 1622 m
- L'Altitude Minimale du bassin versant du barrage Sidi Mohamed ben Abdellah est : 44 m

2.6 Calculer l'altitude moyenne du BV

L'altitude moyenne du bassin versant est définie par :

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

Pour calculer l'altitude moyenne, on suit les étapes suivantes :

Etape 1 : Génération d'un TIN à partir du MNT en utilisant l'outil : "Raster To TIN " de 3D Analyst

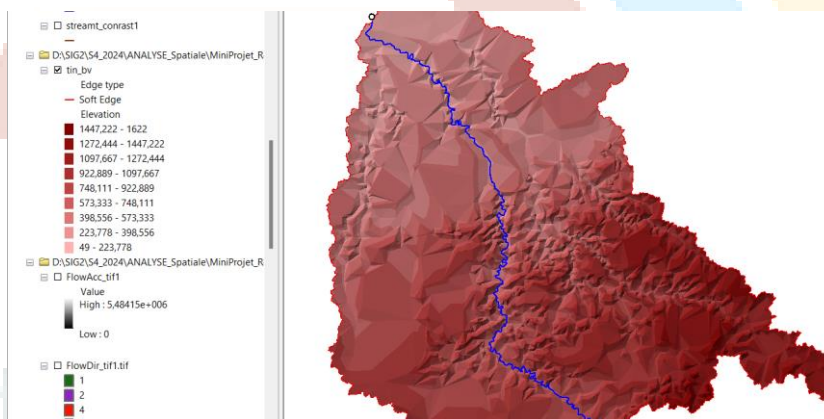


Figure 29: Output de l'outil "Raster To TIN "

Etape 2 : Conversion du TIN vers une table de points avec altitude Z en utilisant "Interpolate Shape" de 3D Analyst

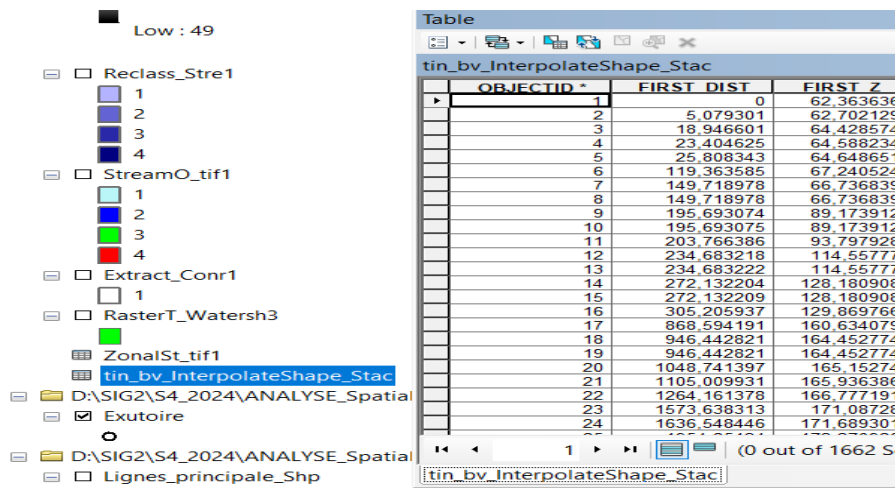


Figure 30 : Output de l'outil "Interpolate Shape" de 3D Analyst

Etape 3 : Utilisation de l'outil "statistic" sur le champ "FIRST_Z" des altitudes

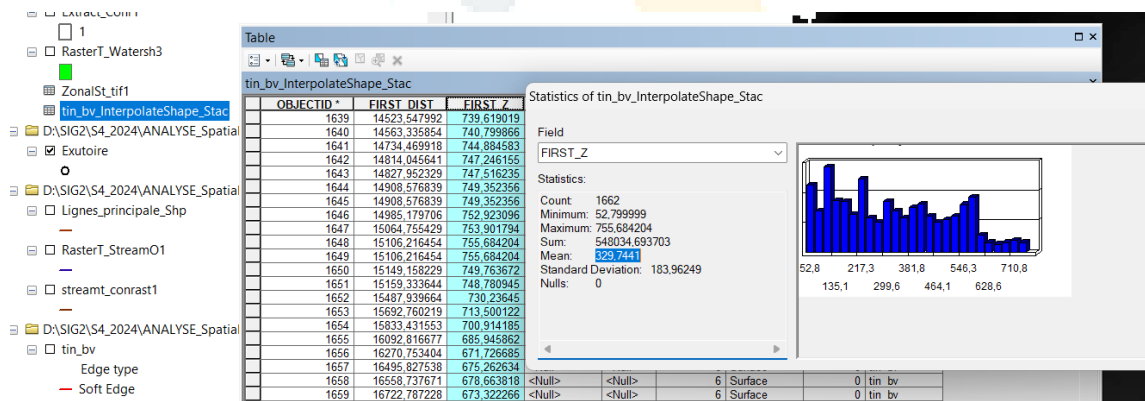


Figure 31 : Résultat de l'altitude moyenne à travers l'outil « statistic »

- **Résultat : 329.744 m**

2.7 La courbe hypsométrique du Bassin versant

La courbe hypsométrique représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude.

a. Reclassification

L'utilisation de l'outil Reclassification, afin de reclasser les altitudes du MNT du bassin versant. Nous avons effectué une classification en 10 classes selon des intervalles égaux.

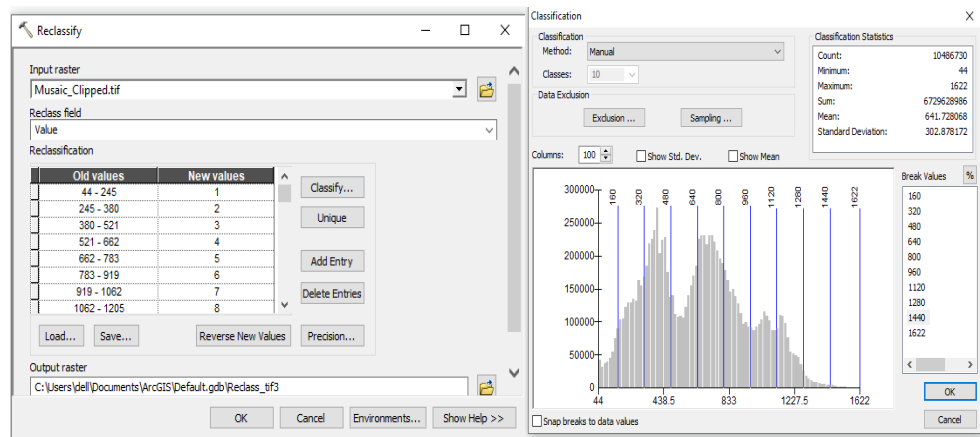


Figure 32: L'outil "Reclassify"

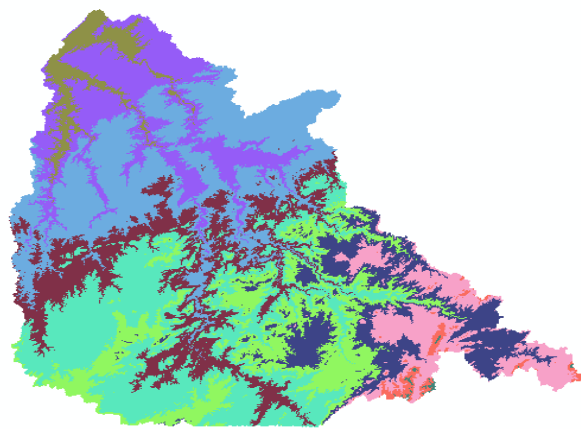


Figure 33: Output de l'outil "Reclassify"

b. Raster To Polygon

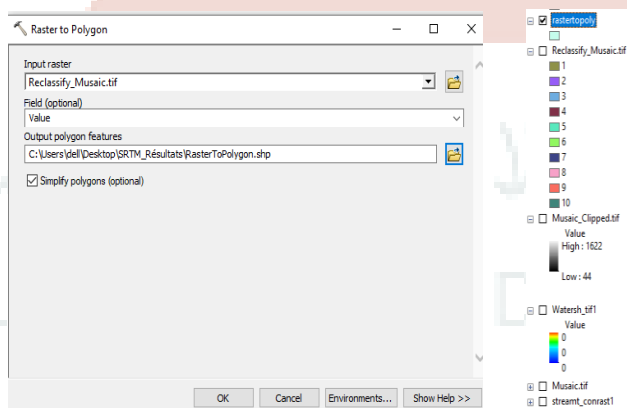


Figure 34: L'outil «Raster To Polygon»

