



**Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et  
Techniques

**Modélisation spatiale des données hydrologiques et hydrogéologiques  
du bassin de la Haute Moulouya, Application de Geodatabae, d'Arc  
Hydro et d'ArcHydro Groundwater**

**Présenté par:**

**DIANI Khadija**

**Encadré par:**

- Mr. Abderrahim LAHRACH, FST, Fès
- Mr. Mohammed HILALI, FST, Erachidia

**Soutenu Le 22 Juin 2013 devant le jury composé de:**

- Mr. Abderrahim LAHRACH
- Mr. Mohammed HILALI
- Mr. Hassan TABYOUI
- Mr. Lahcen BENAABIDATE
- Mr. Abdel-Ali CHAOUNI

**Stage effectué à : la Faculté des Sciences et Techniques, Fès**

---

## Dédicace

---

*A la source de tendresse, à celle qui a apporté la torche du sacrifice pour éclairer mon chemin, à celle qui a fortifié ma volonté, qui m'a consolidé, et qui lève ses mains à chaque prière pour me souhaiter la réussite et le bonheur, Sans elle rien n'aurais pu être fait*

***À ma douce mère.***

*A mon père que Dieu le garde dans sa sainte miséricorde*

*A mes chers frères*

*A mes gracieuses sœurs*

*A mes nièces et neveux*

*A ma famille **DIANI***

*A toute ma famille **Hachimi Alaoui***

*A tous ceux qui me sont chers*

*A tous mes amis sans exception.*

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime,

Je dédie ce modeste travail

*Khadija*

## Avant-propos

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation du Projet de Fin d'études du Master intitulé « Hydrologie de Surface et Qualité des eaux » à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès-Sais.

Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce sujet de Master.

En premier lieu, j'exprime ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mes deux encadrant de ce sujet, **Mr. Abderahim LAHRACH** Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences et Techniques et responsable de Master Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux., Université Sidi Mohammed Ben Abdellah à Fès, Je le remercie infiniment pour la qualité de son encadrement ,qualité des programmes choisis, le haut niveau de la formation, et aussi sur la bonne gestion et la cohérence de ce cursus, et **Mr. Mohammed HIILALI** , Professeur de l'Enseignement Supérieur à la faculté des sciences et Techniques ,Errachidia, Université My Ismail, Meknès, pour son soutien et la qualité de son encadrement et pour l'ensemble des connaissances et la documentation qui m'a fourni tout au long de la réalisation de ce travail.

Je voudrais par la même occasion adresser mes chaleureux remerciements à **Mr .Hassan .TABYAOUI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté poly-disciplinaire de Taza, pour son aide, son soutien et pour ses conseils pertinents et qui m'ont aidé à réaliser mon projet.

Mes remerciements s'adressent également aux professeurs qui ont assuré la formation de master hydrologie de surface et qualité des eaux à la FST de Fès.

Je tiens à remercier Messieurs **Haytam MESRAR, Omar El AROUSSI, Mustafa OUARH, Firdous LAKHILI, Mouloud OUNNIS et Fatima Zahra FAQIHI**, pour l'aide précieux qu'ils ont déployé à mon égard, pour les conseils judicieux qu'ils m'ont prodigué.

Je n'oublie pas dans ces remerciements tous mes amis de Master, pour leur soutien, leur aide et pour leur ambiance agréable dans laquelle s'est déroulé ce travail, leur

sympathie et leur soutien durant tous ces mois de recherche spécialement Ouissam EL BOTI, Najlae Ibtihal Fahli, Sidi ould Neh, chaimae khaissidi ,Majda El hamdani...

J'adresse mes très chaleureux remerciements à ma mère pour son soutien moral et matériel durant toutes ces années de Master. Elle m'a permis d'envisager tous les obstacles, de me soutenir dans les moments de découragement et de faire avancer mon travail en toute sérénité, Mon vocabulaire est trop limité pour exprimer son importance dans ce travail et dans ma vie.

Je remercie enfin toutes les personnes intéressées par mon travail, en espérant qu'elles puissent trouver dans mon rapport de thèse des explications utiles.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont permis d'aller au bout de ce travail et je présente mes excuses à toutes celles que je pourrais oublier de citer dans ces quelques lignes.

Merci encore à tous.

## Sommaire

<b>Dédicace .....</b>	<b>1</b>
<b>Avant-propos .....</b>	<b>3</b>
<b>Résumé .....</b>	Erreur ! Signet non défini.
<b>Liste des figures .....</b>	<b>8</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>9</b>
<b>Liste des abréviations.....</b>	<b>9</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>10</b>
<b>Chapitre 1- Les modèles de données hydrologiques .....</b>	<b>11</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>11</b>
1. Le bassin versant : un cadre physique .....	11
2. Le modèle hydrologique : .....	12
3. La modélisation hydrogéologique .....	12
4. Modélisation spatiale et SIG .....	13
<b>II. Le système d'information hydrologique ArcHydro d'ESRI : .....</b>	<b>13</b>
<b>III. Les atouts d'ArcHydro d'ESRI : .....</b>	<b>14</b>
<b>IV. Types de données SIG utilisées par le modèle de données ArcHydro .....</b>	<b>18</b>
<b>Chapitre 2 : Etude de la zone d'étude la Haute Moulouya .....</b>	<b>19</b>
<b>I. Secteur d'étude : .....</b>	<b>19</b>
1. Contexte géographique.....	19
2. Climatologie.....	20
3. Géologie de la Haute Moulouya .....	23
<b>Chapitre 3 : Modélisation hydrologique et hydrogéologique du bassin de la Haute Moulouya .....</b>	<b>31</b>
<b>I. Application d'ArcHydro pour la modélisation hydrologique :.....</b>	<b>31</b>
A- Outils Arc-Hydro .....	31
<b>II. Application d'ArcHydro Groundwater pour la modélisation hydrogéologique.....</b>	<b>48</b>
A- Généralités .....	48
B- Application.....	50
C- Création de la surface piézométrique.....	51
D- Edition des résultats sous ArcScene d'ArcGIS .....	52
E- Outils d'ArcHydro Groundwater dans ArcScene : .....	53

---

<b>Conclusion générale .....</b>	<b>54</b>
<b>Les références bibliographiques .....</b>	<b>55</b>
<b>Liste des sites web visités .....</b>	<b>56</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>57</b>

## Résumé

Le développement rapide des systèmes d'informations géographiques (Archydro et ArchydroGranwater) a fortement amélioré quantitativement et qualitativement l'interprétation et l'utilisation des données spatiales dans différents sens, notamment dans le domaine de la science de la terre. En revanche l'utilisation de ces outils repose sur la connaissance préalable du terrain.

Cette étude a pour objet la synthèse des connaissances hydrologique et hydrogéologiques de la Haute Moulouya et l'élaboration d'une Geodatabase a partir de l'extension ArcHydro et ArchydroGroundWater d'un système d'information géographique (SIG).

Donc ce mémoire on a démontré en définitive la capacité des modèles hydrologiques Arc Hydro et Archydro Groundwater de 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. C'est un modèle plus précis.

Les résultats de cette étude peuvent être exploités dans n'importe quel projet qui nécessite la base de données similaire.

### **Mots clés:**

**Bassin versant, Haute Moulouya, SIG, Geodatabae, ArcHydro, et d'ArcHydro Groundwater**

## Liste des figures

Figure 1: Système de modélisation hydrologique.....	14
Figure 2: Structure de la geodatabase d'ArcHydro .....	15
Figure 3 : Modèle spatial d'ArcHydro.....	16
Figure 4 : Composantes de bassin de drainage.....	17
Figure 5 :Langage UML des entités hydrogéologiques dans ArcHydro.....	17
Figure 6:Situation géographique de la Haute Moulouya .....	19
Figure 7 :Découpage en sous-bassins versants avec situation des stations hydrologiques .....	20
Figure 8 : courbes montrant la variation des Précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la Haute Moulouya.....	21
Figure 9 : Diagramme montrant la variation de la température dans la Haute Moulouya .....	22
Figure 10 :Carte géologiques du bassin de la Haute Moulouya (d'après la carte géologique du Maroc au 1/500000) .....	26
Figure 11 : Coupe du bassin de la Haute Moulouya à l'Ouest du dôme de Bou Mia (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943).....	28
Figure 12 : Coupe à travers le dôme de Bou Mia (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943) .....	28
Figure 13 : Coupe à travers le dôme d'Aouli (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943) .....	29
Figure 14 : Coupe à travers la plaine d'Enjil (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943) .....	30
Figure 15 :Coupe à travers Jbel Ayachi (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943).....	30
Figure 16 : Outils de base d'ArcHydro.....	32
Figure 17 : Principe de l'outil direction du courant (Flow Direction).....	33
Figure 18 : Résultat de l'outil Flow Direction .....	34
Figure 19 : Principe de l'outil Accumulation de flux (Flow Accumulation) .....	34
Figure 20 : Résultat de l'outil Flow Accumulation. On trouve Oued Moulouya en bleu .....	35
Figure 21 : Résultat de l'outil Stream Définition .....	35
Figure 22 : Résultat de l'outil Stream segmentation.....	36
Figure 23 : Résultat de l'outil Catchment Grid Delineation .....	36
Figure 24 : Résultat de l'outil Catchment Polygon Processing.....	37
Figure 25 : Résultat de l'outil Catchment Polygon Processing.....	37
Figure 26 : Résultat de l'outil Adjoint Catchment Processing.....	38
Figure 27 : Résultat de l'outil Drainage point Processing.....	39
Figure 28 : Résultat de l'outil Longest Flow Path For Catchments.....	40
Figure 29 : Résultat de l'outil Longest Flow Path For Adjacent Catchments .....	41
Figure 30 : Résultat de l'outil Slop greater than 30.....	42
Figure 31 : Résultat de l'outil Batch Watershed Delineation .....	43
Figure 32 : Résultat de l'outil Drainage Area Centroid.....	44
Figure 33 : Résultat de l'outil Longest Flow Path .....	44
Figure 34 : Résultat de l'outil Hydro Network Generation.....	45
Figure 35 : Résultat de l'outil Node/Link Schema Generation.....	46
Figure 36 : Résultat de l'outil stream order par la méthode de Strahler, l'ordre le plus élevé (numéro 3) est colorié en Bleu.....	47
Figure 37 : Résultat de l'outil stream order par la méthode de Shreve.....	48
Figure 38 : Interface de la boîte à outils d'ArcHydro Groundwater d'ArcGIS.....	49
Figure 39 : Modèle de données d'ArcHydro Groundwater.....	49
Figure 40 : Etapes pour la précision des données en entrée du MNT sous Spatial Analyst .....	50
Figure 41 : MNT centré sur le bassin de la Haute Moulouya .....	50
Figure 42 : superposition du réseau de drainage déduit des outils d'ArcHydro sur le MNT du bassin de la Haute Moulouya .....	51
Figure 43 : Surface piézométrique centrée sur le bassin de la Haute Moulouya .....	52

---

Figure 44 : superposition du réseau de drainage déduit des outils d'ArcHydro sur le MNT du bassin de la Haute Moulouya sous ArcScene .....	52
Figure 45 : Vue 3D du MNT et la surface piézométrique sous ArcScene .....	53
Figure 46 : Vue 3D du MNT et les forages du bassin de la Haute Moulouya sous ArcScene .....	53

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la Haute Moulouya .....	21
Tableau 2 : variation de la température dans la période de 30 ans.....	22
Tableau 3 : Evaporation moyenne annuelle (mm) .....	23

### Liste des abréviations

- SGBD** : système de gestion de base de données  
**SIG** : système d'information géographique  
**UML** : langage de modélisation unifié  
**MNT** : Modèle numérique du terrain  
**CRWR** : Centre de recherche sur les ressources en eau  
**AHGW** : ArcHydro Groundwater

## Introduction générale

L'analyse spatiale et la modélisation spatio-temporelle visent à formaliser, sur la base de données et de connaissances, les caractéristiques spatiales et les dynamiques spatio-temporelles des systèmes (écosystèmes, systèmes agricoles, territoires...). Sur cette base peuvent être construits des représentations et des modèles de ces systèmes, utilisables à des fins de connaissance et de gestion.

La modélisation pose le problème de la représentation de l'information nécessaire à la décision. L'information, liée à une ressource naturelle comme l'eau, est caractérisée par une variabilité des données spatiales, une connaissance qualitative et quantitative des phénomènes et par des interactions fortes entre les éléments de l'hydrosystème.

L'objectif de ce mémoire est de démontrer l'intérêt de la modélisation spatiale, de définir une méthodologie pour la gestion des ressources en eau, et de montrer l'intérêt des SIG pour construire un ensemble de données qui peuvent être intégrés aux modèles des ressources en eau et peuvent contribuer au dialogue entre les scientifiques, les techniciens et les décideurs.

Pour le faire le présent mémoire est subdivisé en trois parties :

- La première partie est relative à la définition des modèles de données hydrologiques.
- La deuxième partie discute la modélisation hydrologique (combinaison des données géographiques, géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques) nécessaires pour créer des unités hydrologiques homogènes intégrées dans le modèle ArcGis (Application d'ArcHydro, et d'ArcHydro Groundwater), pour faire une synthèse au bassin, au réseau hydrographique et aux principaux aquifères du bassin versant.
- La troisième partie consiste à exploiter les résultats de la modélisation hydrologique et hydrogéologique du bassin de la Haute Moulouya, par l'application d'ArcHydro et d'ArcHydro Groundwater sachant que la base de données est développée en parallèle avec ces modèles.

-

## Chapitre 1- Les modèles de données hydrologiques

### I. Introduction

#### 1. Le bassin versant : un cadre physique

Le concept de bassin versant « surface drainée par un cours d'eau, en amont d'un point définissant son exutoire » s'impose dans la communauté scientifique comme l'unité fonctionnelle d'étude du cycle de l'eau et des flux associés (énergie, matière). Le terme de bassin versant englobe, de par sa définition, des objets spatiaux de tailles très différentes depuis quelques hectares à quelques millions de km<sup>2</sup>.

D'après Ambroise (1991), le bassin versant est un espace géographique collectant les précipitations en amont d'un point de la rivière définissant son exutoire.

C'est aussi, sur cette entité physique que les hydrologues cherchent à comprendre le cycle de l'eau et des flux associés pour mieux les reproduire. Les petits bassins facilitent la mise en évidence des processus élémentaires, les grands intègrent la globalité des processus.

A partir de la définition du bassin versant proposée, il est évident que c'est une unité spatiale dont les limites correspondent à des lignes de crête. Son tracé commence par l'exutoire et suit les points les plus élevés jusqu'à fermeture du circuit. Or, il peut exister des interactions entre la surface et le sous-sol. Les limites déduites de la topographie peuvent ne plus correspondre aux limites fonctionnelles du bassin.

De nombreuses études de terrain, conduites à l'échelle du versant ou des petits bassins versants, ont apporté une bien meilleure compréhension des cheminements de l'eau, qui à son tour a permis, grâce aux progrès concomitants des moyens informatiques, le développement d'une nouvelle génération de modèles dits distribués ou spatialisés. Contrairement aux modèles globaux, ceux-ci appréhendent le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant en tentant de représenter les processus du ruissellement dans l'espace.

## **2. Le modèle hydrologique :**

Un modèle est une représentation schématique d'un processus, d'une démarche raisonnée réalisée afin de pouvoir mieux étudier celui-ci (Petit Larousse 2002). Cette représentation plus ou moins conceptuelle doit simuler la réponse de ce système à une série de sollicitations. En eaux souterraines, le système en question est un système hydrogéologique.

Le modèle hydrologique est un modèle conceptuel dans le sens où le concept est la représentation générale et abstraite d'un objet ou d'un ensemble d'objets, il se définit selon sa compréhension et selon son extension (Petit Larousse 2002).

La complexité du fonctionnement du bassin versant justifie l'approche systémique qui offre une grille d'analyse des interactions fonctionnelles, spatiales et temporelles propres aux systèmes. Cette approche permet d'analyser l'intensité et la combinaison des processus actifs en fonction des variables d'entrée, des variables d'état et des propriétés hydrologiques des différentes unités de milieu.

## **3. La modélisation hydrogéologique**

Elle consiste à reproduire à l'aide de modèles mathématiques ou numériques l'écoulement des eaux souterraines et la migration des polluants dans les sols et les eaux. Elle permet de simuler le comportement des nappes d'eaux souterraines, par exemple, sous l'effet de contraintes, et les phénomènes complexes de transport de polluants.

La modélisation hydrologique et hydrogéologique est un outil largement utilisé dans de nombreux problèmes pratiques :

- Eau potable et industrielle – Gestion de ressources en eau
- Évaluation du potentiel de captage ;
- Dimensionnement d'ouvrages de captage et d'approvisionnement en eau ;
- Optimisation d'exploitation de puits de pompage, de champs captant ;
- Prédiction d'exploitation dans le temps, gestion de la ressource ;

A partir des années 1980, les hydrologues et les hydrogéologues ont utilisé des modèles de plus en plus diversifiés pour répondre au mieux à des demandes variées. Des modèles spatiaux combinant les écoulements souterrains et ceux de surface, ont amélioré la connaissance de la ressource en eau à l'échelle d'un bassin comme d'une région.

#### **4. Modélisation spatiale et SIG**

Un système d'information géographique (SIG) offre une méthode efficace pour la gestion, la visualisation et l'édition des données spatiales. L'hydrologie est l'étude du mouvement de l'eau sur toute la terre, et il est généralement de nature spatiale. Par conséquent, la fusion de l'hydrologie avec le SIG est un objectif naturel pour de nombreux analystes des bassins versants. Au cours de la dernière décennie, cet objectif a été prouvé à la fois possible et efficace pour une variété d'analyses, y compris l'étude des inondations, des études de qualité de l'eau et la gestion des droits d'eau.

