



Année Universitaire : 2014-2015



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

Utilisation d'Arc-Hydro et d'HEC-GeoHMS dans l'extraction des données pour la modélisation hydrologique spatialisée du bassin du Haut Sebou

Présenté par:

Btissam JABRI

Encadré par:

- Mr. Abdellah DRIDRI, FSDM
- Mr. Mehdi OUADGHIRI, ABHS

Soutenu le 24 Juin 2015 devant le jury composé de:

- Mr. Abderrahim Lahrach
- Mr. Abdellah DRIDRI
- Mr. Abdel-Ali Chaouni
- Mr. Lahcen Benaabidate

Stage effectué à : ABHS,





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

Nom et prénom: Btissam JABRI

Année Universitaire : 2014/2015

Titre: Utilisation d'Arc-Hydro et d'HEC-GeoHMS dans l'extraction des données pour la modélisation hydrologique spatialisée du bassin du Haut Sebou

Résumé

Le présent travail porte sur la collecte et la préparation des données nécessaire à la modélisation hydrologique du bassin du Haut Sebou à l'amont du barrage Allal El Fassi. Il a pour ambition de décrire une méthodologie permettant de combiner les technologies spatiales, notamment les systèmes d'informations géographiques (SIG), de la télédétection, et des modèles numériques de terrain (MNT), avec les modèles hydrologiques dans une perspective de préparer à une modélisation hydrologique spatialisée qui sert à la prévision des crues.

La méthodologie suivie pour la réalisation de cette étude décline en plusieurs phases:

La collecte et le traitement des données géographiques ont constitué la première phase de ce projet. Cette démarche consiste, dans un premier temps, à l'extraction automatique des sous-bassins et du réseau de drainage, l'évaluation de la qualité de cette extraction, ainsi que la mise en œuvre de quelques solutions pour l'amélioration des résultats. Puis, la mise en forme de ces données pour la schématisation du bassin.

Et enfin, la préparation des données d'occupation et de type du sol pour l'élaboration d'une carte du Curve Number (CN) et l'importation du modèle du bassin sous HEC-HMS.

Mots clés:

Modélisation hydrologique spatialisée, Télédétection, Systèmes d'Information Géographique (SIG), modèles numériques de terrain (MNT), Curve Number (CN), HEC-HMS.

Je dédie ce modeste travail de fin d'étude à :

A mes très chers parents, qui ne cesse de se sacrifier pour ma réussite et m'éclairent le chemin par leurs conseils judicieux.

Mes professeurs qui m'ont toujours guidé vers le chemin du succès, leur compréhension et leurs conseils qui m'ont permis de mieux apprécier la formation disposée au sein de la faculté.

Ma sœur et mon frère qui ont toujours été là pour moi et qui m'ont poussé à aller de l'avant.

Mes amis et mes collègues pour le soutien moral et l'ambiance familiale qu'ils m'ont pas manqué d'apporter pendant cette année.

A tous ceux qui m'aime et me souhaite le bonheur.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail et à la l'élaboration de ce rapport.

Btissam

REMERCIEMENTS

Arrivé au terme de la rédaction de ce mémoire, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements à tous ceux qui, par leur soutien et leurs conseils, m'ont aidé à sa réalisation.

Ma gratitude va d'abord au directeur de ce mémoire, Monsieur Abdellah DRIDRI, Professeur à la Faculté des Sciences Dahar Mehraz, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Je tiens vivement à le remercier pour ses directives encourageantes et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de cette recherche.

C'est plus qu'un remerciement ordinaire que je dois remercier Monsieur Mehdi OUADGHIRI, Ingénieur à l'agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS)-division Planification et Gestion des ressources en eaux qui n'a jamais hésité à m'orienter et diriger durant toute ma période de stage à l'ABHS. Je le remercie infiniment.

Mes grands remerciements et respects pour Monsieur. BENAABIDATE Lahcen, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et responsable du Master d'Hydrologie de surface et Qualité des Eaux. Je suis très sensible à l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Il m'est agréable de remercier Monsieur Abderrahim LAHRACH, Monsieur Abdel-Ali CHAOUNI, Professeurs à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès qui m'ont honoré en acceptant de juger ce travail. Je leur suis largement redevable, car leurs qualités d'enseignant, ont permis mon apprentissage de la recherche. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je remercie vivement Monsieur Abdelhafid EL MOSTAKI, Ingénieur à la direction Régionale des Eaux et Forêts et de la lutte contre la Désertification de Fès et tous les responsables du bureau de cartographie et SIG pour toute l'aide qu'ils m'ont accordé.

Mes vifs remerciements à tous les professeurs de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès qui ont contribué pour cette formation durant tout ce cycle.

Ma sincère reconnaissance s'adresse à mes amis qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

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 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

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I. Outils utilisés :.....	4
1. Le système d'information Géographique ArcGIS :.....	4
2. Télédétection :.....	5
3. HEC-HMS :.....	6
II. Modélisation hydrologique :.....	8
1. Généralités :.....	8
2. Modélisation spatialisée.....	8
III. Modélisation sous HEC-HMS :.....	9
1. Introduction :.....	9
2. Méthodes de calcul des pertes en précipitations brutes :.....	10
a) Modèle de pertes initiales à taux constant :.....	10
b) Modèle à déficit et taux constant :.....	11
c) Modèle du SCS Curve Number :.....	11
d) Modèle de Green et Ampt :.....	12
e) Modèle continu SMA (Soil Moisture Accounting) :.....	12
3. Les méthodes de calcul du ruissellement :.....	12
a) Modèle de l'hydrographe unitaire de Snyder :.....	12
b) Le modèle du SCS (Soil Conservation Service) :.....	12
c) Le modèle de CLARK (ModClark) :.....	13
d) Modèle de l'onde cinématique :.....	13
4. Méthodes d'écoulement fluvial :.....	15
a) Modèle de Puls (modified Puls) :.....	15
b) Modèle de Muskingum :.....	15
c) Modèle du décalage (lag model) :.....	16
d) Modèle de l'onde cinématique :.....	16
e) Modèle de Muskingum-Cunge :.....	16
CHAPITRE II: ETUDE HYDRO-GEOMORPHOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU HAUT SEBOU	18
I. Introduction	19
II. Le contexte général du bassin versant Haut Sebou :.....	19

1.	Situation géographique :	19
2.	Population et découpage administratif :	21
III.	Cadre géologique :	21
1.	Affleurements Géologiques :	21
a)	Le primaire	22
b)	Le Permo-Trias	22
c)	Le lias	22
d)	Le Miocène	22
e)	Le quaternaire	22
2.	Unités Morphostructurales :	23
a)	Rides anticlinales	24
b)	Synclinaux	25
c)	Plaines	25
IV.	Les caractéristiques physiques du bassin versant:	27
1.	La superficie et le périmètre :	27
2.	Indice de compacité (Forme) :	27
3.	Carte hypsométrique :	27
4.	Courbe hypsométrique :	29
5.	Le rectangle équivalent :	30
6.	Les altitudes caractéristiques :	32
a)	Les altitudes maximale et minimale	32
b)	L'altitude moyenne	32
c)	L'altitude médiane	32
d)	L'altitude la plus fréquente	32
7.	La pente :	33
a)	Distribution des pentes	33
b)	Pente moyenne	34
c)	Indice de pente globale :	34
8.	Réseau hydrographique et densité de drainage :	35
a)	La densité du drainage :	37
V.	Climatologie du bassin versant :	37
1.	Précipitations :	38
a)	Précipitations annuelles :	38
b)	Précipitations mensuelles :	39
2.	Evaluation de la lame d'eau tombée sur le bassin :	40
3.	Etude des températures :	45

a)	Température moyenne mensuelle :	45
4.	Relation température et précipitation :	46
VI.	Le régime hydrométrique :	50
1.	Débit moyenne annuelle :	50
2.	Répartition Mensuelle des Débits :	51
VII.	Conclusion :	52
CHAPITRE III: PREPARATION DES DONNEES		54
I.	Délimitation du bassin versant :	55
1.	Modèle numérique de terrain (MNT) :	55
2.	Délimitation automatique du bassin du Haut Sebou:	56
II.	Schématisation du bassin versant :	57
1.	Délimitation des sous bassins et extraction du réseau de drainage :	57
a)	Outils Arc-Hydro	57
b)	Démarche :	58
c)	Qualité de l'extraction du réseau hydrographique :	61
d)	Découpage en sous bassins :	63
e)	Paramètres morphologiques des sous bassins	63
III.	Occupation du sol :	66
1.	Impact de l'occupation de sol sur le comportement hydrologique :	66
2.	Choix de l'image satellite :	67
3.	Classification de l'image satellite :	68
IV.	Pédologie :	70
V.	Calcul de la grille CN :	76
1.	Génération de la grille CN :	76
a)	Préparation des données d'occupation des sols pour le CN Grille :	76
b)	Préparation des données de sol pour le CN Grille :	77
c)	Combinaison du type et d'occupation de sol :	77
d)	Table de correspondance type –occupation de sol :	78
e)	Création de la grille CN :	79
2.	Prise en compte de l'état d'humidité de sol :	81
VI.	Importation du modèle du bassin sous HEC-HMS :	85
CONCLUSION GENERALE		89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		90

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue (Musy, 2005).....	6
Figure 2: Vue d'ensemble du SIG et du modèle hydrologique (USACE, 2010d)	7
Figure 3: Etapes de modélisation par HEC-HMS	9
Figure 4: carte de localisation géographique du bassin versant du Haut Sebou.....	20
Figure 5 : Carte de découpage administratif la répartition de la densité des populations du bassin Haut Sebou	21
Figure 6: Carte géologique du bassin versant d' Haut Sebou de la retenue de barrage Alla El Fassi élaborée par SIG. Extrait de la carte géologique de Sefrou au 1/100 000 (A .CHARRIERE, 1971).....	23
Figure 7: Carte Morphostructurales exécutée par la composition du MNT et la géologie du Haut Sebou sous ArcSce	26
Figure 8: Carte hypsométrique du bassin du Haut Sebou	28
Figure 9: Courbe hypsométrique du bassin Haut Sebou	29
Figure 10: Interprétation de la courbe hypsométrique.....	30
Figure 11: Rectangle équivalent du bassin versant Haut Sebou	31
Figure 12: Carte des pentes du Bassin Haut Sebou	33
Figure 13: carte du réseau hydrographique classifié du bassin versant haut Sebou	36
Figure 14 : Variations des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant Haut Sebou (1991-2014).....	39
Figure 15: Variations des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin Haut Sebou (1991-2014).....	39
Figure 16: Variations des précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant Haut Sebou (1991-2014).....	40
Figure 17: Carte des polygones de Thiessen relative au bassin versant Haut Sebou	42
Figure 18: Carte des isohyètes relatives au bassin versant Haut Sebou.....	43
Figure 19: Variations de températures moyennes mensuelles au niveau d'Aguelmane Sidi Ali et EL Mers	46
Figure 20: Diagramme ombrothermique de Gaussen dans le bassin versant Haut Sebou au niveau de la station Aguelmane Sidi Ali (2003-2014).....	47
Figure 21: Diagramme ombrothermique de Gaussen dans le bassin versant Haut Sebou au niveau de la station El Mers (2003-2014).....	47
Figure 22: Climagramme d'Emberger dans le bassin versant Haut Sebou	49
Figure 23: Variations des débits annuels moyens pour les différentes stations (1984-2012)	51
Figure 24: Variations des débits moyens mensuels dans le bassin Haut Sebou (1984-2012)	52
Figure 25: Formats du modèle numérique de terrain	55
Figure 26: Comparaison entre la délimitation manuelle et la délimitation automatique... ..	56
Figure 27: Modèle spatial d'Arc Hydro	57
Figure 28: Principe de l'outil direction du courant (Flow Direction).....	58
Figure 29: Principe de l'outil Accumulation de flux (Flow Accumulation).....	59

Figure 30: Comparaison entre le tracé de réseau extrait du MNT, avant et après modification, et le réseau hydrographique de référence	62
Figure 31: Découpage final des sous bassins	63
Figure 32: Plus long chemin hydraulique par sous bassins	64
Figure 33: Image multi spectrale du Haut Sebou	68
Figure 34: Echantillons d'apprentissage	69
Figure 35: Evaluation d'échantillons d'apprentissage	69
Figure 36: Carte d'occupation des sols classée en sortie	70
Figure 37: Classification pédologique des sols – BV Haut Sebou	71
Figure 38: importance des classes pédologique du Haut Sebou	72
Figure 39 : Pédologie du Bassin versant Haut Sebou selon la classification hydrologique..	75
Figure 40: reclassification et conversion de la carte d'occupation des sols en polygone	76
Figure 41: Préparation des données de sol.....	77
Figure 42: les résultats de l'union	78
Figure 43: Table attributaire de correspondance entre occupation et type de sol –Sol.....	79
Figure 44: Etapes de création de la grille Curve Number (CN Grid)	80
Figure 45: Choix de l'état d'humidité pour le calcul de CN	81
Figure 46: Carte CN du BV du Haut Sebou à l'état sec (CN I).....	82
Figure 47: Carte CN du BV du Haut Sebou à l'état moyennement humide (CN II)	83
Figure 48: Carte CN du BV du Haut Sebou à l'état humide (CN III)	84
Figure 49: Modèle physique du bassin versant du Haut Sebou	86
Figure 50: Modèle hydrologique finale du bassin du Haut Sebou	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Répartition de la surface totale par tranche d'altitude	28
Tableau 2: Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au-dessus de la limite....	29
Tableau 3: Importance des classes des pentes dans le bassin-versant	34
Tableau 4: Classification du relief selon l'Ig donnée par l'ORSTOM	35
Tableau 5: Caractéristiques morphologiques du bassin Haut Sebou	37
Tableau 6 : Caractéristiques géographiques des stations météorologiques	38
Tableau 7: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen	43
Tableau 8: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des isohyètes	44
Tableau 9: Estimation de la lame d'eau moyenne	45
Tableau 10: Bioclimats des stations étudiées selon le système d'Emberger	49
Tableau 11: Stations hydrométriques et leurs caractéristiques	50
Tableau 12: Débit liquides moyens mensuels des stations étudiées.....	52
Tableau 13: Caractéristiques des sous bassins	65
Tableau 14: Bandes Landsat ETM+.....	67
Tableau 15: texture des sols en fonction de leurs compositions.....	73
Tableau 16: la classification hydrologique des sols.....	74

LISTE DES ABREVIATIONS

BV: Bassin versant

HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center –Hydrologic Modeling System

MNT : Modèle Numérique de Terrain

SCS : Soil Conservation Service

SIG : Système d'Information Géographique

NRCS : Natural Resource Conservation Service

Résumé

Le présent travail porte sur la collecte et la préparation des données nécessaire à la modélisation hydrologique du bassin du Haut Sebou à l'amont du barrage Allal El Fassi. Il a pour ambition de décrire une méthodologie permettant de combiner les technologies spatiales, notamment les systèmes d'informations géographiques (SIG), de la télédétection, et des modèles numériques de terrain (MNT), avec les modèles hydrologiques dans une perspective de préparer à une modélisation hydrologique spatialisée qui sert à la prévision des crues.

La méthodologie suivie pour la réalisation de cette étude décline en plusieurs phases :

La collecte et le traitement des données géographiques ont constitué la première phase de ce projet. Cette démarche consiste, dans un premier temps, à l'extraction automatique des sous-bassins et du réseau de drainage, l'évaluation de la qualité de cette extraction, ainsi que la mise en œuvre de quelques solutions pour l'amélioration des résultats. Puis, la mise en forme de ces données pour la schématisation du bassin.

Et enfin, la préparation des données d'occupation et du type de sol pour l'élaboration d'une carte du Curve Number (CN) et l'importation du modèle du bassin sous HEC-HMS.