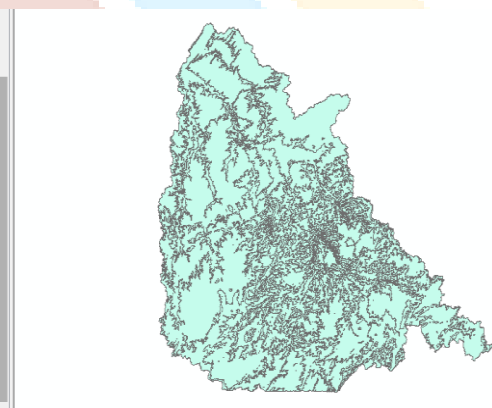


Figure 35: Output de l'outil

c. Dissolve

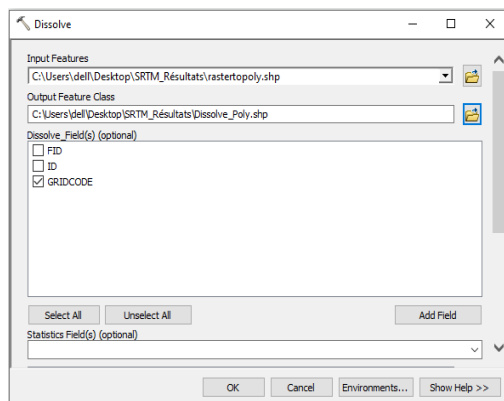


Figure 36 : "Dissolve"

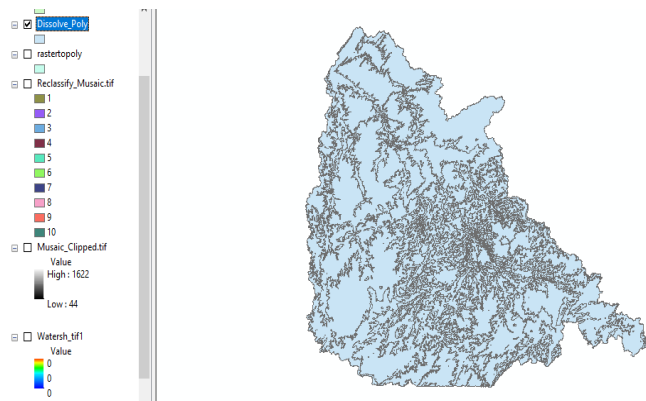


Figure 37: Output de l'outil "Dissolve"

d. Calcul des champs

À l'aide de des outils calcule géométrie et calculateur des champs, on commence par calculer la surface occupée par chaque intervalle d'altitude puis le pourcentage de surface et on déduit le cumul des surfaces.

OBJETID *	Shape *	GRIDCODE	Shape_Length	Shape_Area	Superficie	Pourcentage	Pource Accum
1	Polygon	160	905689.289188	279174021.666719	279174021.666719	3.363317	100
2	Polygon	320	2534084.36360	1039071068.18063	1039071068.180633	12.61809	96.636686
3	Polygon	480	3090151.69099	1699043387.38646	1699043387.386469	20.46903	84.118596
4	Polygon	640	3404333.83301	1068823961.66687	1068823961.666874	12.87653	63.649566
5	Polygon	800	4018221.50299	1746704811.54832	1746704811.548326	21.04322	50.773036
6	Polygon	960	3310956.38876	1040493596.61089	1040493596.610894	12.53523	29.729816
7	Polygon	1120	2144195.41327	775244431.268014	775244431.268014	9.339667	17.194586
8	Polygon	1280	1285747.97682	562744802.439798	562744802.439798	6.779603	7.854919
9	Polygon	1440	383877.528842	78193975.030746	78193975.030746	0.942033	1.075316
10	Polygon	1622	86154.882993	11063195.010801	11063195.010801	0.133283	0.133283

Figure 38: Calcul des champs

e. la courbe hypsométrique du BV sous Excel

L'axe des abscisses présente le cumul des surfaces en % et l'axe des ordonnées présente les altitudes en m.

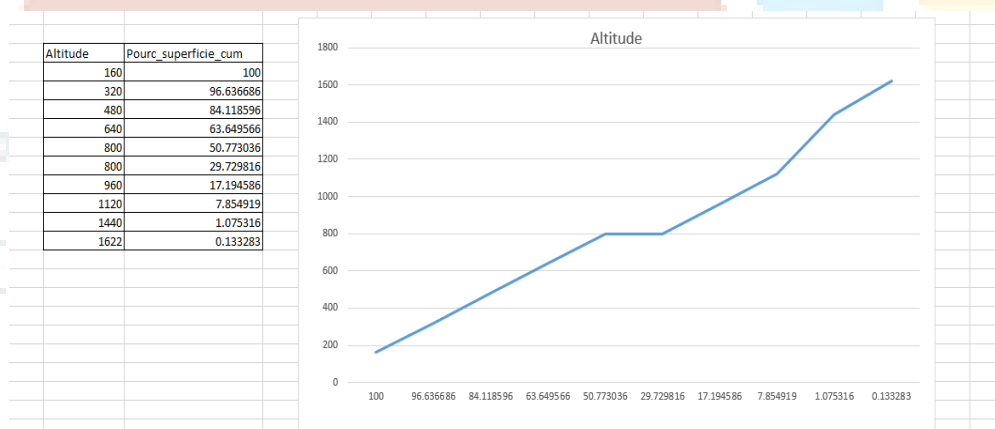


Figure 39: la courbe hypsométrique du BV

2.8 L'altitude médiane et la dénivelée utile du Bassin versant

▪ **L'altitude médiane** : L'altitude du point correspondant au point d'abscisse 50% sur la courbe hypsométrique.

L'altitude médiane de bassin versant Allal El Fassi est : 795 m

▪ **La dénivelée utile (Du)** : La dénivelée utile est l'altitude entre laquelle s'inscrit 90% de la surface du bassin. Il se calcule par la relation suivante: $D_u = H_{5\%} - H_{95\%}$

La dénivelée utile de bassin versant Allal El Fassi est : 805 m

2.9 Elaborer la carte des pentes du BV et commenter la

L'utilisation de l'outil Pente qui identifie la déclivité de chaque cellule de surface raster. Plus la valeur de la pente est faible, plus le terrain est plat ; plus la valeur de la pente est élevée, plus le terrain est pentu.

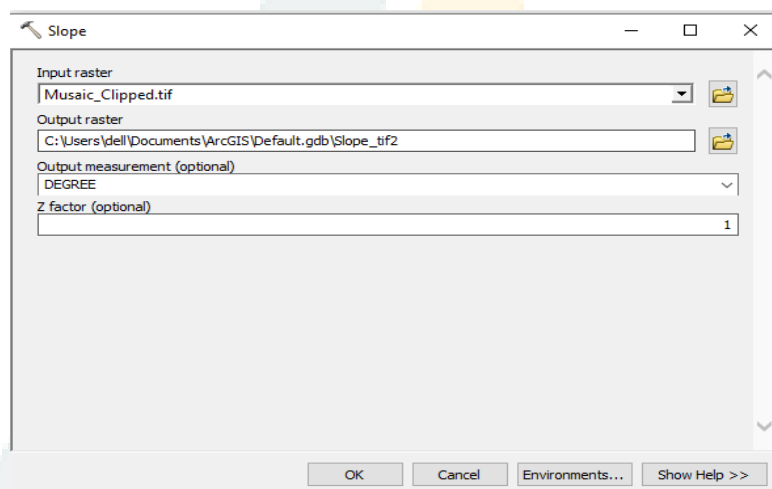


Figure 40 : L'outil "Slope"

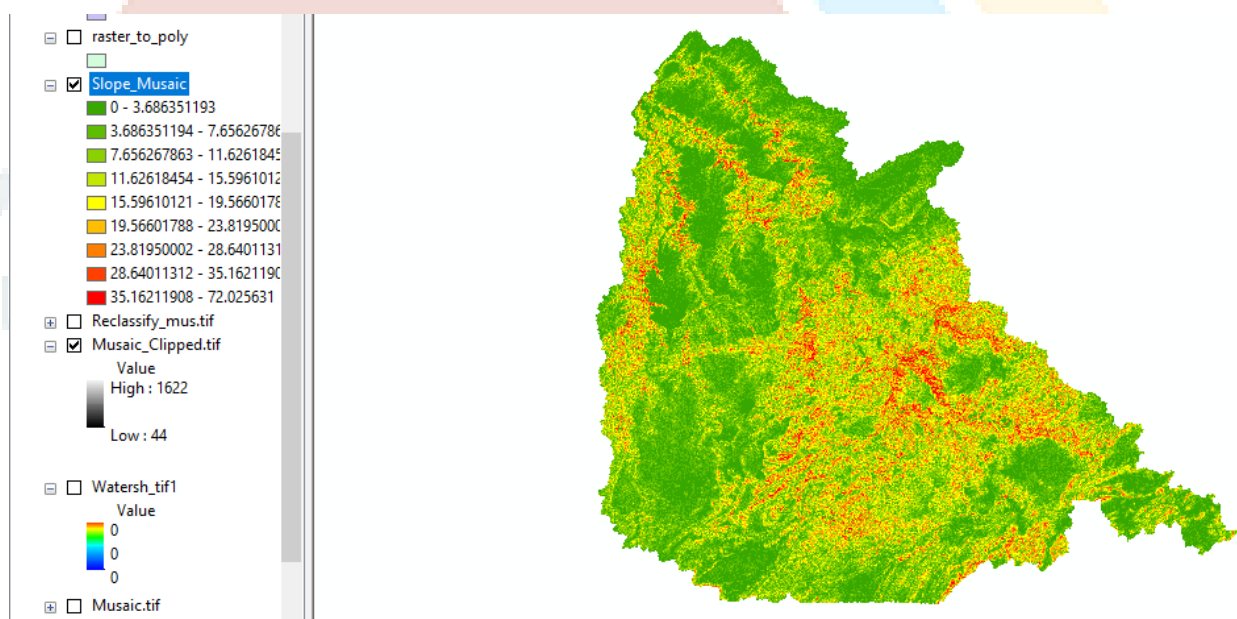


Figure 41 : Output de l'outil "Slope"

