
Chapitre 3 : Modélisation hydrologique et hydrogéologique du bassin de la Haute Moulouya

I. Application d'ArcHydro pour la modélisation hydrologique :

A- Outils Arc-Hydro

Arc Hydro est un ensemble de modèles de données et d'outils qui fonctionnent dans ArcGIS pour prendre en charge les analyses de données géospatiales et temporelles. On l'utilise pour délimiter et caractériser les lignes de partage des eaux aux formats raster et vecteur, définir et analyser le réseau hydrogéométrique, gérer les données chronologiques et exporter les données vers des modèles numériques.

Les outils Arc Hydro ont deux objectifs principaux :

- Le premier est de manipuler (attribuer) des attributs clés dans le modèle de données Arc Hydro. Ces attributs constituent la base des analyses ultérieures. Ils comprennent les identifiants clés (tels que HydroID, DrainID, NextDownID, etc.) et les attributs de mesure (tels que LengthDown).
- Le second est de fournir certaines fonctionnalités de base souvent utilisées dans les applications de ressources hydrologiques. Cela inclut la délimitation des bassins versants basés sur le MNT, la génération de réseaux et le traçage basé sur les attributs.

Ces outils d'hydrologie permettent d'identifier les dépressions, la direction des flux, délimitent les bassins de ruissellement et créent des réseaux de drainage (figure 16).

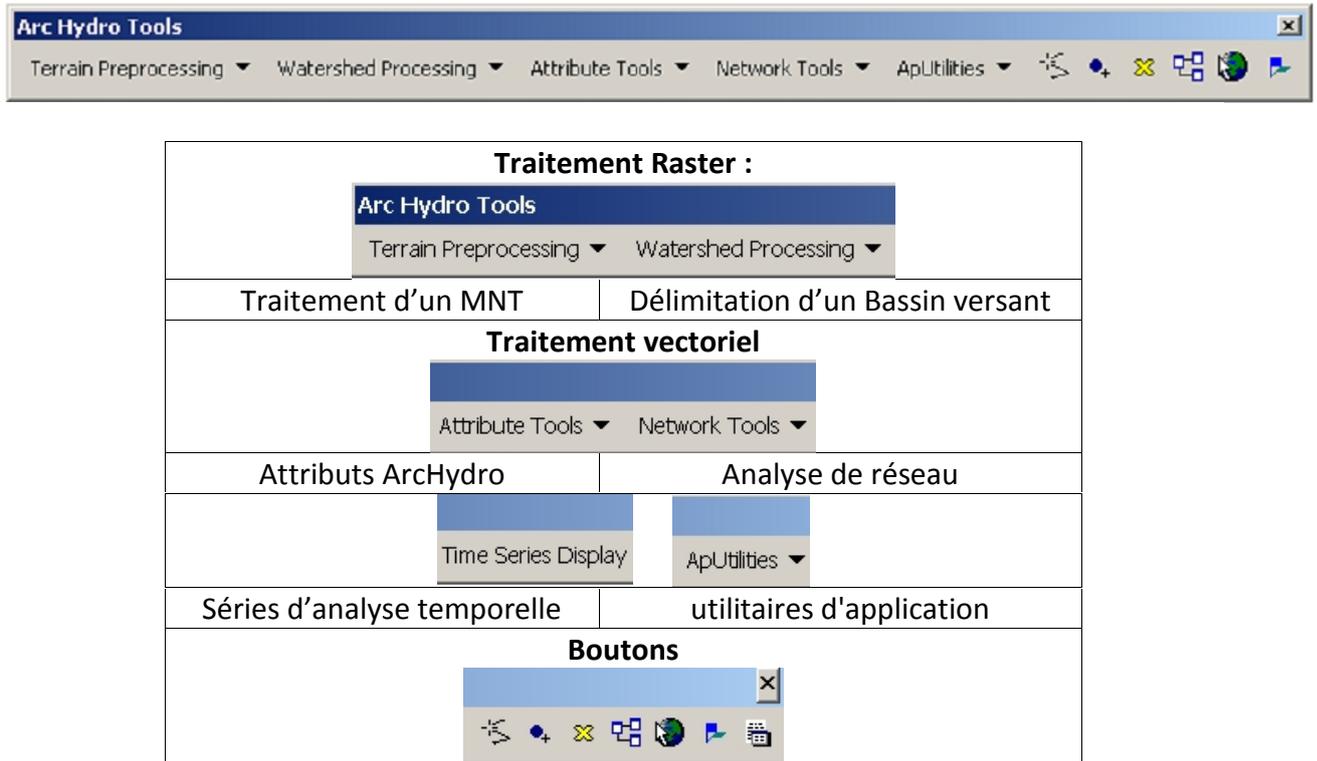


Figure 16 : Outils de base d'ArcHydro

La manipulation d'ArcHydro est fascinante tout en étant difficile. En utilisant un raster d'altitude ou un modèle numérique de terrain (MNT) comme entrée, il est possible de délimiter automatiquement un système de drainage et de quantifier les caractéristiques de ce système. Donc à l'aide d'un MNT, on peut suivre plusieurs étapes pour le calcul d'un bassin versant et d'un réseau hydrographique.

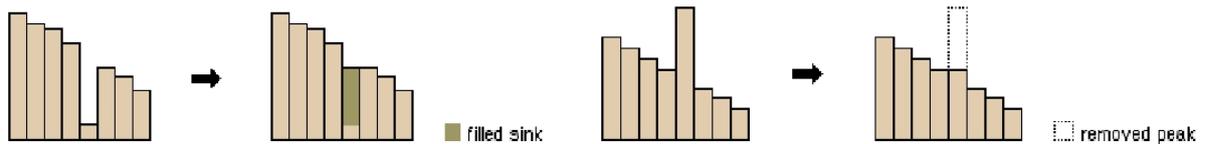
A-1- TERRAIN PRE-PROCESSING

L'outil Sink :

L'outil SINK permet d'identifier les cuvettes. On crée un raster identifiant toutes les cuvettes ou zones de drainage interne. En fonction des résultats, nous pouvons remplir les cuvettes ou utiliser la sortie pour déterminer la limite de remplissage. Les cuvettes peuvent être remplies à l'aide de la fonction Remplissage (FILL).

L'Outil Fill :

Cette outil remplit les cuvettes d'une surface raster pour supprimer de légères imperfections dans les données ;



A partir d'un MNT de type SRTM centré sur la Haute Moulouya, nous avons pu créer un nouveau MNT qui servira dans les étapes suivantes.

L'outil Flow Direction :

Cet outil sert à créer un Raster montrant des directions de flux à partir de chaque cellule vers son voisin de plus grande pente descendante (figure 17).

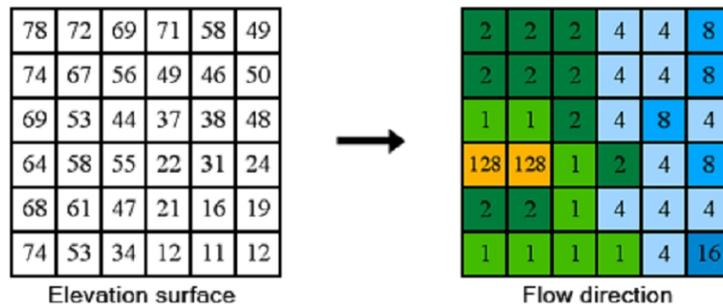


Figure 17 : Principe de l'outil direction du courant (Flow Direction)

Un raster en sortie est créé représentant le rapport de la variation maximale d'altitude à partir de chaque cellule dans la direction du flux sur la distance du trajet entre le centre des cellules, exprimé en pourcentage. L'image résultante montre le barrage **Sidi Said** sur oued Moulouya (Figure 18).

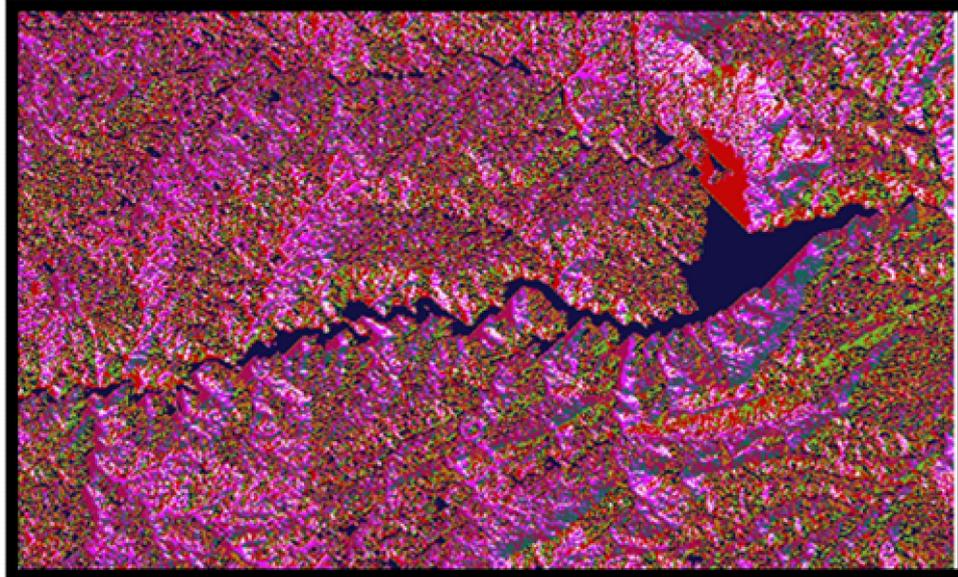


Figure 18 : Résultat de l'outil Flow Direction

Outil Flow Accumulation :

L'outil Flow Accumulation (accumulation de flux) permet de créer un raster de flux cumulé dans chaque cellule. Les résultats obtenus peuvent permettre de créer un réseau hydrographique en fixant un seuil pour sélectionner des cellules avec une haute circulation accumulée (figure 19). L'image raster ainsi créée montre les lignes de drainage en classes de différentes couleurs (figure 20).