Mots clés :

Modélisation hydrologique spatialisée, Télédétection, Systèmes d'Information Géographique (SIG), modèles numériques de terrain (MNT), Curve Number (CN), HEC-HMS.

Abstract

This work focusing on the hydrological modeling of High Sebou basin upstream of the dam Allal El Fassi. It describe a methodology for combining space technologies, including geographical information systems (GIS), remote sensing and digital terrain models (DTM), with hydrological models with a view to prepare for a spatial hydrologic modeling which used for flood forecasting.

The methodology for conducting this study comes in several parts:

The collection and processing of geographic data constituted the first part of this project. This approach is, in the beginning, to automatic extraction of sub-basins and drainage network, assessing the quality of this extraction, as well as the implementation of some solutions to the improved results. Then, the formatting of data for the mapping of the basin.

And finally, the preparation of the occupation and soil type data for the development of a map of Curve Number (CN) and import the model basin in HEC-HMS.

Keywords:

Spatial hydrologic modeling, Geographic information systems (GIS), remote sensing, digital terrain models (DTM), Curve Number (CN), HEC-HMS.

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des vingt dernières années, le Maroc a connu un certain nombre d'événements d'inondations tragiques ayant généré des inondations au niveau de plusieurs régions du pays en raison d'une part, de la croissance démographique, et du développement urbain, agricole, industriel et touristique qui entraînent une occupation croissante des zones vulnérables et d'autre part, de l'aggravation des phénomènes extrêmes (sécheresse et crues) suite aux changements climatiques.

Les épisodes qui ont causé d'importants dégâts humains et matériels ont eu lieu notamment en 1995 (Ourika), 1996-1997 (plaine du Gharb), décembre 2002 (Mohammedia, El Jadida, TAZA, Tétouan, Settat, Berrechid), 2009-2010 (plaine du Gharb, Rabat, Er-Rachidia, Missouri, IminTanout, Tanger, Nador, Casablanca, Khenifra, Tétouan, Agadir, Ait Melloul, Essaouira...).

Le plan national de protection contre les crues, réalisé par la Direction de la recherche et de la planification de l'eau en 2011, a permis d'identifier 392 sites qui présentent un risque de crues dont 63 sont situés dans le bassin de Sebou.

Dans notre projet on a choisi le bassin versant du Haut Sebou à l'amont du barrage Allal El Fassi qui est situé dans la partie haute du grand bassin de Sebou et qui a connu des inondations catastrophiques, comme celle de la crue du 10 octobre 2008 de l'oued Sebou. Le bassin du Haut Sebou était la scène de ce phénomène hydrologique exceptionnel a enregistré la plus grosse crue de son histoire soit 2600 m³/s. Cette crue a causé des dégâts matériels importants au niveau de l'infrastructure routière, d'alimentation en eau potable, et des terrains agricoles.

Pour faire face à ce risque d'inondation, il est nécessaire de se donner des outils pour répondre à trois objectifs complémentaires : la prévision des événements exceptionnels, pour pouvoir anticiper les inondations, la gestion de crise, pour réduire au mieux les dégâts, et la prévention des inondations pour déterminer quels sont les événements susceptibles de se produire dans le temps et dans l'espace.

La modélisation hydrologique permet de donner une représentation simplifiée du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant, afin d'expliquer sa réponse aux différentes conditions auxquelles il est soumis. Elle permet ainsi de connaître le fonctionnement du bassin versant, prévoir des débits en fonction de scénarii météorologiques et des aménagements hydrauliques existants et aussi de simuler les débits sur des cours d'eau.

L'objectif du présent travail repose sur la préparation des données nécessaire pour l'élaboration d'un modèle hydrologique spatialisé sur la base du modèle hydrologique HEC-HMS, , en se basant sur les fonctionnalités offertes par les SIG et la télédétection.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres dans lesquels sont présentés les aspects de la méthodologie suivie pour la préparation à la modélisation hydrologique, ainsi que l'application de cette méthodologie au bassin du Haut Sebou.


Le premier chapitre, comprend une synthèse bibliographique concernant la modélisation hydrologique ainsi que l'apport des SIG et de la télédétection à l'étude hydrologique des bassins versants.

le deuxième est consacré sur la détermination des facteurs qui vont prédire la réponse hydrologique du bassin du Haut Sebou, ils regroupent la situation géographique et géologique, les caractéristiques morphométriques, du réseau hydrographique et hydro-climatiques, à ce stade, on a va établir une étude basée sur la construction du modèle du bassin par l'élaboration des cartes d'altitude, des pentes, du réseau hydrographique et aussi effectuer certains calcul pour caractériser mieux le bassin tel que le périmètre, la superficie ,et le coefficient de compacité, on a abordé une étude des paramètres hydro-climatiques essentiels (précipitations, débit) qui s'avère très utile puisque c'est grâce à eux que s'opèrent les différents mécanismes régissant les transferts d'eau.

Le troisième chapitre porte sur la préparation des données nécessaires pour la modélisation hydrologique spatialisée du bassin à partir de l'extension Arc-Hydro et HEC-GeoHMS d'un système d'information géographique (SIG) ainsi l'élaboration des cartes d'occupation du sol et pédologique conformes aux prescriptions du NRC et le calcul de la grille CN. Puis l'importation du modèle du bassin dans HEC-HMS.

Chapitre I:

Synthèse bibliographique

A decorative scroll graphic with a light green background and a dark green border. The scroll is unrolled on the left and right sides. On the left side, there is a vertical floral pattern of leaves and flowers. At the bottom of the scroll, there is a horizontal row of small dots.

Dans ce premier chapitre nous présentons les outils et les méthodes utilisés dans ce travail ainsi une synthèse bibliographique des différents concepts théoriques

I. Outils utilisés :

1. Le système d'information Géographique ArcGIS :

C'est un ensemble d'applications SIG développé par la compagnie américaine ESRI (Environment Systems Research Institute), fondée 1969 aux Etats-Unis.

Ce logiciel offre de nombreuses potentialités pour la manipulation, la gestion, l'analyse et l'édition des données spatiales. Différentes couches d'informations spatiales peuvent être

manipulées offrant la possibilité d'analyser une ou plusieurs couches sous le contrôle des autres. Le seul lien entre ces différentes couches est le lien spatial, c'est-à-dire, l'appartenance au même espace géographique et ayant le même système de coordonnées. Il comporte principalement trois composantes :

ArcCatalog : est un explorateur de données tabulaires et cartographiques. Il est vivement conseillé d'utiliser ArcCatalog pour effacer les fichiers car ces fichiers sont accompagnés d'autres fichiers que l'explorateur de Windows, s'il est utilisé, ne permet pas de les effacer automatiquement. ArcCatalog permet aussi de visualiser les données tabulaires et les couches géographiques ainsi qu'une exploration des différents thèmes qui les constituent.

ArcMap : ArcMap est l'application fondamentale du logiciel ArcGIS. Elle contient une boîte à outils, organisée sous forme de modules indépendants (extensions), permettant de gérer, manipuler, analyser et éditer les différentes couches d'informations de la base de données. ArcMap est l'équivalent de l'ancienne version d'ArcView.

ArcToolbox : est une boîte à outils permettant d'effectuer des conversions et de transferts de format et aussi de projection.

Nous avons choisi d'utiliser ArcGIS pour la préparation des données, autant pour sa puissance de traiter les données spatiales que pour sa compatibilité avec le logiciel HEC-HMS.

2. Télédétection :

La télédétection (remote sensing) regroupe un ensemble de techniques ayant pour objectif d'étudier la surface de la terre par l'interprétation et l'analyse des images recueillies à partir d'avions ou de satellites. Elle utilise les propriétés des ondes électromagnétiques émises ou réfléchies par les objets sur terrain.

La liaison télédétection - hydrologie est une mise en relation de deux ensembles de données de nature très différente: les données issues des prises de vues satellitaires, d'une part, et les données résultant d'observations hydrologiques à l'exutoire des bassins versants d'autre part.

La télédétection satellitaire à haute résolution propose actuellement des images au pas d'espace de 10 m (SPOT) ou 30 m (LANDSAT TM) où chaque élément (pixel) est connu à travers sa radiométrie, respectivement selon 3 ou 7 bandes spectrales. L'information fournie se limite à la strate superficielle visible

En matière de gestion de risque d'inondation, la télédétection est utile pour déterminer:

- ✓ l'occupation de sol: élément important de la vulnérabilité et facteur clé du comportement hydrologique du bassin versant.
- ✓ Des caractéristiques d'inondation telles que l'extension spatiale et les hauteurs d'eau.
- ✓ Le relief, pour une représentation cartographique pertinente et pour une analyse d'impact des facteurs géomorphologique sur les débits.

L'élaboration d'un modèle pour caractériser le comportement hydrologique du bassin versant est délicate, notamment pour des bassins hétérogènes où de nombreux facteurs influencent les caractéristiques hydrologiques. La télédétection offre alors un moyen d'aider à la caractérisation spatiale des bassins.

L'utilisation des SIG et de la télédétection dans la modélisation hydrologique devient de plus en plus avantageuse, lorsqu'on constate que le croisement des hétérogénéités de bassin et des variabilités des précipitations, génère autant de variabilités dans les processus de genèse des débits.

3. HEC-HMS :

HEC-HMS est un logiciel de modélisation hydrologique déterministe et conceptuel qui permet la simulation événementielle et continue sur une longue durée. C'est un modèle semi distribué (sauf pour la modélisation par la méthode de ruissellement ModClark qui est une méthode distribuée) qui permet de diviser le bassin versant en sous-bassins élémentaires, en fonction des affluents et de la topographie.

La modélisation de la réponse d'un bassin versant à un évènement pluvieux est découpée en trois parties :

- ✓ La modélisation du bassin versant (basin model)
- ✓ La modélisation de la pluviométrie (Meteorologic Model)
- ✓ Les spécifications particulières

La modélisation d'un bassin versant consiste d'abord en un découpage de celui-ci en plusieurs sous-bassins versants élémentaires. Puis, dans un deuxième temps, il s'agit de spécifier les méthodes de calcul pour la fonction de production, la fonction de transfert et le type de débit de base adopté (fig. 21)

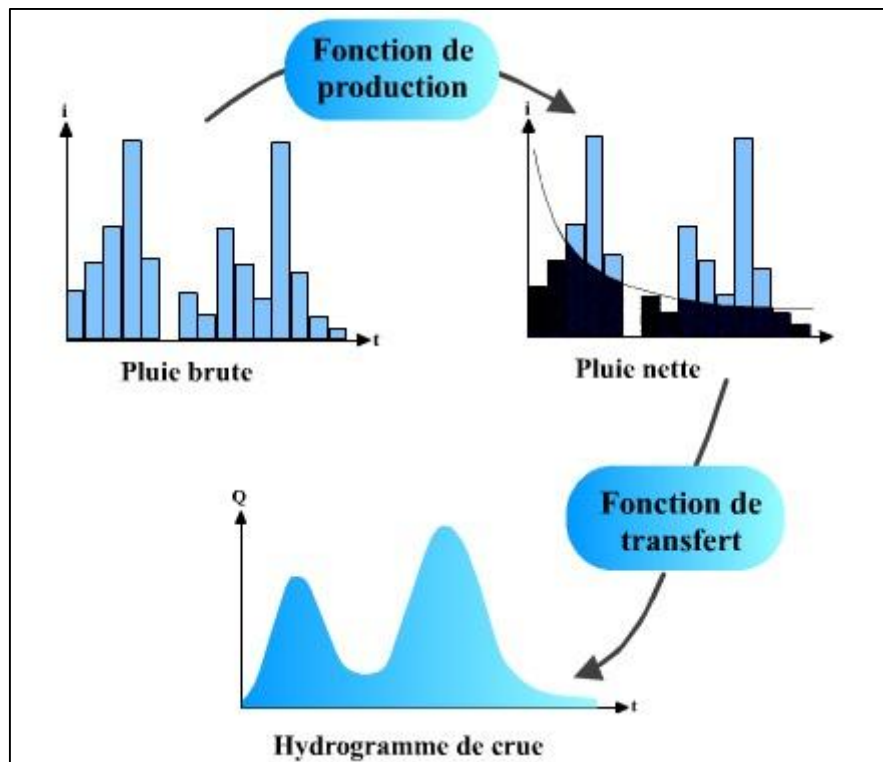


Figure 1: Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue (Musy, 2005)

Le couplage entre les deux logiciels HEC-GeoHMS et HEC-HMS permet de traduire l'information spatiale du SIG en une information hydrologique. Cette information peut être stockée sous forme distribuée dans l'espace, dans une grille dont on définit le maillage (Gridded Hydrologic Data).

En effet, HEC-GeoHMS opère dans le MNT via le SIG pour réaliser la délimitation en sous-bassins versants et l'extraction automatique du réseau hydrographique (Watershed & River Characteristics). Puis il permet d'estimer les paramètres hydrologiques d'entrée dans le modèle (HMS Inputs) comme le temps de concentration, le plus long chemin hydraulique, etc.

La relation entre le SIG, le HEC-GeoHMS et le HEC-HMS est illustrée sur la figure suivante. Les fonctionnalités du SIG et du modèle hydrologique sont séparées par la ligne discontinue au milieu :

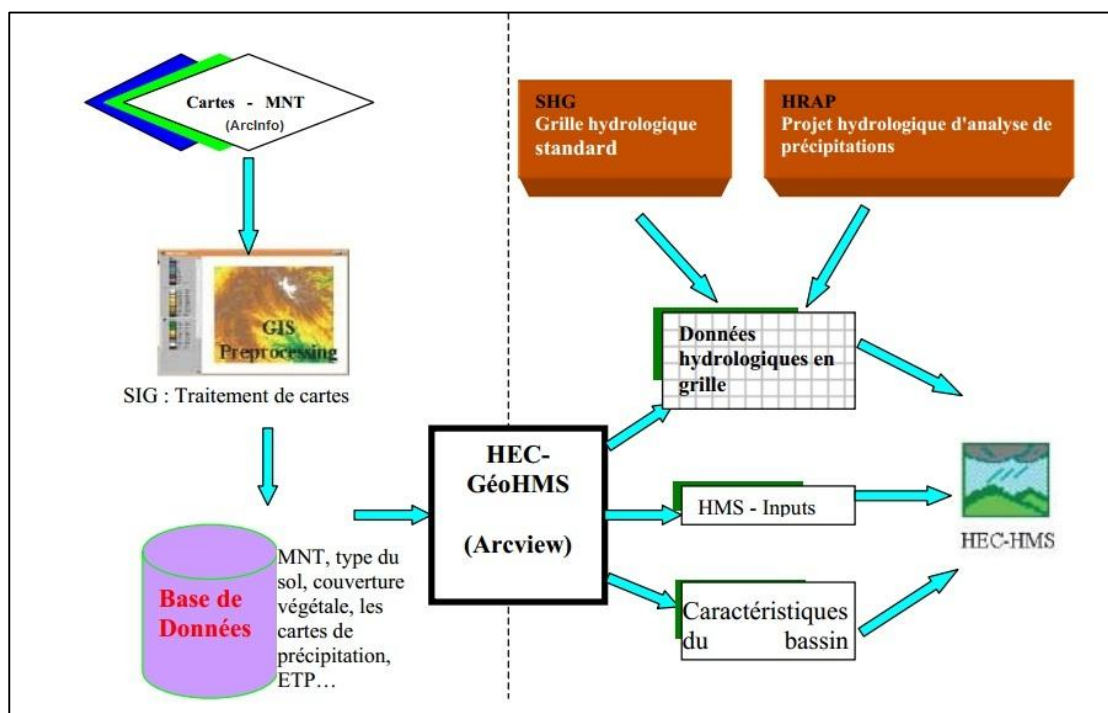


Figure 2: Vue d'ensemble du SIG et du modèle hydrologique (USACE, 2010d)

II. Modélisation hydrologique :

1. Généralités :

On appelle modèle une représentation qui décrit les relations entre les différents éléments d'un système.