Un système d'information géographique de type hydrologique résulte de la synthèse des séries chronologiques, les données géospaciales (données SIG), la modélisation et l'analyse hydrologique (Maidment, 2002). Il est important de réaliser qu'un tel système contient deux types de modèles. Un «modèle de données» est utilisé pour stocker des données importantes de la série géospatiale et l'heure dans un cadre normalisé et un «modèle de calcul» (ou «modèle de simulation») contient les algorithmes nécessaires pour simuler les processus naturels.

Par conséquent, un système d'information hydrologique combine les capacités prédictives d'un modèle de calcul avec les capacités de gestion de données d'un modèle de données.

#### **II. Le système d'information hydrologique ArchHydro d'ESRI :**

ArchHydro, qui a été développé par le Centre de recherche sur les ressources en eau (CRWR) à l'Université du Texas à Austin, est un modèle de données pour stocker des données hydrologiques géospaciales (Figure 1). Ce modèle de données « *normalisé* » est important car il permet « *l'interopérabilité* » entre les différentes agences de l'eau, et il fournit un cadre autour duquel des programmes de calcul futurs peuvent être conçus. Par conséquent, de nombreuses agences hydrauliques sont maintenant intéressées à convertir leurs données sur les ressources en eau dans une forme compatible ArchHydro.

On utilise ArcHydro 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.

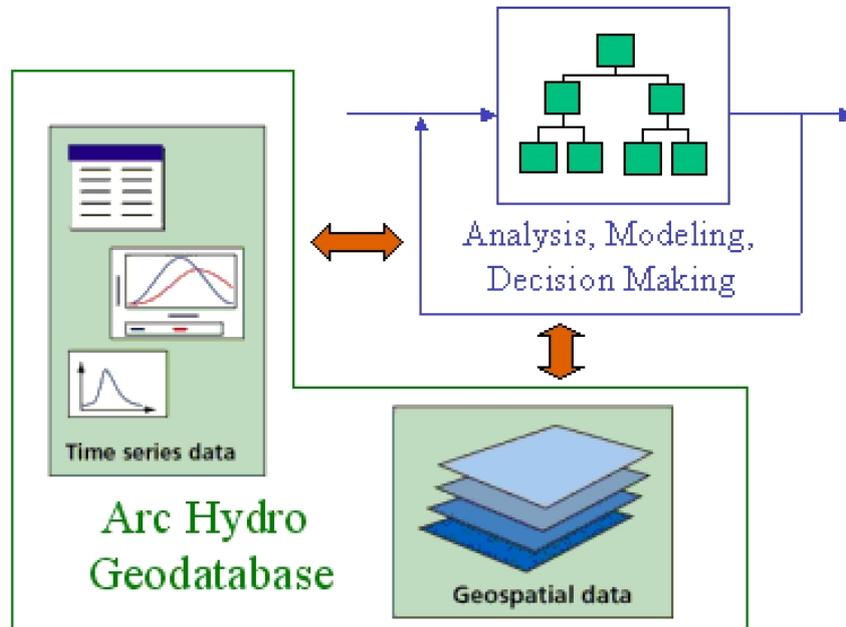


Figure 1: Système de modélisation hydrologique

### III. Les atouts d'ArcHydro d'ESRI :

ArcHydro est un modèle de données géospatiales et temporelles SIG qui peut être utilisé pour conserver les données sur les ressources en eau, nécessaires pour la modélisation et l'analyse hydrologique (Maidment 2002). En général, ArcHydro a été créé avec trois composantes principales (Obenour et Maidment, 2004) :

1. Un format normalisé pour stocker des données hydrologiques géospatiales et temporelles ;
2. Relations logiques entre les données représentées par des entités géospatiales basées sur les principes hydrologiques ;
3. Un ensemble d'outils pour créer, manipuler et visualiser des données hydrologiques.

Les deux premiers de ces composants ont été créés en utilisant le langage de modélisation unifié (UML) pour concevoir une Geodatabase "ArcHydro" standard. La Geodatabase d'ArcHydro comprend un certain nombre de tableaux qui représentent différents thèmes hydrologiques (figure 5).

Les tables qui représentent des entités spatiales, telles que les bassins versants et des points de contrôle, sont appelées «classes d'entités». Les tables qui représentent des données non-spatiales, telles que les séries chronologiques, sont appelés «classes d'objets» (figure 2).

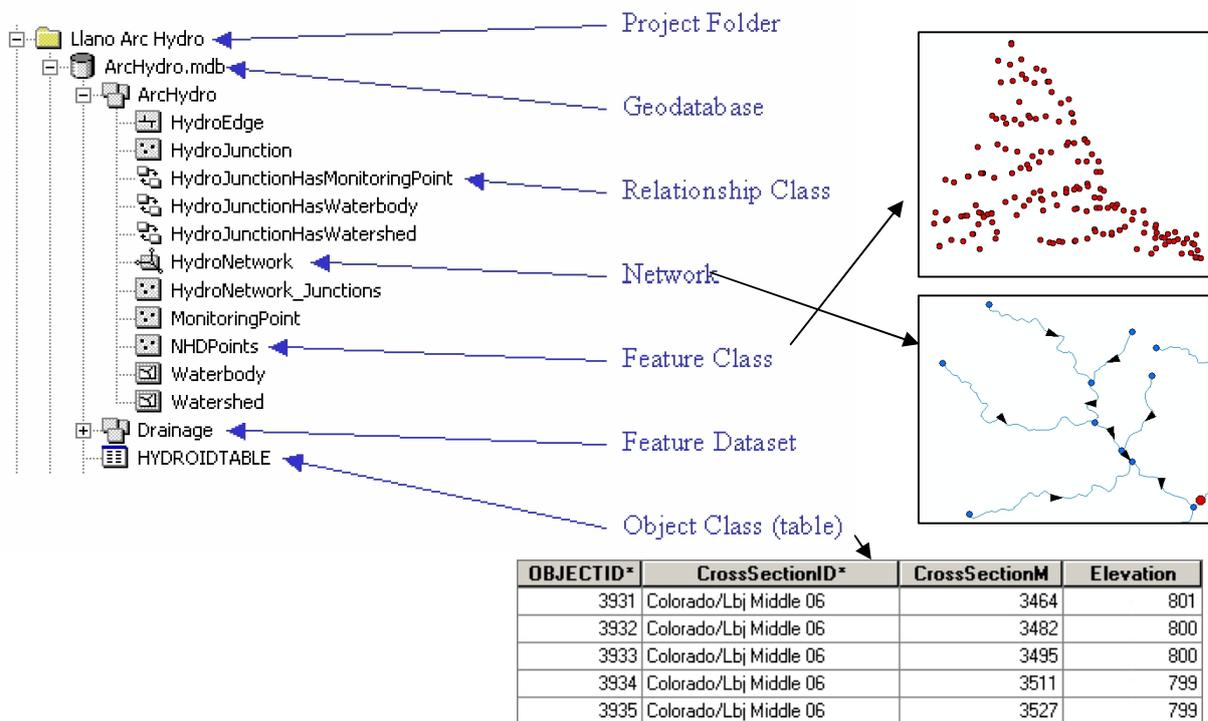
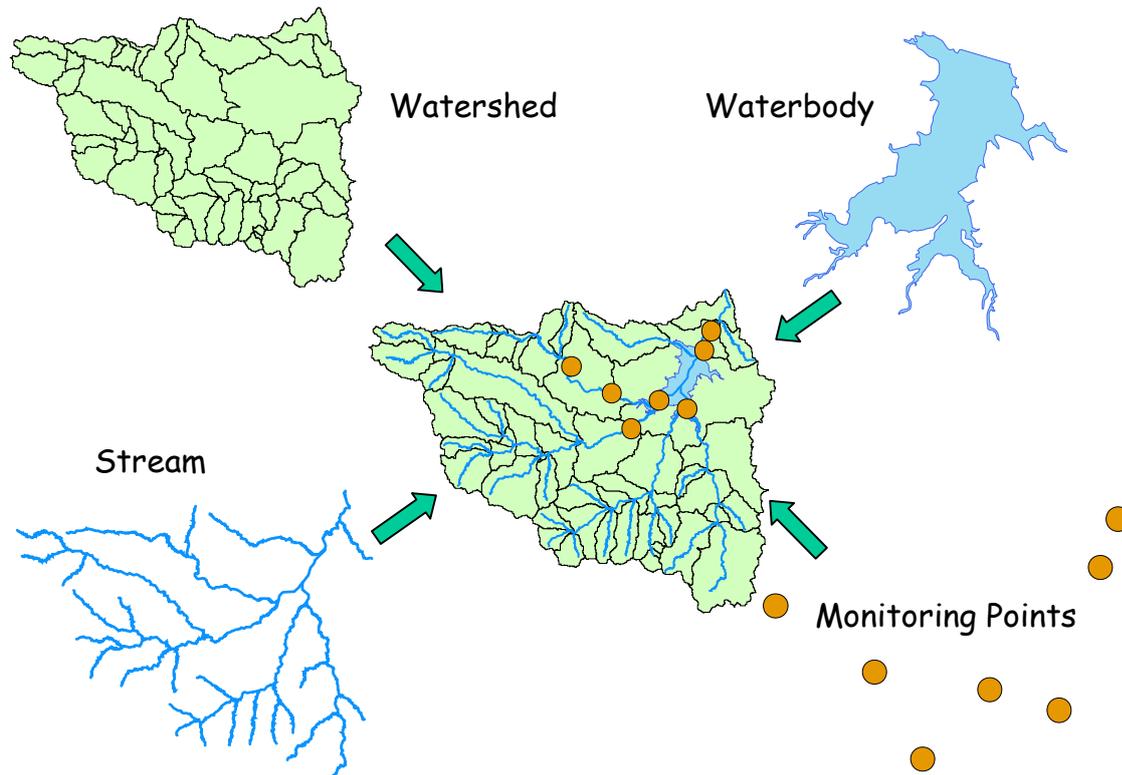


Figure 2: Structure de la Geodatabase d'ArcHydro



**Figure 3 : Modèle spatial d'ArcHydro**

Le modèle de données ArcHydro est conçu pour la manipulation d'un ensemble de données sur le cours d'eau (stream), les bassins versants (watershed), les plans d'eau (waterbody) et les points hydroélectriques (monitoring points) comme données des jauges de cours d'eau et des points de contrôle de qualité de l'eau.

Les relations entre les données de l'ArcHydro ont également été créées en utilisant le langage UML (figure 5). Ces relations sont utilisées pour associer d'autres entités hydrologiques connexes. Par exemple, un sous-bassin peut-être lié à un point de sortie (auquel le bassin draine) et une jauge de courant peut être lié à un point le long d'une rivière (Outlet, figure 4) et un ensemble de données de précipitation peut être lié à une station de jaugeage de pluie. Avec ces relations établies, l'utilisateur peut facilement demander des informations hydrologiques complémentaires.

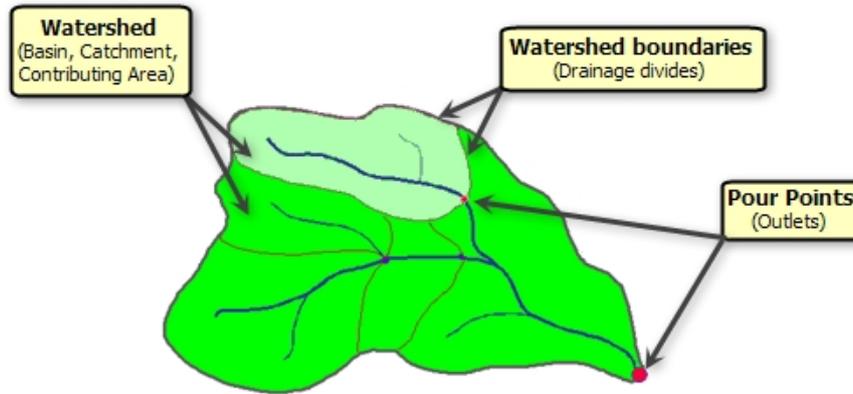


Figure 4 : Composantes de bassin de drainage

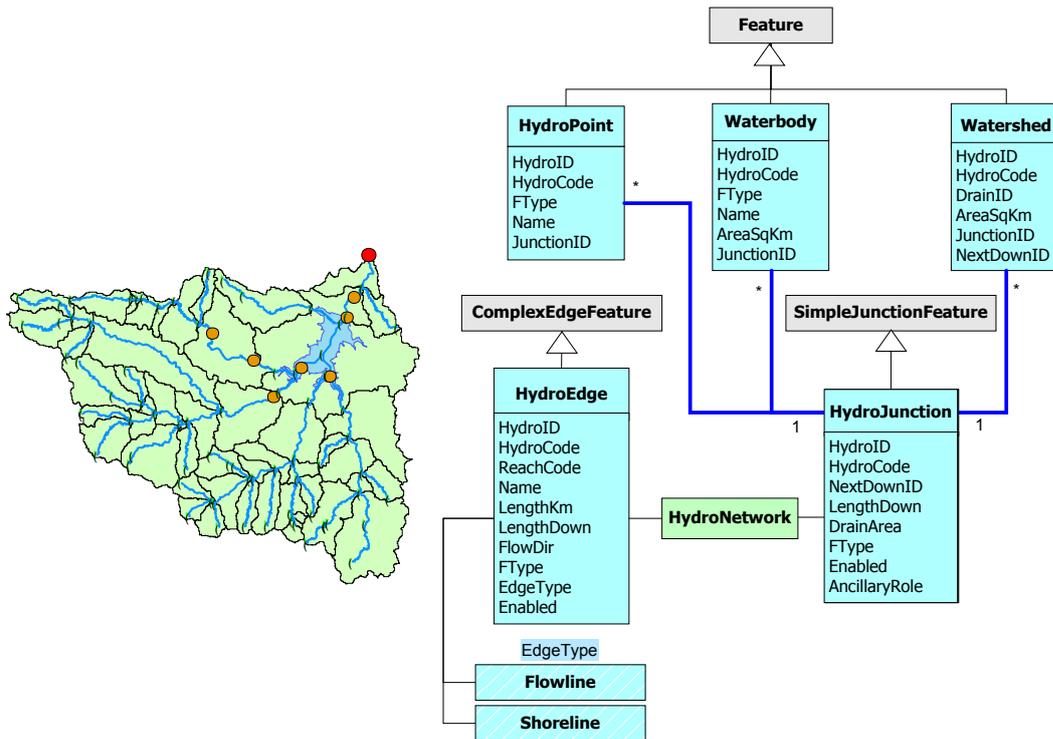


Figure 5 : Langage UML des entités hydrogéologiques dans ArcHydro

Le troisième volet d'ArcHydro est l'ArcHydro Toolset, qui s'exécute dans l'environnement ArcMap d'ArcGIS. Cet ensemble d'outils peut être utilisé pour un certain nombre de routines de traitement hydrologiques y compris le traitement raster et l'affectation des attributs

---

d'entités. En outre, ArcHydro fait usage d'un certain nombre d'autres boîtes à outils d'ESRI, y compris ArcGIS Spatial Analyst et Network Analyst.

#### ***IV. Types de données SIG utilisées par le modèle de données ArcHydro***

Les deux types les plus communs de données SIG sont les données Raster et Vecteur. Les données vectorielles incluent des points, des lignes et des polygones et leurs attributs associés. Les données au format vecteur sont idéales pour représenter le réseau hydrographique, les bassins versants et les points de contrôle. ArcHydro est constitué presque entièrement de classes d'entités (feature class), qui sont des données vectorielles. Les données rasters sont des données maillées, où chaque cellule d'une grille raster possède une valeur unique. Les données raster ne sont généralement pas considérées comme une partie du modèle de données ArcHydro. Les données raster peuvent cependant être utilisées pour générer des données vectorielles utilisées par le modèle ArcHydro. En fait, la plupart des outils ArcHydro se concentre sur l'utilisation de d'un MNT de la surface terrestre (au format raster) à générer des cours d'eau et des bassins versants pour le modèle de données.

## Chapitre 2 : Etude de la zone d'étude la Haute Moulouya

### I. Secteur d'étude :

#### 1. Contexte géographique

Le bassin hydrogéologique de la Haute Moulouya couvre 4500 km<sup>2</sup> (sur un bassin hydrographique de 7960 Km<sup>2</sup>), dont 85% de plaines et 15% de montagnes. Les altitudes moyennes, maximales et minimums sont respectivement de 1750, 1075 et 3714m. Le bassin est constitué de 6 sous-bassins qui assurent l'écoulement de l'oued Moulouya. Ce dernier prend sa source à Almsid dans la zone de jonction des deux Atlas. Son cours amont prend une direction Nord-Est bissectrice entre les directions Moyen-atlasiques NNE et Haut-atlasique ENE. Il bute contre le massif d'Aouli et fait un coude brusque vers l'Est, puis reprend la direction NNE à la sortie de ce massif où on rentre dans le cours moyen. Les affluents de la rive droite ont tous une origine haut-atlasique (O. Oudrhès, O. Ansegmir, O. Outat) et ceux de la rive gauche moyen-atlasique (O. Kiss, O. Aguersif, O. Boulajoul).

Du point de vue hydrographique, la Haute Moulouya est limitée par le bassin versant d'Oum Er-Rbia à l'Ouest et au sud-Ouest, le bassin de Sebou au Nord, la Moyenne Moulouya à l'Est et le bassin de l'Oued Guir au Sud.