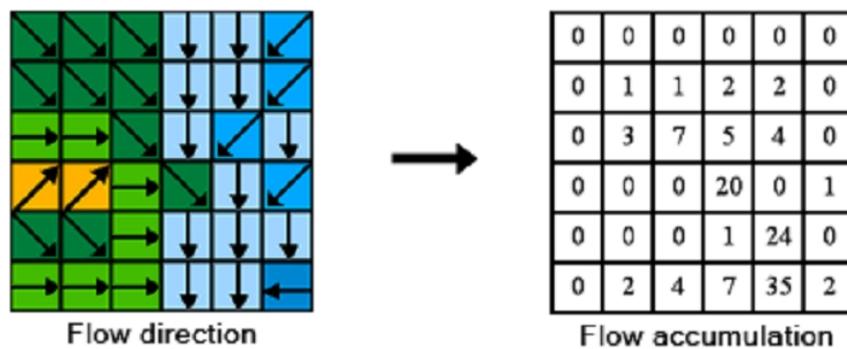


Figure 19 : Principe de l'outil Accumulation de flux (Flow Accumulation)

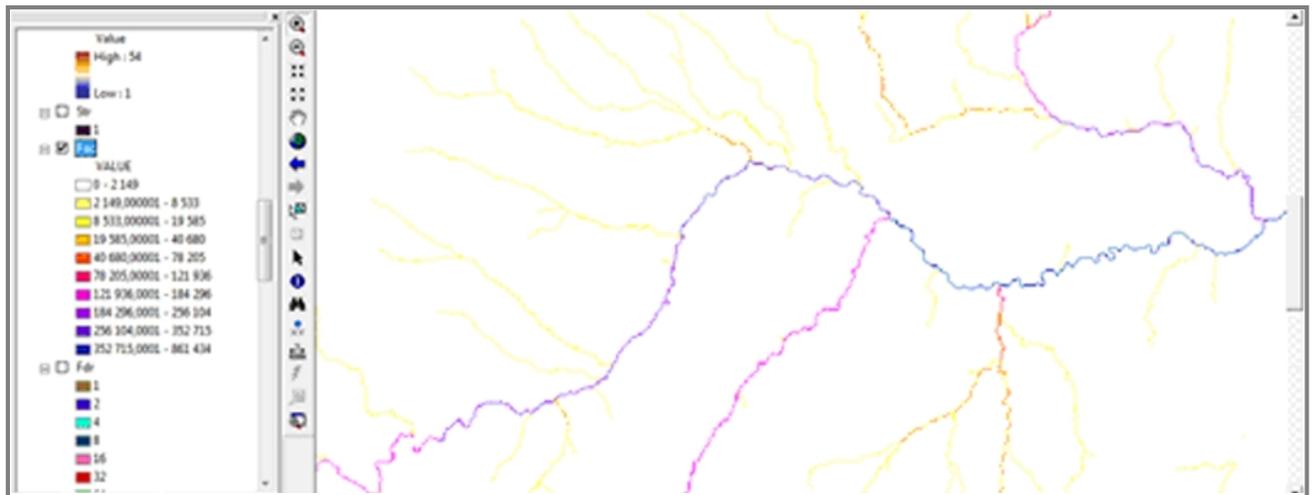


Figure 20 : Résultat de l’outil Flow Accumulation. On trouve Oued Moulouya en bleu

Outil Stream Définition:

Cette fonction calcule une grille de flux qui contient une valeur de «1» pour toutes les cellules dans la grille d'accumulation de flux d'entrée qui ont une valeur supérieure au seuil donné. Toutes les autres cellules de la grille de flux ne contiennent pas de données (figure 21).

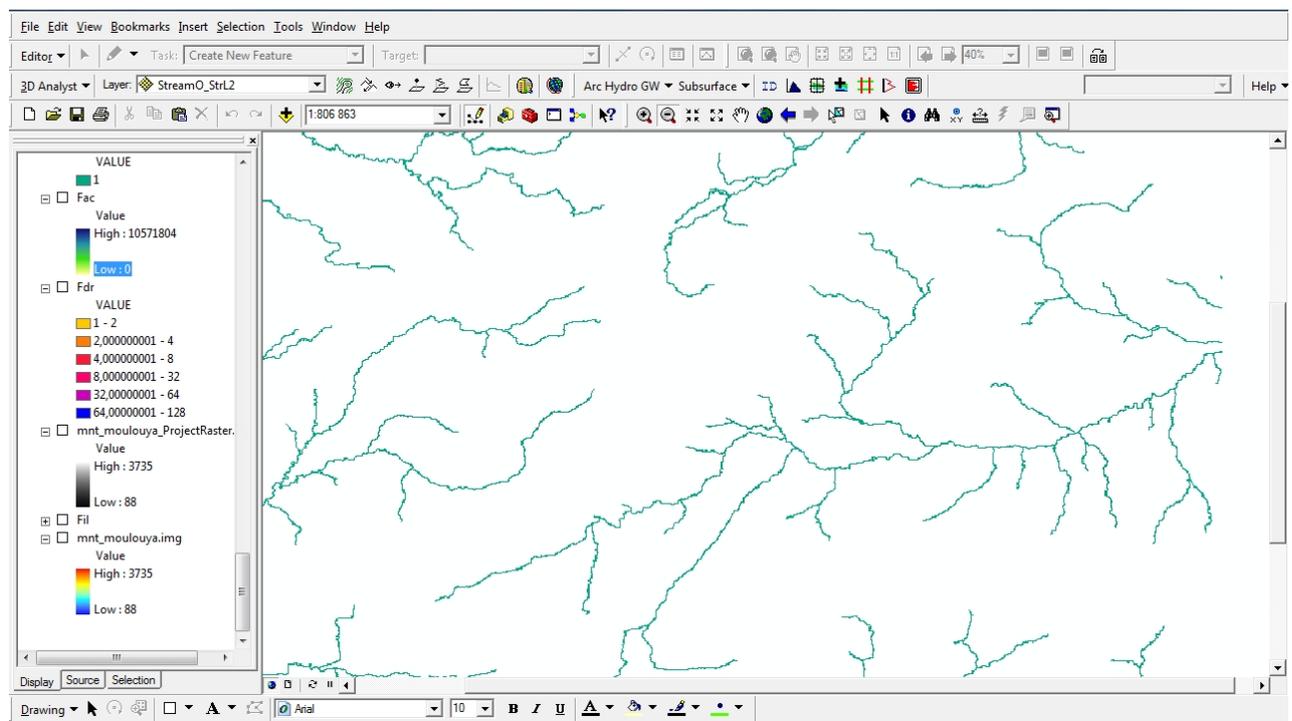


Figure 21 : Résultat de l’outil Stream Définition

Outil Stream segmentation:

Cette fonction nous montre les détails sur la segmentation du réseau de drainage (figure 22).

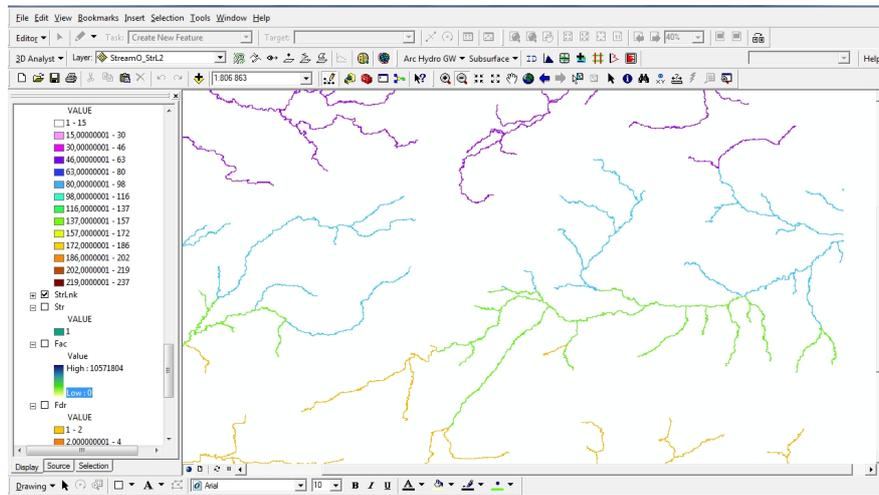


Figure 22 : Résultat de l’outil Stream segmentation

Outil Catchment Grid Delineation :

Cette fonction crée une grille dans laquelle chaque cellule porte une valeur qui indique à quel versant de la cellule appartient. La valeur correspond à la valeur portée par le segment des cours d'eau qui draine cette zone, définie dans le segment de grille lié au flux (figure 23).