En particulier, un modèle hydrologique de bassin versant est une représentation simplifiée du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant, afin d'expliquer la réponse du bassin aux différentes conditions auxquelles il est soumis. Il est constitué de variables d'état pour la description du bassin, de variables d'entrée pour la description de son environnement et de variable de sortie pour la description du problème, et il permet de définir des relations mathématiques paramétrées entre ces variables [Gineste 1998].

Les objectifs d'un modèle hydrologique :

- ✚ Connaître le fonctionnement d'un bassin versant,
- ✚ Prévoir des débits en fonction de scénarii météorologiques ou d'aménagement
- ✚ Simuler les débits sur des cours d'eau.

Les facteurs influençant la variabilité spatiale et temporelle des processus sont:

- ✚ Les conditions aux limites, c'est-à-dire la chronique de pluie dans son ensemble
- ✚ Les conditions initiales, c'est-à-dire l'état hydrique initial du bassin.
- ✚ La variabilité spatio-temporelle des caractéristiques du sol et de la végétation.
- ✚ Les caractéristiques géométriques du bassin.

Les différents modèles hydrologiques, selon Clarke (1973) sont:

- Déterministe / Stochastique
- Conceptuel / Empirique
- Distribué / Global

2. Modélisation spatialisée

Historiquement, la modélisation hydrologique était contrainte par les limites de calcul et l'indisponibilité des données distribuées de terrains et de précipitations. C'est pourquoi on était forcé d'utiliser des valeurs moyennes pour tout le bassin étudié.

Aujourd'hui, le développement des outils de calcul, les SIG, les satellites, la résolution spatial, ..., permet de produire, traiter et analyser les données spatiales afin d'obtenir des informations pertinentes permettant de tenir en compte la

variabilité spatiale des différents paramètres et améliorer significativement les systèmes de prévision.

D'autre part, le développement des modèles hydrologiques pour les pays arides et semi arides présente un certain nombre de problèmes. Le faible nombre d'événements pluvieux et l'hétérogénéité spatiale des précipitations rendent le modèle hydrologique difficile, voire impossible à calibrer. Dans ces cas, il est fort conseillé de développer un modèle spatialisé qui peut parfaitement tenir en compte de la distribution spatiale des caractéristiques du bassin et des précipitations.

III. Modélisation sous HEC-HMS :

1. Introduction :

Le modèle hydrologique déterministe HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) est un modèle qui permet de simuler en continu ou sur une base événementielle des événements sur une courte période (cas d'une crue) grâce à des modules de calculs de pertes, de ruissellement, d'écoulement fluvial et d'écoulement souterrain.

Le schéma général de la modélisation sous HEC-HMS est le suivant :

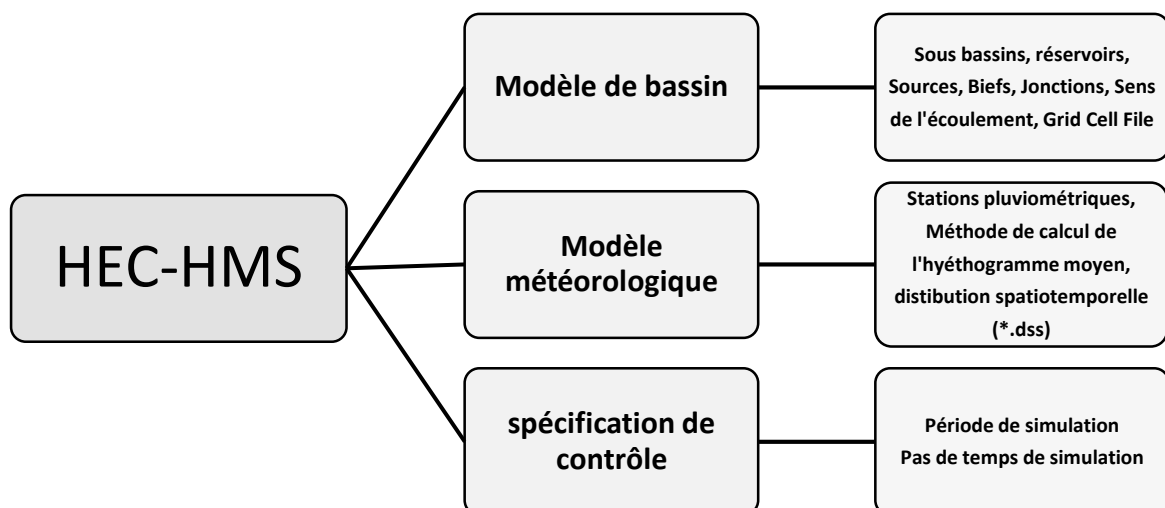


Figure 3: Etapes de modélisation par HEC-HMS

La modélisation mathématique peut se faire sur la base des méthodes suivantes :

Pertes	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle de pertes initiales à taux constant • Modèle à déficit et taux constant • Modèle basé sur le Curve Number • Méthode de Green et Ampt • Modèle de Soil Moisture Accounting
Ruissellement direct	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de l'hydrographe unitaire de Snyder • Méthode de l'hydrographe unitaire de Clark • Modèle du ModClarck • Méthode de l'onde cinématique
Ecoulement fluvial	<ul style="list-style-type: none"> • Plus modifiée • Muskingum Cunge • Décalage • Onde cinématique • Muskingum

2. Méthodes de calcul des pertes en précipitations brutes :

a) Modèle de pertes initiales à taux constant :

Dans ce modèle, on adopte les hypothèses suivantes:

- ✓ Il existe une perte initiale I_a qui représente l'interception et le stockage dans les dépressions du bassin versant. Tant qu'elle n'est pas atteinte il n'y a pas de ruissellement.
- ✓ Dès que la somme des précipitations antérieures atteint I_a , le taux de pertes potentiel maximum, noté f_c , est constant.

On peut calculer l'excès de précipitations comme suit:

$$\text{Si } \sum P_i \leq I_a \Rightarrow P_{et} = 0$$

$$\text{Si } \sum P_i \geq I_a \text{ et } P_t \geq f_c \Rightarrow P_{et} = P_t - f_c$$

$$\text{Si } \sum P_i \geq I_a \text{ et } P_t \leq f_c \Rightarrow P_{et} = 0$$

b) **Modèle à déficit et taux constant :**

C'est un modèle quasi-continu de pertes de précipitations. Il est similaire au précédent sauf que la valeur due aux pertes initiales est changée dépendamment des épisodes de précipitation.

Ce modèle inclut trois paramètres qui sont : le taux de perte, la perte initiale et le taux d'absorption qui représentent respectivement des propriétés physiques du sol.

c) **Modèle du SCS Curve Number :**

Ce modèle estime l'excès de précipitations comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation suivante :

$$P_e = \frac{(p - I_\alpha)^2}{p - I_\alpha + S}$$

***P_e** : L'excès de précipitation ;*

***P** : est le total des précipitations accumulées au temps t ;*

***I_a** : Les pertes initiales ;*

***S** : est le potentiel maximum de rétention.*

On a par ailleurs la relation empirique ci-dessous, qui a été développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins versants expérimentaux qui donne la en fonction de S:

$$I_\alpha = 0.2S$$

On obtient donc :

$$P_e = \frac{(p - 0.2S)^2}{p + 0.8S}$$

Le potentiel de rétention maximum, S, et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du numéro de courbe CN (Curve Number) par :

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

CN peut être estimé comme une fonction du type du sol, d'occupation du sol et des conditions hydriques précédentes du bassin.

d) **Modèle de Green et Ampt :**

Il est l'un des plus utilisés, c'est un modèle conceptuel d'infiltration et de précipitation. Sa fonction de production est basée sur la loi de Darcy généralisée aux milieux non saturés combinée avec le principe de conservation de la masse.

e) **Modèle continu SMA (Soil Moisture Accounting) :**

Contrairement aux modèles précédents, SMA est un modèle qui étudie de longs épisodes pluviométriques avec alternance de pluie et de temps sec. A partir des données de précipitations et d'évapotranspiration, il calcule le ruissellement de surface, les infiltrations, l'évaporation et la percolation profonde.

3. Les méthodes de calcul du ruissellement :

a) **Modèle de l'hydrographe unitaire de Snyder :**

Ce modèle est défini par deux paramètres : un coefficient de pointe C, et le lag time du bassin t_p .

L'hydrographe unitaire standard de Snyder est tel que la durée de l'hydrographe t_r est reliée au lag t_p du bassin par l'équation:

$$t_p = 5.5 t_r$$

La pointe de l'hydrographe unitaire standard de Snyder est calculée par la formule suivante:

$$\frac{U_p}{A_d} = C \frac{C_p}{t}$$

Où,

U_p : Le pic de l'hydrogramme unitaire,

A_d : La surface drainée,

C_p : Coefficient du pic de l'hydrogramme unitaire,

C : Constante de conversion = 2.08 pour le Système international d'unités (SI),

t : Le temps de décalage. Il est égal à t_p pour des événements standards et à t_{pr} pour d'autres durées.

b) **Le modèle du SCS (Soil Conservation Service) :**

Ce modèle repose sur l'hydrogramme unitaire normalisé (qui est la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires calculés pour différents bassins versant). Ce hydrogramme normalisé représente le débit d'écoulement, U_t , comme une fraction du débit maximal, U_p , et, T_p , l'instant du pic. On a par ailleurs les relations empiriques suivantes :

$$U_p = 2.08 \frac{A_d}{T_p}$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6T_c$$

Où, Δt : La durée de l'excès de précipitation ;

T_c : le temps de concentration du bassin.

Ainsi, il suffit de connaître le temps de concentration pour remonter à T_p et U_p et d'obtenir ainsi l'hydrogramme unitaire désiré par simple multiplication de l'hydrographe unitaire normalisé.

c) Le modèle de CLARK (ModClark) :

Il s'agit d'un modèle quasi-conceptuel puisqu'il prend en compte les deux processus intervenant dans la transformation d'un excès de précipitation en ruissellement, à savoir le mouvement de l'eau de son origine jusqu'à l'exutoire du bassin versant et l'atténuation de cette quantité d'eau par stockage lors de son parcours. Le modèle de Clark modifié, fait intervenir un maillage du bassin versant qui permet de mieux modéliser les temps de parcours.

Une fois que l'excès de précipitation est déterminé pour chaque grille du maillage du bassin versant, le temps de transfert de l'excès de précipitation de la grille à l'exutoire est calculé par la relation suivante :

$$U_p = 2.08 \frac{A_d}{T_p}$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6T_c$$

Où,

t_{cell} : Temps de transfert de l'excès de précipitations de la grille ;

t_c : Temps de concentration du bassin versant

d_{cell} : Distance entre la grille et l'exutoire du bassin versant ;

d_{max} : Le plus long parcours du bassin versant.

d) Modèle de l'onde cinématique :

Il s'agit d'un modèle conceptuel qui représente les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à l'excès de précipitations.

Il résout donc les équations (de continuité et de quantité du mouvement) qui régissent les écoulements non stationnaires en eau peu profonde pour tracer l'hydrogramme de ruissellement.

Le bassin versant étant découpé en deux plans séparés par le cours d'eau dans lequel les écoulements se déversent Le modèle de l'onde cinématique représente les écoulements de surface sur ces plans.

Sans rentrer dans la théorie complète, et sous quelques hypothèses simplificatrices, l'équation de mouvement et celle de continuité donnent :

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \alpha^{m-1} \frac{\partial A_T}{\partial x} = q$$

Avec

$$\alpha = 1.486 \frac{S^{0.5}}{N}$$

$$m = \frac{5}{3N}$$

Où,

A_T : La section transversale

S : est la pente

N : est un coefficient de rugosité tabulé;

q : est le débit d'apport latéral par unité de longueur du canal.

HEC-HMS représente les écoulements de surface sur un canal rectangulaire de largeur unité. Cette méthode est aussi utilisée pour les écoulements fluviaux. Dans les deux cas, la résolution des équations se fait par la méthode des différences finies pour assurer la précision et la stabilité. Pour utiliser la méthode de l'onde cinématique dans la modélisation du ruissellement, le bassin versant est décomposé en divers éléments :

- Les plans de ruissellement de surface ;
- Les canaux de collection ;
- Le cours d'eau principal.

4. Méthodes d'écoulement fluvial :

a) Modèle de Puls (modified Puls) :

Ce modèle est basé sur une approximation en différences finies de l'équation de continuité, et sur une représentation empirique de l'équation de quantité de mouvement. On considère qu'il n'y a pas d'apports latéraux. L'équation de continuité devient alors :

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

On utilise alors la méthode des différences finies en écrivant que :

$$I_t - O_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t}$$

Où I_t et O_t sont les débits moyens respectivement amont et aval pendant une période Δt , ΔS_t , étant la variation du stock d'eau durant le même pas de temps. On obtient alors l'équation suivante :

$$\left(\frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2} \right) = \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) + \left(\frac{S_{t-1} - O_{t-1}}{2} \right)$$

Ainsi, au temps t , on connaît les termes de droite, et l'on cherche à déterminer les termes de gauche. On a donc deux inconnues S_t et O_t , et l'on doit donc connaître une relation supplémentaire entre ces deux variables. Une fois cette relation déterminée, on résout le nouveau système d'équations par récurrence. En ce qui concerne la relation liant S_t à O_t , on peut la déterminer par des observations historiques des valeurs des débits et du volume d'eau stocké au cours du temps.

b) Modèle de Muskingum :

Ce modèle utilise comme le modèle précédent une approximation simple en différences finies de l'équation de continuité :

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2} \right) = \left(\frac{S_t + S_{t-1}}{\Delta t} \right)$$

On écrit ensuite que le volume d'eau stocké est la somme d'un volume stocké constant et d'une variation du stock :

$$S_t = T_p O_t + T_p X (I_t - O_t) = T_p (X I_t + (1 - X) O_t)$$

Avec, T_p : Temps de parcours et X paramètre permettant une pondération ($0 < X < 0.5$). Ainsi, si le stockage d'eau dans la rivière est contrôlé par les conditions aval, on met $X = 0$ (On retrouve alors le modèle de réservoir linéaire présenté plus haut). Au contraire, on prendra $X = 0.5$, pour donner un poids similaire aux débits entrants et sortants.

c) **Modèle du décalage (lag model) :**

Ce modèle est le plus simple de tous et est extrêmement utilisé surtout pour modéliser le drainage urbain. On considère que l'hydrogramme aval est simplement l'hydrogramme amont décalé dans le temps d'une certaine durée (lag) : La valeur de ce décalage peut être estimée comme la durée entre les deux pics des deux hydrographes (ou leurs centres de gravité respectifs).

d) **Modèle de l'onde cinématique :**

Ce modèle est basé sur une approche différences finies de l'équation de continuité et une approche simplifiée de l'équation du mouvement. Cette approche est décrite en détail dans la section précédente. Les informations nécessaires à ce modèle sont :

- Le type de la section du cours d'eau : trapézoïdale, rectangulaire ou circulaire ;
- Les dimensions principales : la base de la section du canal, le diamètre de la conduite ;
- Pente des berges ;
- La longueur du bief ;
- La pente de ligne d'énergie ;
- Coefficient de la rugosité de Manning (n).

e) **Modèle de Muskingum-Cunge :**

Le modèle Muskingum est facile à utiliser mais emploie des paramètres qui n'ont pas de signification physique et qui sont donc difficiles à évaluer. De plus ce modèle est basé sur des approximations qui s'avèrent souvent fausses. Le modèle de Muskingum-Cunge évite ces erreurs. Il est basé sur l'équation de continuité incluant un débit latéral et sur la forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = q$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial Y}{\partial X}$$

En combinant ces deux équations, on obtient alors l'équation de diffusion-convection de Miller et Cunge, 1975.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial X} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} + c q_1$$