Élaboration de la carte des pentes :

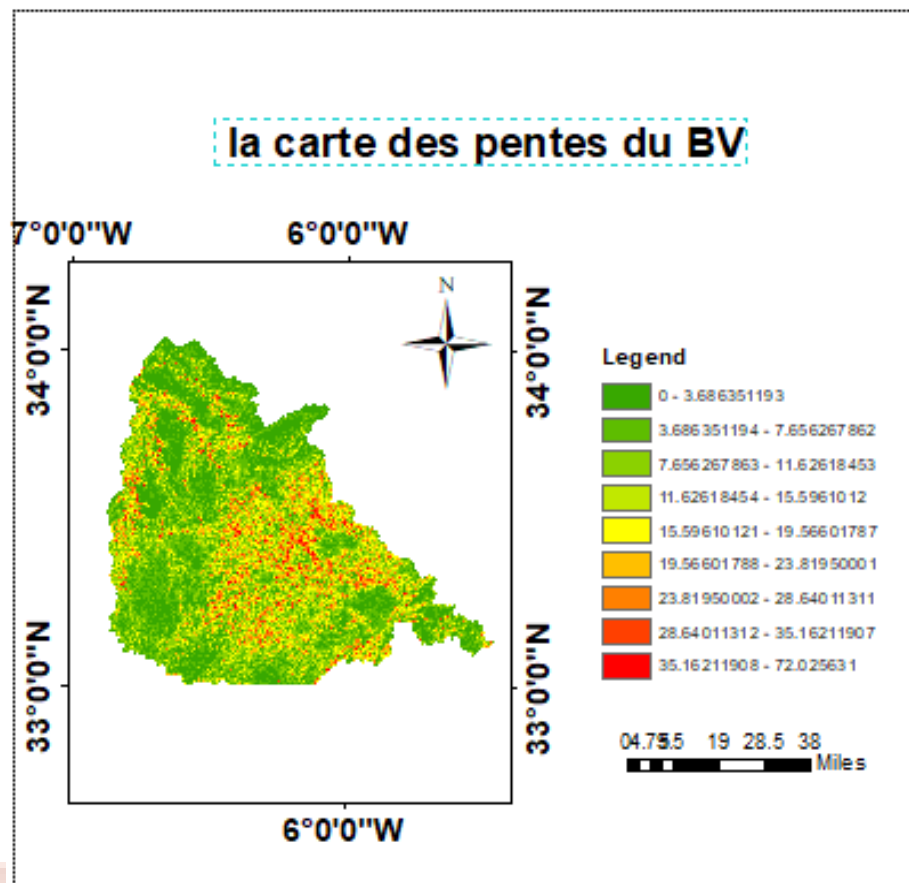


Figure 42 : La carte des pentes du BV

Conclusion : D'après le résultat de la carte des pentes, on voit que la grande partie du relief de bassin versant du barrage SIDI Mohamed BEN ABDELLAH a une pente basse, seulement quelques zones qui ont une grande pente. On conclut qu'un bassin versant ne nécessite pas toujours une grande pente, l'écoulement de l'eau peut se faire même avec une pente très faible.

2.10 Déterminer la pente moyenne du BV

A partir des statistiques de la classification des pentes, on trouve que : **la moyenne des pentes est de 10,26698 m.**

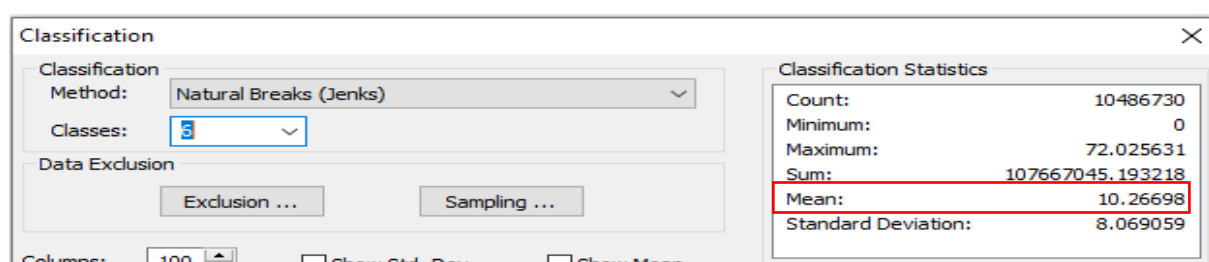


Figure 43: Des statistiques sur les pentes

2.11 Donner le seuil de drainage en Km2 en considérant ce seuil égale à 1% de la superficie du bassin versant

En considérant comme seuil de drainage 1% de la superficie du bassin versant, le seuil de drainage qu'on va prendre (en termes de superficie) est : **83006344.925 m²**.

Seuil de drainage en nombre de cellule : **104869.289**

2.12 Générer le réseau de drainage du BV (réseau hydrographique théorique) en considérant le seuil de drainage défini dans la question précédente

Pour générer le réseau de drainage de bassin versant on suit les étapes suivantes :

L'utilisation de l'outil Fill :

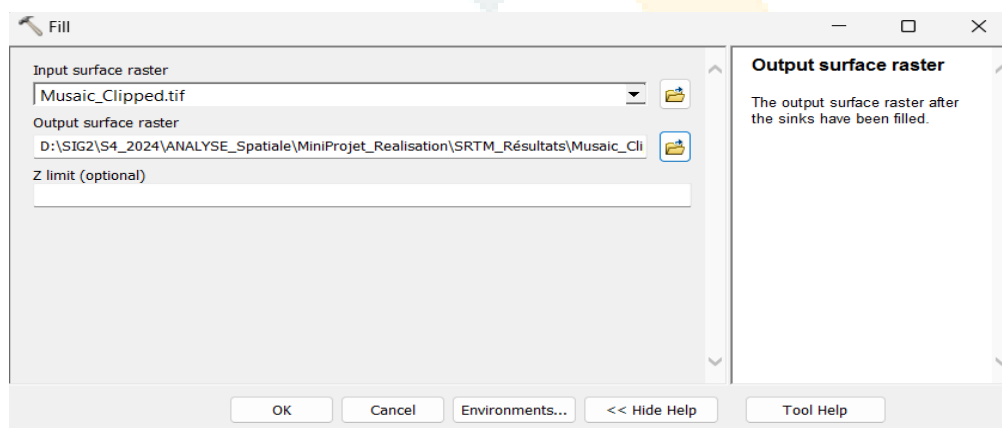


Figure 44: L'outil "Fill"

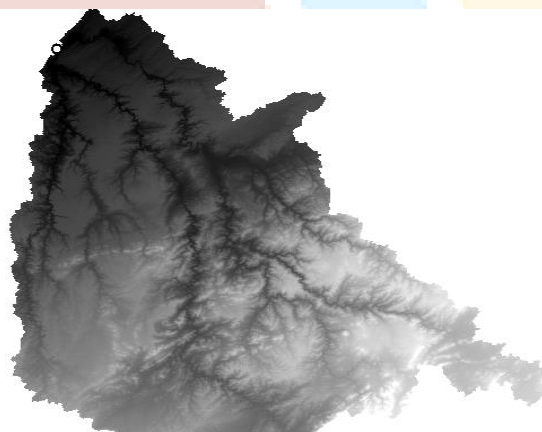
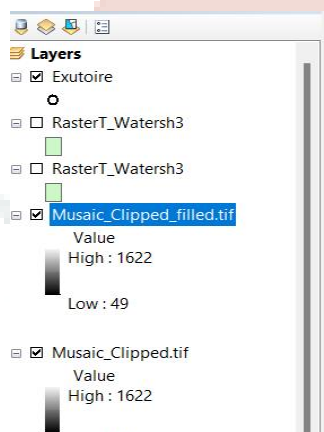