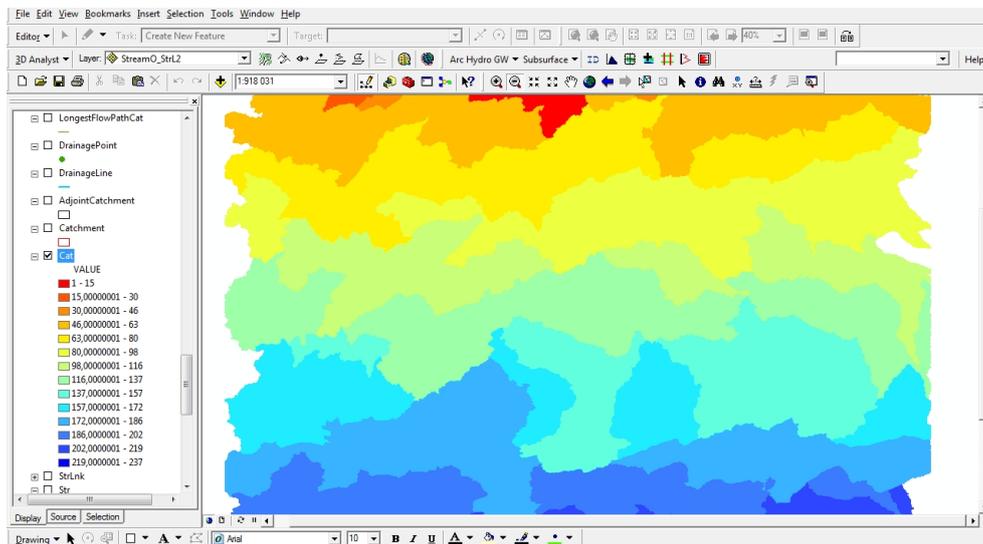


Figure 23 : Résultat de l’outil Catchment Grid Delineation

Outil Catchment Polygon Processing :

Cette fonction convertit une grille de captage en une entité polygone. Elle permet de tracer les contours de chaque sous-bassin (figure 24).

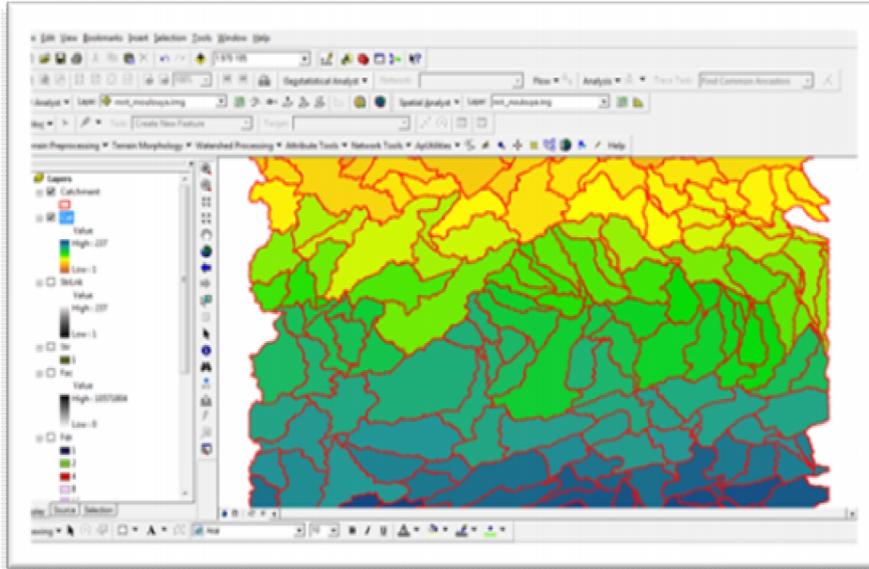


Figure 24 : Résultat de l'outil Catchment Polygon Processing

Outil Drainage Line Processing

Cet outil permet de voir le détail des lignes de drains dans des sous-bassins versants (figure 25).

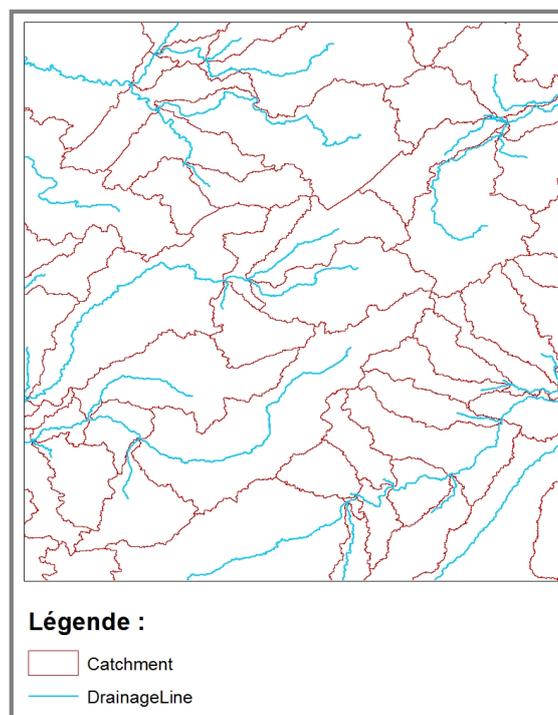


Figure 25 : Résultat de l'outil Catchment Polygon Processing

Outil Adjoint Catchment Processing :

Agrège les bassins versants à partir des réseaux de drainage et donne les bassins versants indépendants (figure 26).

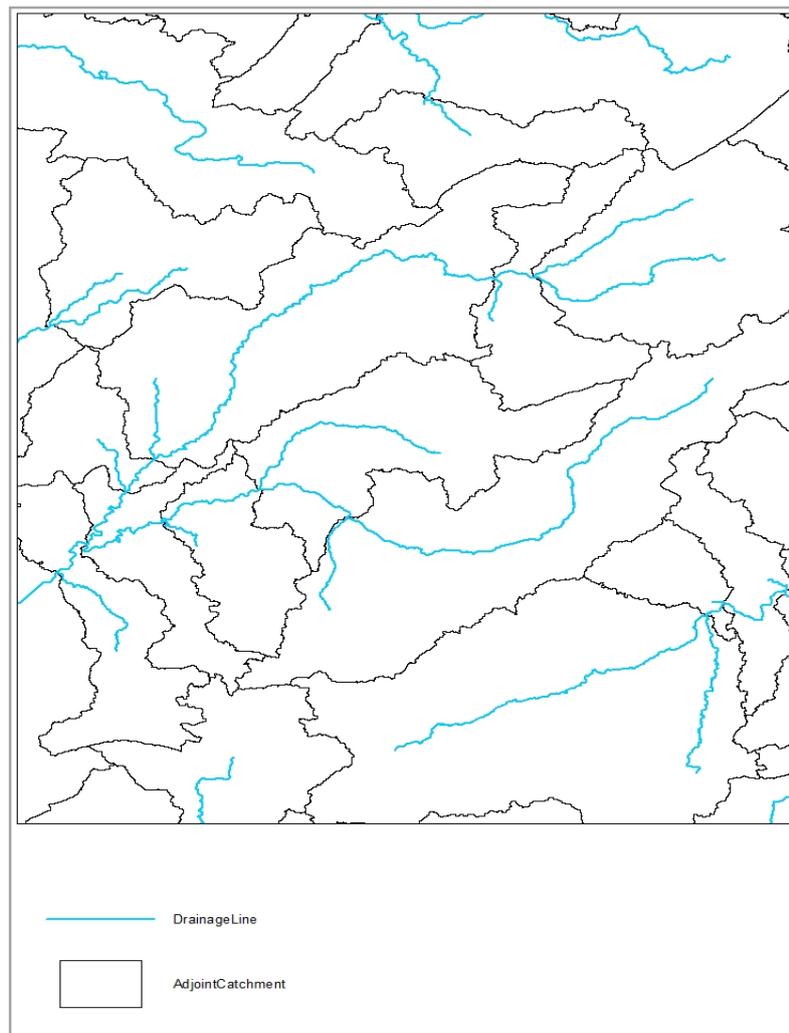


Figure 26 : Résultat de l'outil Adjoint Catchment Processing

Outil Drainage point Processing :

Cette fonction détermine l'exutoire des bassins versants élémentaires. Elle permet de générer des points de drainage associés à des bassins versants. Elle montre un ensemble de points d'intersection ou de bifurcation entre les drains (Figure 27).