Avec c la célérité μ la diffusivité hydraulique définies par :

$$c = \frac{\partial Q}{\partial X}$$

$$\mu = \frac{Q}{2B S_0}$$

L'approximation en différences finies des dérivées partielles permet d'obtenir l'équation suivante:

$$Q_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 q_1 \Delta x$$

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}$$

$$C_3 = \frac{2(1-X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}$$

$$C_4 = \frac{2\frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}$$

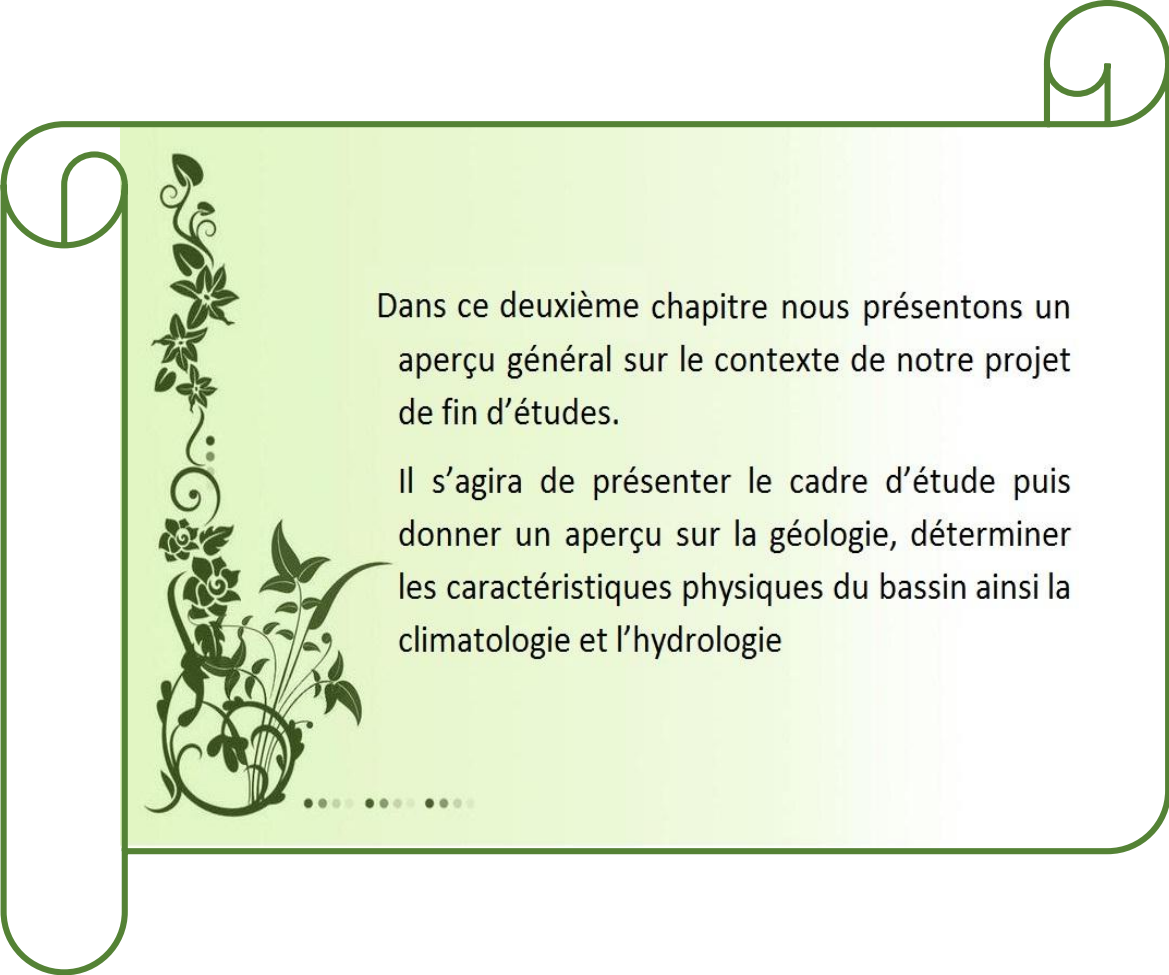
$$K = \frac{\Delta x}{c}$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B S_0 c \Delta x} \right)$$

Les coefficients, Q , B et les quatre paramètres C_i sont des variables. Ils sont recalculés à chaque pas de temps et d'espace par HEC-HMS.

Chapitre II :

Étude hydro-géomorphologique du bassin versant du Haut Sebou



Dans ce deuxième chapitre nous présentons un aperçu général sur le contexte de notre projet de fin d'études.

Il s'agira de présenter le cadre d'étude puis donner un aperçu sur la géologie, déterminer les caractéristiques physiques du bassin ainsi la climatologie et l'hydrologie

I. Introduction

La caractérisation hydrologique du Haut Sebou ne sera entamée qu'après une analyse des facteurs qui vont prédire sa réponse hydrologique, notamment le régime des écoulements en période des crues. Ainsi nous devons citer les facteurs suivants : La situation géographique et géologique et les caractéristiques morphométriques, celles du réseau hydrographique ainsi que les caractéristiques hydro-climatiques.

L'estimation de ces caractéristiques sera basée sur la technique de digitalisation et les modèles numérique du terrain.

II. Le contexte général du bassin versant Haut Sebou :

1. Situation géographique :

Le BV de la retenue de barrage Allal-Fassi est situé dans la partie haute du grand bassin de l'oued Sebou (Fig. 4). Il se localise entre les latitudes 33° et 34° nord et les longitudes 4°03" et 5°20" ouest et couvre une superficie de 5764 km². Ce bassin est drainé par l'oued Sebou qui prend naissance dans la région d'Aguelmane Sidi Ali à environ 2078 m d'altitude. Sur son parcours l'oued Sebou reçoit plusieurs affluents (Guigou, Zloul, Maasser...) creusés principalement comme le cours principal dans les terrains du Jurassique carbonaté (calcaires et dolomies) dont les altitudes dépassent localement 2500 m.

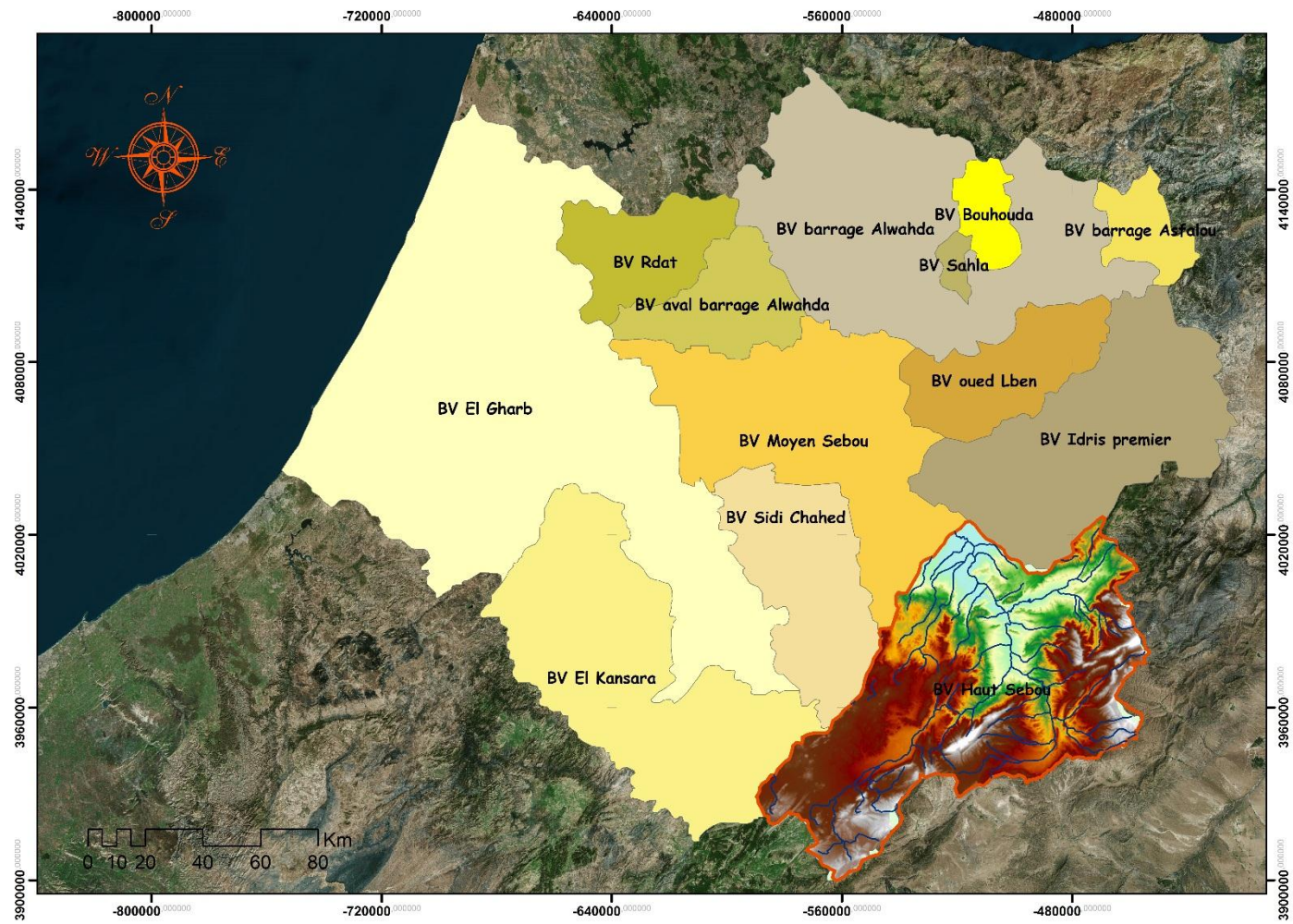


Figure 4: carte de localisation géographique du bassin versant du Haut Sebou

2. Population et découpage administratif :

Le bassin Haut Sebou couvre près de 30 communes et 5 provinces à savoir une partie des provinces : Taza, Sefrou, Ifrane, Khenifra et Boulmane.

Ce bassin abrite une population urbaine d'environ 49 102 habitants, localisé dans 7 centres urbains à savoir les centres de : Timahdit, Boulemane, Almis Guigou, Immouzer Marmoucha, Ribat Al Khir, El Menzel, Zaouiate Bougrine (fig. 5). Par ailleurs la majorité de la population est localisée aux deux centres :

- ✓ Ribat Al khir avec 12 654 habitants.
- ✓ El Menzel avec 11 484 habitants.

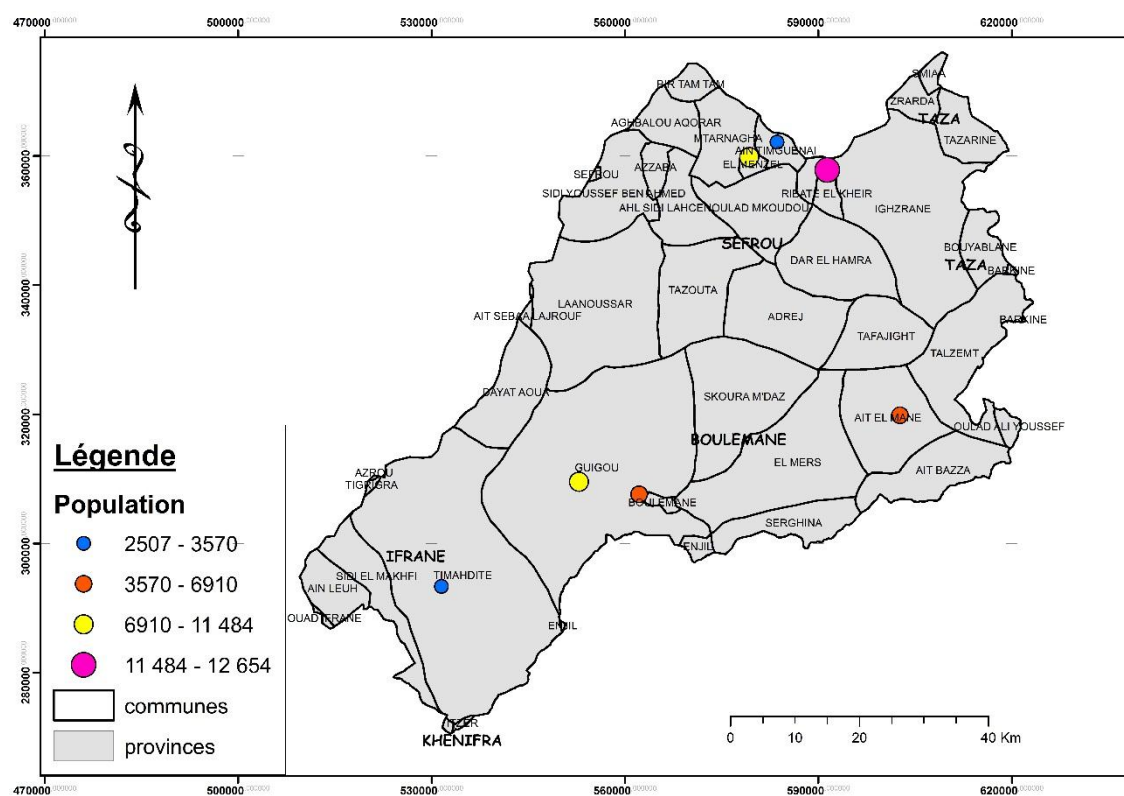


Figure 5 : Carte de découpage administratif la répartition de la densité des populations du bassin Haut Sebou

III. Cadre géologique :

1. Affleurements Géologiques :

Le bassin-versant se situe dans le domaine du Moyen Atlas tabulaire et plissé dont l'individualisation revient au Jurassique. Les affleurements géologiques rencontrés sont (fig.6) :

a) Le primaire

Il affleure sous forme de schistes et de quartzites. Il se trouve localisé surtout dans la vallée de l'Oued Sebou, Oued Azzaba, El Adrej, Ribat El Khair et en rive gauche de l'Oued Sebou dans la boutonnière de Bsabis.

b) Le Permo-Trias

Il affleure sous forme d'argilites rouges souvent gypsifères et salifères et de basaltes doléritiques brunâtres et verdâtres. Il est représenté dans la vallée encaissée de l'Oued Sebou à l'ouest d'Azzaba, dans la cuvette d'El Menzel, dans le versant nord d'El Adrej et dans le secteur de Tazouta.

c) Le lias

Présent dans la totalité du Causse Moyen Atlassique. Il est représenté par trois faciès principaux :

- * Les dolomies peu résistantes qui fournissent le faciès des dolomies sableuses.
- * Les dolomies massives plus résistantes qui reposent directement sur le Trias dans le canyon de l'Oued Sebou.
- * Les dolomies litées qui sont caractérisées par une série de bancs calcaires dolomitiques dans la partie centrale du causse.

Les lias inférieurs et moyens couvrent des surfaces étendues des causes de Sefrou, d'El Menzel et apparaissent dans les cassures tectoniques et le long des anticlinaux où il forme leur ossature. Le lias supérieur est surtout caractérisé par un faciès marneux avec des poussées calcaires.

d) Le Miocène

Représenté par un faciès de molasse dans la vallée encaissée de l'Oued Sebou puis par des marnes grises ou bleues du Tortonien.

Au pied du Causse de Sefrou le Miocène est représenté par des marnes sableuses et du grès. Il couvre aussi le couloir Pont Mdez- El Adrej, la région de Tazouta (marne, grès et calcaire), et le secteur de l'Oued maasser (micro conglomérats, marnes).

e) Le quaternaire

Il est caractérisé par le processus de karstification avec formation d'encroûtement et croûtes sur les zones tabulaires. Les formes spectaculaires de karstification sont représentées par le réseau de vallées sèches, les cuvettes fermées

à fond plat colmatées par des dépôts argileux limoneux occupés souvent par des dayats temporaires ou permanentes (Dayat Aoua, Dayat Ifrah).