Figure 45: Output de l'outil "Fill"

L'utilisation de l'outil direction de flux :

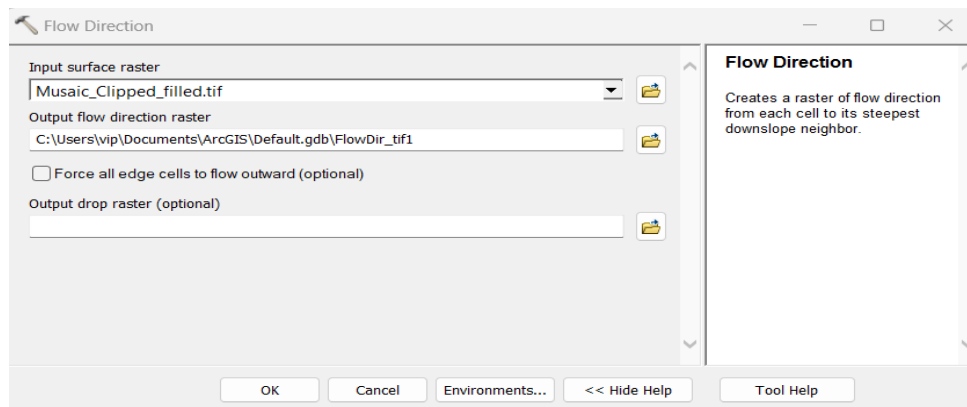


Figure 46 : "Flow Direction"

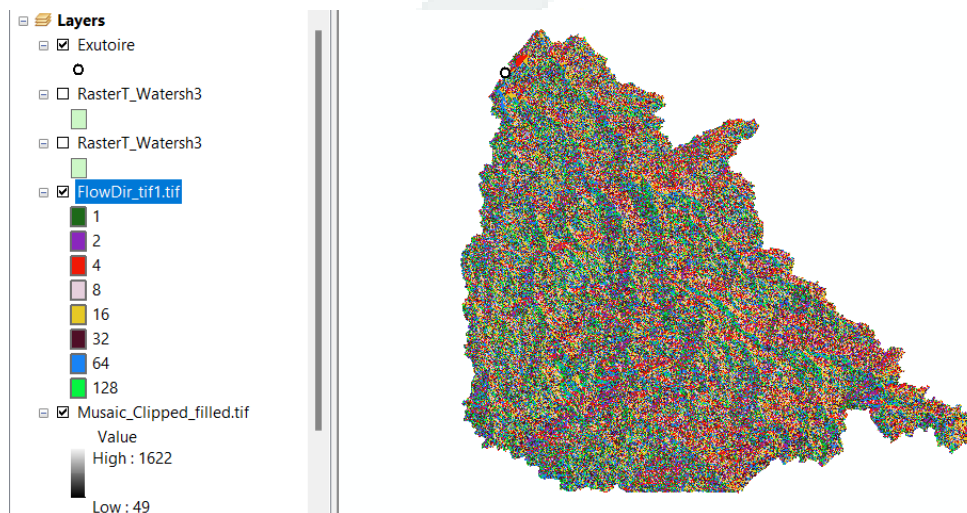


Figure 47: Output de l'outil « Flow Direction »

L'utilisation de l'outil Flow accumulation :

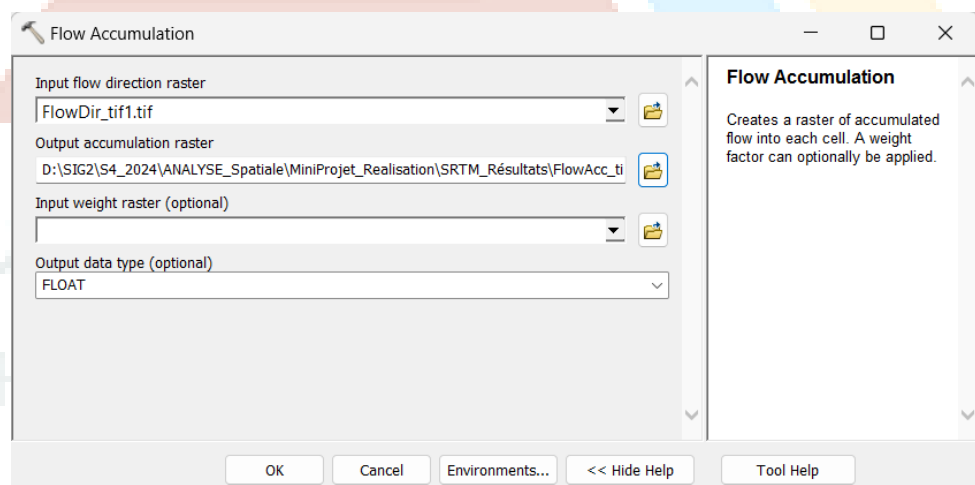


Figure 48 : L'outil "Flow Accumulation"

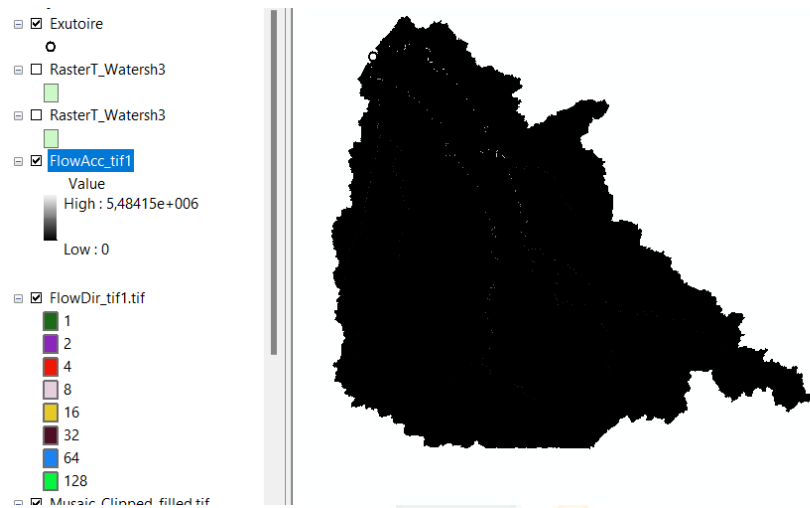


Figure 49 : Output de l'outil

L'utilisation de l'outil Con :

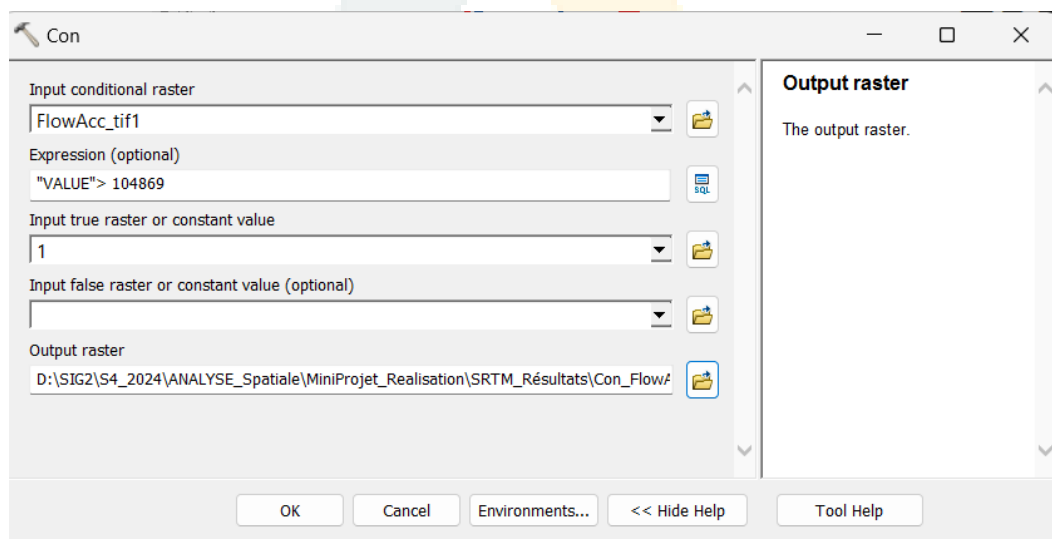


Figure 50: L'outil « Con »