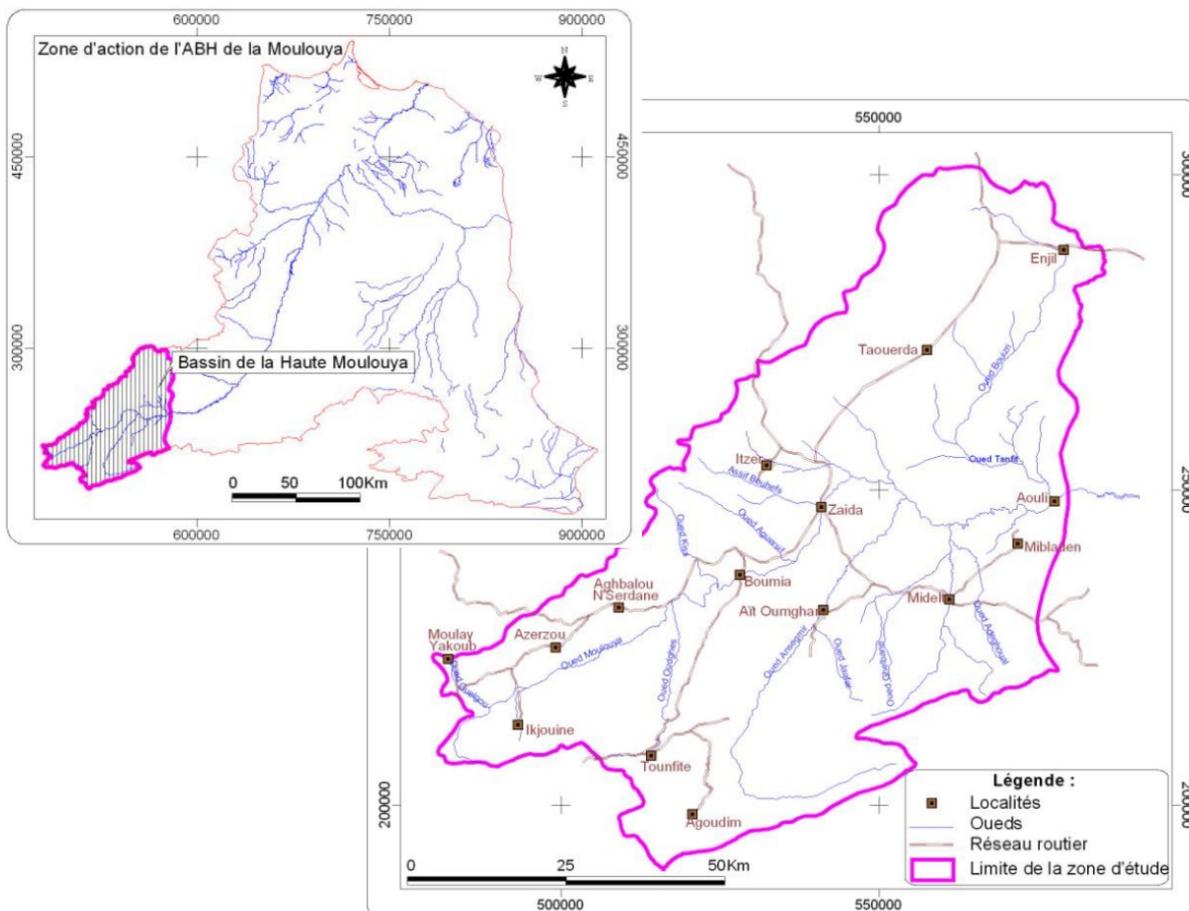


Figure 6: Situation géographique de la Haute Moulouya

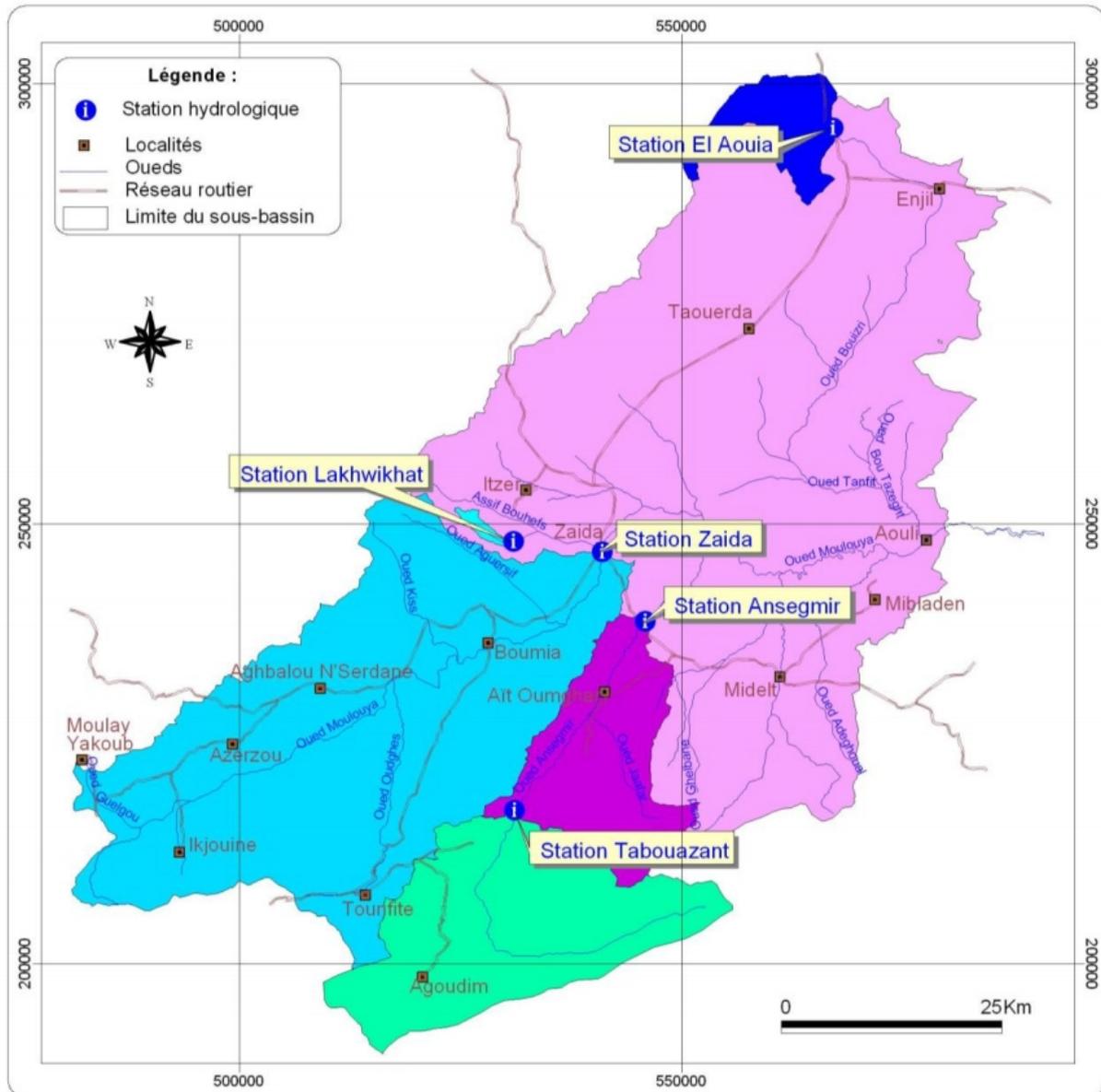


Figure 7 : Découpage en sous-bassins versants avec situation des stations hydrologiques

## 2. Climatologie

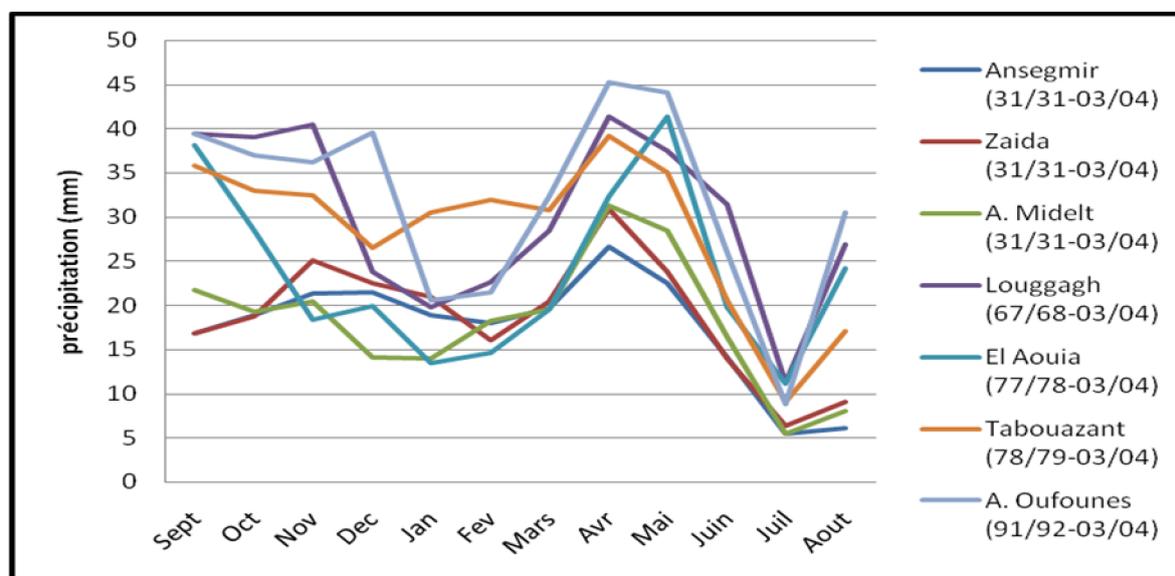
### 2.1 Les précipitations

La hauteur moyenne annuelle des précipitations est très variable sur l'ensemble du bassin et est étroitement liée à l'altitude et à l'exposition. La pluie moyenne annuelle varie en plaine entre 210 mm à l'aval (Ansegmir) et 225 mm (Zaida), et s'élève jusqu'à 379 mm (A. Oufounes) en montant sur les bordures montagneuses. La moyenne du bassin s'établit autour de 300 mm.

**Tableau 1 : Précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la Haute Moulouya**

Station et période de mesure	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
Ansegrim (31/31-03/04)	16,8	18,9	21,3	21,4	18,9	18	19,7	26,6	22,5	14,1	5,5	6,2	<b>209,8</b>
Zaida (31/31-03/04)	16,8	18,8	25,1	22,5	21	16,1	20,4	30,9	23,8	14	6,4	9,1	<b>225</b>
A. Midelt (31/31-03/04)	21,7	19,3	20,5	14,2	14	18,3	19,6	31,3	28,5	16,5	5,5	8,1	<b>217,4</b>
Louggagh (67/68-03/04)	39,4	39	40,4	23,8	19,8	22,6	28,4	41,3	37,4	31,4	11,3	26,9	<b>363,6</b>
El Aouia (77/78-03/04)	38,1	28,4	18,3	19,9	13,4	14,6	19,5	32,3	41,3	19,7	11,1	24,1	<b>287,9</b>
Tabouazant (78/79-03/04)	35,9	33	32,5	26,5	30,6	32	30,8	39,2	35,1	20,6	9,1	17,1	<b>342,4</b>
A. Oufounes (91/92-03/04)	39,4	37	36,2	39,5	20,5	21,5	32,3	45,2	44,1	26	8,8	30,5	<b>379,3</b>

Le régime des précipitations (figure 3) est caractérisé par deux maxima : le plus élevé est en Novembre-décembre, le second est en mars sur la bordure occidentale, et en avril sur la bordure méridionale.



**Figure 8 : courbes montrant la variation des Précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la Haute Moulouya**

Le climatogramme d'Emberger détermine les étages bioclimatiques suivants :

- *Etage présaharien* : limitrophe des provinces du Sud, caractérisé par une pluviométrie faible inférieure à 100 mm/an et un été chaud et sec ;
- *Etage aride* : rencontré généralement à Midelt et Aït Izdeg et dont la pluviométrie moyenne n'excède pas 200 mm ;
- *Etage semi-aride* : qui marque nettement comme rurale Aït Ayach et Idzer avec une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 200 mm. Les communes d'Amersid et de Mibladen sont classées dans l'étage bioclimatique aride froid. La pluviométrie annuelle n'excède pas 200 mm.

Pour les communes d'Itzer et de Tounfite, le climat est de type continental. Les précipitations en année normale se situent entre 300 et 400 mm.

## 2.2 La température

Les données sur les températures ne sont connues qu'aux stations de Louggagh, Zaida et à Ansegmir, où les moyennes annuelles sont respectivement de 10,9°C, 13,2°C et 14,3°C (Tableau 2 et figure 4). La température maximale moyenne est atteinte en juillet (33,8 et 32,9°C) et la minimale en janvier (0,2 et - 1,3°C).

Tableau 2 : variation de la température dans la période de 30 ans

Station	Période de mesure (30 ans)	Moyenne
Louggagh	74-75/03-04	10,9
Ansegmir	74-75/03-04	14,28
Zaida	74-75/03-04	13,94

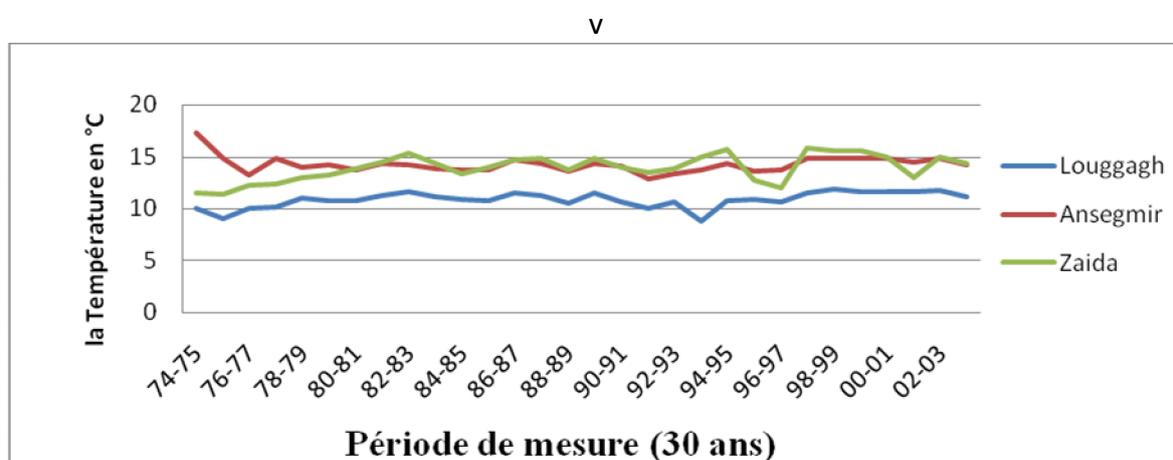


Figure 9 : Diagramme montrant la variation de la température dans la Haute Moulouya

Aucune donnée n'existant sur l'évapotranspiration (ETP), le calcul par la méthode de Thornthwaite a donné les résultats suivants aux stations de Louggagh, Zaida et à Ansegmir (tableau 3).

**Tableau 3 : Evaporation moyenne annuelle (mm)**

Station	Evaporation moyenne annuelle (mm)	
	Piche	Bac
Louggagh	1520	1444
Ansegmir	2258	2110
Zaida	1827	1939

Le climat de la Haute Moulouya est aride avec des précipitations faibles et une période sèche qui dure presque toute l'année. Les hivers sont souvent rigoureux, longs et froids, alors que les étés sont chauds. Le climat de cette zone est dicté par la présence de barrières montagneuses du Moyen Atlas et du Haute Atlas.

### 3. Géologie de la Haute Moulouya

#### A- Litho-stratigraphie

##### ***Le Primaire***

Les affleurements sédimentaires des massifs d'Aouli comportent des masses schisteuses peu métamorphisées. Les assises sédimentaires hercyniennes sont affectées par des venues granitiques. Les batholites d'Aouli et de Bou-Mia se caractérisent par leur étendue et leur diversité pétrographique.

##### ***Le Permo-Trias***

Les affleurements Permo-triasiques de la Haute Moulouya correspondent à des formations détritiques à granulométrie fine, de couleur rouge. Ils se caractérisent par leur étendue important. La coupe la plus complète s'observe sur la bordure Ouest et Nord-Ouest du massif de Bou Mia, entre le confluent de l'Oudrhès et le Tizi N'Rechou. Elle comprend de bas en haut :

Grès conglomératiques et arkoses, à stratification entrecroisée ;

Marnes gréseuses et argiles rubéfiées, à lits gypseux ;

Basaltes rouges violacées ou noirâtres, très décomposés ;

Marnes ou argiles rouges, comprenant des inter-stratifications de lits plus gréseux.

### ***Les formations secondaires***

- *Le Lias :*

Dans la Haute Moulouya, le Lias fournit les éléments essentiels du relief. Il débute au Lias inférieur par une série épaisse de 200 à 300 m de dolomies foncées, des calcaires oolithiques, des Calcaires sombres, en bancs compacts (Sinémurien supérieur–Lotharingien) et des Calcaires clairs, en bancs d'épaisseur inégale (Pliensbachien-Domérien inférieur). Le Domérien se compose de bancs de calcaires assez clairs, bien lités et peu épais. Le Lias supérieur est représenté par une série marneuse.

- *Le Dogger*

Les assises calcaires du Bajocien et du Bathonien affleurent en position synclinale, dans le Moyen Atlas méridional aux abords du piedmont d'Itzer. Elles manquent presque totalement en Haute Moulouya, sauf près de Midelt dans les avant-monts de l'Ayachi et en lisière du massif d'Aouli. Par contre elles affleurent largement à l'Ouest et au Nord de la plaine d'Enjil, et elles forment le flanc des anticlinaux qui limitent la cuvette de Missouri (Tsiouant, Tafgourt, Bou Naceur).

- *Le Jurassique supérieur*

Les étages supérieurs du Jurassique n'apparaissent en affleurement que dans la partie Nord-Est.

- *Le Crétacé :*

Seuls le Crétacé moyen et partiellement le Crétacé supérieur sont représentés dans le domaine de cette étude. La série type est uniforme dans la Haute-Moulouya et se compose de :

- *Grès rouges infra-cénomaniens* provenant du démantèlement des reliefs antérieurs, plus particulièrement au Sud où leur épaisseur est maximum ;
- *Marnes à gypses versicolores* (Cénomaniens), sur 100 à 200 m d'épaisseur;
- *Calcaires cénomano-turonien*s, avec des horizons plus marneux à la base et des bancs compacts silicifiés, formant une corniche vers le haut.

La série sénonienne, visible au flanc des anticlinaux et dans les cuvettes, se développe sur une épaisseur de 150 à 200 m. Elle comprend de bas en haut :

- *Marnes rouges, avec des bancs de lumachelles à débris de coquilles* (20 à 30 m) ;
- *Marnes rouges à huîtres* ;
- *Calcaire-corniche à silex* ;
- *Marnes à huîtres, sur 25 à 30 m* ;
- *Dalle calcaire* (plusieurs mètres).