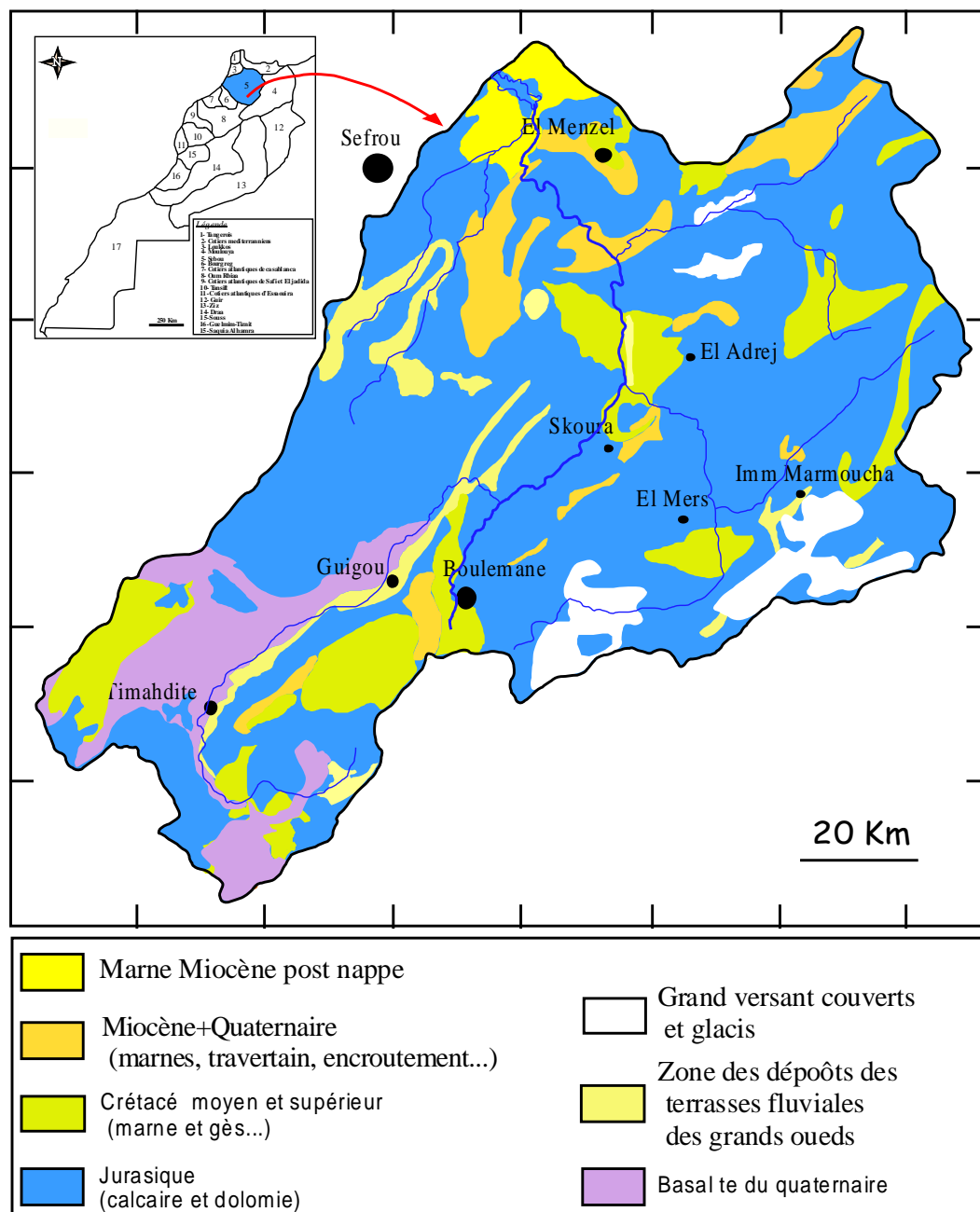


Figure 6: Carte géologique du bassin versant d' Haut Sebou de la retenue de barrage Alla El Fassi élaborée par SIG. Extrait de la carte géologique de Sefrou au 1/100 000 (A .CHARRIERE, 1971)

2. Unités Morphostructurales :

Le relief du bassin-versant est caractérisé par trois unités Morphostructurales : les rides anticlinales, les synclinaux et les plaines.

a) Rides anticlinales

Les quatre rides anticlinales, constituant l'ossature du pli du Moyen Atlas plissé, sont formées de dolomies du Lias inférieur et d'une carapace de calcaire due au Lias moyen. Ces rides se succèdent dans une direction nord-ouest au sud-est et forment des lignes de crêtes plus élevées.

- La première ride sépare le Moyen Atlas tabulaire et le Moyen Atlas plissé. Cette ride a une altitude moyenne de 1700 m et une altitude maximale de 1986 m.

- La seconde ride est matérialisée par Jbel Tichoukt dont l'altitude de sa ligne de crête augmente du nord-est (1859 m) au sud-ouest pour atteindre 2794 m au piton de Lalla Oum El Bent.

- La troisième ride est plus longue que la seconde mais discontinue et faillée au niveau du bassin-versant. Sa ligne de crête atteint des altitudes très élevées au nord-est du bassin-versant où le point culminant atteint 3000 m à la crête de Jbel Bou Iblane. Le long de cette ride l'altitude varie de 1800 m à 2900 m.

- La quatrième ride, à la différence des autres rides, traverse le bassin-versant dans la direction est-ouest. L'altitude de ces crêtes varie de 1920 m à 2332 m. Elle surplombe la vallée d'Almis Marmoucha au Nord.

Toutes ces rides forment des barrières climatiques. Leurs versants sont dissymétriques, les pentes sont très fortes et sont plus accusées sur les versants des façades atlantiques exposées au nord-ouest. Des pentes raides sont atteintes localement au niveau des falaises.

Dans ce modèle en crêtes, les processus d'altération liés au froid dominant et sont responsables des formes karstiques visibles surtout sur certains sommets de Tichoukt et Bou Iblane.

b) Synclinaux

Dans les synclinaux d'El Mers, de Marmoucha et de Skoura les versants nus ou couverts prédominent et les pentes sont généralement fortes. Dans l'ensemble de ces formations, le grès et le calcaire, constitués de substrats durs et relativement résistants à l'érosion, affleurent partout sous forme de grandes crêtes ou front de "cuesta".

c) Plaines

Au niveau du bassin-versant, on distingue deux plaines principales :

- La plaine d'Almis Marmoucha qui est caractérisée par des pentes moyennes inférieures à 5 %.

- La plaine de Skoura qui couvre 7000 ha et correspond à la partie élargie de la vallée de l'Oued Guigou et Mdez. Elle regroupe les terrains plats ou peu pentus situés en rive gauche de l'oued Sebou. L'altitude moyenne de cette varie entre 800 et 900 m.

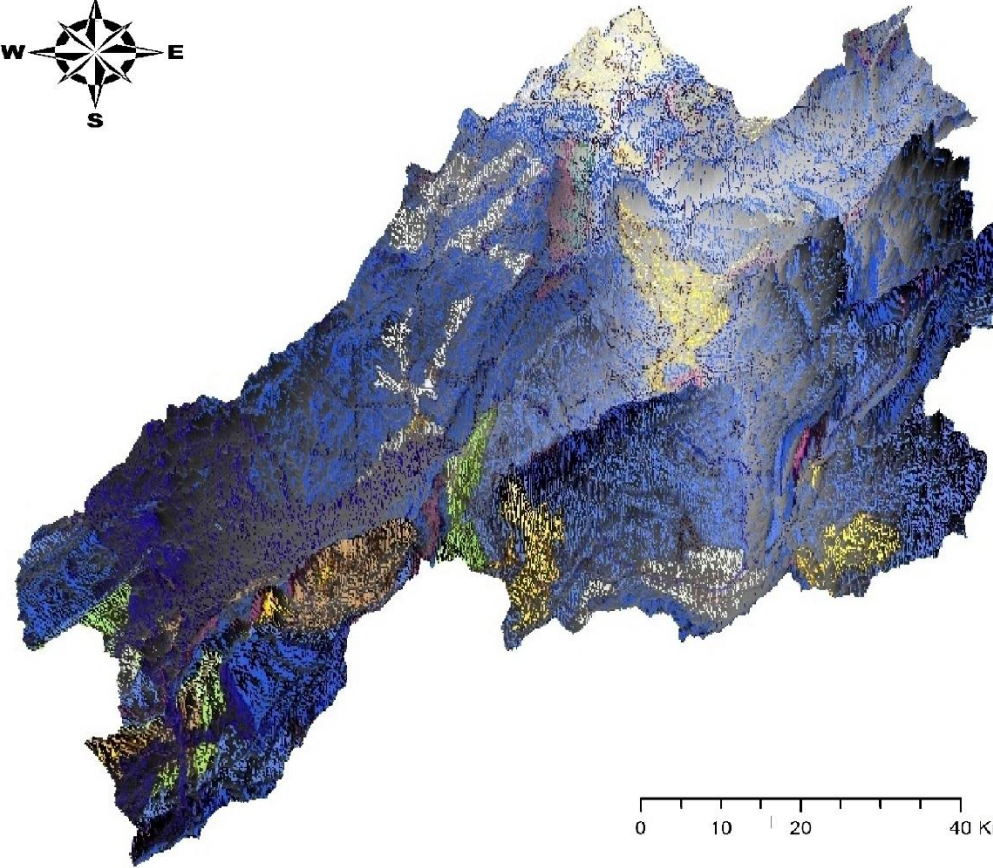
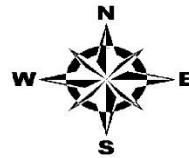
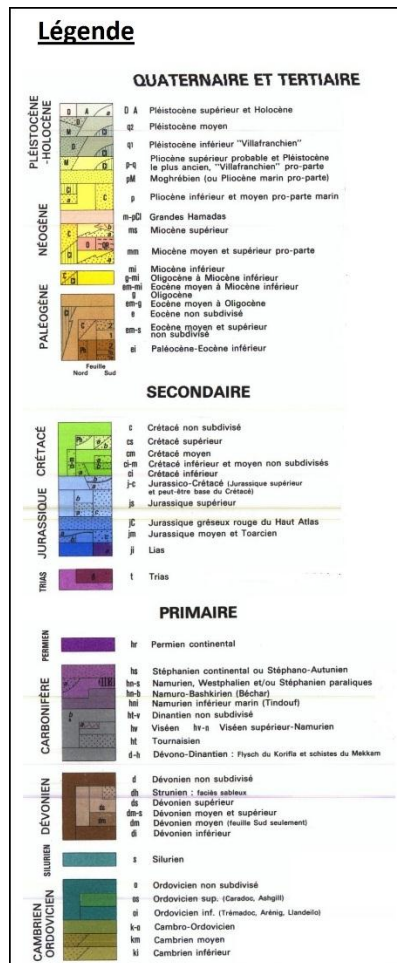


Figure 7: Carte Morphostructurales exécutée par la composition du MNT et la géologie du Haut Sebou sous ArcSce

IV. Les caractéristiques physiques du bassin versant:

1. La superficie et le périmètre :

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont être en partie reliés à sa surface. Pour le Haut Sebou il s'étale sur une superficie de 5763,78 km².

Le périmètre est la longueur du contour du bassin versant en épousant aussi bien que possible la sinuosité des crêtes. Il se calcule en assimilant le bassin à une forme géométrique régulière. Le périmètre de l'aire sous étude est de 432,60 km.

2. Indice de compacité (Forme) :

L'indice admis par les hydrologues pour caractériser la forme d'un bassin versant d'une part et de renseigner sur la rapidité de la concentration des écoulements est l'indice de Gravelius. C'est le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de surface de même périmètre.

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

Avec :

K_G est l'indice de compacité de Gravelius,

A : surface du bassin versant [km²],

P : périmètre du bassin [km].

Pour le BV Haut Sebou l'indice de compacité est $K_G = 1,59 > 1$, Donc il possède une forme allongée ce qui va causer un retard de l'acheminement de l'eau vers l'exutoire pendant une période de crue.

3. Carte hypsométrique :

Le modèle numérique du terrain (M.N.T) a permis de déterminer les altitudes en tout point du bassin-versant. Six classes hypsométriques sont retenues par tranche de 400 m de dénivelée.

L'importance et la répartition de ces classes sont illustrées par les données du tableau n° 1.

Le bassin-versant peut être considéré comme étant une zone d'altitude puisque environ 94 % de la superficie totale du bassin-versant se trouve à une altitude supérieure à 800 m. La tranche altitudinale 400-800 m ne présente que 6% de la superficie du bassin-versant.

La classe modale est concentrée dans la tranche altitudinale 1600 et 2000m.

L'analyse de la carte hypsométrique (fig.8) montre que les altitudes les plus élevées se localisent au niveau de Bou Iblane, Tichoukt, Aguelmame Sidi Ali et Immouzer Marmoucha.

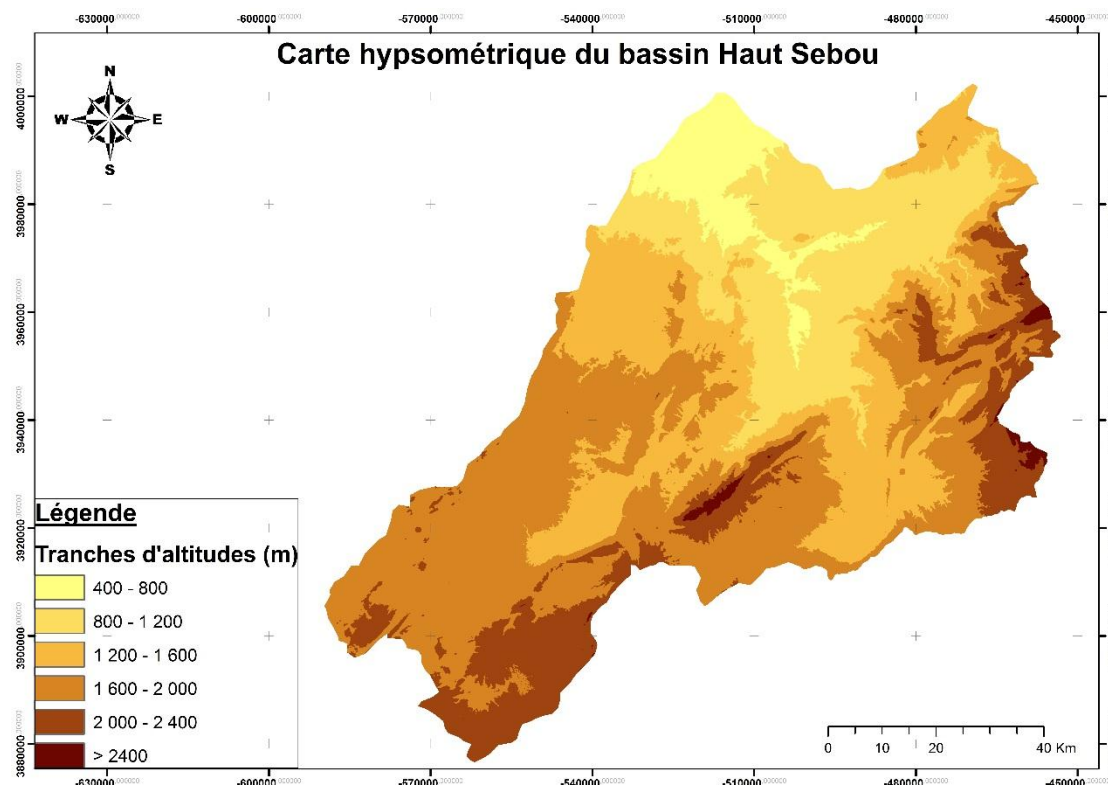


Figure 8: Carte hypsométrique du bassin du Haut Sebou

Tableau 1 : Répartition de la surface totale par tranche d'altitude

Classe d'altitude (m)	Importance de la surface	
	(Km ²)	%
400-800	356,13	6.2
800-1200	1086,46	18.8
1200-1600	1461,65	25.4
1600-2000	1911,27	33.2
2000-2400	929,48	16.1
> 2400	18,79	0.3
Total	5763,78	100

4. Courbe hypsométrique :

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique. Cette dernière représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en ordonnée le pourcentage de surface du bassin qui se trouve au-dessus de l'altitude représentée en abscisse (Fig.9).

pour représenter la courbe hypsométrique, on a calculé les superficies cumulées et leurs pourcentages à une altitude donnée (tab.2).