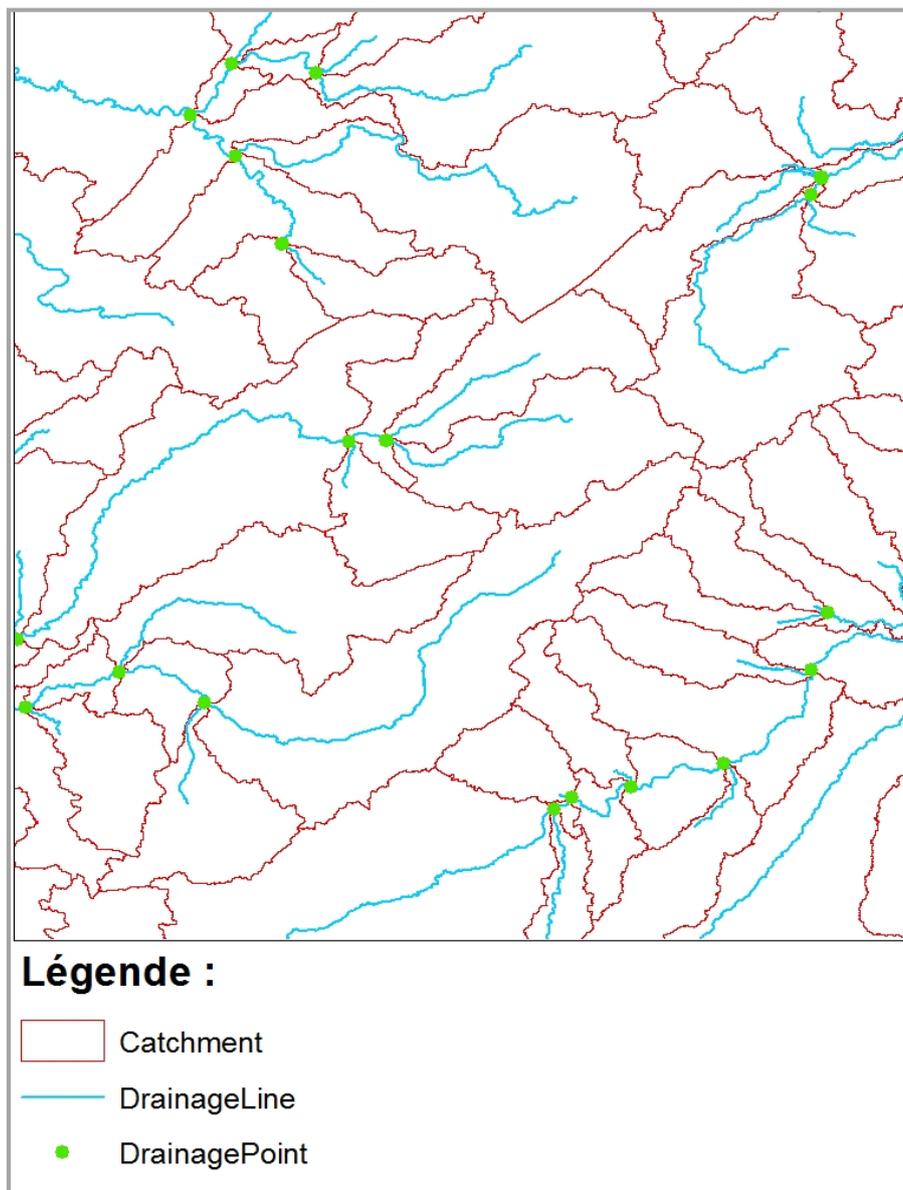


Figure 27 : Résultat de l'outil Drainage point Processing

Outil Longest Flow Path for Catchments:

Cette fonction permet de générer des chemins plus longs de débit associée à des bassins versants (Figure 28). Cela est

nécessaire pour accélérer la génération des chemins de plus longs débit. Le nouveau shapefile montre seulement les drains les plus longs pour **un bassin** donné. Cette fonction prend beaucoup de temps de calcul.

Drainage Point Processing

Longest Flow Path for Catchments

Longest Flow Path for Adjoint Catchments

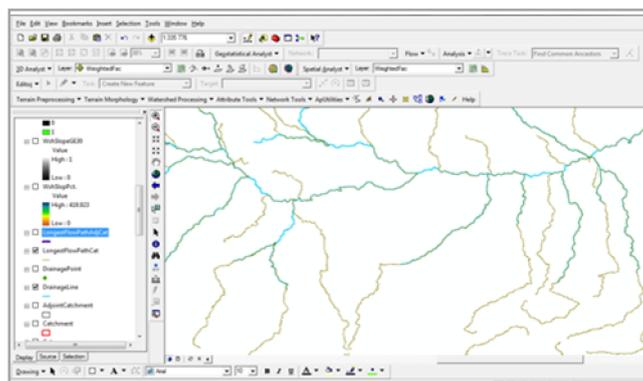
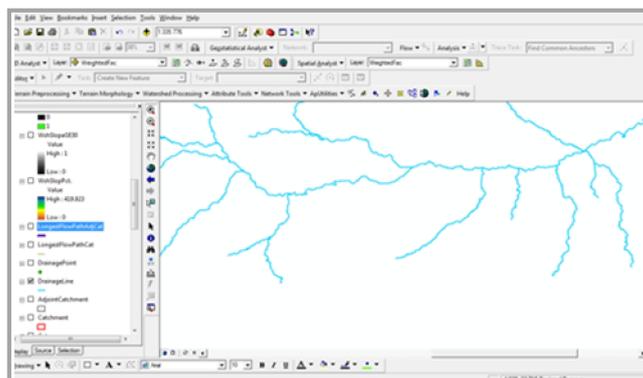
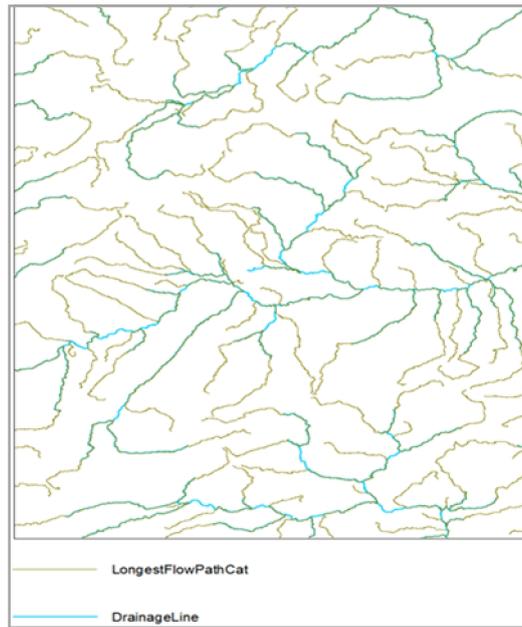


Figure 28 : Résultat de l'outil Longest Flow Path For Catchments

Outil Longest Flow Path For Adjacent

Catchments:

Cette fonction permet de générer des chemins plus longs de débit associée au captage adjoint (figure 29).

Drainage Point Processing

Longest Flow Path for Catchments

Longest Flow Path for Adjacent Catchments

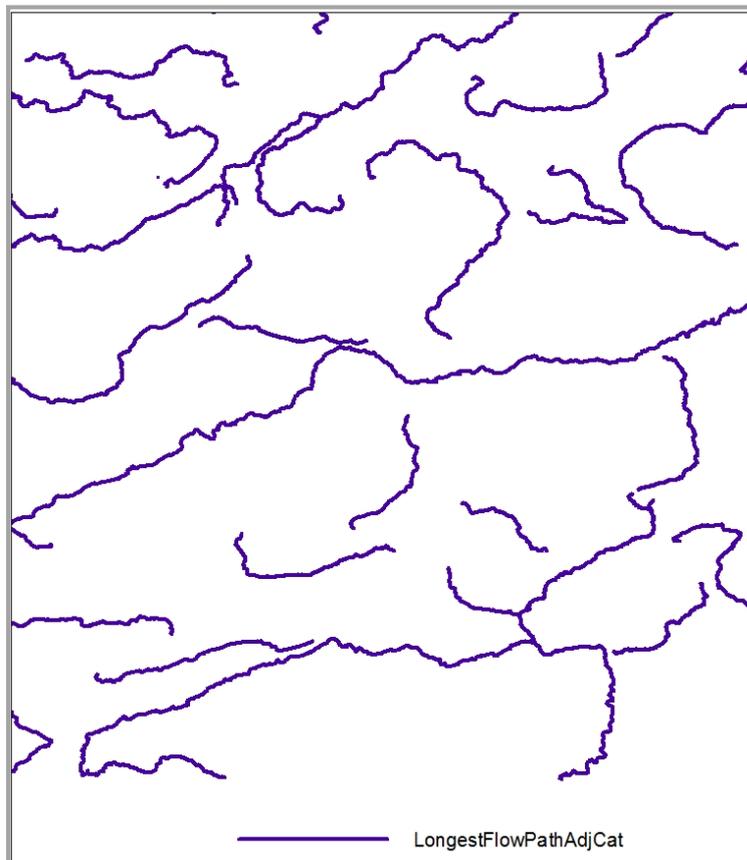


Figure 29 : Résultat de l'outil Longest Flow Path For Adjacent Catchments

Outil Slop (Pente):

Cette fonction permet de générer la grille de pente pour le MNT du secteur de la Haute Moulouya. L'outil **Slop greater than 30** permet de générer une grille qui caractérise toutes les cellules ayant une pente supérieure à 30%. Ces cellules ont une valeur de 1, alors que tous les autres ont une valeur de 0, ou bien une pente supérieure à 30 %.

Le document qui en résulte (Figure 30) est une grille dans laquelle toutes les cellules ayant une pente supérieure à 30% ont une valeur de 1, et toutes les autres cellules d'une valeur de 0.