### **Couverture sédimentaire Tertiaire à Quaternaire**

- *L'Eocène*

Il n'affleure que dans le synclinal perché du Jbel Oudiksou. La série comprend, de bas en haut :

Eocène inférieur continental, avec des grès, marnes à silex et argiles à gypses sur une épaisseur de 50 m ;

Eocène inférieur, avec des marnes jaunes et calcaires. Il constitue un ensemble peu épais de près de 30 m localisé sur le flanc Nord ;

Eocène supérieur continental avec des marnes rouges et calcaires lacustres, sur une épaisseur de 150 m ;

Eocène supérieur – Oligocène, avec des grès et conglomérats rouges sur une épaisseur de 150 m.

- *L'Oligocène*

Il comprend des calcaires lacustres blancs (8 à 10 m), des marnes claires (30 m), des conglomérats et des marnes (50 m). Les calcaires lacustres n'affleurent qu'en rive droite et les conglomérats paraissent plus développés en rive gauche.

- *Le Mio-Pliocène*

Affleure au-dessus des calcaires lacustres et des conglomérats de base de la série Oligocène.

On trouve successivement :

- Des couches rouges à dominance marneuse (Miocène supérieur).
- Un ensemble calcaire comprenant des grès argileux gris, des grès grossiers, des conglomérats et des calcaires lacustres.

- *Quaternaire* :

Correspond à un matériel d'épandage au pied des reliefs de bordure, et le long du réseau hydrographique. (Figure 10)

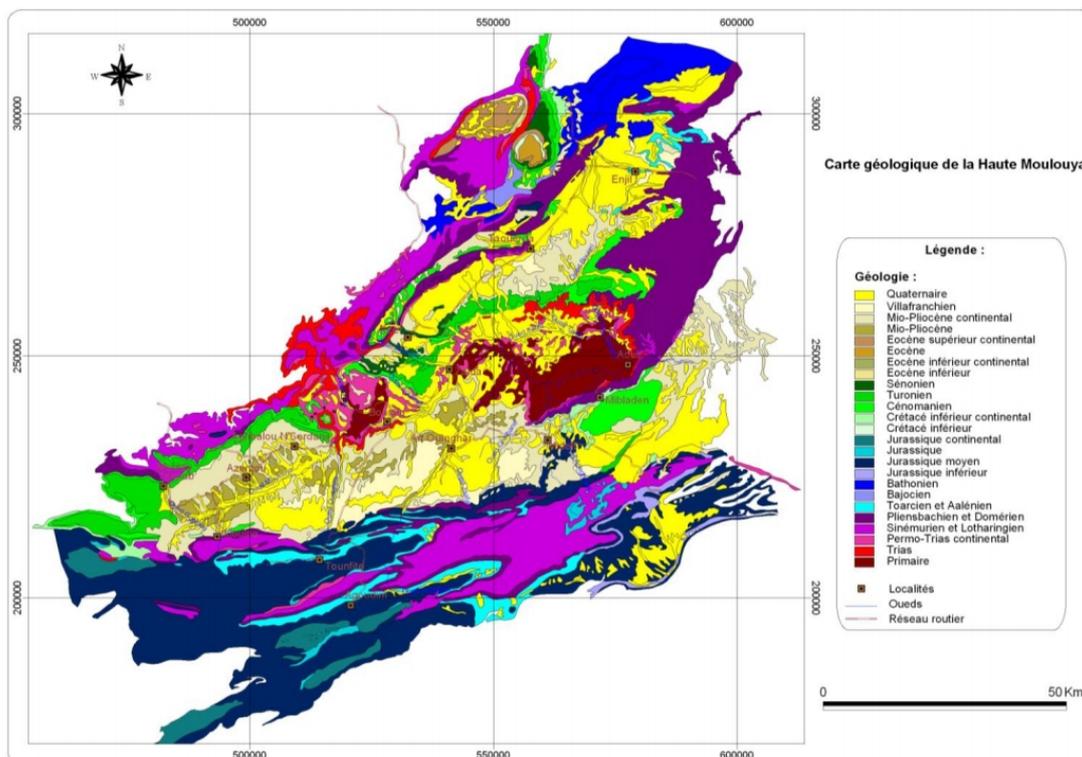


Figure 10 : Carte géologiques du bassin de la Haute Moulouya (d'après la carte géologique du Maroc au 1/500000)

---

## B. Structure

### **B-1- La Haute Moulouya et ses bordures (Figures 4 à 6)**

#### **Partie occidentale :**

Cette partie du bassin comprend à la fois une région d'assises sub-tabulaires, au Nord et au Nord-ouest d'Aghbalou N'Serdane, et le massif paléozoïque de Bou Mia (figure 4). Dans la première, les formations calcaires du Lias inférieur s'étalent largement avant de disparaître vers la lisière Sud, sous le Domérien que recouvre le Turonien. Elles sont affectées d'accidents cassants de direction Ouest-est qui déterminent localement le maintien de lambeaux de couches plus récentes, et en particulier des témoins d'une couverture créacée.

#### **Partie orientale :**

Cette partie est représentée par le massif paléozoïque d'Aouli. Elle montre la même dissymétrie que la précédente entre un flanc Nord sub-tabulaire et un versant Sud à pente forte.

La bordure méridionale correspond toujours à une gouttière sub-atlasique. Le massif d'Aouli plonge vers elle en pente douce au Sud-Ouest le long de l'Ansegmir. Mais au Sud et au Sudest, la structure est plus tourmentée. Cependant comme dans la partie occidentale, ce sillon est affecté d'accidents transverses SSW-NNE.

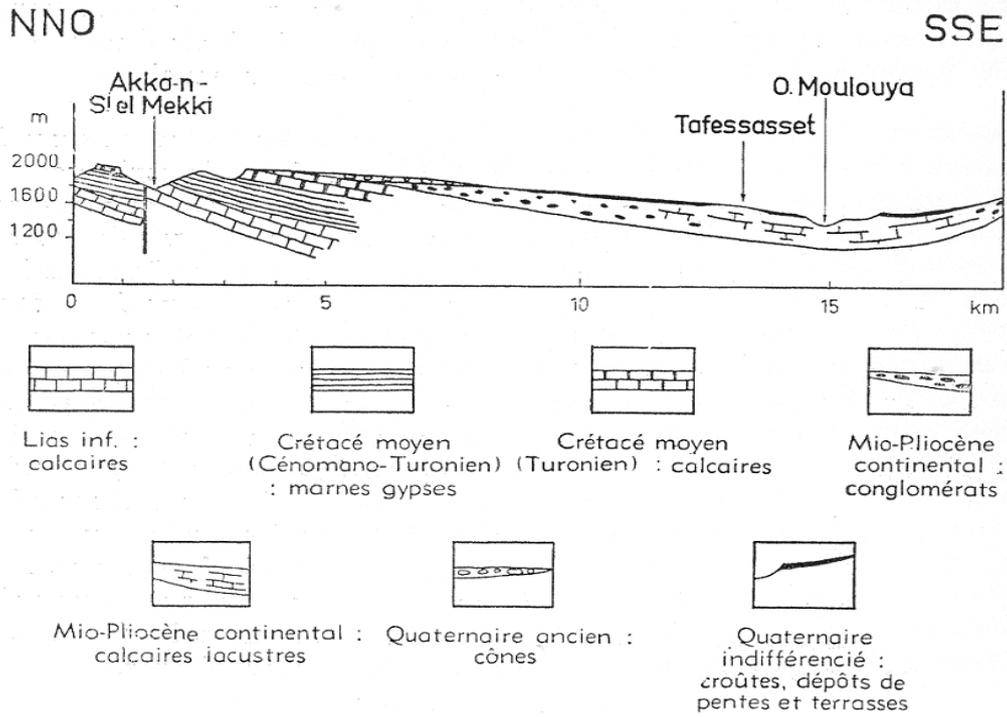
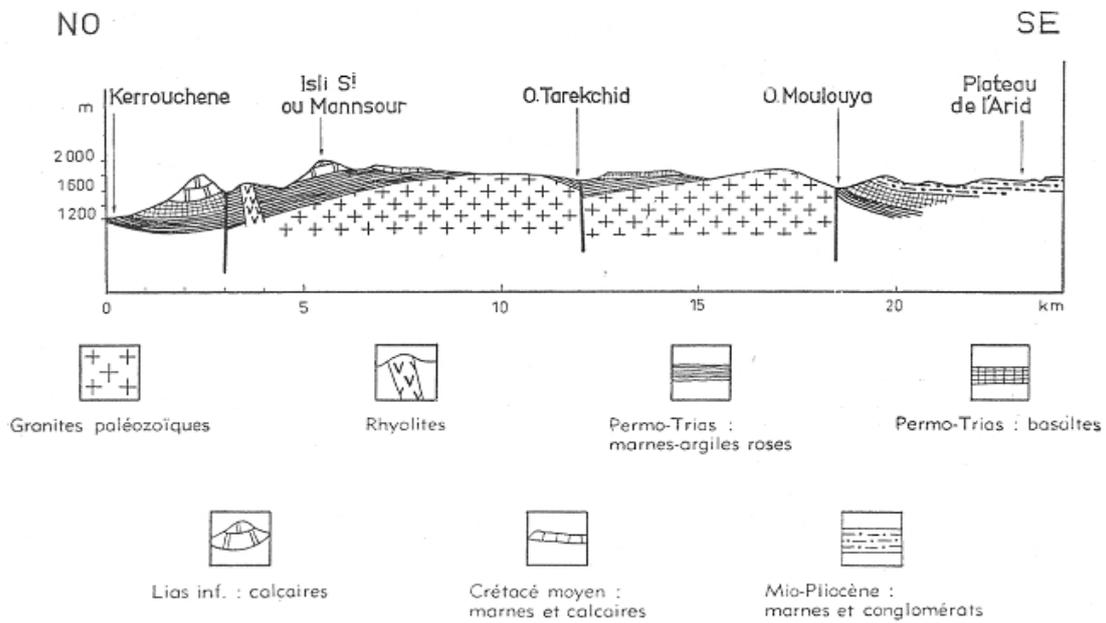


Figure 11 : Coupe du bassin de la Haute Moulouya à l'Ouest du dôme de Bou Mia (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943)



Coupe à travers le dôme de Bou Mia

Figure 12 : Coupe à travers le dôme de Bou Mia (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943)

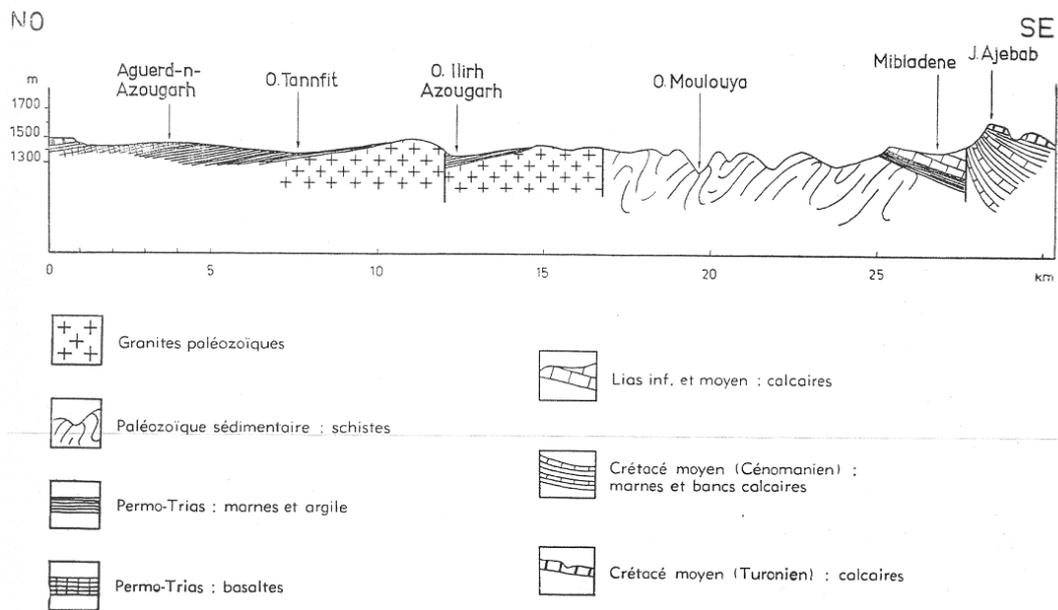


Figure 13 : Coupe à travers le dôme d'Aouli (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943)

**B-2- Bordure plissée du Moyen Atlas, de l'oued Aguercif à Enjil des Ikhatarn (figure 14)**

Au niveau de l'oued Aguercif, le Causse fait place à une région tectoniquement moins calme, où les mouvements tectoniques se sont marqués par des déformations de la couverture mésozoïque, avec une souplesse qui va croissant en direction du NE. Le schéma structural de cette partie moyen atlasique se résume en un grand axe anticlinal des assises liasiques, partiellement dédoublé de part et d'autre d'un synclinal médian, affecté de nombreux accidents longitudinaux ou transverses, déversé enfin sur son flanc Nord.

***Haut Atlas de Midelt (versant Nord)*** (figure 15)

Le Haut Atlas forme un front abrupt d'un système de plis dissymétriques et partiellement chevauchants du côté Nord, alignés suivant une orientation WSW-ENE.

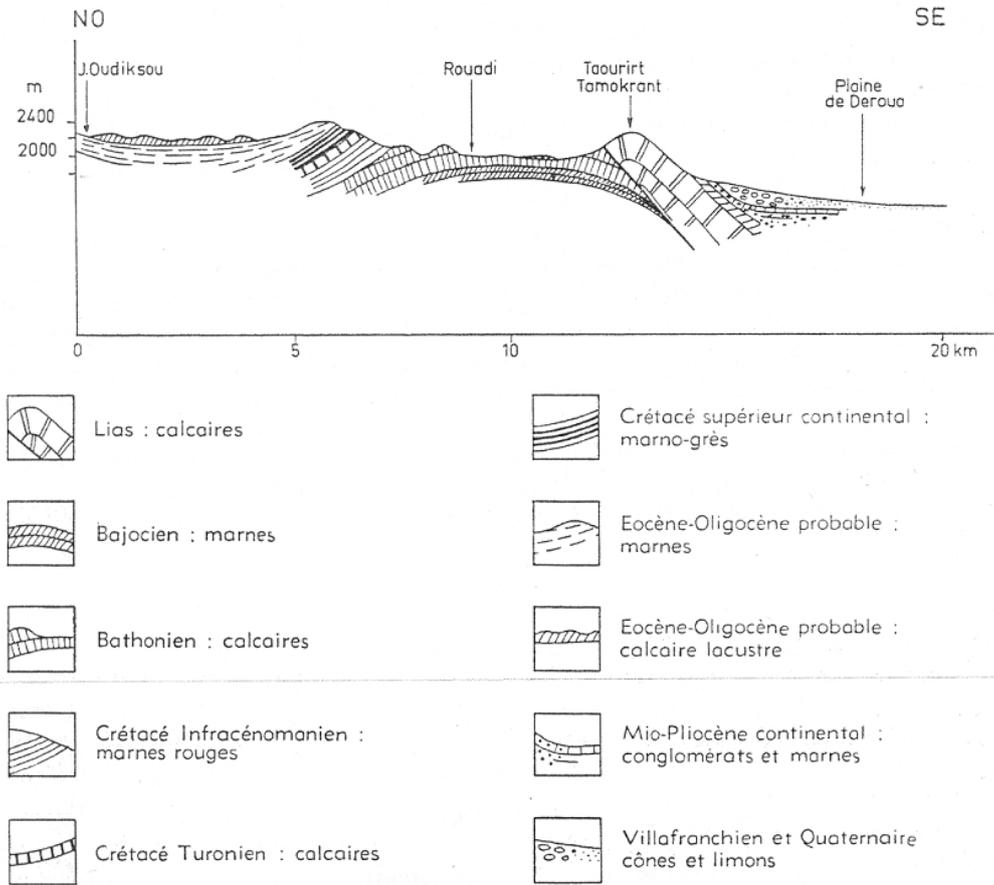


Figure 14 : Coupe à travers la plaine d'Enjil (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943)

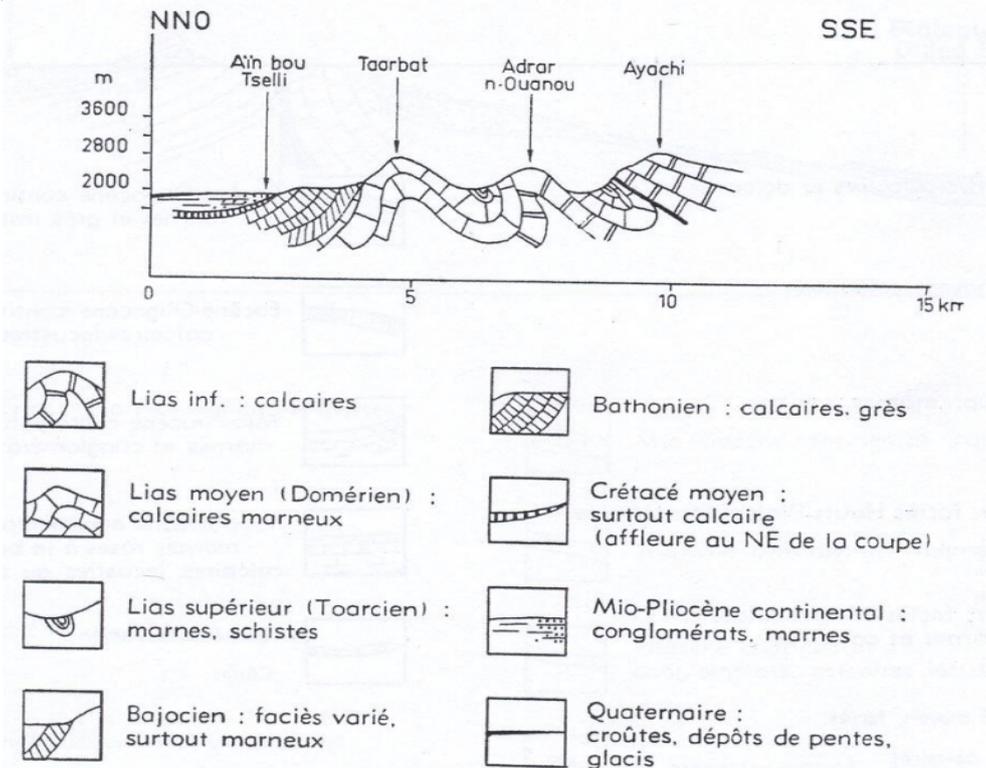


Figure 15 : Coupe à travers Jbel Ayachi (d'après Termier et Dubar entre 1930 et 1943)