Tableau 2: Tableau de fréquences et des pourcentages cumulés au-dessus de la limite

Classe d'altitude (m)	Surface (Km ²)	Pourcentage de surface (%)	Surface cumulée	Altitude (m)	Pourcentage de surface cumulée(%)
400 - 800	356,13	6,2	5763,78	400	100,00
800 - 1200	1086,46	18,8	5407,65	800	93,8
1200 - 1600	1461,65	25,4	4321,19	1200	75
1600 - 2000	1911,27	33,2	2859,54	1600	49,6
2000 - 2400	929,48	16,1	948,27	2000	16,4
2400-3068	18,79	0,3	18.79	2400	0,3
Total	5763,78	100,00	0,00	3068	0,00

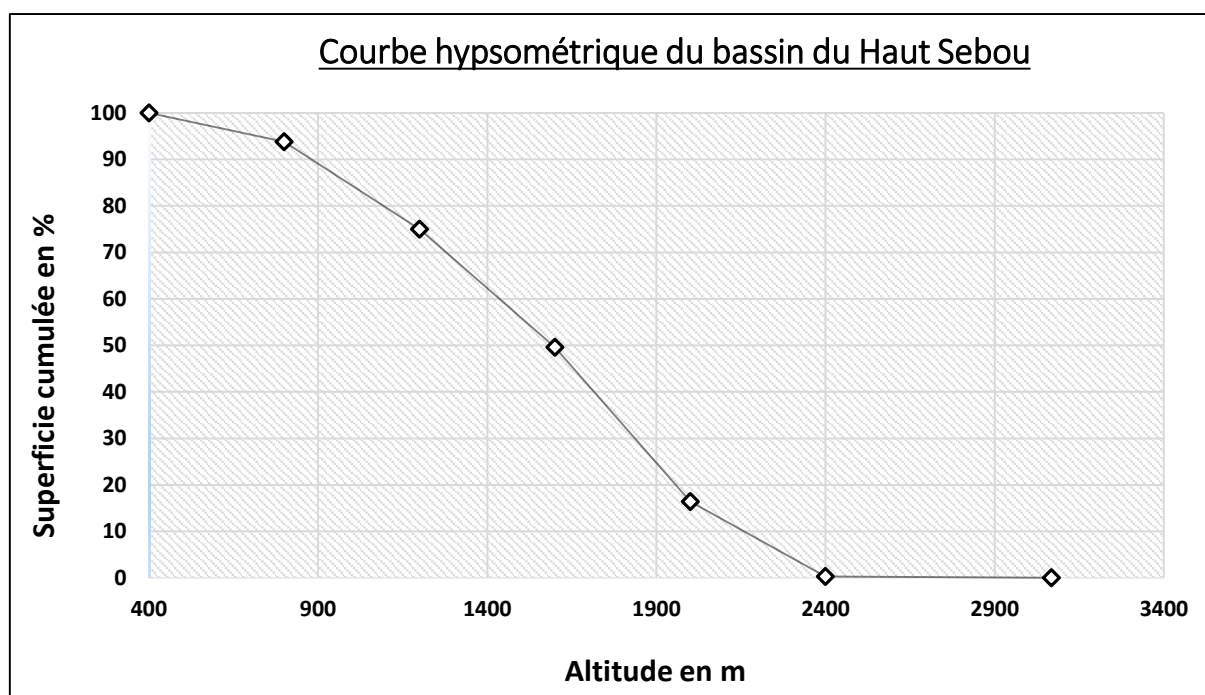


Figure 9: Courbe hypsométrique du bassin Haut Sebou

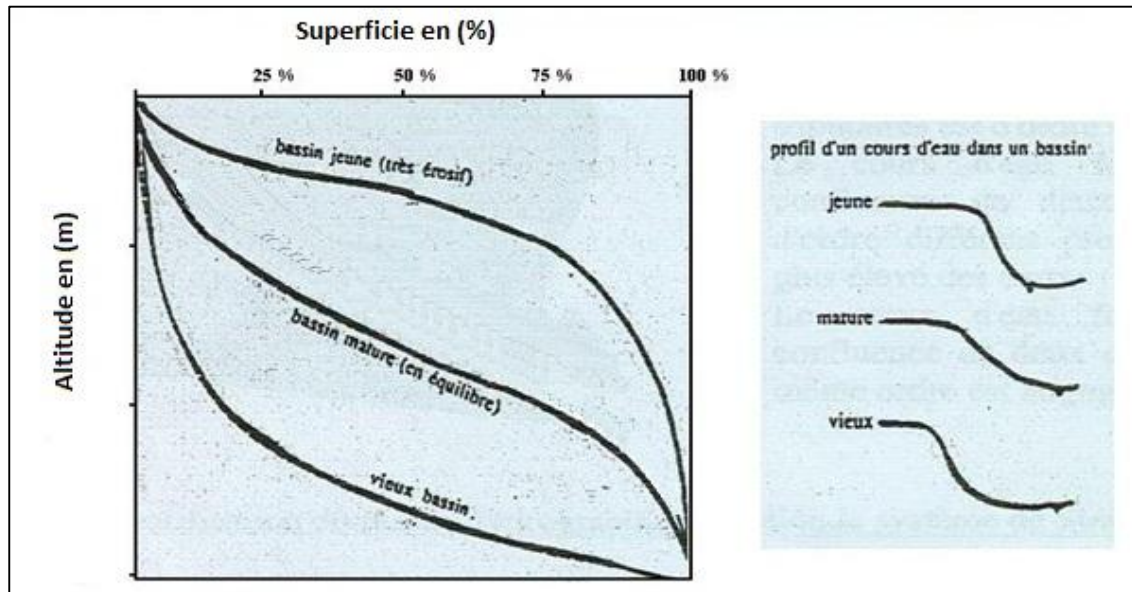


Figure 10: Interprétation de la courbe hypsométrique

- **Interprétation de l'aspect de la courbe hypsométrique**

L'analyse de l'aspect de la courbe (Fig.9) est en comparaison avec la classification citée au-dessus (Fig.10), on peut dire qu'on est en présence d'un bassin vieux dans lequel la superficie est faible par rapport au changement d'altitude.

En résumé l'analyse de la carte et de la courbe hypsométrique confirme qu'on est en présence d'un bassin où les différences d'altitudes sont très marquées, ce qui va rendre facile les circulations des eaux à l'intérieur du bassin et par conséquent des pertes en terre plus grande.

5. Le rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent est une représentation géométrique du contour du bassin versant transformé en rectangle. Celui-ci est tracé à partir de la longueur et de la largeur du bassin. Les courbes de niveau y sont parallèles et sont tracées en respectant les répartitions hypsométriques. Ce rectangle est conçu pour pouvoir comparer les bassins versants du point de vue morphologique.

Le tracé des droites de niveau du rectangle équivalent découle directement de la répartition hypsométrique cumulée. La distance de chaque droite de niveau au petit côté représentant le haut du bassin s'obtient en multipliant le L par les fractions de surfaces cumulées. La figure.11 illustre le rectangle équivalent du bassin versant de Haut Sebou.

Soit L et l respectivement la longueur et la largeur du rectangle équivalent, on a d'après les définitions ci-dessus :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \text{ et } l = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right)$$

Avec :

K_G : indice de compacité de Gravelius

A : superficie de bassin versant (Km)

L : longueur du rectangle équivalent (Km)

l ; largeur du rectangle équivalent (Km)

On obtient : **L= 183,20 km** et **l= 32,33 km**.

La longueur est presque cinq fois plus grande que la largeur.

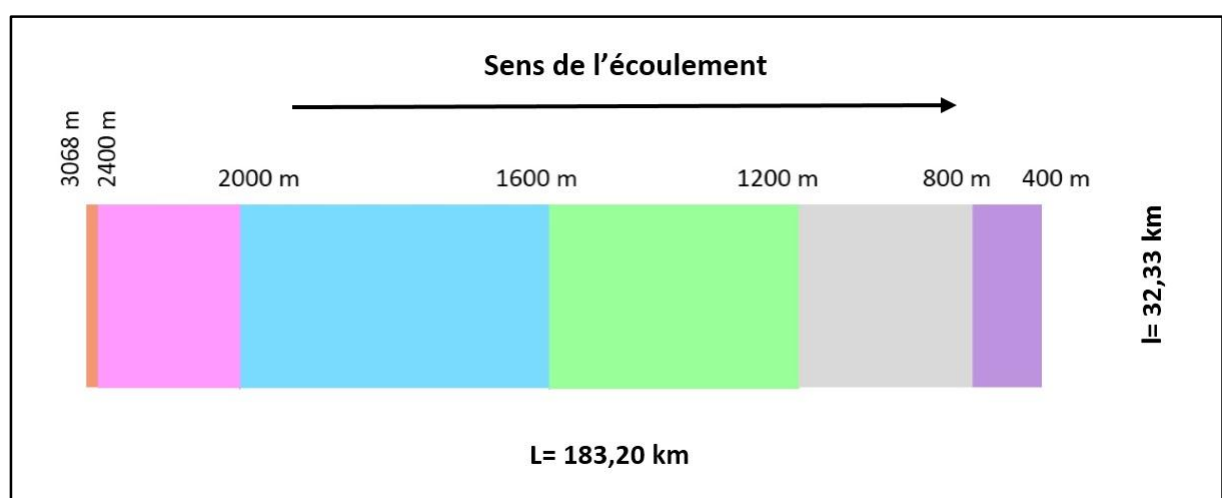


Figure 11: Rectangle équivalent du bassin versant Haut Sebou

6. Les altitudes caractéristiques :

a) Les altitudes maximale et minimale

Elles sont obtenues directement à partir des cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale indique le point le plus bas, se trouvant généralement à l'exutoire. Dans notre étude on a obtenu :

-la côte la plus basse est de 357 m ;

-la côte la plus haute est de 3068 m.

b) L'altitude moyenne

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

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

Avec :

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau (en km^2) ;

h_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (en m) ;

A : Surface totale du bassin versant (en km^2).

D'où : $H_{moy} = 1541,19$ m

c) L'altitude médiane

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Elle est de l'ordre de **1600 m**.

d) L'altitude la plus fréquente

Cette altitude correspond à la tranche d'altitude qui représente le maximum de l'histogramme des fréquences altimétriques, elle varie entre 1600 à 2000m. Donc le Haut Sebou est un bassin versant d'altitude élevée ; puisque l'analyse altimétrique a montré que plus de 50 % de sa superficie à une altitude entre 1600 à 2000 m.

7. La pente :

La pente joue un rôle incontournable dans le cycle hydrologique. Elle influe directement sur l'infiltration et le ruissellement. Ainsi pour une même averse et à perméabilité équivalente, la dualité des partage entre écoulement superficiel et infiltration sur le bassin sera essentiellement en fonction de la pente .

a) Distribution des pentes

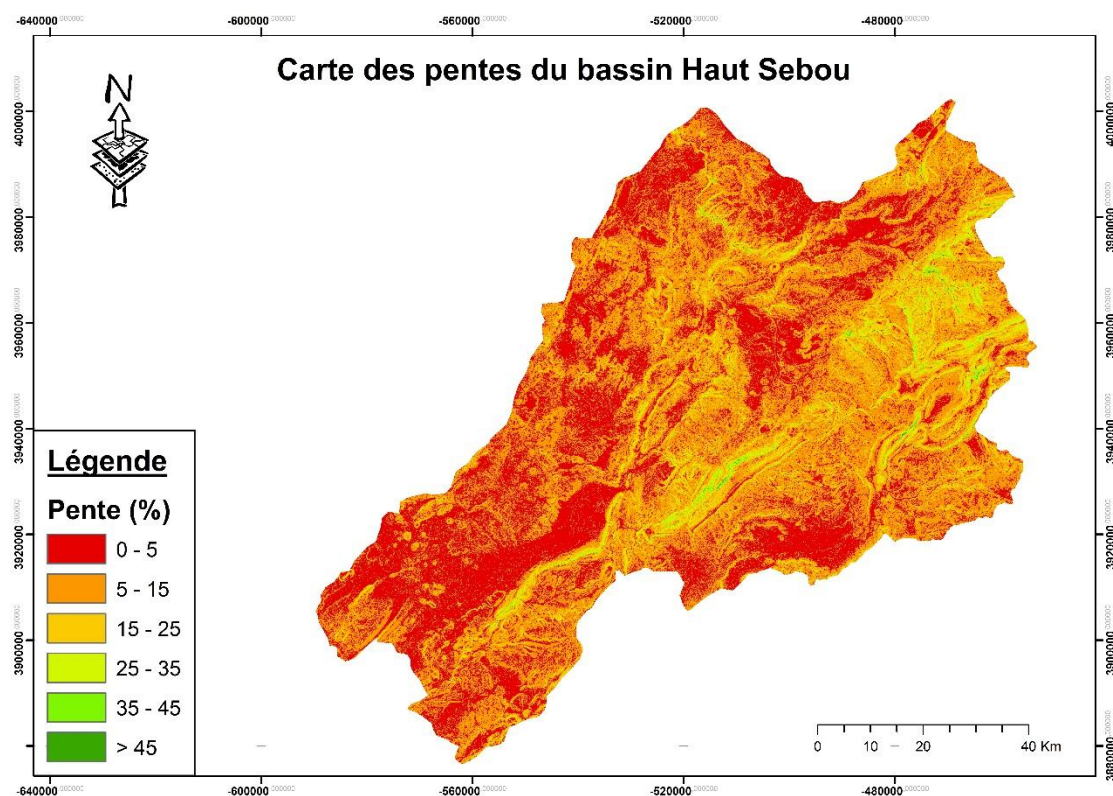


Figure 12: Carte des pentes du Bassin Haut Sebou

L'analyse de la carte des pentes (Fig.12) montre que le bassin-versant est caractérisé par une prédominance de pentes faibles et moyennes.

Les classes de pente inférieures à 25 % s'étendent sur environ 77 % de la superficie totale du bassin-versant contre 23 % pour les classes de pente dépassant 25 % (tab.3). Ces pentes fortes, sont localisées dans les zones montagneuses et notamment sur les chaînons de Jbel Bou Iblane et Jbel Tichoukt.

Tableau 3: Importance des classes des pentes dans le bassin-versant

Classe	Pente (%)	Superficie (ha)	Importance (%)
A	0-5	81002	14
B	5-15	202574	35
C	15-25	159647	28
D	25-35	65166	11
E	35-45	29995	5
F	> 45	37993	7

b) Pente moyenne

La pente moyenne (ou pente théorique) donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct, donc sur le temps de concentration, et influence directement le débit de pointe lors d'une averse lente. Elle est déterminée par la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Avec :

P_{moy} : La pente moyenne du bassin versant

ΔH : L'altitude moyenne (m)

L : La longueur du rectangle équivalent (km)

D'où: **$P_{moy} = 14,56$**

Donc la pente moyenne du bassin versant du Haut Sebou est égale 0,14%,

c) Indice de pente globale :

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global I_g . Il est défini comme étant le rapport entre la dénivellation utile (D_u) et la longueur du rectangle équivalent (L_{eq}) donné par la formule suivante :

$$I_g = \frac{Du}{L_{eq}} = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L_{eq}}$$

Avec :

I_g: Indice de pente globale en m/km

Du: La dénivelée H5% - H95%

L_{eq}: Longueur du rectangle équivalent

H5% : Altitude correspondant à 5% de la sur face totale du bassin versant

H95% : Altitude correspondant à 95% de la sur face totale du bassin versant

D'où : ***I_g* = 8.77, soit : 0.08%**

Selon la classification du relief donnée par l'ORSTOM (Tab.4), la valeur de l'indice de pente globale du bassin versant du Haut Sebou montre que le relief est très fort.