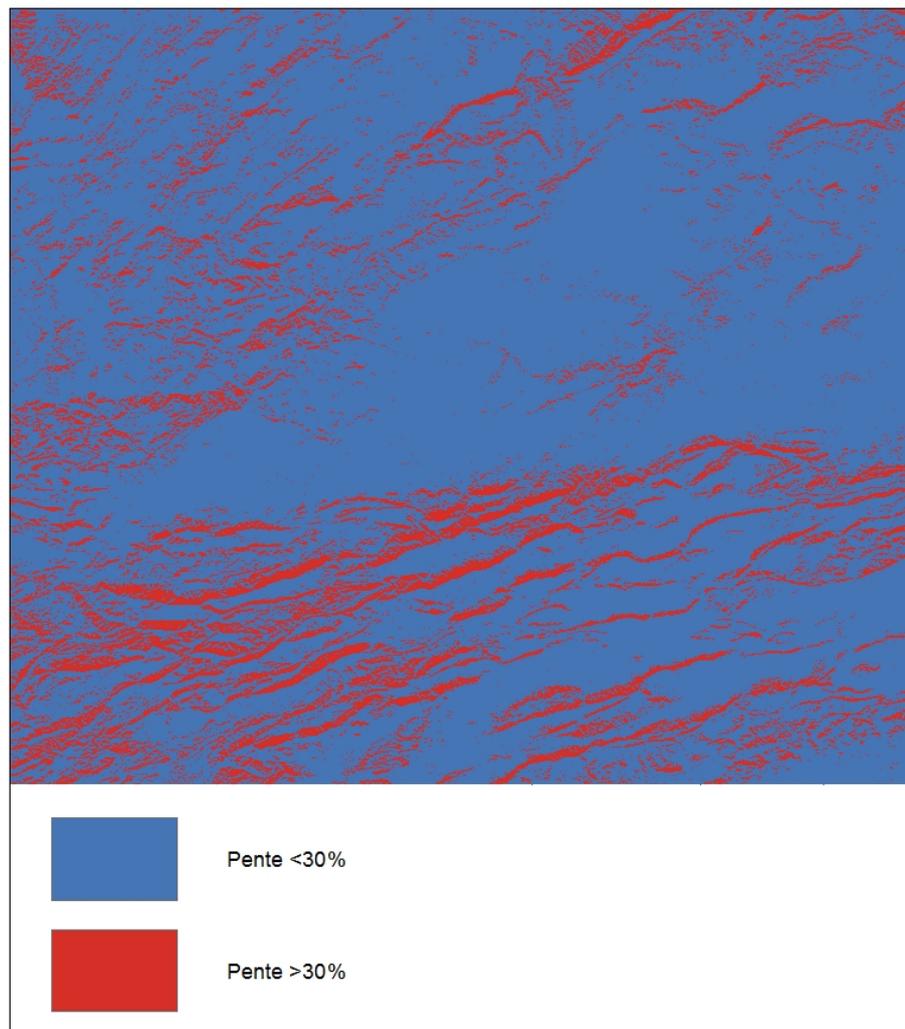


Figure 30 : Résultat de l'outil Slop greater than 30

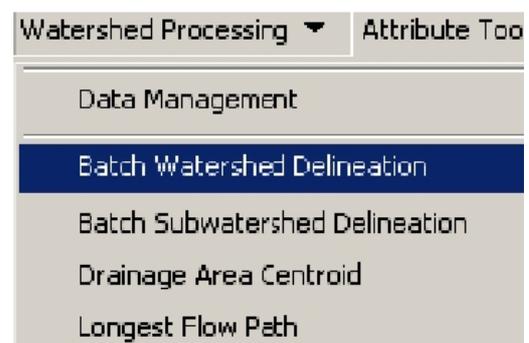
Outil Weighted Flow Accumulation :

Cette fonction calcule une grille pondérée du débit d'accumulation.

A-2- Watershed Processing:

Outil Batch Watershed Delineation

Cette fonction permet de délimiter des lots de bassins versants et de sous-bassins hydrographiques à partir d'une classe d'entité de points sélectionnés auparavant (figure 31).



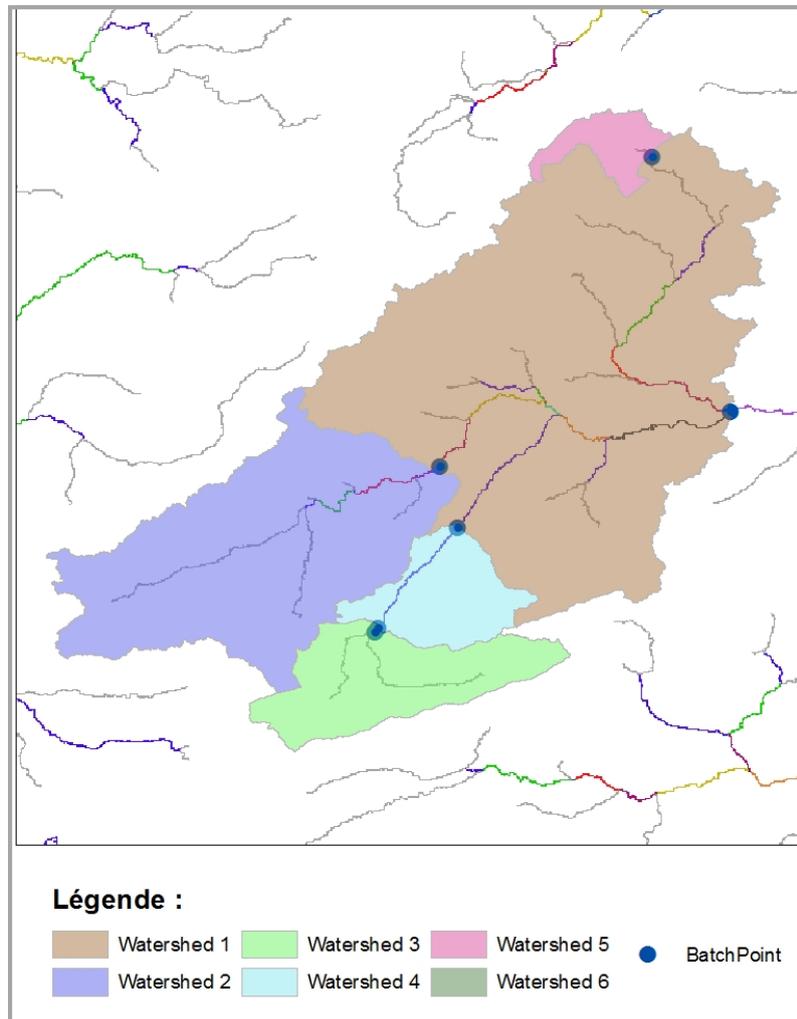


Figure 31 : Résultat de l'outil Batch Watershed Delineation

L'outil Délimitation des bassins versants par lots d'ArcHydro  peut être utilisé pour créer interactivement la classe d'entité groupée Point.

Outil Drainage Area Centroid :

Cette fonction génère le centroïde des aires de drainage comme les centres de gravité (figure 32). Elle opère sur un ensemble sélectionné d'aires de drainage dans la classe d'entrée de drainage des surfaces.

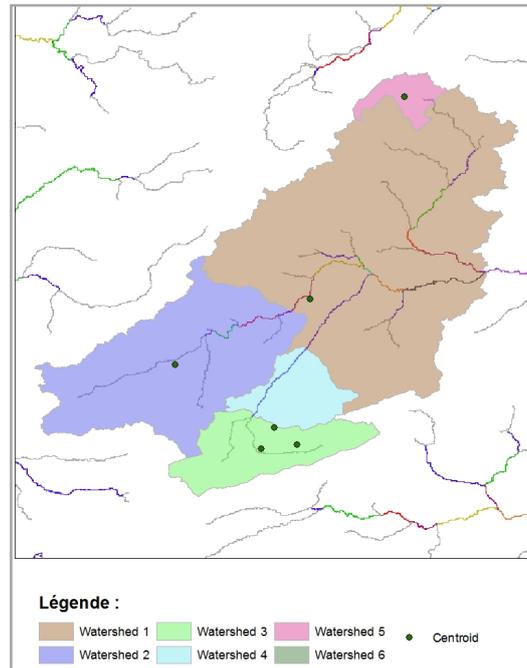


Figure 32 : Résultat de l'outil Drainage Area Centroid
Outil Longest Flow Path :

Cette fonction identifie et calcule la longueur du chemin le plus long de flux dans un ensemble sélectionné d'aires de drainage (figure 33).

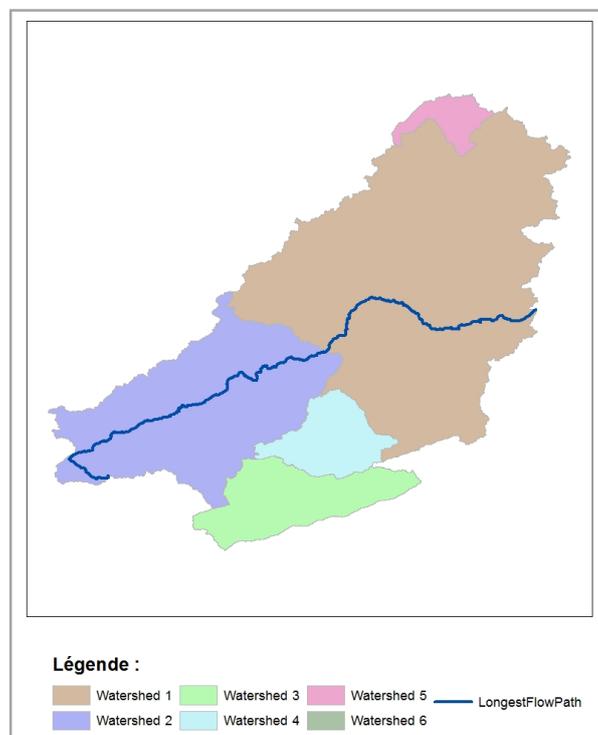
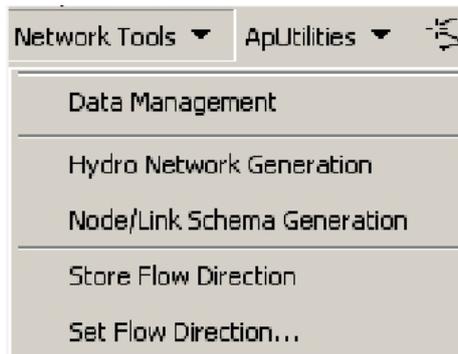


Figure 33 : Résultat de l'outil Longest Flow Path

A-3- OUTILS DE RESEAU: NETWORK TOOLS



Outil Hydro Network Generation:

Cette fonction permet de convertir les caractéristiques de drainage dans les caractéristiques du réseau, et de créer un réseau géométrique associé (Figure 34).