---

### **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).

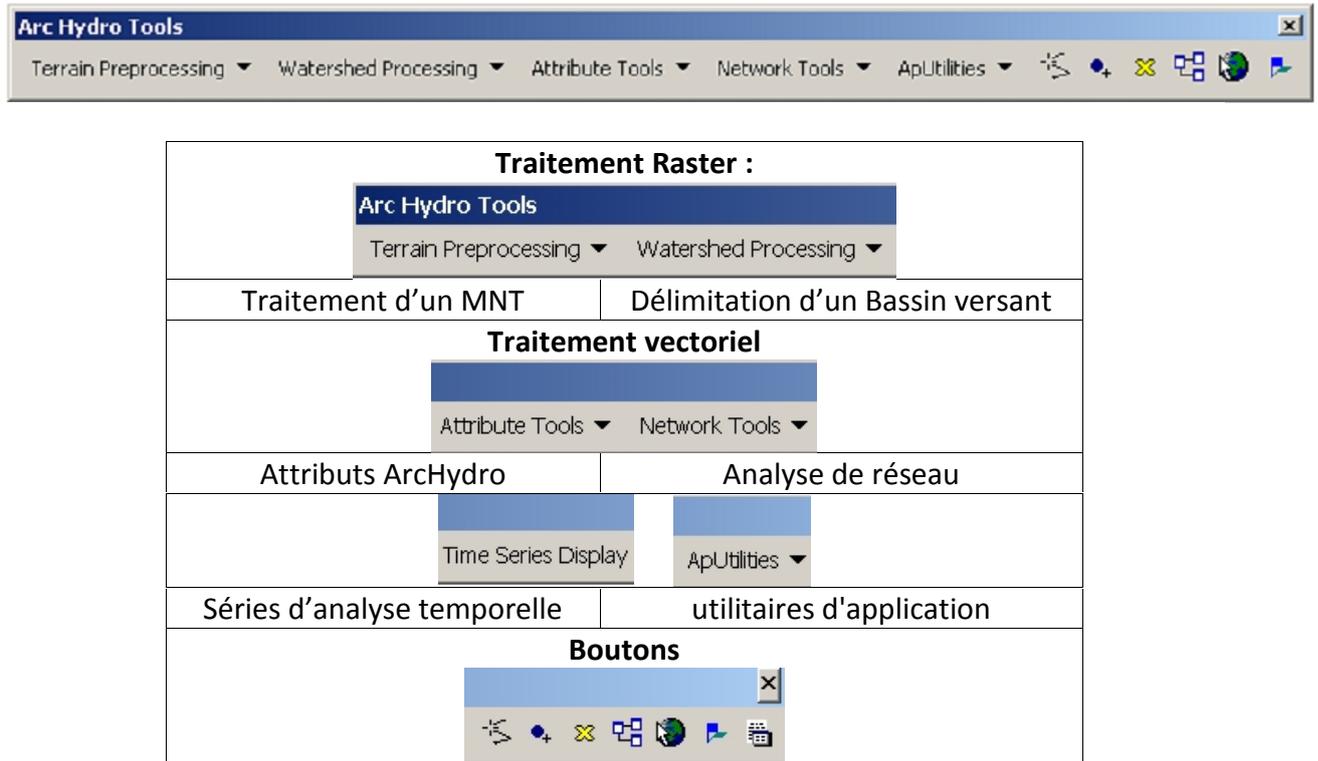


Figure 16 : Outils de base d'ArcHydro

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.

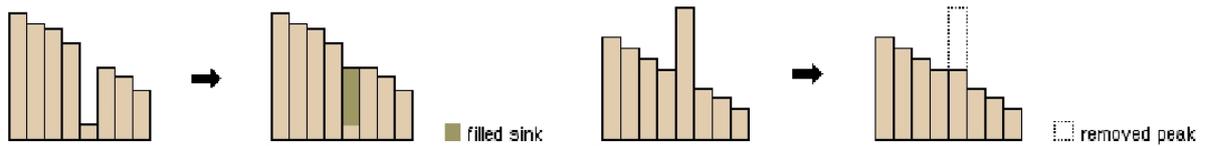
### A-1- TERRAIN PRE-PROCESSING

#### **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 :**

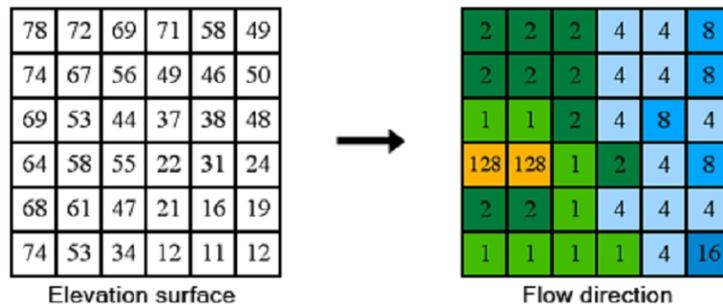
Cette outil remplit les cuvettes d'une surface raster pour supprimer de légères imperfections dans les données ;



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).

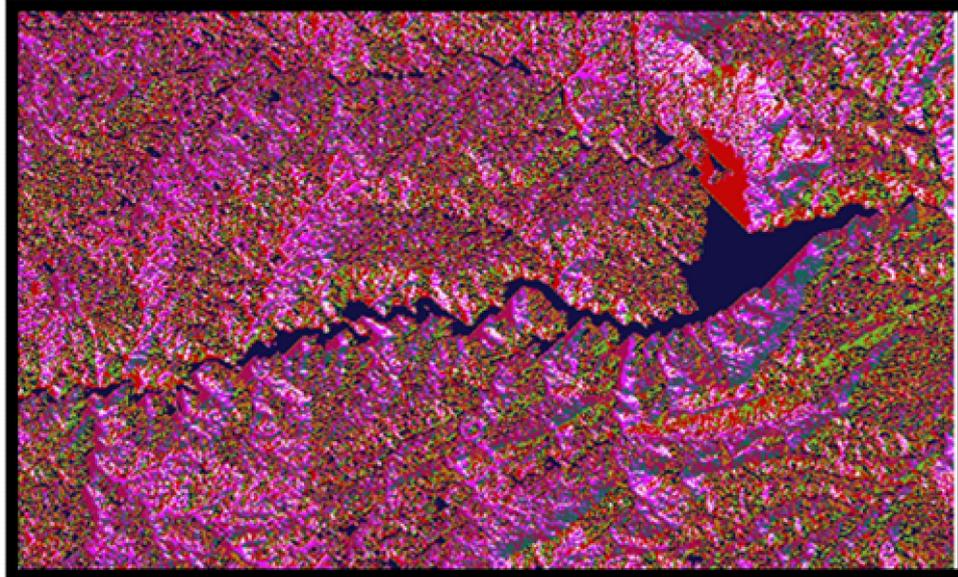


Figure 18 : Résultat de l'outil Flow Direction

**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).

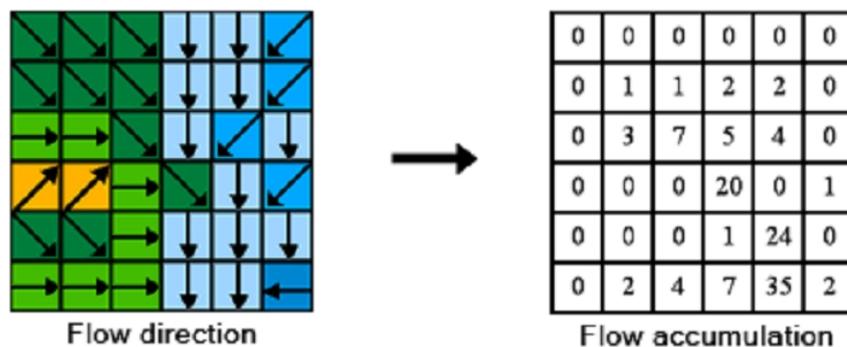


Figure 19 : Principe de l'outil Accumulation de flux (Flow Accumulation)

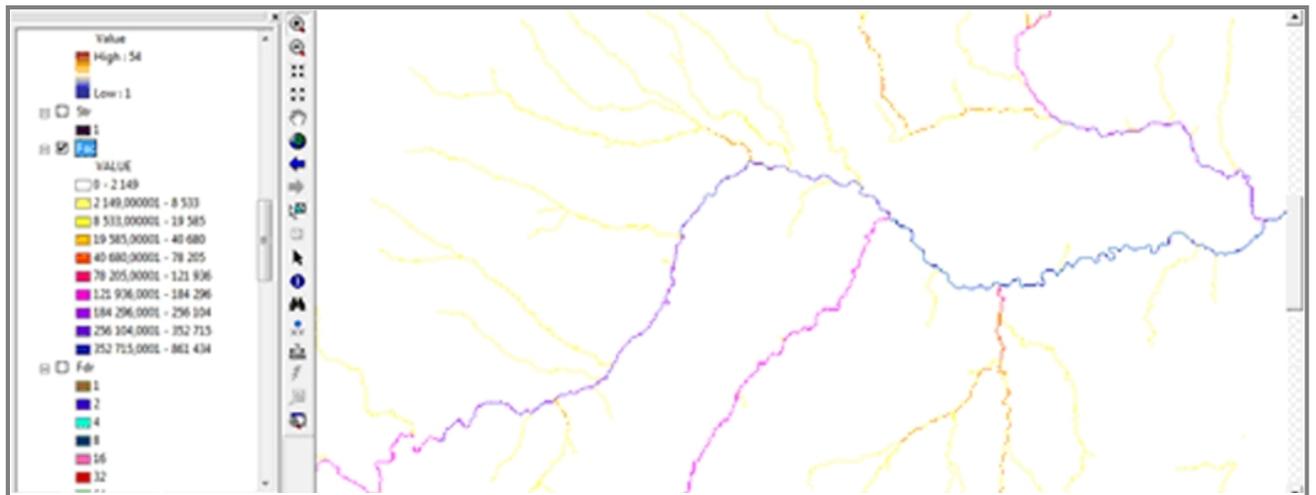


Figure 20 : Résultat de l’outil Flow Accumulation. On trouve Oued Moulouya en bleu

**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).

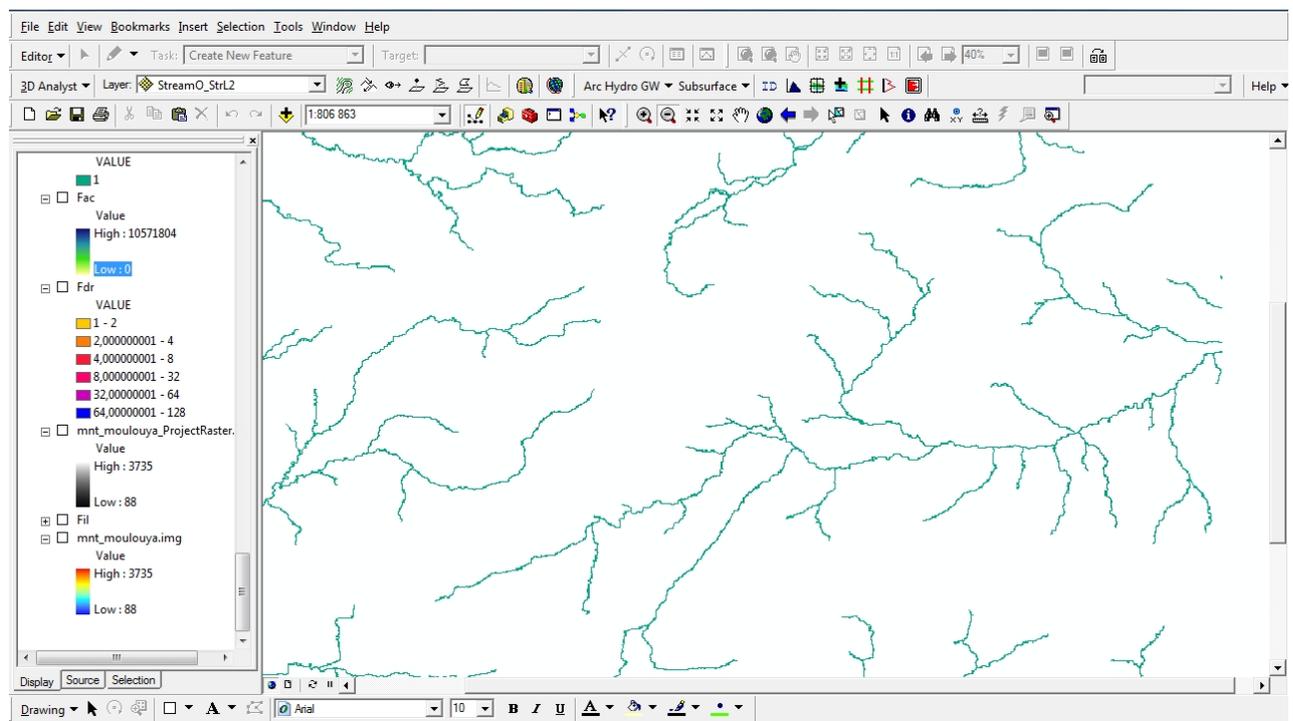
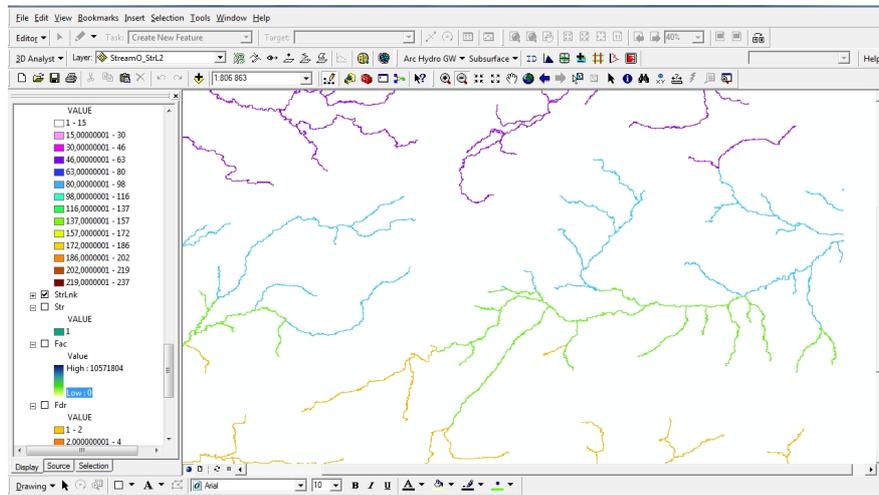


Figure 21 : Résultat de l’outil Stream Définition

**Outil Stream segmentation:**

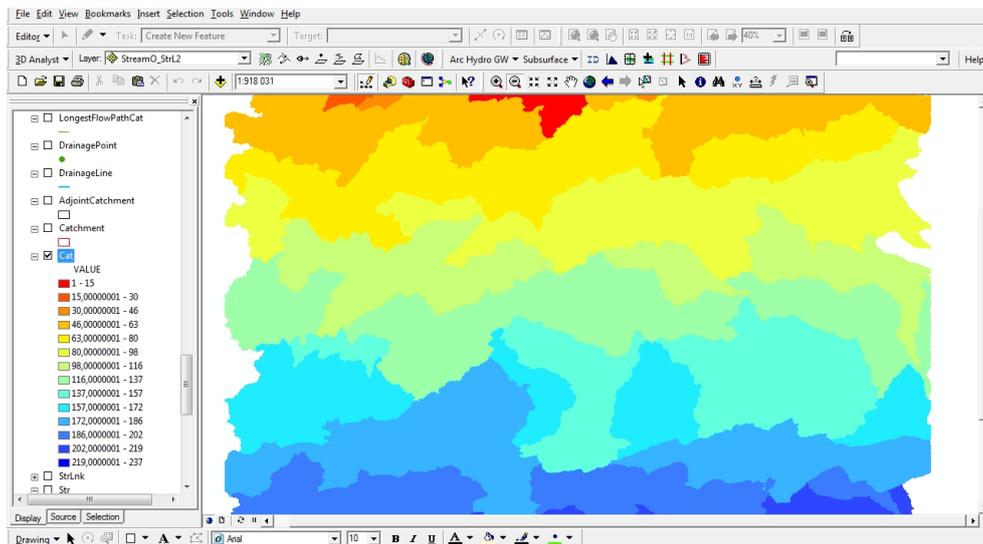
Cette fonction nous montre les détails sur la segmentation du réseau de drainage (figure 22).