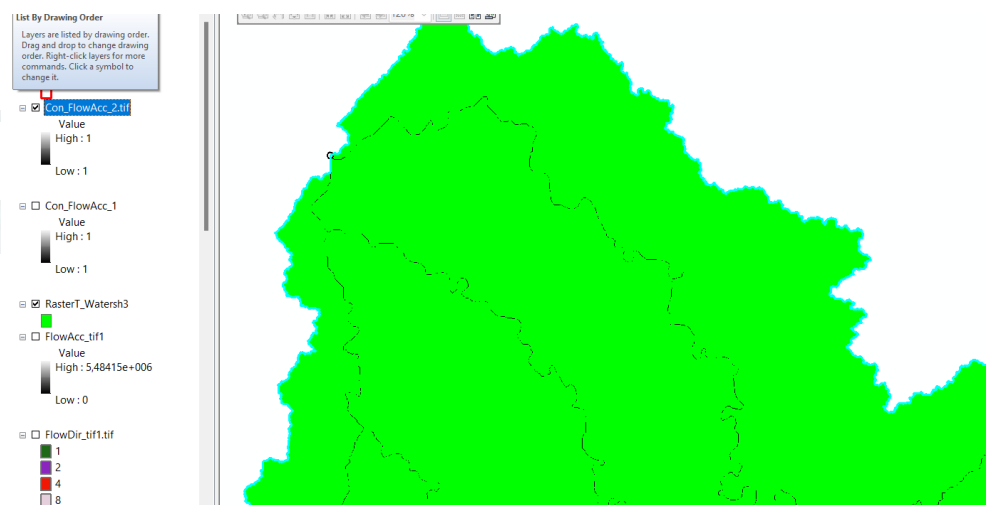


Figure 51: Output de l'outil «Con»

L'utilisation de l'outil écoulement vers entité "stream to feature" :

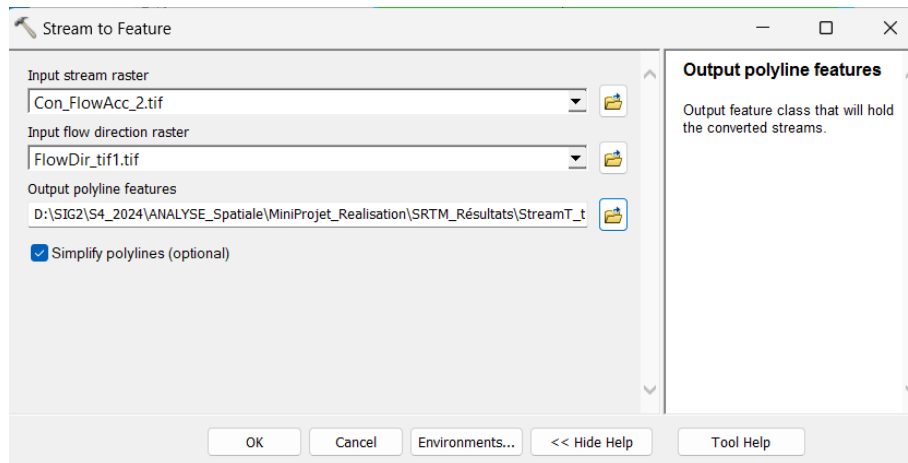


Figure 52: L'outil "Stream to Feature"

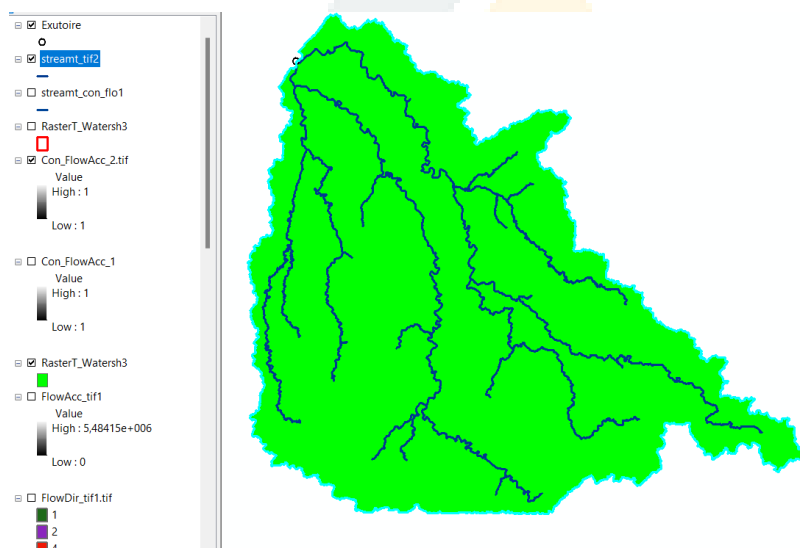


Figure 53: Output de l'outil "Stream to Feature"

La carte du réseau de drainage généré :

le réseau de drainage du BV

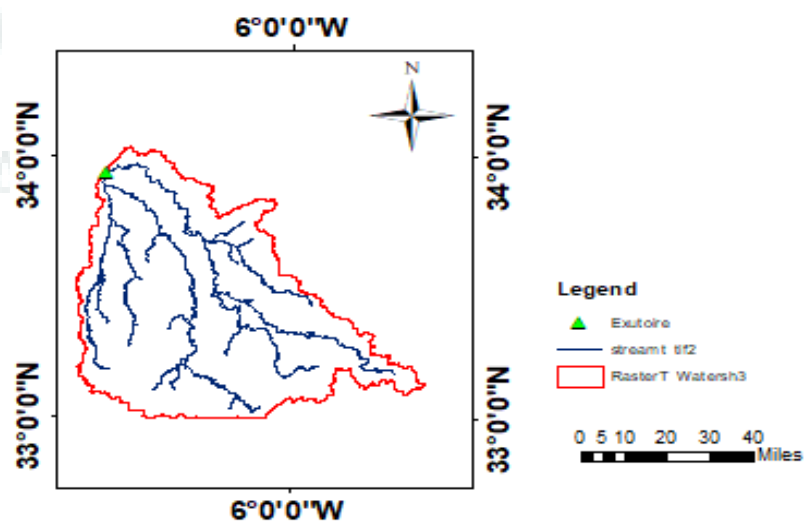


Figure 54 : La carte de réseau de drainage du BV

2.13 Calculer la longueur totale du réseau de drainage généré

On utilise le champ "Shape_length" et l'outil de statistique pour calculer la longueur totale de notre réseau de drainage.