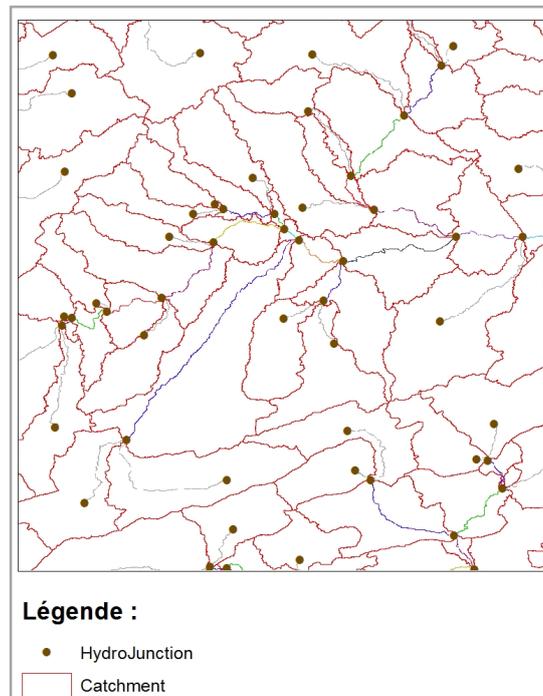


Figure 34 : Résultat de l'outil Hydro Network Generation

Outil Node/Link Schema Generation

Cette fonction permet de générer un schéma nœud-lien. Les nœuds sont définis par les centres des polygones représentant les bassins et par des points qui représentent des lieux d'intérêt dans le modèle. Les points incluent le bassin de sortie, les jonctions de rivière, les prises d'eau et autres installations (figure 35).

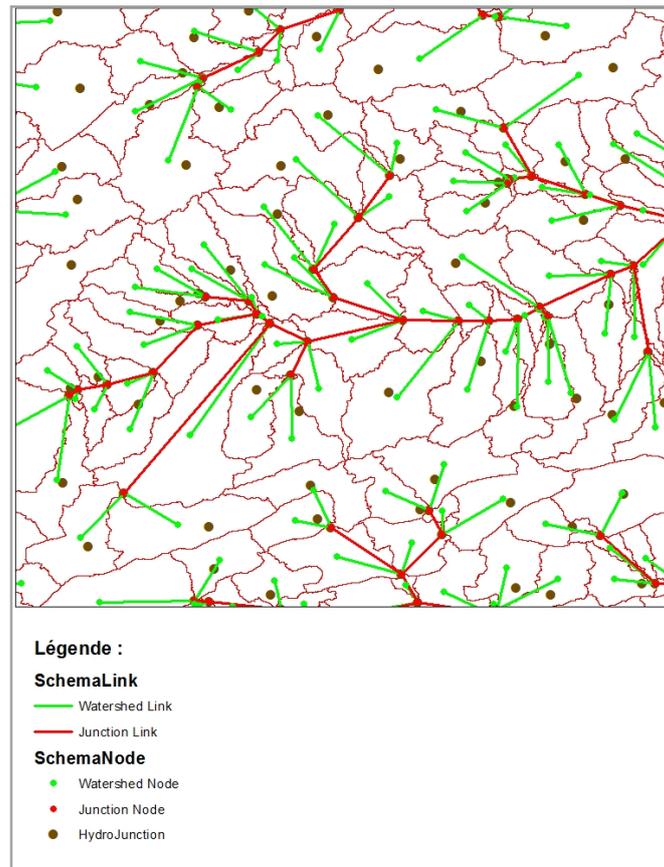


Figure 35 : Résultat de l'outil Node/Link Schema Generation

A-4- Ordre de Drainage

La hiérarchisation d'écoulement est une méthode d'attribution d'un ordre numérique aux liaisons d'un réseau hydrographique. Cet ordre est un moyen qui permet d'identifier et de classer des types de cours d'eau en fonction de leur nombre d'affluents. Certaines caractéristiques de cours d'eau peuvent être trouvées, sans difficultés, d'après leur ordre.

Pour savoir l'ordre du réseau hydrographique on applique l'outil Ordre d'écoulement (Stream Order).

Il existe deux méthodes de classification associées à l'outil Stream Order :

– *Méthode de Strahler*

Dans cette méthode, toutes les liaisons sans affluents sont classées avec la valeur 1 et sont connus sous le nom du premier ordre. L'ordre d'écoulement augmente lorsque des cours d'eau du même ordre se croisent. L'intersection de deux liaisons de premier ordre crée donc une liaison de deuxième ordre. Dans le secteur de la Haute Moulouya, cette méthode montre que l'ordre le plus élevé est l'ordre 3 (figure 35).

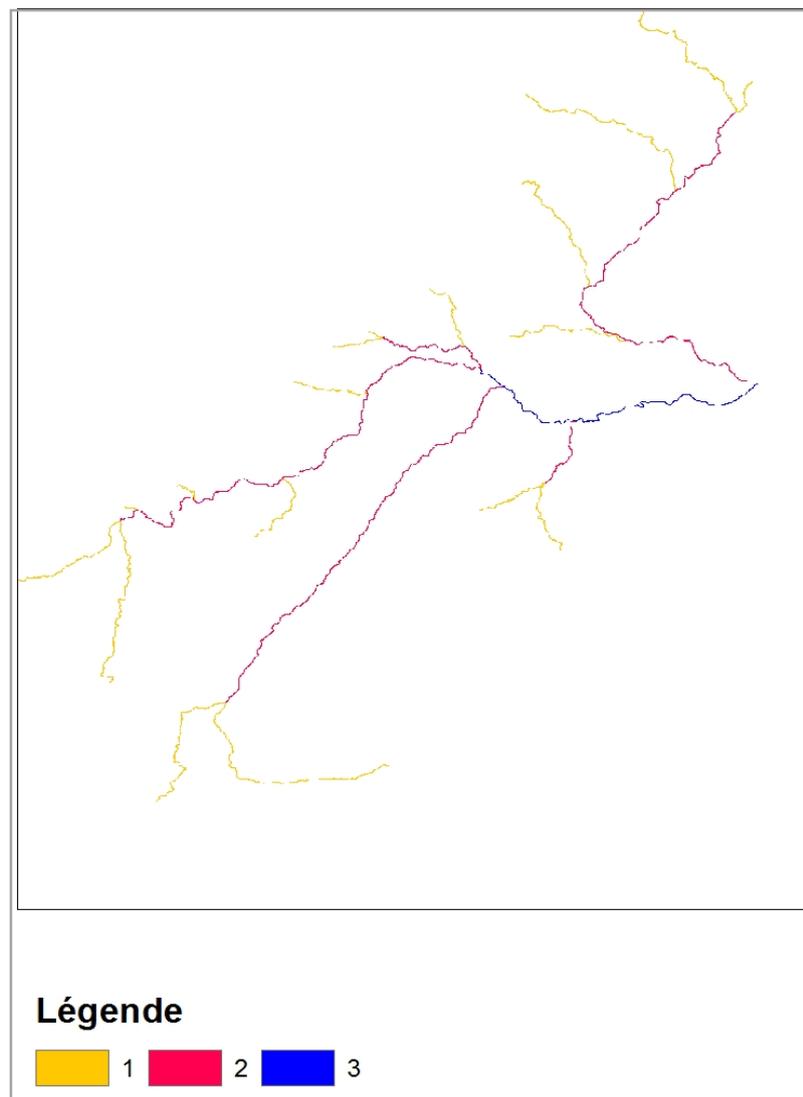


Figure 36 : Résultat de l'outil stream order par la méthode de Strahler, l'ordre le plus élevé (numéro 3) est colorié en Bleu

– *Méthode de hiérarchisation de Shreve*

La méthode de Shreve tient compte de l'ensemble des liaisons du réseau. Comme avec la méthode de Strahler, toutes les liaisons externes sont associées à un ordre 1. Toutefois, les liaisons internes dans le cadre de la méthode de Shreve s'additionnent. Par exemple, l'intersection de deux liaisons de premier ordre crée une liaison de deuxième ordre, l'intersection d'une liaison de premier ordre et d'une liaison de deuxième ordre crée une liaison de troisième ordre et ainsi de suite. Dans le secteur de la Haute Moulouya, cette méthode montre que l'ordre le plus élevé est l'ordre 28 (figure 36).

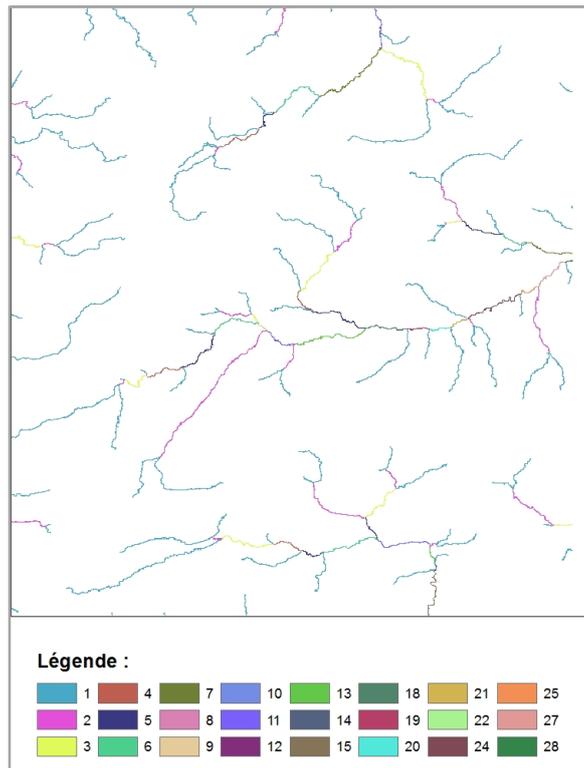


Figure 37 : Résultat de l'outil stream order par la méthode de Shreve

II. Application d'ArcHydro Groundwater pour la modélisation hydrogéologique

A- Généralités

Archydro groundwater est un modèle de données et une suite d'outils de géotraitement des nappes phréatiques.