**Figure 22 : Résultat de l’outil Stream segmentation**

**Outil Catchment Grid Delineation :**

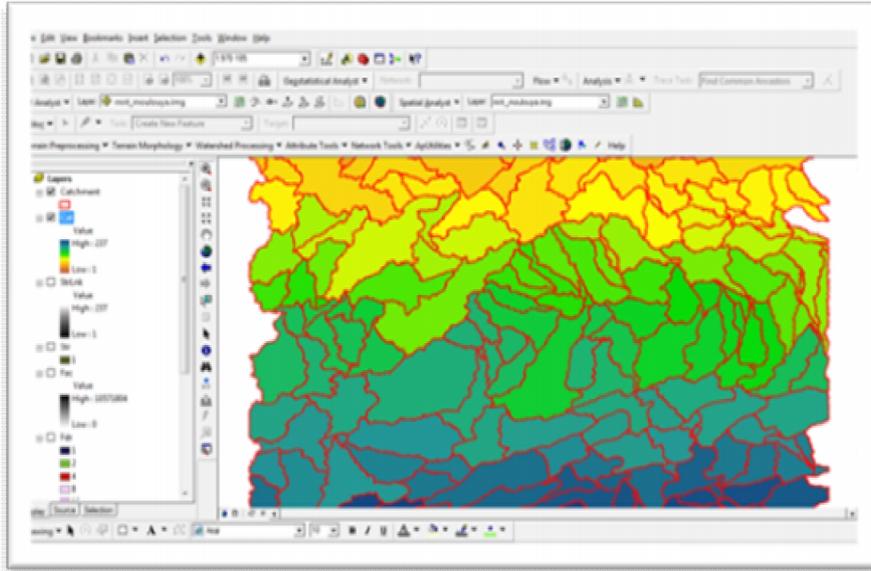
Cette fonction crée une grille dans laquelle chaque cellule porte une valeur qui indique à quel versant de la cellule appartient. La valeur correspond à la valeur portée par le segment des cours d'eau qui draine cette zone, définie dans le segment de grille lié au flux (figure 23).



**Figure 23 : Résultat de l’outil Catchment Grid Delineation**

**Outil Catchment Polygon Processing :**

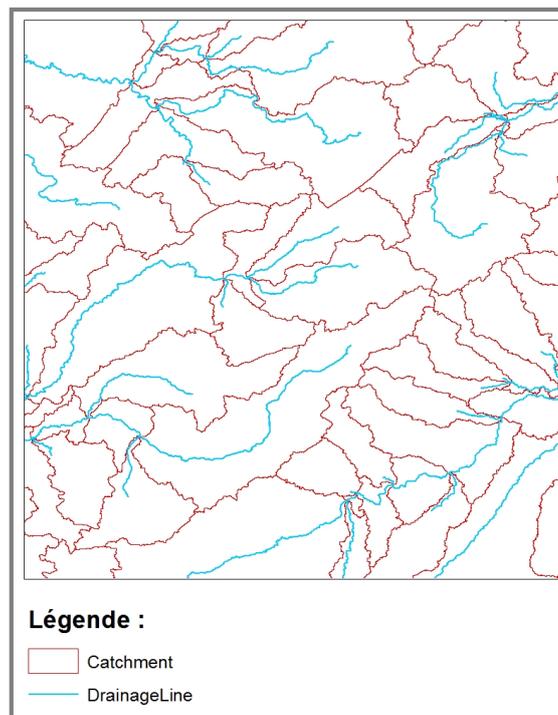
Cette fonction convertit une grille de captage en une entité polygone. Elle permet de tracer les contours de chaque sous-bassin (figure 24).



**Figure 24 : Résultat de l’outil Catchment Polygon Processing**

**Outil Drainage Line Processing**

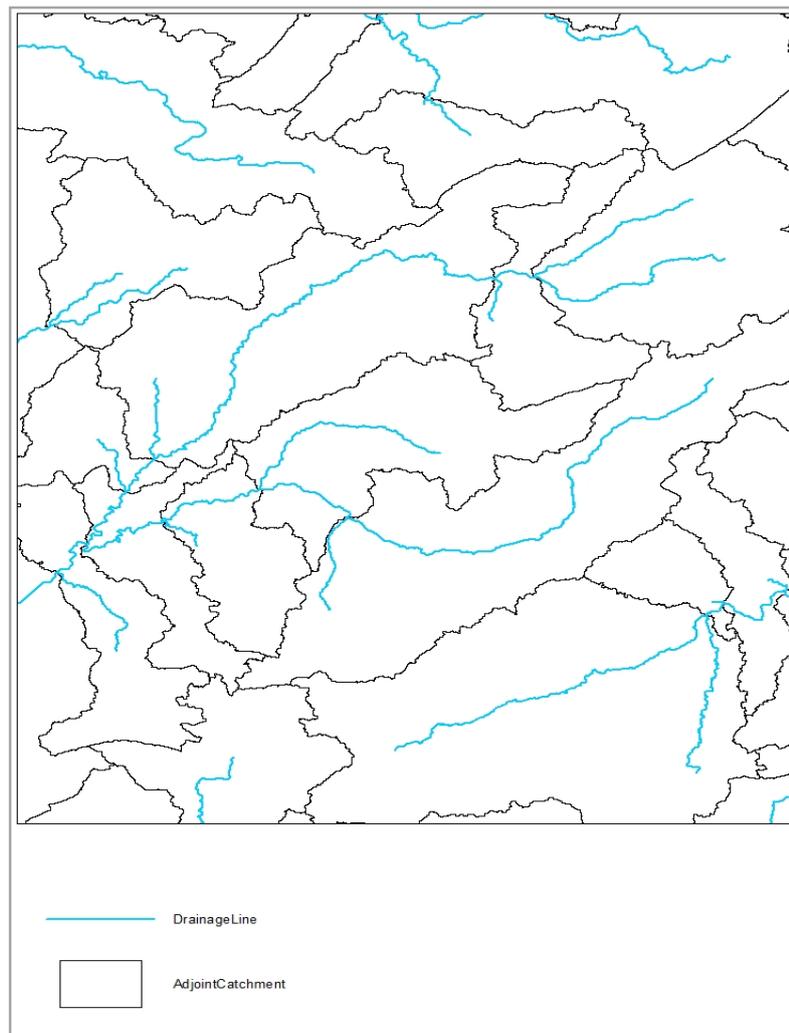
Cet outil permet de voir le détail des lignes de drains dans des sous-bassins versants (figure 25).



**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).

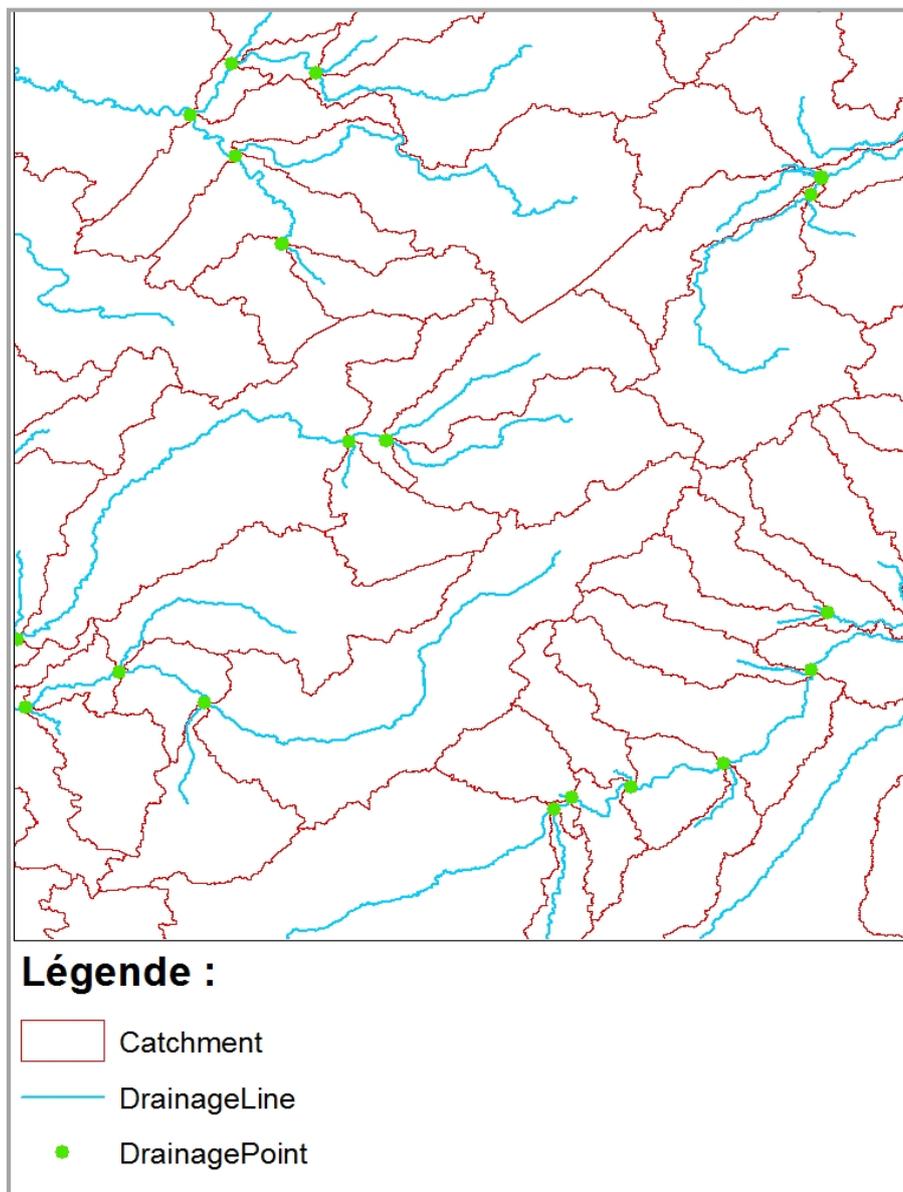


Figure 27 : Résultat de l'outil Drainage point Processing

#### 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

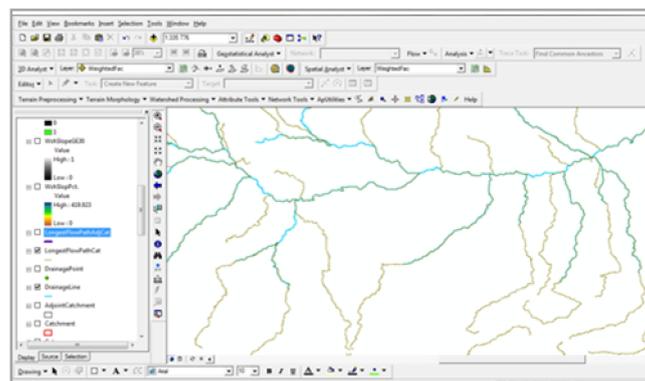
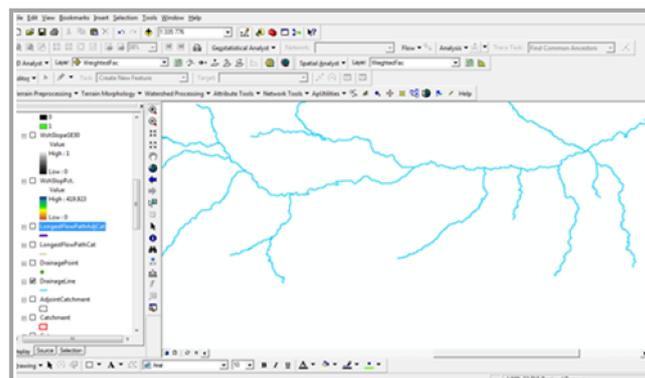
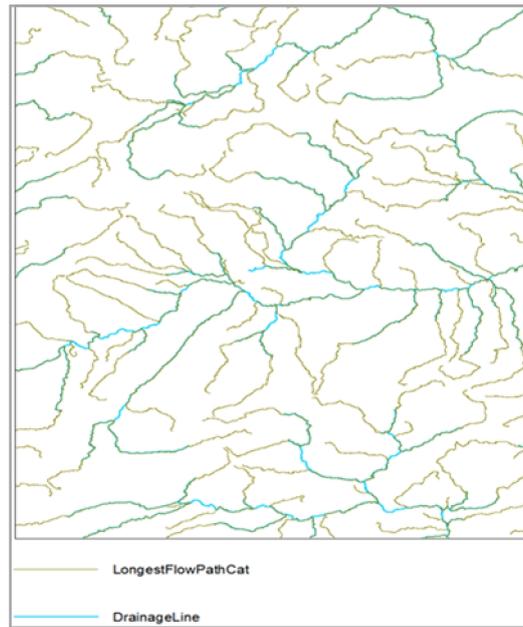


Figure 28 : Résultat de l'outil Longest Flow Path For Catchments

**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

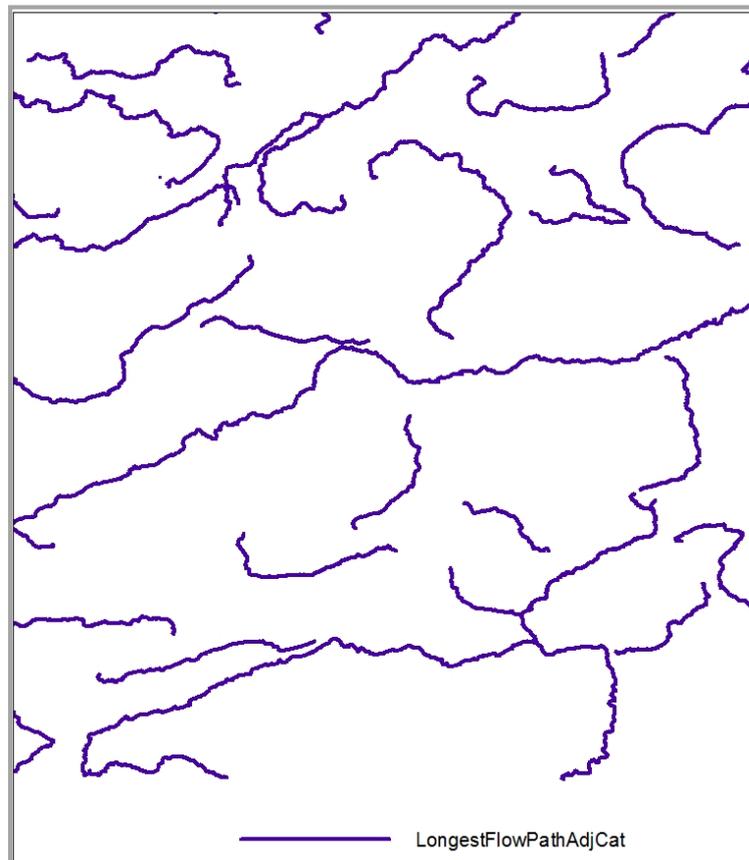


Figure 29 : Résultat de l'outil Longest Flow Path For Adjacent Catchments

**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.

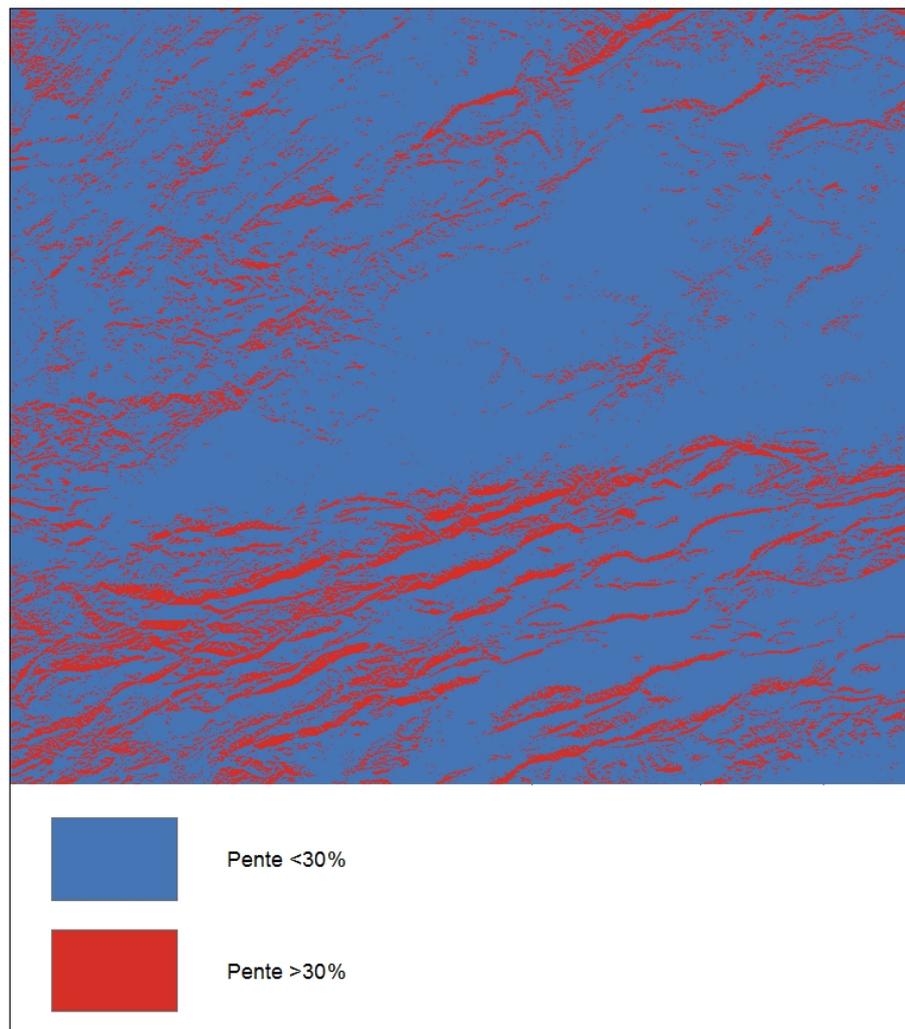


Figure 30 : Résultat de l'outil Slop greater than 30

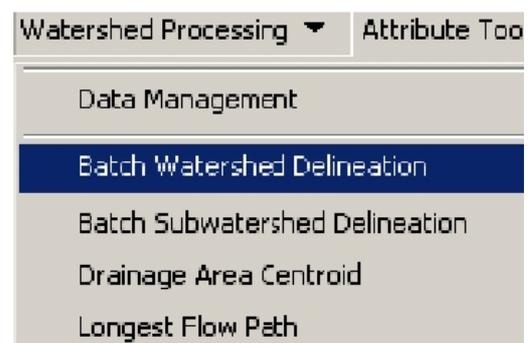
#### Outil Weighted Flow Accumulation :

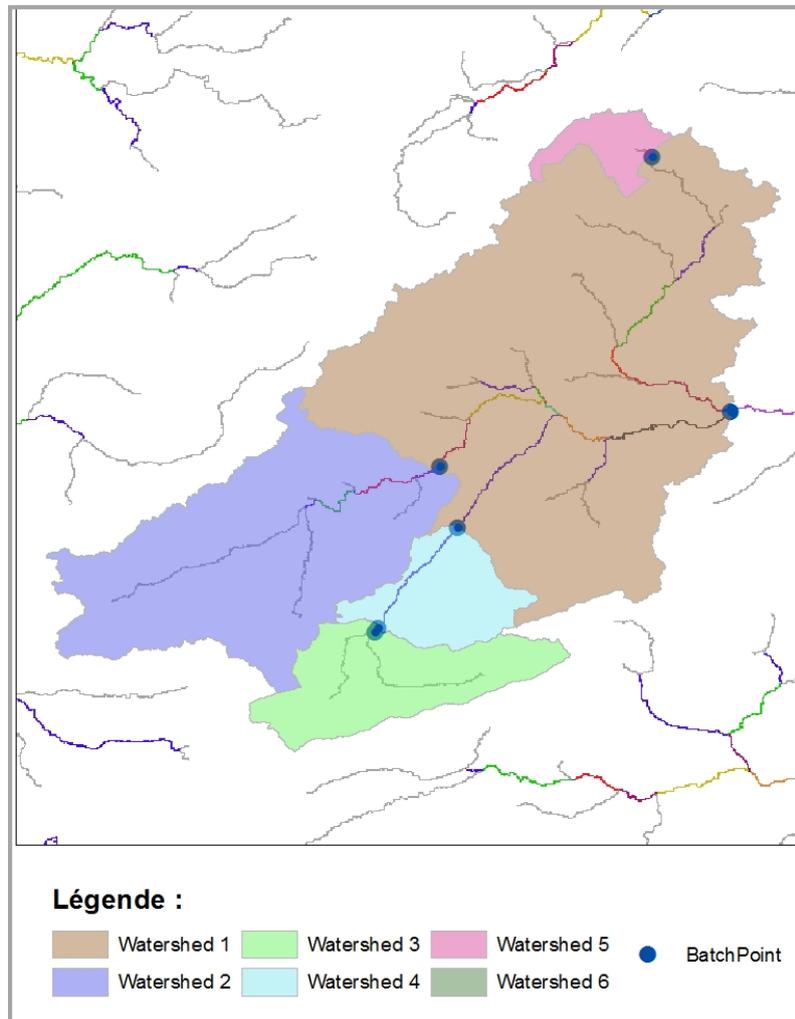
Cette fonction calcule une grille pondérée du débit d'accumulation.