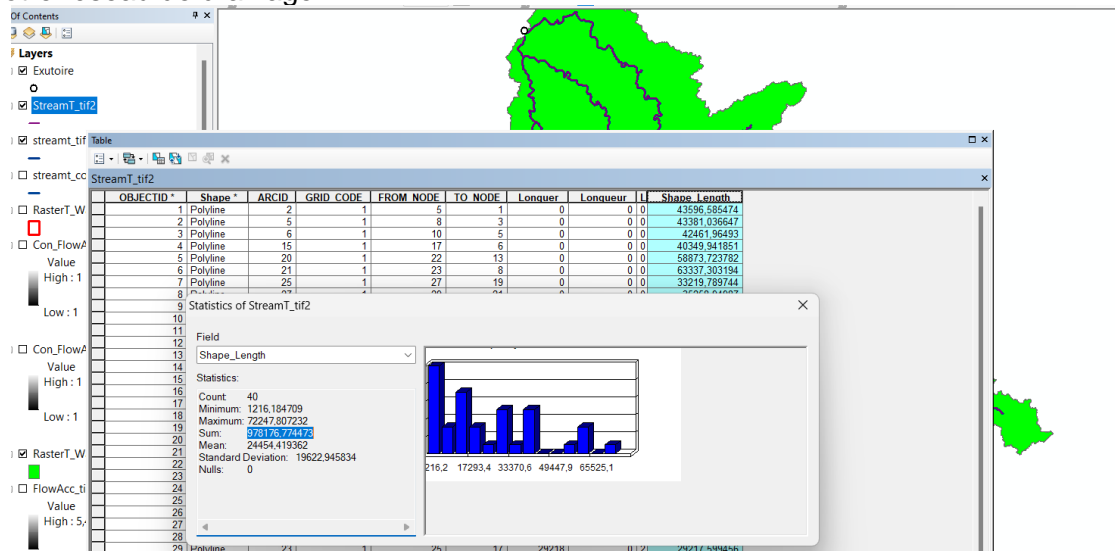


Figure 55 : la longueur totale du réseau de drainage

La longueur totale de notre réseau de drainage est : **978176.774 m**

2.14 Calculer l'ordre du réseau de drainage généré selon la méthode Strahler

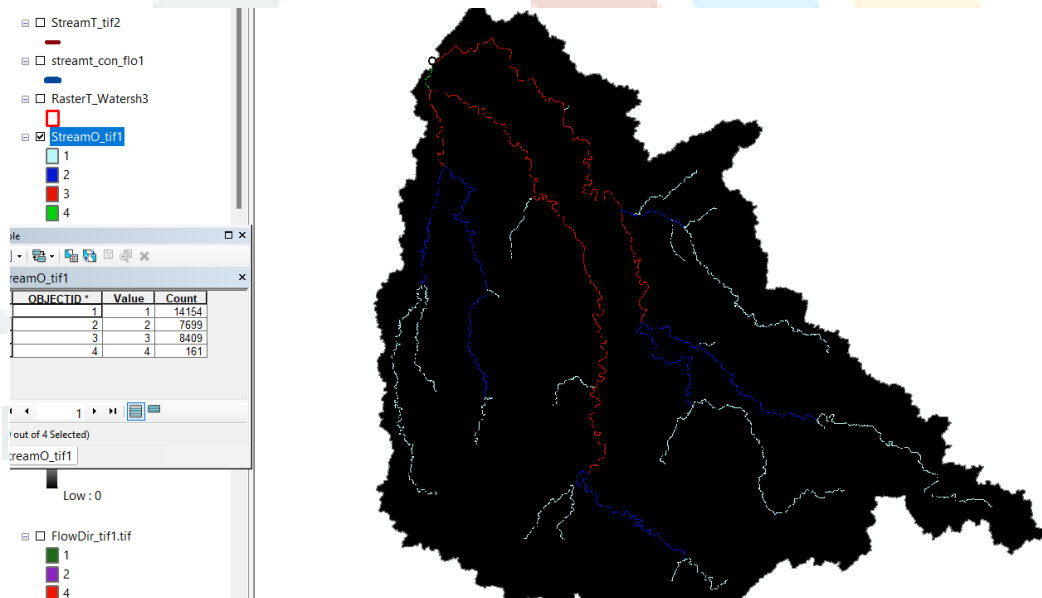


Figure 56 : 1ère Visualisation de l'ordre du réseau de drainage

Conversion vers "polylines" pour une visualisation claire :

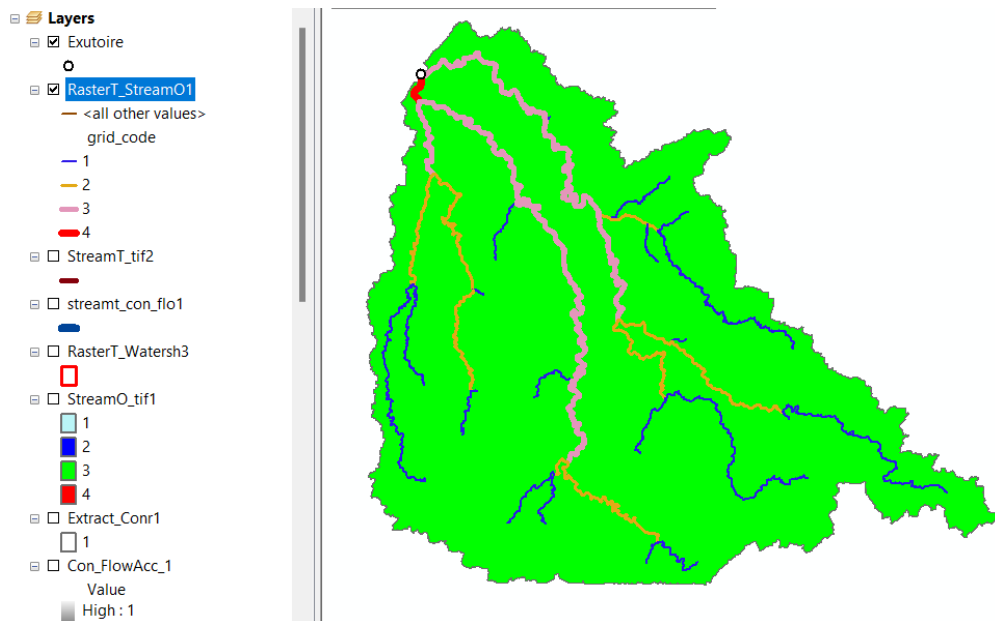
Figure 57 : 2^{ème} Visualisation de l'ordre du réseau de drainage

Table			
StreamO_tif1			
OBJECTID *	Value	Count	
1	1	14154	
2	2	7699	
3	3	8409	
4	4	161	

Figure 58 : Ordres du réseau de drainage

La carte du réseau de drainage (Strahler) :

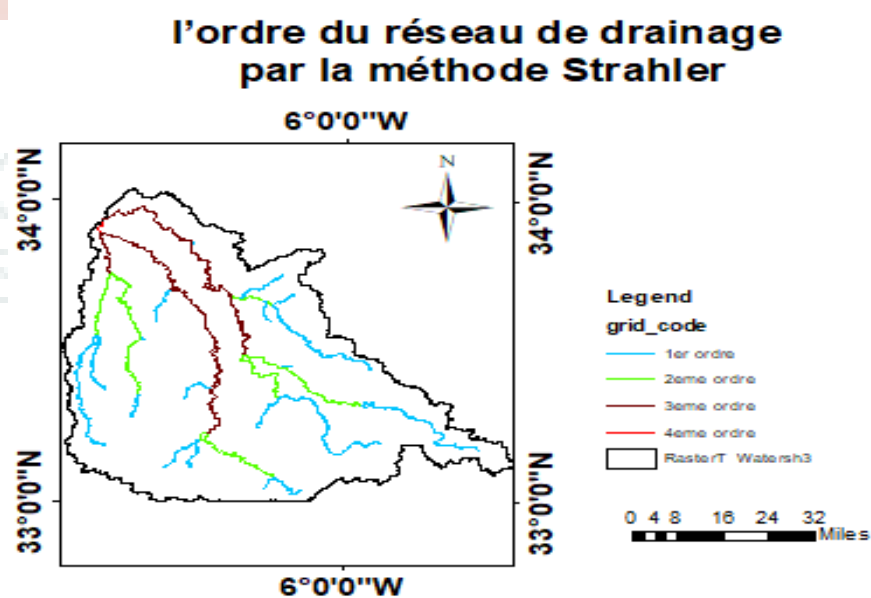


Figure 59 : La carte de l'ordre du réseau de drainage

2.15 Calculer le rapport de confluence du réseau de drainage

On utilise l'outil Raster to Polylines pour exporter la couche générée par Stream Order vers fichier de forme de type Polylines.

Le rapport de confluence ou de bifurcation est un nombre sans dimension exprimant le développement du réseau de drainage.

Le rapport de confluence est défini pour chaque ordre par : $R_{Bu} = \frac{N_u}{N_{u+1}}$






Sym...	Value	Label	Count
	<all other values>	<all other values>	0
	<Heading>	grid_code	75
	1	1	42
	2	2	24
	3	3	8
	4	4	1

Figure 60 : Nombre de cours d'eau pour chaque ordre

Après classification selon l'ordre, on obtient le nombre des cours d'eau dans chaque ordre, d'où :

- Le rapport de confluence pour l'ordre 1 est : 1.75
- Le rapport de confluence pour l'ordre 2 est : 3
- Le rapport de confluence pour l'ordre 3 est : 8

Le rapport de bifurcation total est :

$$R_B = \frac{\sum_{u=1}^{n-1} R_{Bu}}{n-1}$$

Donc, **Rb = 4.25**

2.16 Déterminer la longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal (L) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

Après sélection de la ligne principale, on l'exporte en une nouvelle couche, puis on calcule sa longueur.