Archydro Grandwater (AHGW) est une conception de géodatabase pour représenter les ensembles de données des eaux souterraines dans ArcGIS. Il facilite l'archivage, l'affichage et l'analyse des données multidimensionnelles des eaux souterraines, et comprend plusieurs composantes pour représenter les différents types de jeux de données, y compris les représentations des aquifères et les puits / forages, des modèles hydrogéologiques 3D, des informations temporelles et des données provenant de modèles de simulation.

Les outils d'Archydro groundwater contribuent à importer, éditer et gérer les données des eaux souterraines stockées dans une géodatabase (figure 37). Ils permettent de gérer les données hydrogéologiques 2D et 3D, et créer des modèles de subsurface y compris la production de représentations de forage, des coupes, des surfaces et des volumes.



Figure 38 : Interface de la boîte à outils d’ArcHydro Groundwater d’ArcGIS

Le modèle de données d’ArcHydro Groundwater (figure 38) présente quatre sous-groupes d’informations disposées dans les ensembles de données de fonctionnalités et catalogues d’images. Il s’agit notamment de l’hydrogéologie, la modélisation, GeoRasters et Série Raster. Il enregistre les liens hydrogéologiques unitaires de la table des représentations spatiales et les propriétés de chaque unité. Il représente, en plus des caractéristiques spatiales, des informations temporelles en utilisant le composant de séries chronologiques du modèle ArcHydro.

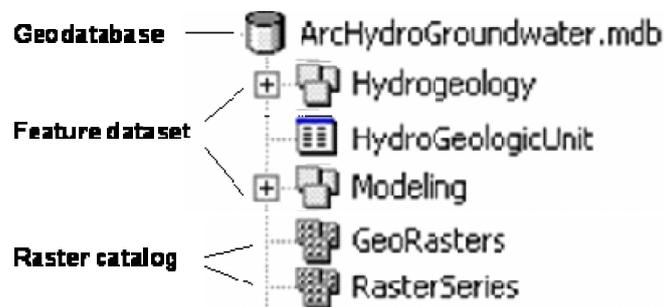


Figure 39 : Modèle de données d’ArcHydro Groundwater

Dans ce chapitre, nous allons apprendre à créer des sections en combinant des données provenant de différentes sources, y compris des cartes géologiques, des surfaces et la stratigraphie des sondages.

Le but de ce travail est d'introduire l'utilisation des SIG dans les études des eaux souterraines. Nous allons afficher les aquifères et des emplacements de puits du bassin de la Haute Moulouya, créer la surface piézométrique des aquifères, et procéder à l'analyse des eaux souterraines.

B- Application

Modification des propriétés du MNT de la Haute Moulouya (Figure 39)

Il s'agit de la définition du système de projection et l'étendu de la zone d'étude et la résolution spatiale souhaitée pour l'édition du modèle numérique de terrain. Les figures 40 et 41 montrent les résultats obtenus.

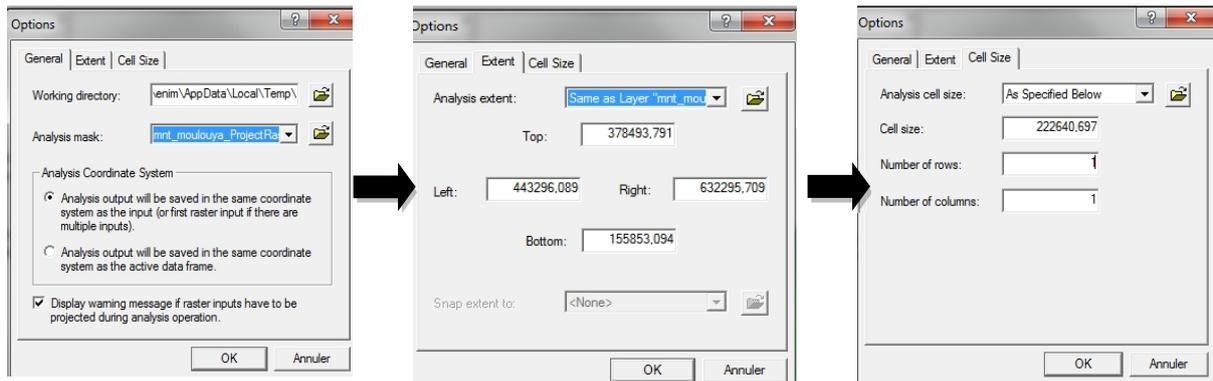


Figure 40 : Etapes pour la précision des données en entré du MNT sous Spatial Analyst