#### 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).



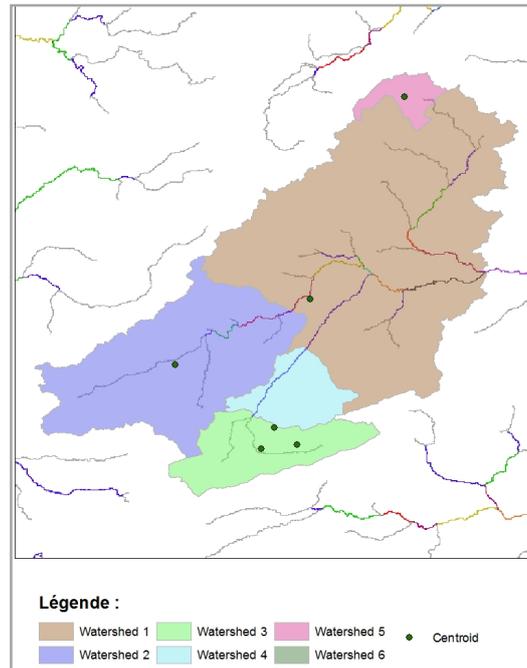


**Figure 31 : Résultat de l'outil Batch Watershed Delineation**

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

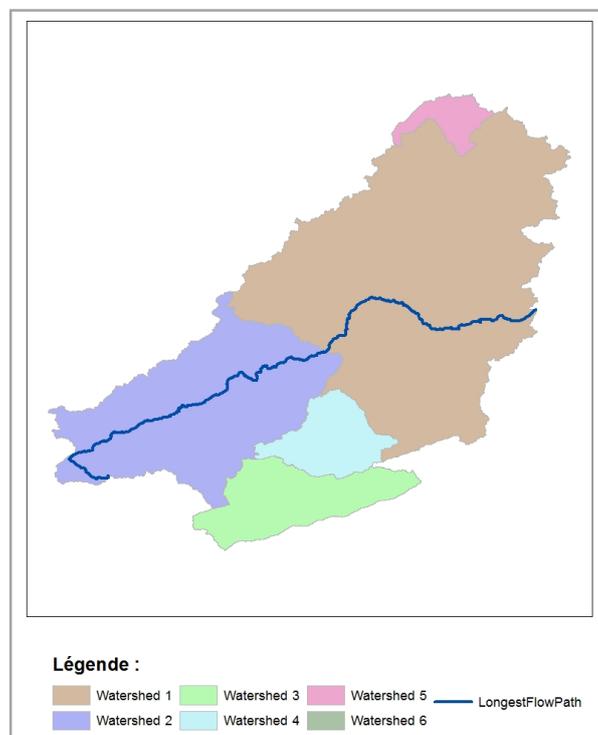
#### **Outil Drainage Area Centroid :**

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.



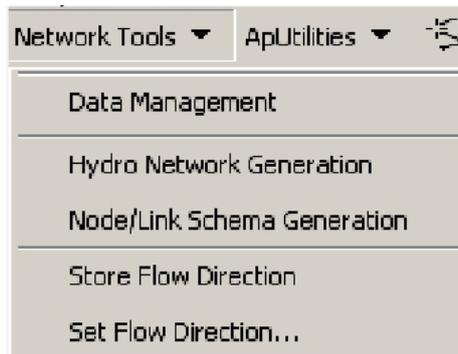
**Figure 32 : Résultat de l'outil Drainage Area Centroid**  
**Outil Longest Flow Path :**

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).

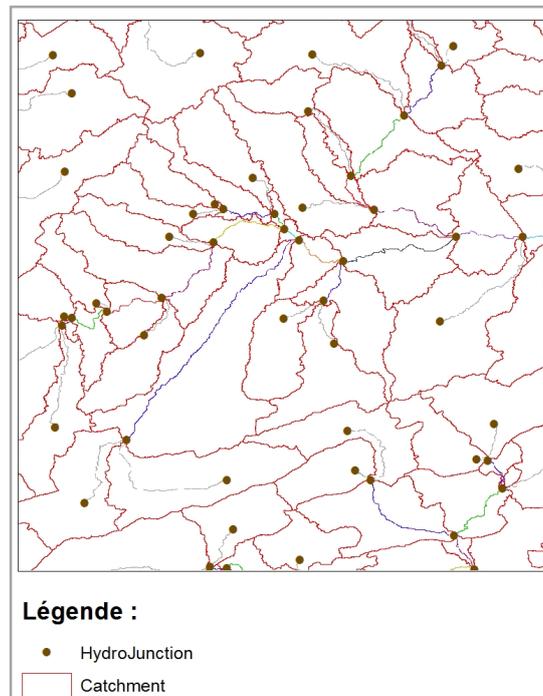


Figure 34 : Résultat de l'outil Hydro Network Generation

#### 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).

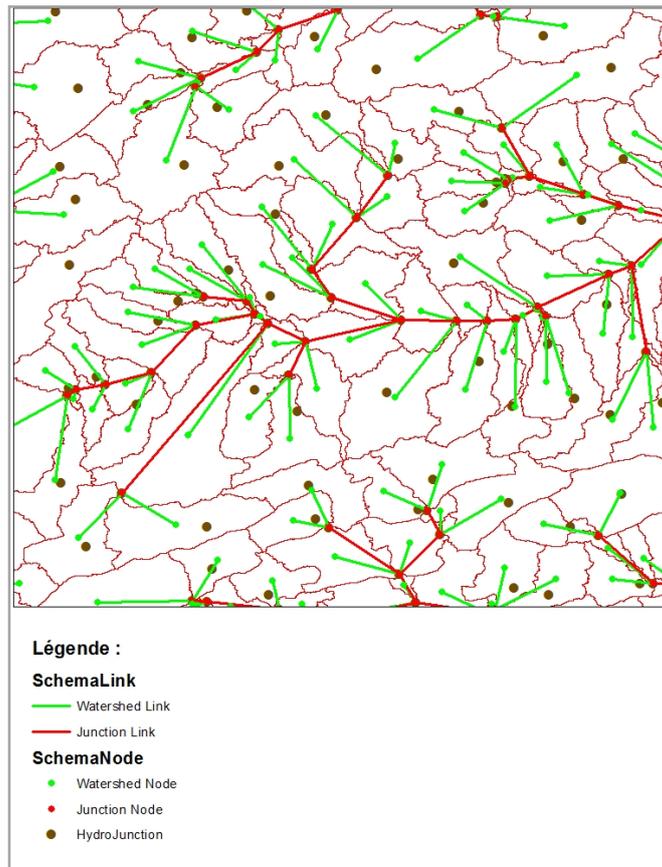


Figure 35 : Résultat de l'outil Node/Link Schema Generation

#### A-4- Ordre de Drainage

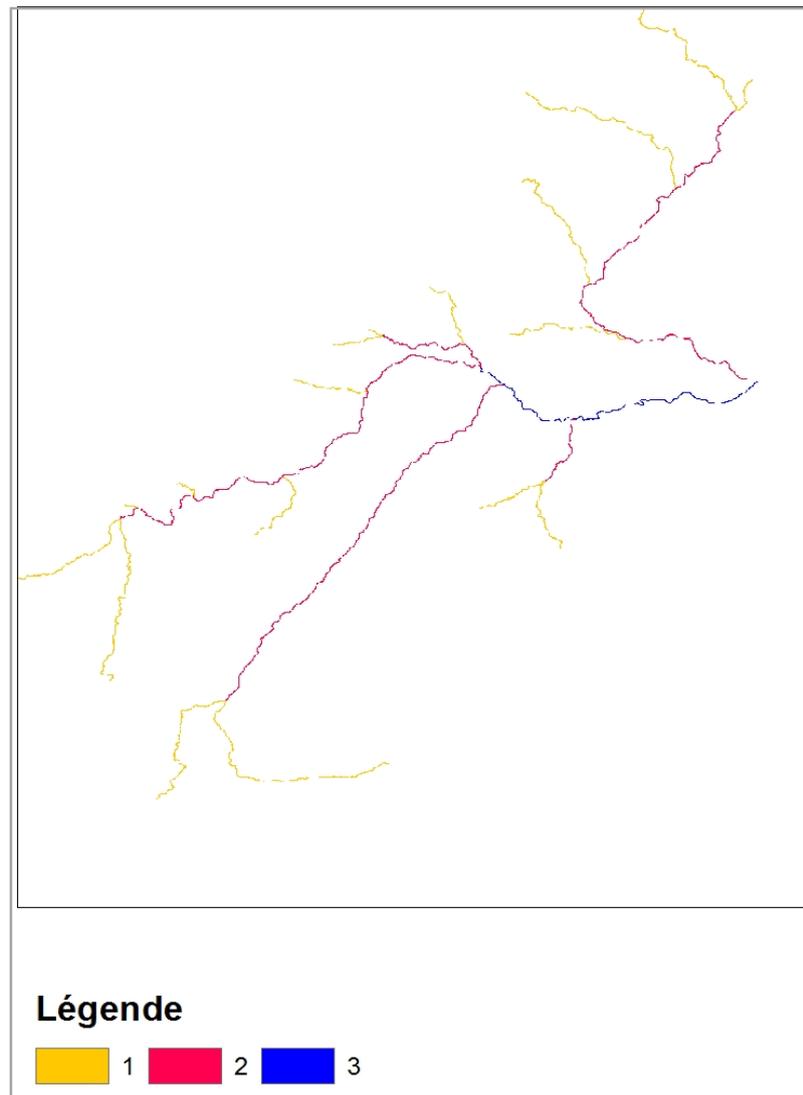
La hiérarchisation d'écoulement est une méthode d'attribution d'un ordre numérique aux liaisons d'un réseau hydrographique. Cet ordre est un moyen qui permet d'identifier et de classer des types de cours d'eau en fonction de leur nombre d'affluents. Certaines caractéristiques de cours d'eau peuvent être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

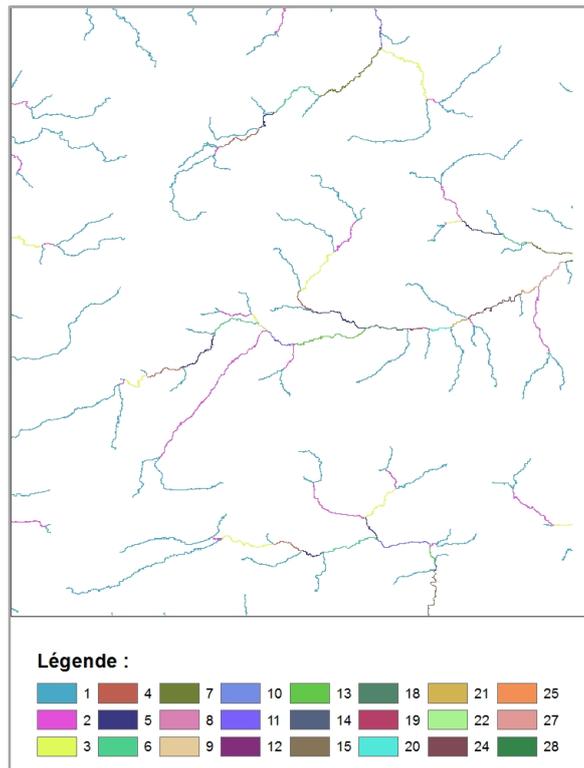


Figure 37 : Résultat de l'outil stream order par la méthode de Shreve

## 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.

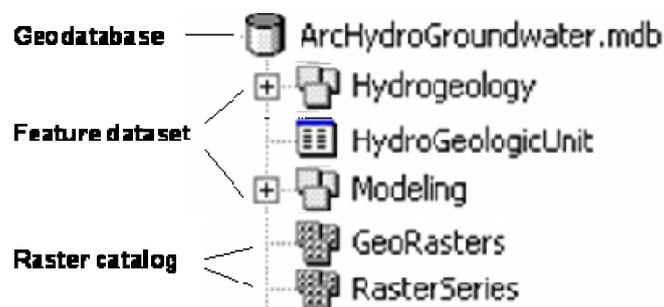
Archydro Grandwater (AHGW) est une conception de géodatabase pour représenter les ensembles de données des eaux souterraines dans ArcGIS. Il facilite l'archivage, l'affichage et l'analyse des données multidimensionnelles des eaux souterraines, et comprend plusieurs composantes pour représenter les différents 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.

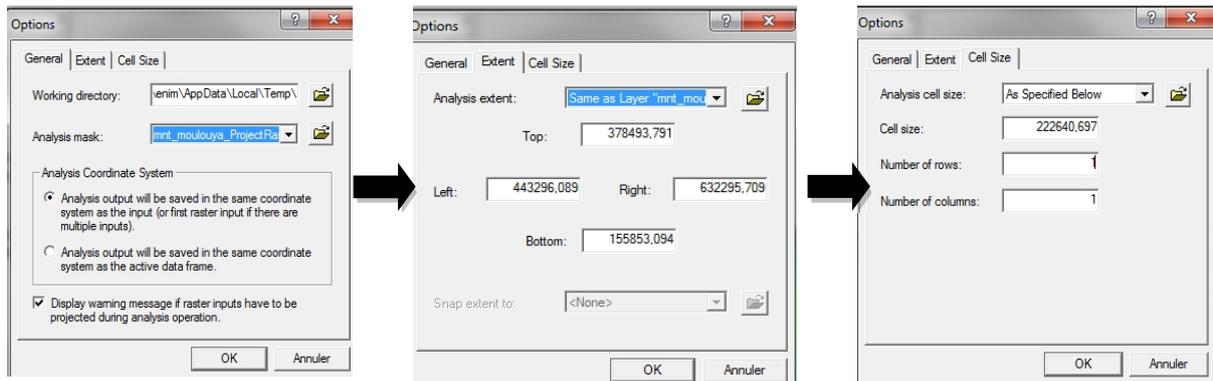


Figure 40 : Etapes pour la précision des données en entré du MNT sous Spatial Analyst