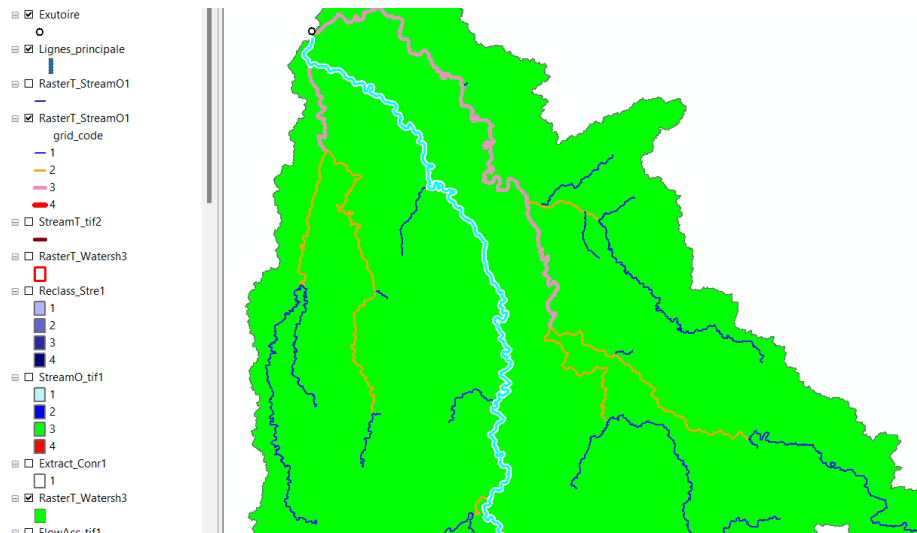


Figure 61 : Le cours d'eau principal

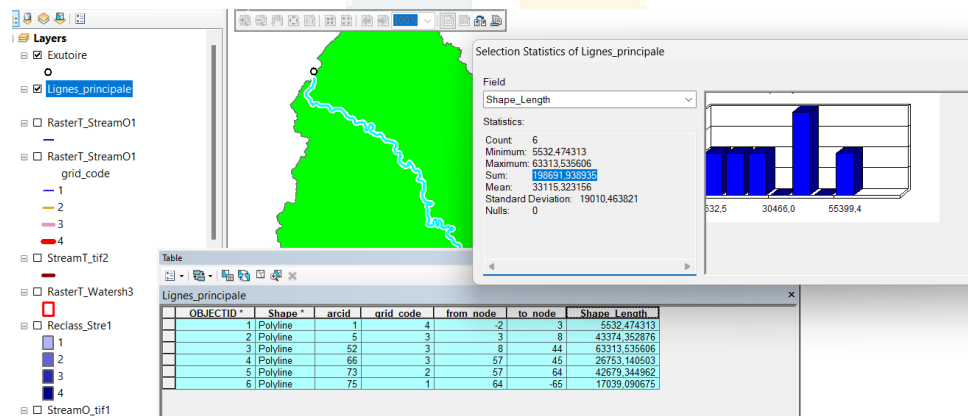


Figure 62 : La longueur du cours d'eau principal

La longueur totale de la ligne principale de notre réseau de drainage est : **198691.939 m**

2.17 Déterminer la pente moyenne du cours d'eau principal

Pour déterminer la pente moyenne le long de notre cours d'eau principale, on fait les étapes suivantes :

a. Extraction du profil altimétrique du cours d'eau :

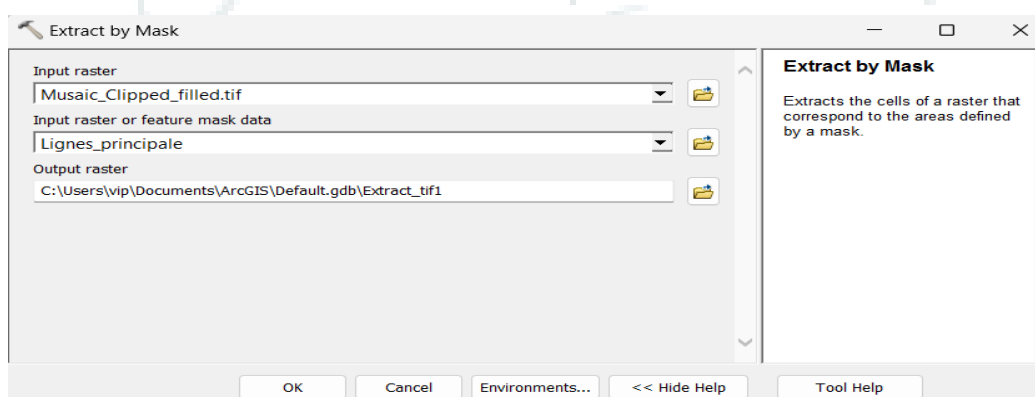


Figure 63: L'outil "Extract by Mask"



Figure 64 : Output de l'outil "Extract by Mask"

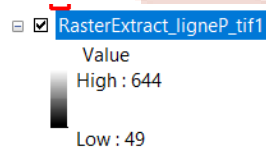
b. Calcul de la pente moyenne :

La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau.

$$Pente_{moy} = \frac{(H_{max} - H_{min})}{L}$$

Avec :

- Pmoy : pente moyenne du cours d'eau [m/km] ;
- Hmax - Hmin : dénivellation maximale de la rivière [m] (différence d'altitude entre le point le plus éloigné et l'émissaire);
- L : longueur du cours d'eau principal [km].



- **Hmax = 644 m**
- **Hmin = 49 m**
- **L = 198.691 Km**

Pente_moyenne = 3 m / km

2.18 Tracer le profil en long du cours d'eau principal

Etape 1 : On crée tout d'abord le modèle TIN de notre BV, à partir du MNT, en utilisant l'outil "Raster to TIN " de 3D Analyst.

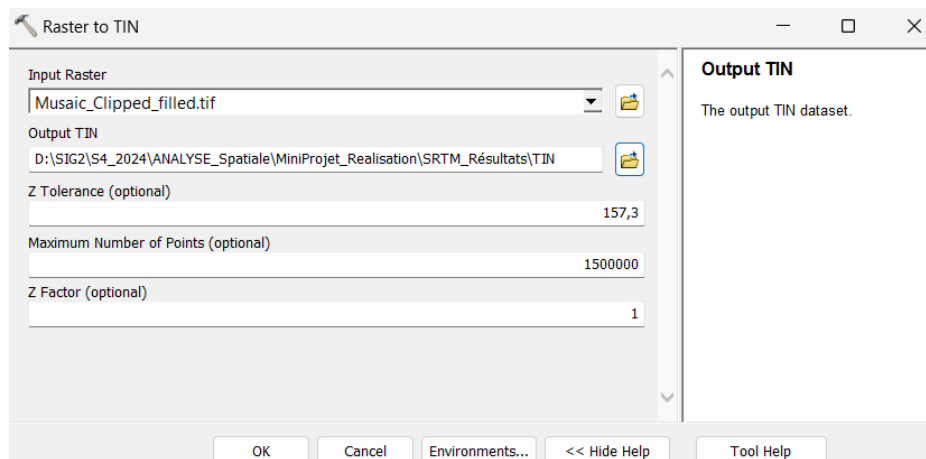


Figure 65 : L'outil « Raster to TIN »

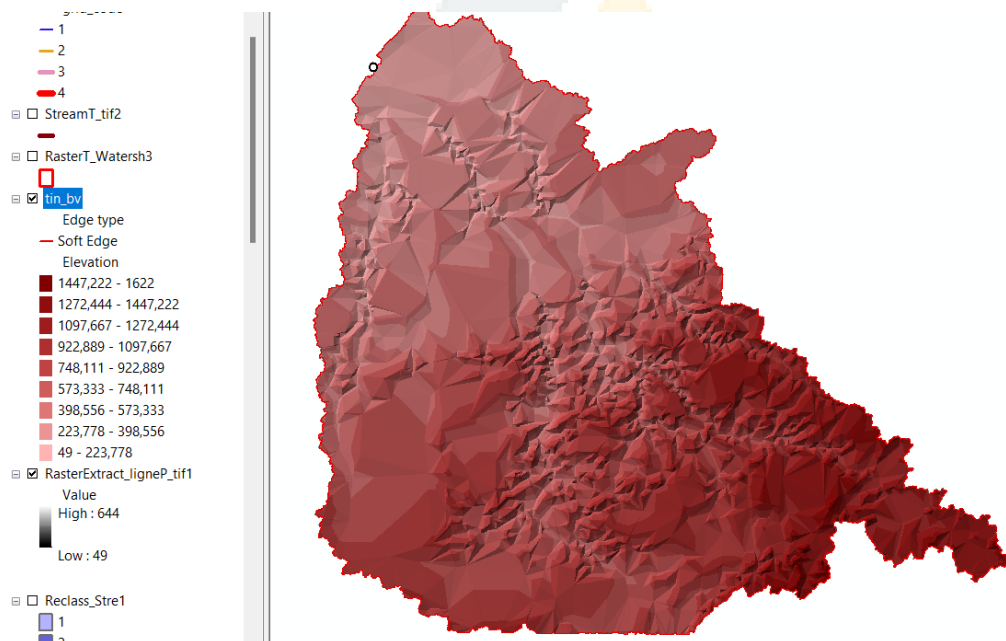


Figure 66 : Output de l'outil « Raster to TIN »

Etape 2: On crée tout le profil en long de notre cours d'eau principale.