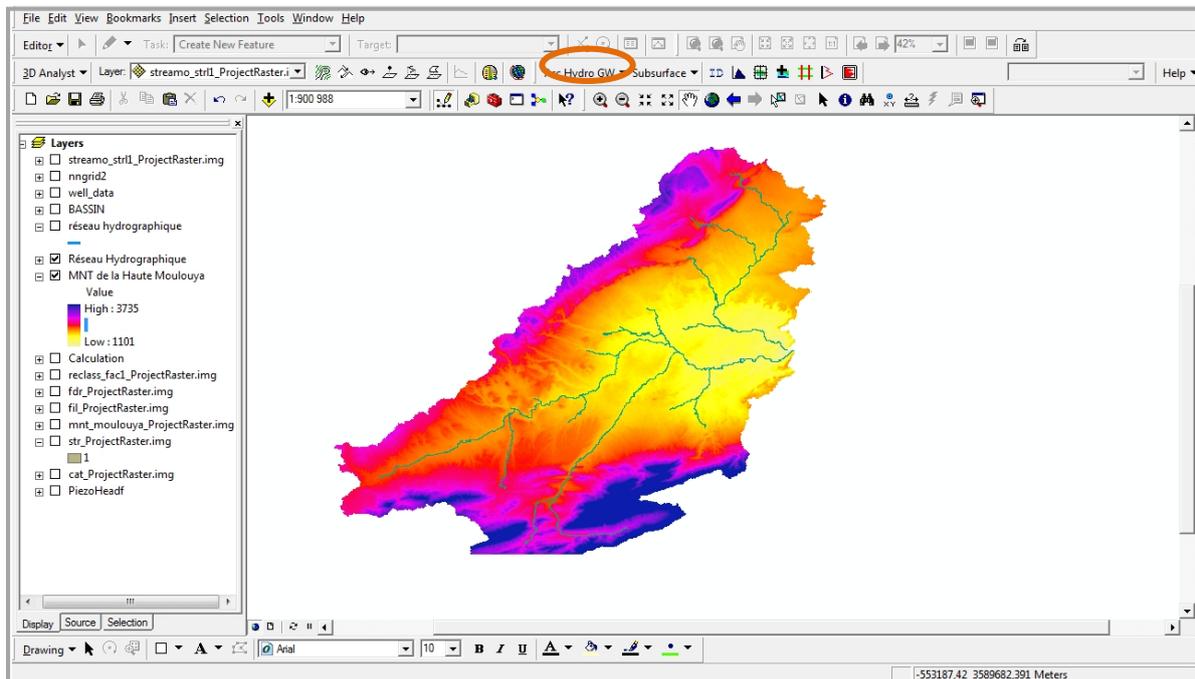


Figure 41 : MNT centré sur le bassin de la Haute Moulouya

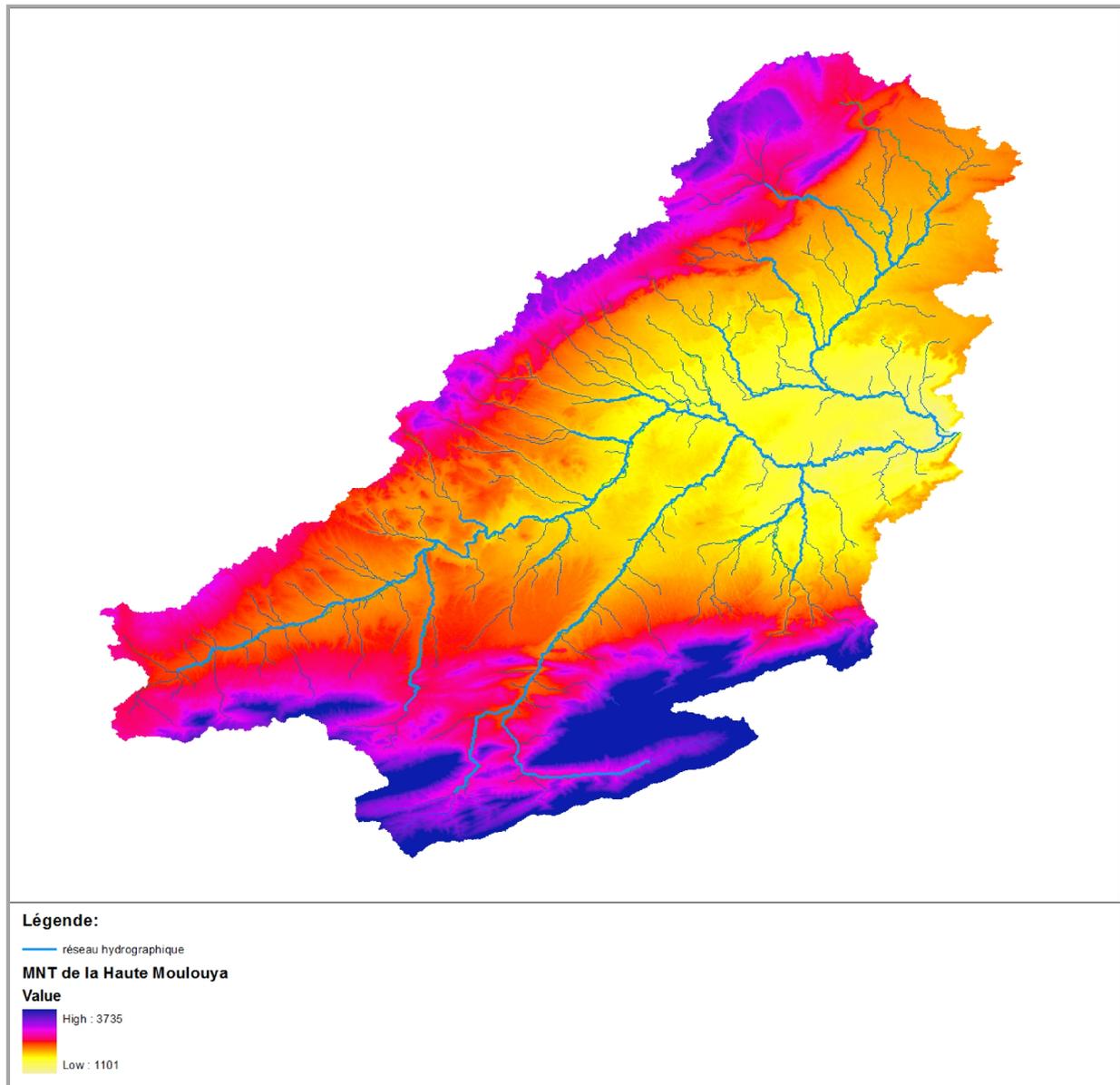


Figure 42 : superposition du réseau de drainage déduit des outils d'ArcHydro sur le MNT du bassin de la Haute Moulouya

C- Création de la surface piézométrique

Dans cet axe on va créer une surface piézométrique de l'aquifères de la Haute Moulouya par interpolation des niveaux d'eau enregistrés aux différents puits. On peut alors comparer la surface piézométrique à un modèle numérique d'élévation pour essayer de trouver des domaines de décharge des potentiels des aquifères. La figure 42 montre une superposition des deux couches « limite du bassin » et « surface piézométrique » du bassin de la Haute Moulouya.

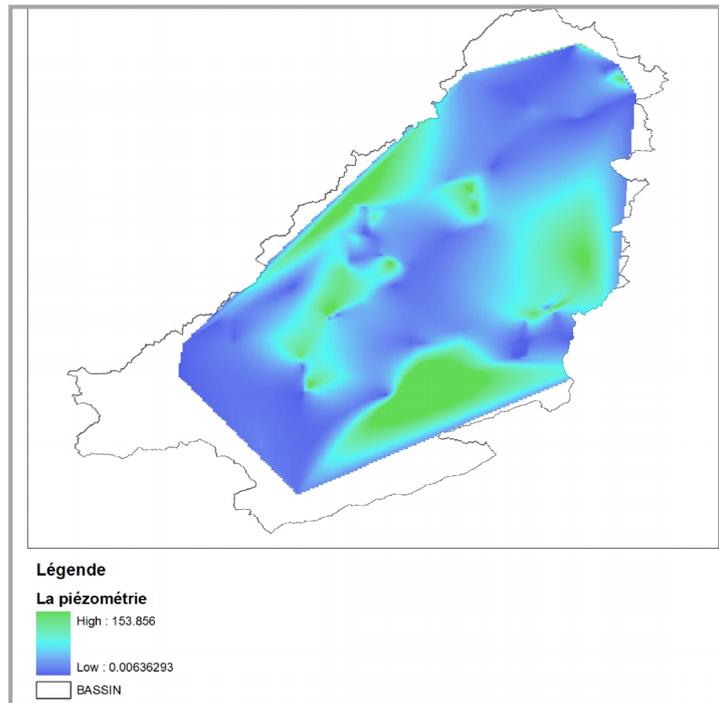


Figure 43 : Surface piézométrique centrée sur le bassin de la Haute Moulouya

D- Edition des résultats sous ArcScene d'ArcGIS

ArcScene est une application de visualisation 3D qui permet de superposer et consulter les données SIG en trois dimensions. Les données sur les hauteurs sont extraites à partir de la géométrie et des attributs d'entité, des propriétés de la couche ou d'une surface 3D définie, et chaque couche dans la vue 3D peut être gérée différemment.

Superposition du réseau hydrographique avec le MNT (Figure 43)

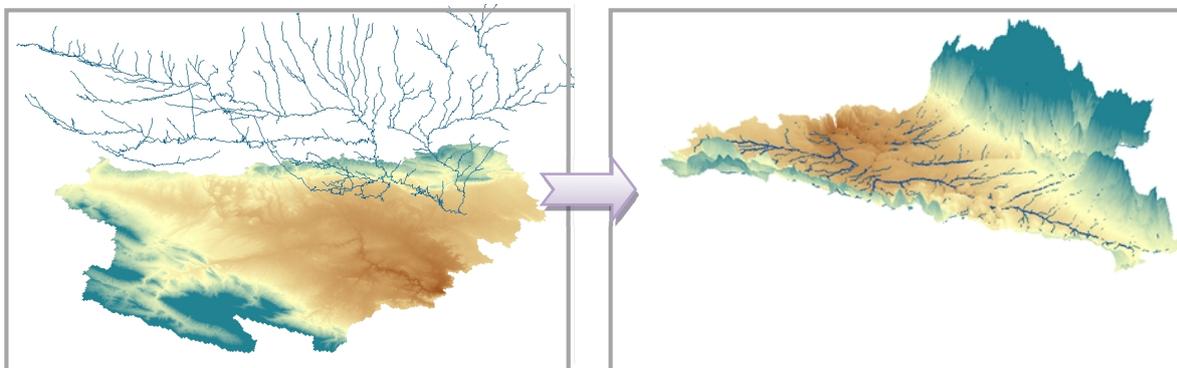


Figure 44 : superposition du réseau de drainage déduit des outils d'ArcHydro sur le MNT du bassin de la Haute Moulouya sous ArcScene

Affichage du MNT et la surface piézométrique du bassin de la Haute Moulouya (Figure 44)

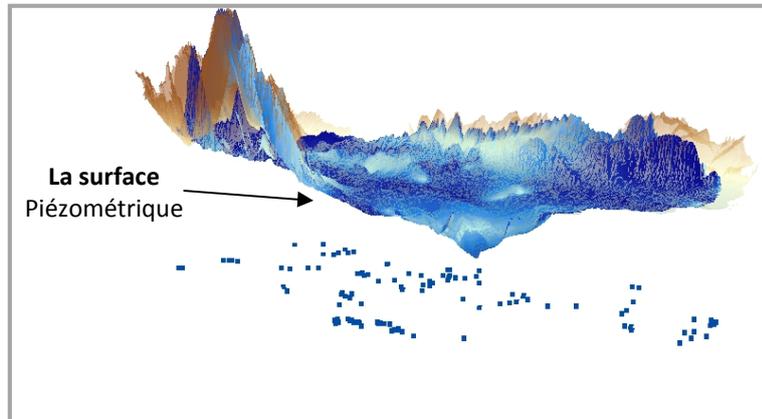
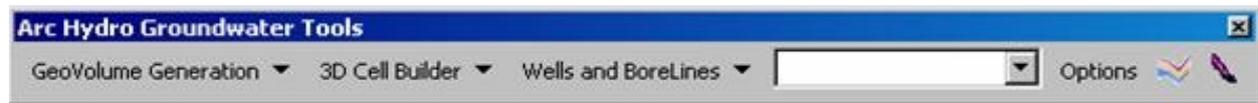


Figure 45 : Vue 3D du MNT et la surface piézométrique sous ArcScene

E- Outils d'ArcHydro Groundwater dans ArcScene :

Pour les applications d'ArcHydro Groundwater, la barre suivante doit apparaitre dans ArcScene



ArcScene nous permet de modifier l'extrusion des objets vectoriels, les points deviennent des lignes, les lignes deviennent des polygones et polygones deviennent des volumes. Pour la couche des forages, la source qui fourni plus d' l'information sur l'eau souterraine. Les tables attributaires décrivent les puits, le niveau de l'eau et parfois les propriétés chimiques de l'eau ainsi indexé par heure. La figure suivante montre les forages en 3D

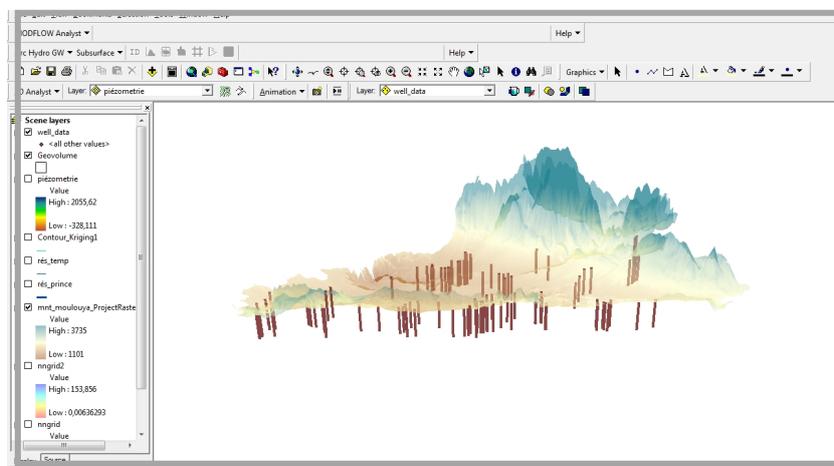


Figure 46 : Vue 3D du MNT et les forages du bassin de la Haute Moulouya sous ArcScene