Tableau 4: Classification du relief selon l'*I_g* donnée par l'ORSTOM

	Relief	Valeur d' <i>I_g</i>
1	Relief très faible	$I_g < 0.002$
2	Relief faible	$0.002 \leq I_g < 0.005$
3	Relief assez faible	$0.005 \leq I_g < 0.01$
4	Relief modéré	$0.01 \leq I_g < 0.02$
5	Relief assez fort	$0.02 \leq I_g < 0.05$
6	Relief fort	$0.05 \leq I_g < 0.5$
7	Relief très fort	$0.5 < I_g$

8. Réseau hydrographique et densité de drainage :

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin. Le réseau hydrographique peut prendre une multitude de formes. La différenciation du réseau hydrographique d'un bassin est due à quatre facteurs principaux : La géologie, Le climat, La pente du terrain et La présence humaine.

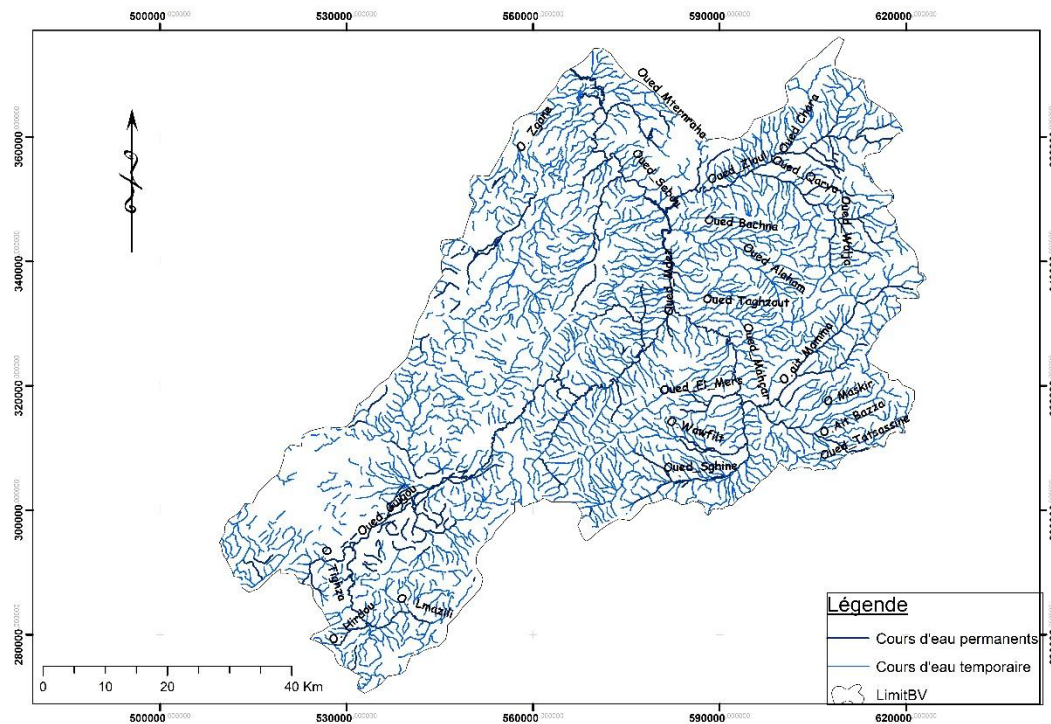


Figure 13: carte du réseau hydrographique classifié du bassin versant haut Sebou

Le bassin-versant occupe une position géographique qui draine le Moyen Atlas calcaire et karstique. Généralement, les pentes du bassin-versant sont moyennes ou faibles à l'exception de jbel Tichoukt (2796 m) et jbel Bou Iblane (3000 m) où les couches géologiques sont presque à la verticale. Cette faiblesse des pentes ajoutées à la nature karstique du terrain ont une influence directe sur le comportement et le régime hydrologique des oueds.

Le régime hydrologique reste également soumis à l'influence de la neige par le fait que la majeure partie du bassin-versant se situe dans des zones montagneuses. Environ la moitié de la superficie est située au-dessus de 1600 m ce qui lui permet de recevoir en hiver une forte proportion des précipitations sous forme de neige. La fonte printanière soutient les débits des oueds après la saison des pluies.

Compte tenu de la nature karstique de certains terrains des Causes Moyens Atlasique, l'infiltration des eaux pluviales est élevée et, par conséquent, le débit des écoulements reste faible. C'est le cas de l'oued Guigou qui ne contribue à l'alimentation de l'oued Sebou que lors des périodes de crues (DREFLCD Fès, 1997). Les terrains karstiques jouent, donc, un rôle de réservoirs et se caractérisent par une circulation souterraine des eaux importantes qui donne lieu à l'apparition de nombreuses sources. Ces sources soutiennent les étiages au cours des années sèches et donnent à l'oued Sebou son régime régulier.

a) La densité du drainage :

La densité de drainage D_d caractérise le chevelu hydrographique. Elle se définit comme la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Si on désigne par A la surface du bassin versant en kilomètres carrés et par L_i les longueurs de cours d'eau en kilomètres, on a :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} = 0,17 \text{ km}^{-1}$$

Pour conclure nous avons récapitulé les différents paramètres physiques étudiés dans ce chapitre sous forme d'un tableau récapitulatif (Tab.5)

Tableau 5: Caractéristiques morphologiques du bassin Haut Sebou

Paramètres	Valeurs
Surface	5763,78 km ²
Périmètre	432,60
Indice de compacité	1,59
Longueur du rectangle équivalent	183,20 km
Largeur du rectangle équivalent	32,33 km
Altitude maximale	3068m
Altitude minimale	357 m
Altitude moyenne	1541,19 m
Pente moyenne	0,14%

V. Climatologie du bassin versant :

Le climat en tant qu'ensemble d'une série d'éléments (précipitations, températures) constitue un facteur primordial dans l'appréciation des potentialités hydrauliques du bassin-versant. Ce facteur climatique est apprécié à partir de dépouillement des données de 8 stations pour les précipitations et de 3 stations pour les températures. Les principales caractéristiques géographiques des stations considérées sont consignées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Caractéristiques géographiques des stations météorologiques

STATION	COORDONNEES Lambert (km)		ALTITUDE (m)
	LONGITUDE	LATITUDE	
AZZABA(1957)	569.650	359.575	516
AIN TIMEDRINE(1958)	578.900	350.000	642
PONT M'DEZ(1958)	581.400	341.900	725
AIT KHABBACHE(1970)	557.000	314.800	1478
AGUELMANE SIDI ALI(1975)	537.800	276.000	2078
Barrage Allal Fassi(1989)	566.650	370.542	430
EL MERS(1984)	593.100	318.620	1210
Dar El HAMRA(1982)	591.500	352.250	830

1. Précipitations :

- **Variation temporelle des précipitations**

La connaissance de la répartition des précipitations permet, en particulier, de calculer la lame d'eau tombée sur la totalité du bassin. Cette opération, qui reste relativement délicate, nécessite la combinaison de différentes méthodes à savoir la méthode des isohyètes et la méthode des polygones de Thiessen afin de prendre en considération les contraintes géographiques existantes telles l'altitude, la topographie, exposition...

a) Précipitations annuelles :

Le diagramme de variations des précipitations moyennes annuelles dans les stations pluviométriques du bassin versant haut Sebou (Fig. 14) permet de distinguer un maximum au niveau de la station de Dar El HAMRA (446.8 mm) et le minimum est enregistré à la station du PONT M'DEZ (276.3 mm). On note que les valeurs minimales sont ceux des stations situés en aval où les altitudes sont basses alors que les valeurs maximales sont situés en amont où les altitudes sont élevées.

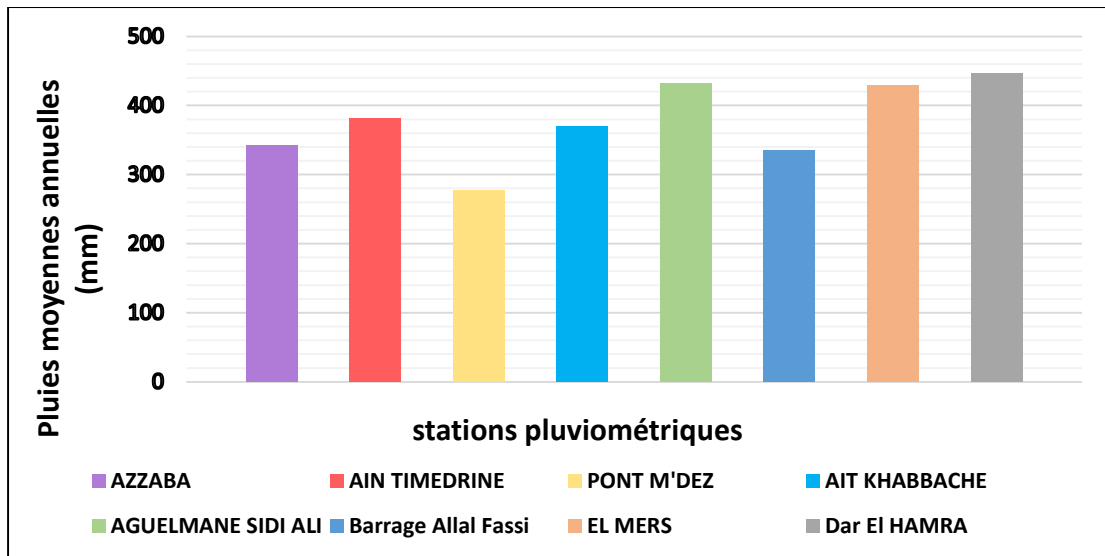


Figure 14 : Variations des précipitations moyennes annuelles dans le bassin versant Haut Sebou (1991-2014)

b) Précipitations mensuelles :

Leur étude permet la connaissance de la répartition des pluies au cours de l'année. La variation des pluies moyennes mensuelles est représentée dans la (fig.15) sous forme de diagramme. Ce diagramme montre que les précipitations moyennes mensuelles sont marquées par leur hétérogénéité et par une grande variable spatiale. Cela confirme le caractère du climat méditerranéen.

En général, le mois le plus pluvieux pour les différentes stations se situe entre novembre et avril. Le mois le moins arrosé pour la quasi-totalité des stations reste celui de juillet.

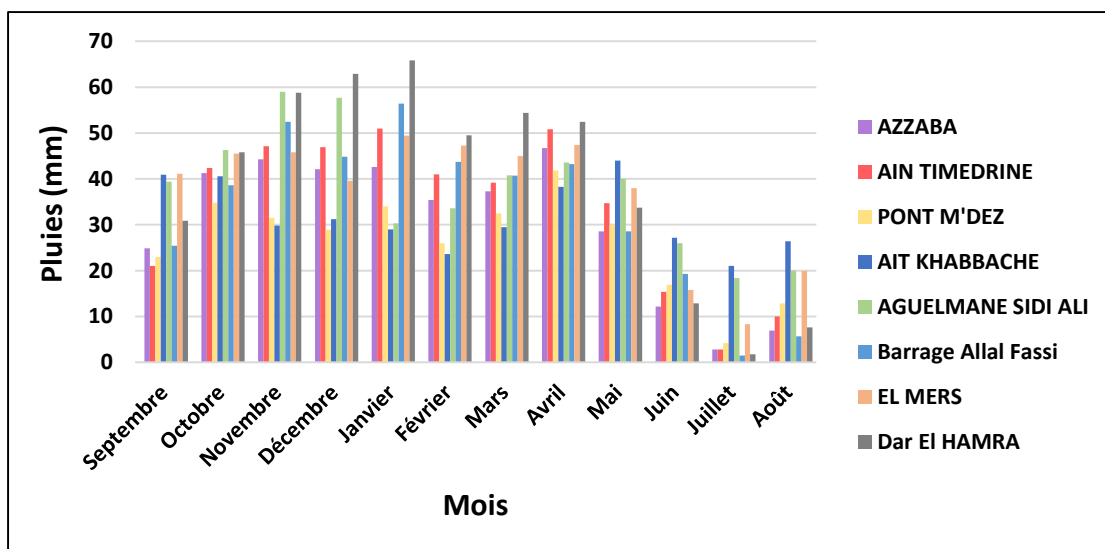


Figure 15: Variations des précipitations moyennes mensuelles dans le bassin Haut Sebou (1991-2014)

c) Précipitations saisonnières :

Dans chacune des stations, les trois mois de juin, juillet et août reçoivent des précipitations faibles. La figure 16 illustre la répartition saisonnière des précipitations et montre que la saison la plus pluvieuse est celle d'hiver suivie de celle du printemps et donc le régime pluviométrique du bassin Haut Sebou est de type méditerranéen. En effet ce dernier se caractérise par une sécheresse estivale accentuée et par un maximum pluviométrique concentré en hiver.

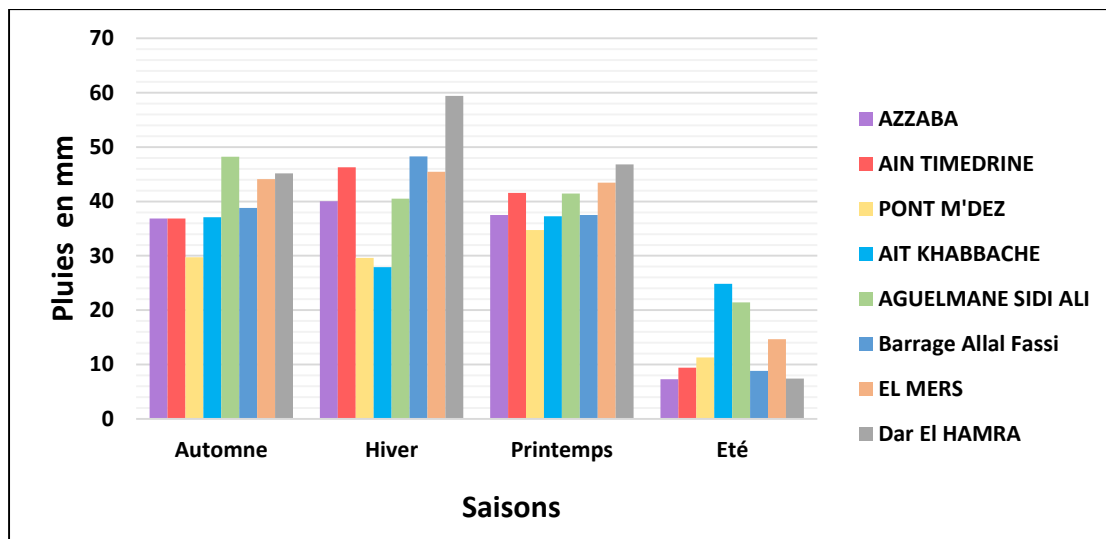


Figure 16: Variations des précipitations moyennes saisonnières dans le bassin versant Haut Sebou (1991-2014)

2. Evaluation de la lame d'eau tombée sur le bassin :

Parmi les méthodes généralement proposées pour calculer la moyenne des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin ou à proximité, on distingue la méthode de la moyenne arithmétique, la méthode des polygones de Thiessen et l'utilisation d'isohyètes.

a) Méthode arithmétique :

C'est une méthode plus simple, elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées. La moyenne arithmétique peut être exprimée par la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum P_i}{n}$$

Avec :

P_{moy}: Précipitation moyenne sur le bassin versant (mm)

P_i: Hauteur des précipitations à la station (mm)

n: Nombre des stations sur le bassin versant

La moyenne des précipitations obtenues par cette méthode est estimée à la valeur suivante : **P_{moy}= 376,387 mm.**

b) Méthode des polygones de Thiessen :

La méthode de Thiessen est une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à une zone d'influence présumée telle qu'un point situé dans cette zone soit proche en distance horizontale du pluviomètre correspondant que de tout autre pluviomètre. La méthode ne tient donc compte que de la distribution spatiale en plan des stations.