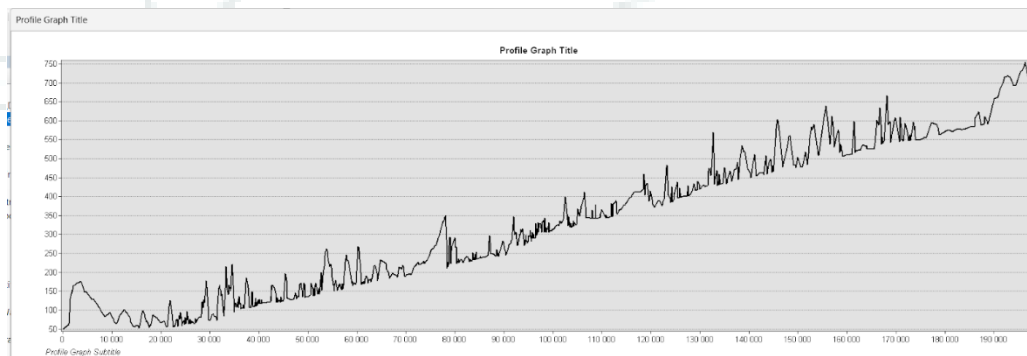


Figure 67 : Le profil en long de notre cours d'eau principale

2.19 Calculer le temps de concentration du BV selon les différentes méthodes empiriques

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

$$t_c = \max(t_h + t_r + t_a)$$

Avec :

- t_h : Temps d'humectation. Temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.
- t_r : Temps de ruissellement ou d'écoulement. Temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).
- t_a : Temps d'acheminement. Temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Formules empiriques du calcul de temps de concentration t_c :

- Giondotti : $t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{h}}$ t_c : Temps de concentration en heures
- Kirpich : $t_c = 0.945 \frac{L^{1.155}}{D^{0.385}}$ S : surface du bassin en km^2
- Ventura : $t_c = 0.1272 \sqrt{\frac{S}{I}}$ L : longueur du cours d'eau principal en Km
- Van Te Chow : $t_c = 0.123 \left(\frac{L}{I^{0.5}} \right)^{0.64}$ D : la différence d'altitude entre les extrémités du CEP en m
- Turrazza : $t_c = \frac{0.108}{\sqrt{I}} \sqrt[3]{SL}$ I : pente moyenne du cours d'eau principal en m/m
- h : différence entre l'altitude moyenne du bassin et celle de l'exutoire en m

Paramètre	Résultat
Surface du bassin	$S = 8300.634 \text{ km}^2$
Longueur du cours d'eau principale	$L = 198.691 \text{ Km}$
Différence d'altitudes entre les extrémités du cours d'eau principale	$D = 595 \text{ m}$

Données :

Pente moyenne du cours d'eau principal en m/m	$I = 0.003 \text{ m/m}$
Différence entre l'altitude moyenne du bassin et celle de l'exutoire en m	$h = 280.744 \text{ m}$

- a. Formule de Giordotti : $tc = 49.42 \text{ h}$
- b. Formule de Kiripich : $tc = 36.44 \text{ h}$
- c. Formule de Ventura : $tc = 211.58 \text{ h}$
- d. Formule de Van Te Chow : $tc = 23.34 \text{ h}$
- e. Formule de Turrazza : $tc = 232.96 \text{ h}$

2.20 Elaboration de la carte du bassin versant

Carte du bassin versant BOUREGREG en amont du barrage sidi mohamed ben abdellah

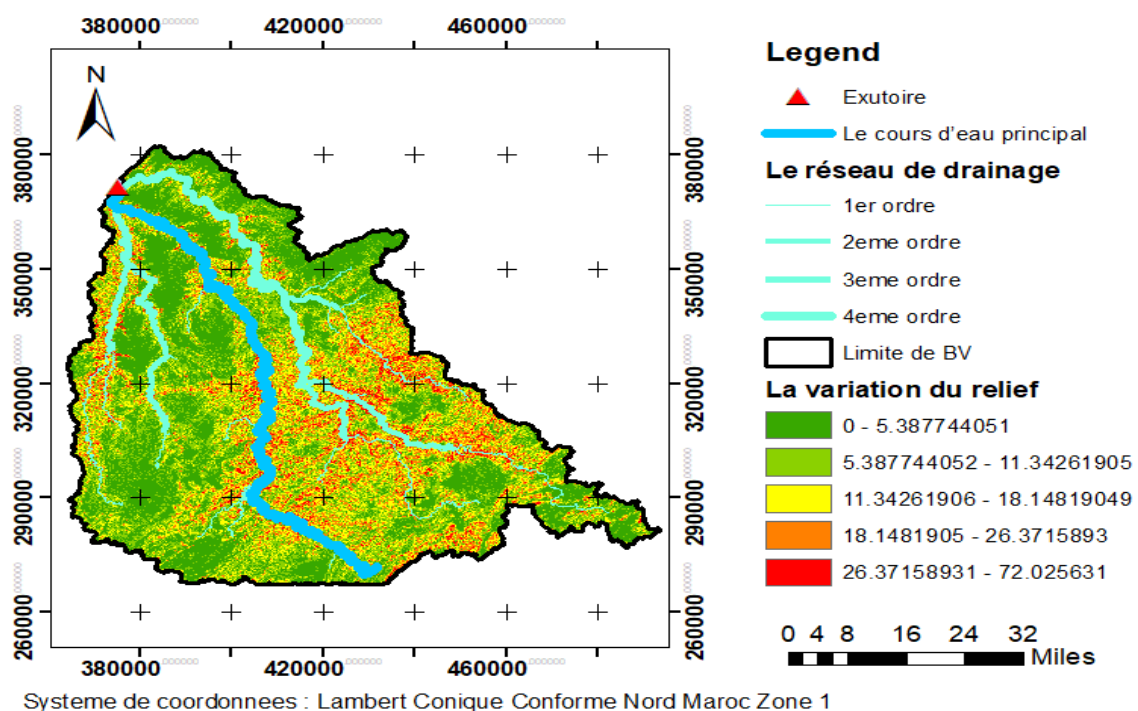
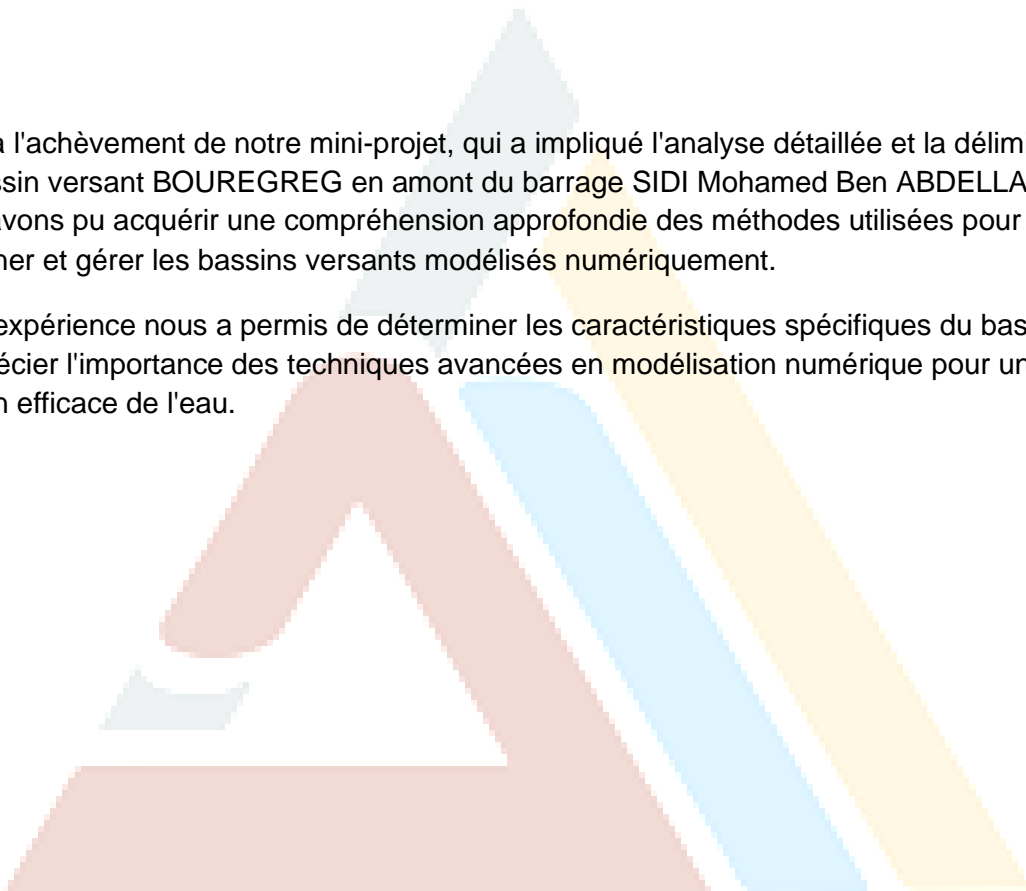


Figure 68 : Carte finale du bassin versant Bouregrag

Conclusion

Suite à l'achèvement de notre mini-projet, qui a impliqué l'analyse détaillée et la délimitation du bassin versant BOUREGREG en amont du barrage SIDI Mohamed Ben ABDELLAH, nous avons pu acquérir une compréhension approfondie des méthodes utilisées pour examiner et gérer les bassins versants modélisés numériquement.

Cette expérience nous a permis de déterminer les caractéristiques spécifiques du bassin et d'apprécier l'importance des techniques avancées en modélisation numérique pour une gestion efficace de l'eau.



المدرسة الحسنية للأشغال العمومية
ECOLE HASSANIA DES TRAVAUX PUBLICS