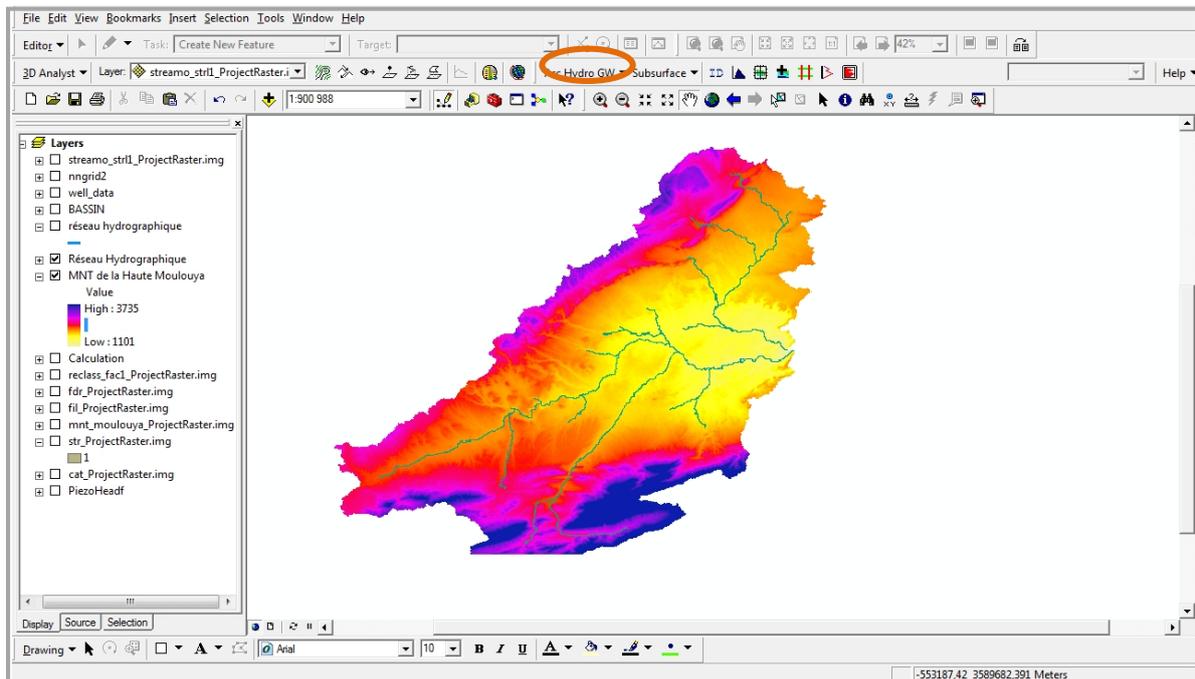


Figure 41 : MNT centré sur le bassin de la Haute Moulouya

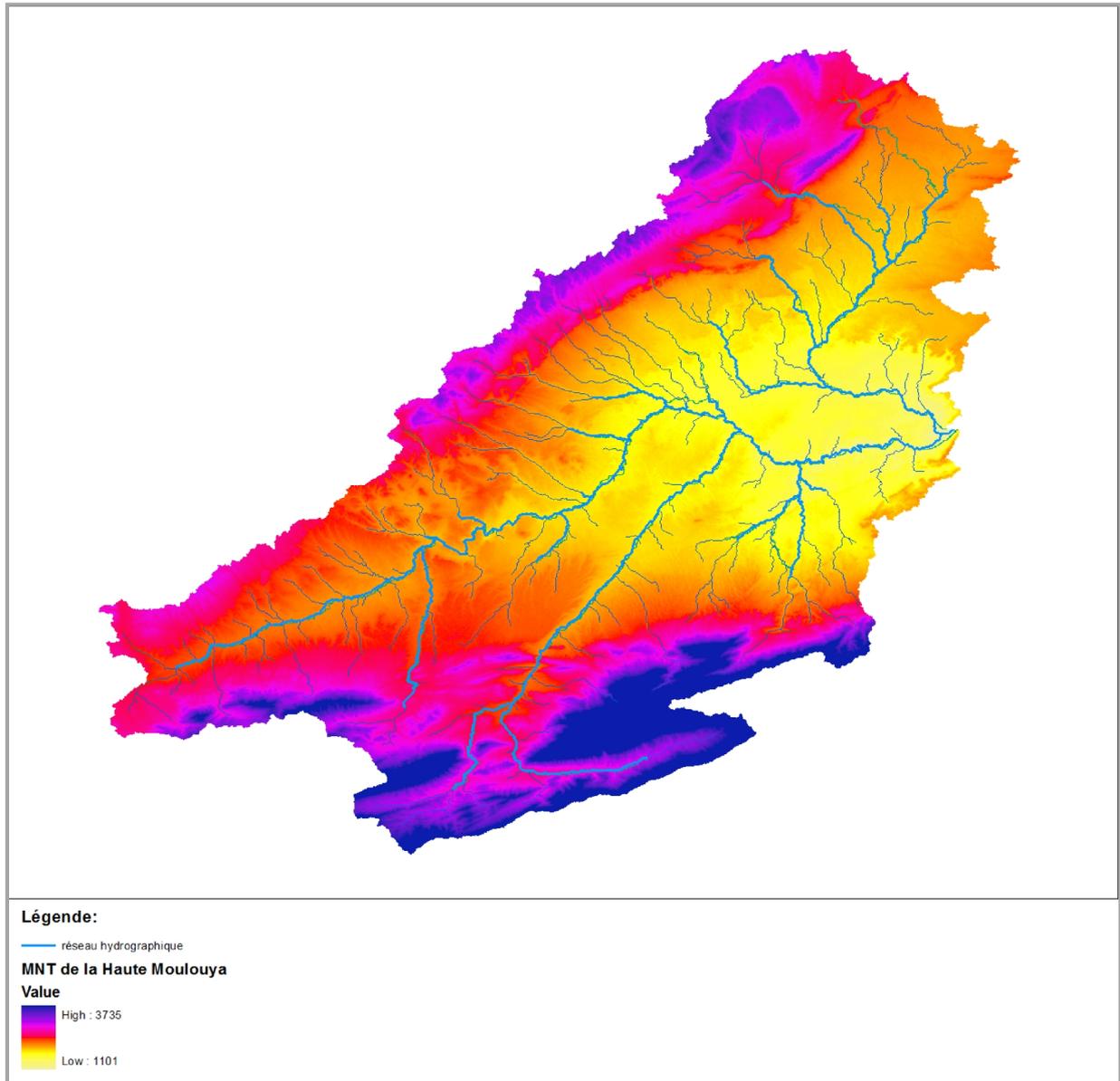
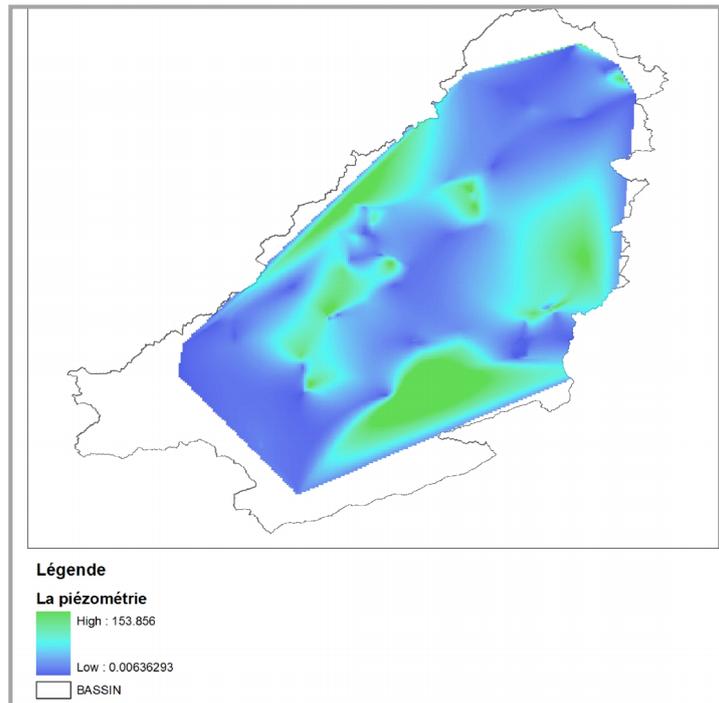


Figure 42 : superposition du réseau de drainage déduit des outils d'ArcHydro sur le MNT du bassin de la Haute Moulouya

### 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.

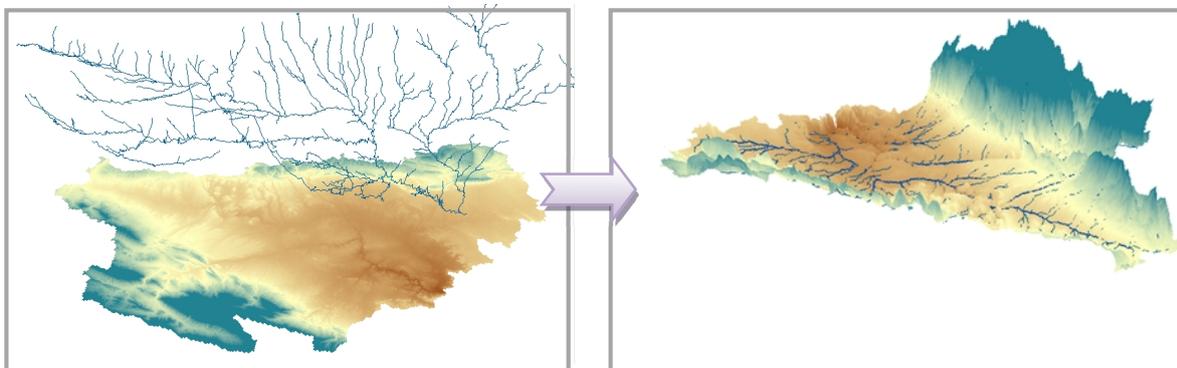


**Figure 43 : Surface piézométrique centrée sur le bassin de la Haute Moulouya**

#### **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)

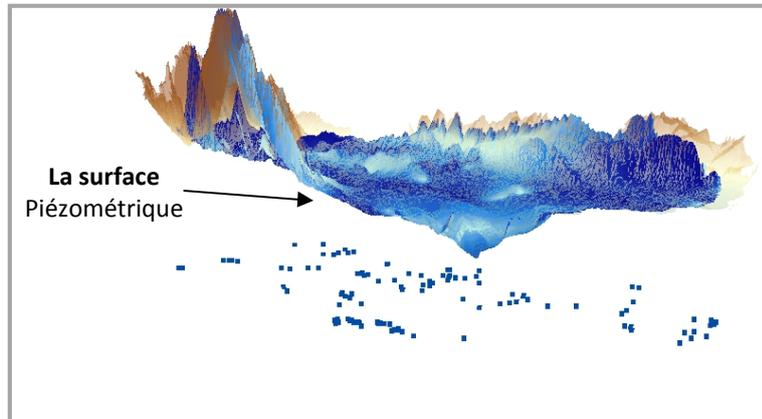
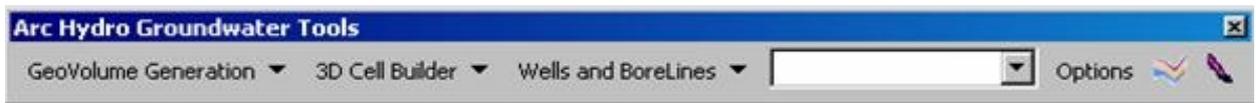


Figure 45 : Vue 3D du MNT et la surface piézométrique sous ArcScene

**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

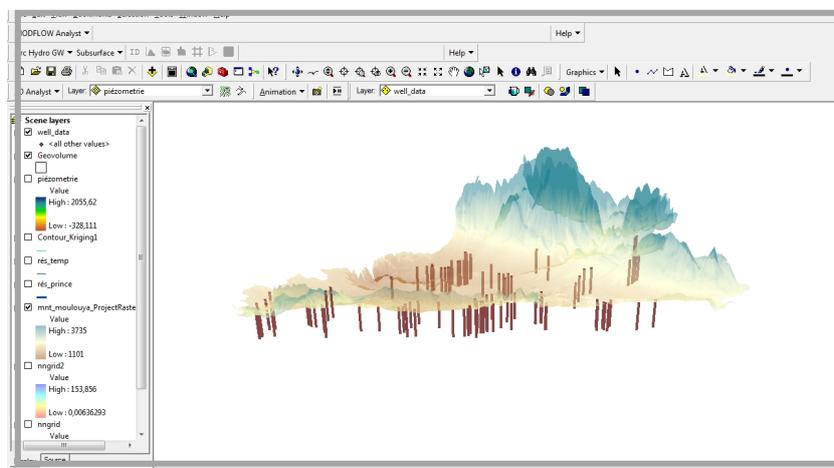


Figure 46 : Vue 3D du MNT et les forages du bassin de la Haute Moulouya sous ArcScene

## Conclusion générale

Les modèles spatialisés ou semi-spatialisés représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin.

La prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des bassins versants est nécessaire pour répondre aux divers enjeux liés à la gestion des ressources en eaux, tant au niveau quantitatif que qualitatif.

Le développement rapide des systèmes d'informations géographiques (ArcHydro et ArcHydro Grounwater) a fortement amélioré quantitativement et qualitativement l'interprétation et l'utilisation des données spatiales dans différents sens, notamment dans le domaine de la science de la terre. En revanche l'utilisation de ces outils repose sur la connaissance préalable du terrain

Dans ce mémoire on a démontré en définitive la capacité des modèles hydrologiques Arc hydro et ArcHydro Groundwater de 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. C'est un modèle plus précis

Les résultats de cette étude peuvent être exploités dans n'importe quel projet qui nécessite la base de données similaire

## Les références bibliographiques

- **AMRANI et al. (2006)** : Analyse du dynamisme morphogénétique du bassin de la haute et moyenne Moulouya (Maroc) par couplage d'imagerie LANDSAT et du modèle
- **Abderrahim AMRANI et al. (2006)** Analyse du dynamisme morphogénétique du bassin de la haute et moyenne moulouya (maroc) par couplage d'imagerie landsat et du modèle numérique de terrain, p. 379-391,
- **Agence du bassin hydraulique de la Moulouya**, Etude du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de la Moulouya (pdairé) Evaluation des ressources en eau et état de leur utilisation (Sous mission i.2a : hydrologie, Sous mission i.2a : hydrogéologie)
- **Cherkaoui (EMI/LASH, Maroc), (2012)** Désagrégation des données via l'outil SDSM pour la projection des changements climatiques futurs dans la haute Moulouya (Maroc) ».
- **MOUSSU R.** - Les basaltes permotriassiques à indices de cuivre d'Agourir et Sidi Tiar (Haute Moulouya). - pp. 109-127
- **CHAPOND G. & COLAS des FRANCS E. (1961)** : Reconnaissance hydrogéologique du sillon Itzer-Enjil. Rapp. inéd., MTPC/DH/DRE, 8 pp., 1 carte géol. au 1/200 000, 1 coupe géol., diagr. log., 1 diagr. en losange.
- **GANZEEV A., GROUZDEV V., MITIAEV A. (1978)**- Structure géologique de la région de la Haute-Moulouya.- pp. 111-114
- **LAZAREVIC D. (1969)** : Etude hydrogéologique du bassin versant de la Moulouya. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE, 58 pp., 52 fig. 60 tabl.
- **Michel COMBE & Marc SIMONET, (1971)** la haute moulouya, le sillon d'itzer-enjil et le massif de bou-mia — aouli
- **NGUYEN QUANG T. (1963)** : Rapport de fin de sondage ; forage de reconnaissance dans la Haute-Moulouya. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE, 6 pp., 1 coupe géol. De forage.

- **NGUYEN QUANG T. (1964)** : Rapport de fin de sondage : forages de reconnaissance en Haute-Moulouya. Rapp. inéd. MTPC/DH/DRE, 16 pp., 1 fig., 8 coupes géol. De forages.
- **Pierre ADAM & Patrice BAPTISTE (2002)**: HYDROGEOLOGIE & FORAGE D'EAU

### Liste des sites web visités

<http://glcf.umiacs.umd.edu/>

<http://www.vulgarisation-informatique.com/>

<http://www.esrifrance.fr/>

<http://www.esri.com>

<http://www.sig-gps.net>

<http://blogs.esri.com/hydro/archiveArc-Hydro-Tools-Version-.aspx>

[www.water.gov.ma](http://www.water.gov.ma)

[www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)

[www.minenv.gov.ma](http://www.minenv.gov.ma)

[www.esri.com/datamodels](http://www.esri.com/datamodels)

[www.archydrogw.com](http://www.archydrogw.com)

[www.aquaveo.com/archydro](http://www.aquaveo.com/archydro)

## Annexes

### Précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la Haute Moulouya

Station et période de mesure	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Total
Ansegmir (31/31-03/04)	16,8	18,9	21,3	21,4	18,9	18	19,7	26,6	22,5	14,1	5,5	6,2	<b>209,8</b>
Zaida (31/31-03/04)	16,8	18,8	25,1	22,5	21	16,1	20,4	30,9	23,8	14	6,4	9,1	<b>225</b>
A. Midelt (31/31-03/04)	21,7	19,3	20,5	14,2	14	18,3	19,6	31,3	28,5	16,5	5,5	8,1	<b>217,4</b>
Louggagh (67/68-03/04)	39,4	39	40,4	23,8	19,8	22,6	28,4	41,3	37,4	31,4	11,3	26,9	<b>363,6</b>
El Aouia (77/78-03/04)	38,1	28,4	18,3	19,9	13,4	14,6	19,5	32,3	41,3	19,7	11,1	24,1	<b>287,9</b>
Tabouazant (78/79-03/04)	35,9	33	32,5	26,5	30,6	32	30,8	39,2	35,1	20,6	9,1	17,1	<b>342,4</b>
A. Oufounes (91/92-03/04)	39,4	37	36,2	39,5	20,5	21,5	32,3	45,2	44,1	26	8,8	30,5	<b>379,3</b>

Variation de la température dans la période de 30 ans

Station	Période de mesure (30 ans)	Moyenne
Louggagh	74-75/03-04	10,9
Ansegmir	74-75/03-04	14,28
Zaida	74-75/03-04	13,94

Evaporation moyenne annuelle (mm)

Station	Evaporation moyenne annuelle (mm)	
	Piche	Bac
Louggagh	1520	1444
Ansegmir	2258	2110
Zaida	1827	1939



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**Nom et prénom:** Khadija DIANI

**Année Universitaire :** 2012/2013

**Titre:** Modélisation spatiale des données hydrologiques et hydrogéologiques du bassin de la Haute Moulouya, Application de Geodatabae, d'Arc Hydro et d'ArcHydro Groundwater

### Résumé

Le développement rapide des systèmes d'informations géographiques (Arhydro et ArhydroGranwater) a fortement amélioré quantitativement et qualitativement l'interprétation et l'utilisation des données spatiales dans différents sens, notamment dans le domaine de la science de la terre. En revanche l'utilisation de ces outils repose sur la connaissance préalable du terrain

Cette étude a pour objet la synthèse des connaissances hydrologique et hydrogéologiques de la Haute Moulouya et l'élaboration d'une Geodatabase a partir de l'extension ArcHydro et ArhydrGroundWater d'un système d'information géographique (SIG)

Donc ce mémoire on a démontré en définitive la capacité des modèles hydrologiques Arc Hydro et Arhydro Groundwater de 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. C'est un modèle plus précis

Les résultats de cette étude peuvent être exploités dans n'importe quel projet qui nécessite la base de données similaire.

### Mots clés:

**Bassin versant, Haute Moulouya, SIG, Geodatabae, ArcHydro, et d'ArcHydro Groundwater**