Cette méthode consiste à tracer autour des stations pluviométriques voisines un polygone formé par les médiatrices des segments de droite reliant ces stations. Le bassin versant de Haut Sebou dispose de huit stations, pour lesquelles sont tracés 8 polygones (Fig.17).

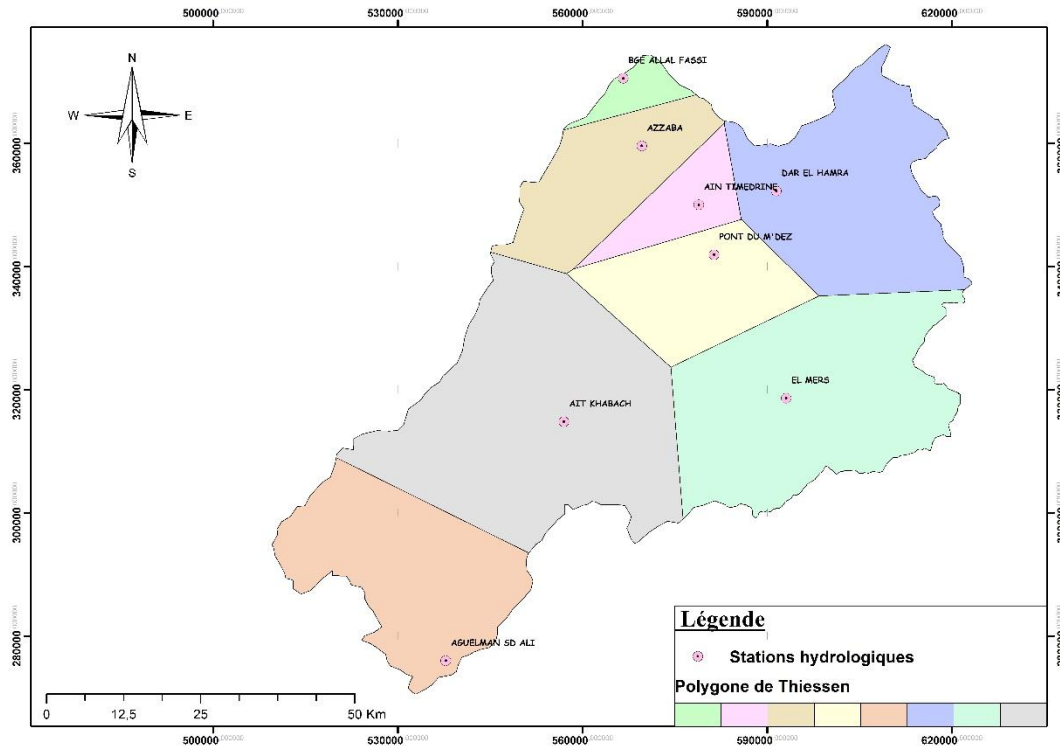


Figure 17: Carte des polygones de Thiessen relative au bassin versant Haut Sebou

La superficie de chaque polygone (Tab.7) est déterminée avec un logiciel ArcGis. Elle sert d'élément de pondération pour le calcul de la lame d'eau annuelle en appliquant la formule ci-après :

$$P_{moy} = \frac{\sum A_i P_i}{A}$$

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin (mm),

P_i : précipitation enregistrée à la station i (mm),

A_i : superficie du polygone associée à la station i (km²)

A : aire totale du bassin ($=\sum A_i$) en km².

Selon cette méthode la lame d'eau tombée sur le bassin versant du Haut Sebou est égale à **401,07 mm**.

Tableau 7: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode de Thiessen

Stations pluviométriques	Ai (km ²)	Pi (mm)	Pi x Ai
AIT KHABBACHE	1524,95	369,1	562859,045
Barrage Allal Fassi	92,34	335	30933,9
PONT M'DEZ	518,4	276,3	143233,92
AGUELMANE SIDI ALI	824,77	431,5	355888,255
EL MERS	1193,24	429,1	512019,284
AIN TIMEDRINE	223,3	381,1	85099,63
Dar El HAMRA	930,41	446,8	415707,188
AZZABA	500,83	446,8	223770,844
Total	5808,24	3115,7	2329512,066

c) Méthode des isohyètes

Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (isovaleurs de pluies annuelles) tracées grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux autres stations avoisinantes si nécessaires (Fig.18).

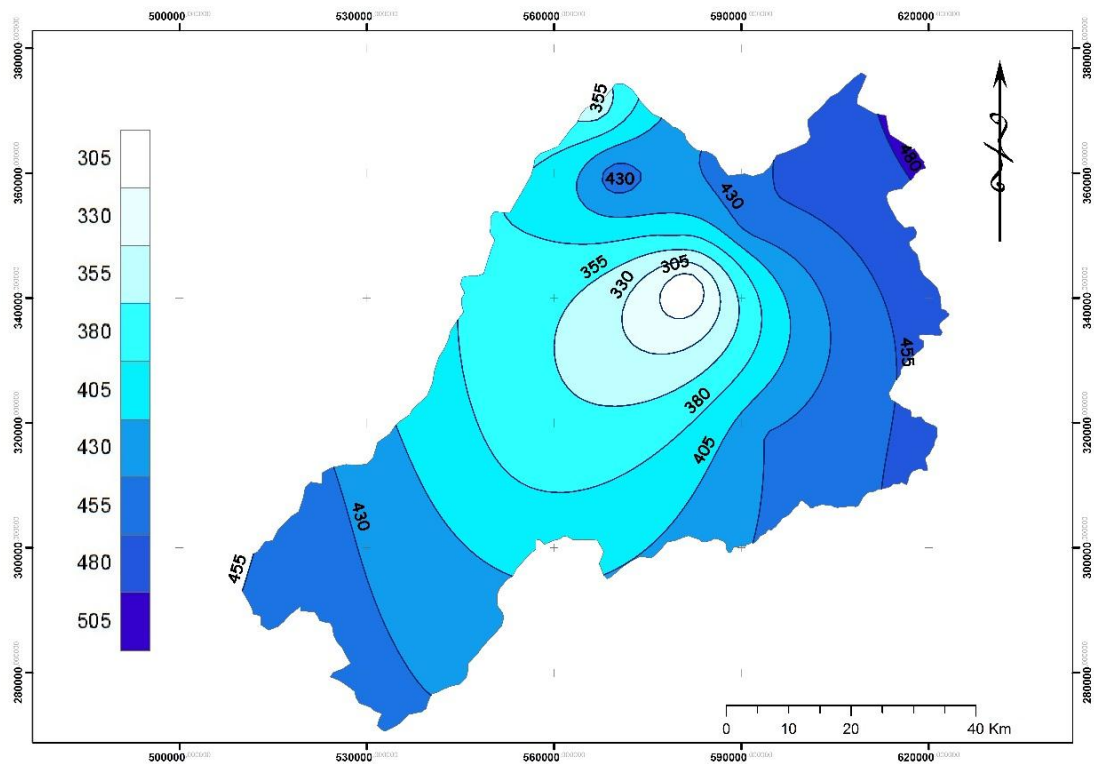


Figure 18: Carte des isohyètes relatives au bassin versant Haut Sebou

La superficie comprise entre deux isohyètes (Tab.9) est déterminée avec un logiciel ArcGIS et la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^K A_i P_i}{A} \text{ avec } P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin (mm),

A : surface totale du bassin (km²),

A_i : surface entre deux isohyètes h_i et h_{i+1} (km²),

K : nombre total d'isohyètes,

P_i : hauteur moyenne entre deux isohyètes (mm).

Selon cette méthode la lame d'eau tombée sur le bassin versant de l'oued Beht est égale à **406,28 mm**.

Tableau 8: Calcul de la lame d'eau tombée par la méthode des isohyètes

Isohyètes	Ai (km ²)	Pi (mm)	Pi x Si
< 305	13,3	276,03	3671,199
305-330	138,913	317,5	44104,8775
330-355	375,783	342,5	128705,6775
>340	22,571	342,2	7723,7962
355-380	1049,543	367,5	385707,0525
380-405	1122,801	392,5	440699,3925
405-430	1238,156	417,5	516930,13
430-455	1213,29	442,5	536880,825
455-480	568,319	467,5	265689,1325
>480	22,3	544	12131,2
Total	5764,976	3909,73	2342243,283

d) Estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par les trois méthodes :

La lame d'eau estimée par les trois méthodes, évoquée précédemment, montrent des valeurs différentes. Dans le but de rapprocher entre ces valeurs trouvées, une moyenne entre elle est calculée dans le tableau suivant :

Tableau 9: Estimation de la lame d'eau moyenne

Moyenne arithmétique	Carte des isohyètes	Polygone de Thiessen	La lame d'eau moyenne
376,387 mm	406,28 mm	401,07	394.57

Le calcul de la lame d'eau précipité sur le bassin versant du Haut Sebou par ces différentes méthodes donne des résultats relativement proches et que la moyenne générale est de 394.57 mm Le volume d'eau tombé sur le bassin versant Haut Sebou peut être déterminé par la relation suivante :

$$V = P_{moy} \cdot S_T$$

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin (mm)

S_T : surface totale du bassin (km²),

D'où : $V = 2274.30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

En conclusion, le Haut Sebou reçoit un volume d'eau estimé à 2274.30 million de mètre cube par an.

3. Etude des températures :

L'étude du facteur température, constitue une primordiale pour caractériser le contexte climatique d'un bassin versant. La combinaison de ce facteur aux précipitations permet de contrôler plusieurs paramètres du cycle de l'eau surtout, les indices climatiques et l'évapotranspiration.

Dans notre étude les données relatives aux températures ne sont disponibles qu'au niveau des stations suivantes : EL MERS et AGUELMANE SIDI ALI.

a) Température moyenne mensuelle :

L'analyse de la fig.19 donne une première estimation concernant la répartition des mois chauds et des mois froids. Les mois de novembre, décembre, janvier, février et mars constituent les mois les plus froids (saison froide), avec une moyenne minimum au mois de janvier de 2.2 °C au niveau de la station Aguelmane Sidi Ali et de 11.7 °C au niveau d'EL Mers. Par contre le mois de juin, juillet, août et septembre

caractérisent la saison chaude avec une moyenne maximum au mois d'août de 20.5°C au niveau d'Aguelmane Sidi Ali et de 27.6°C au niveau d'El Mers.

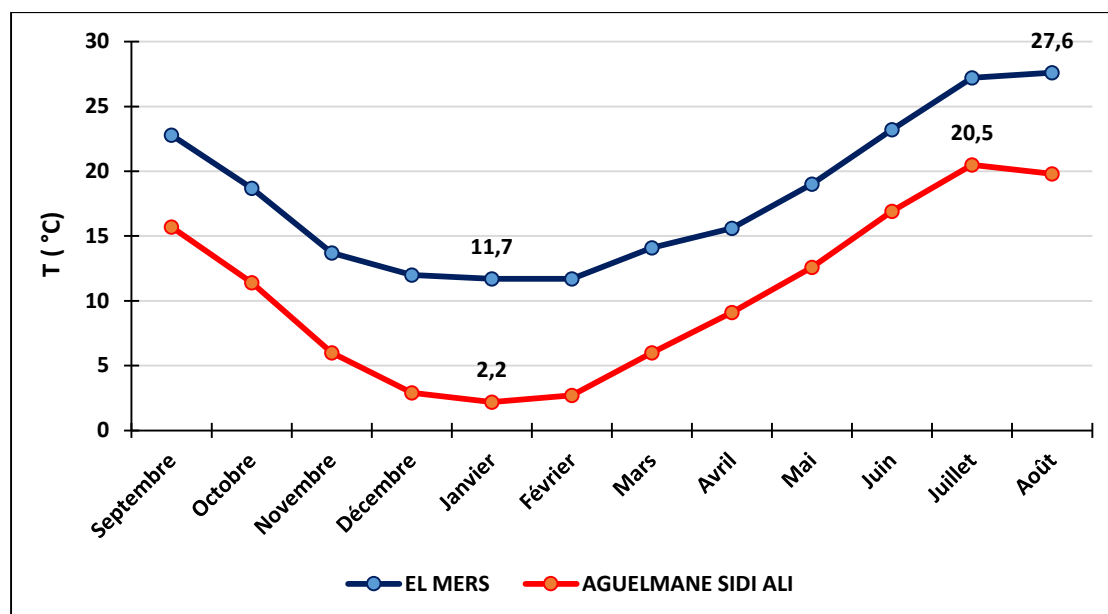


Figure 19: Variations de températures moyennes mensuelles au niveau d'Aguelmane Sidi Ali et EL Mers (2003-2014)

4. Relation température et précipitation :

Le climat, régnant dans une région, peut être estimé à travers certains paramètres qui mettent en relation la température et les précipitations caractérisant cette région. Dans cette optique, le calcul des indices suivant semble utile :

a) Indice Xérothermique de Gausсен :

Cet indice Xérothermique appelé aussi diagramme ombrothermique de Gausсен permet de distinguer les périodes sèches des périodes humides. Ainsi, une période considérée comme sèche, lorsque le total des précipitations est inférieur ou égal au double de la température moyenne mensuelle, dans le cas contraire la période est considérée comme humide, par contre lorsqu'il y a une égalité entre les précipitations et le double de la température, les besoins en eau sont satisfaisants. Cet indice est commodément figuré par le diagramme ombrothermique de Gausсен. Ce dernier est un mode de représentation, sur le même graphique, des températures et des précipitations moyennes mensuelles.

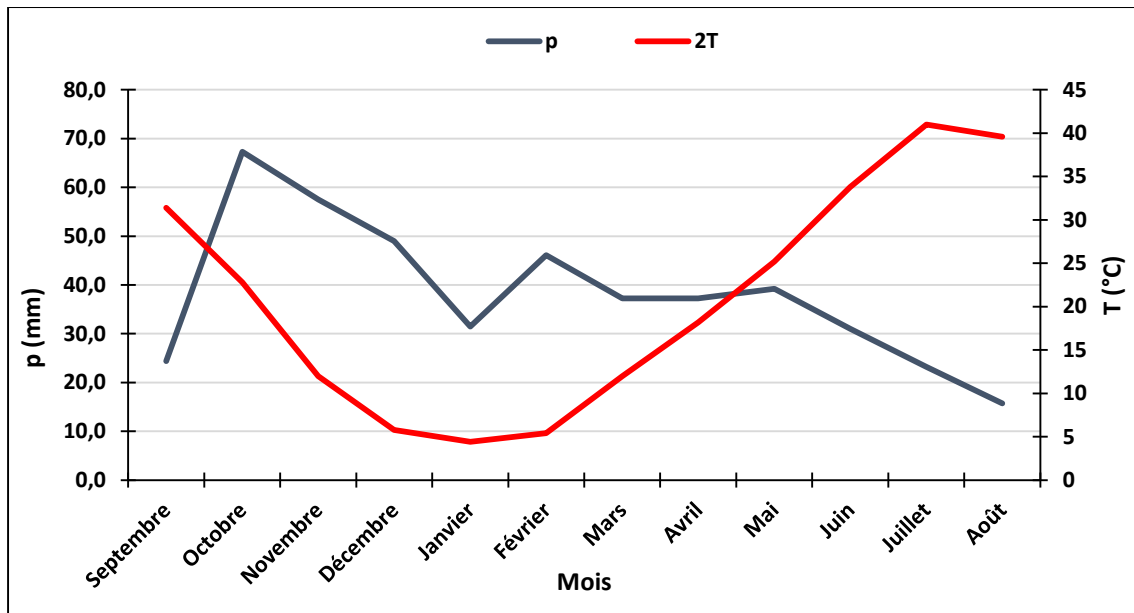


Figure 20: Diagramme ombrothermique de Gausson dans le bassin versant Haut Sebou au niveau de la station Aguelmane Sidi Ali (2003-2014)

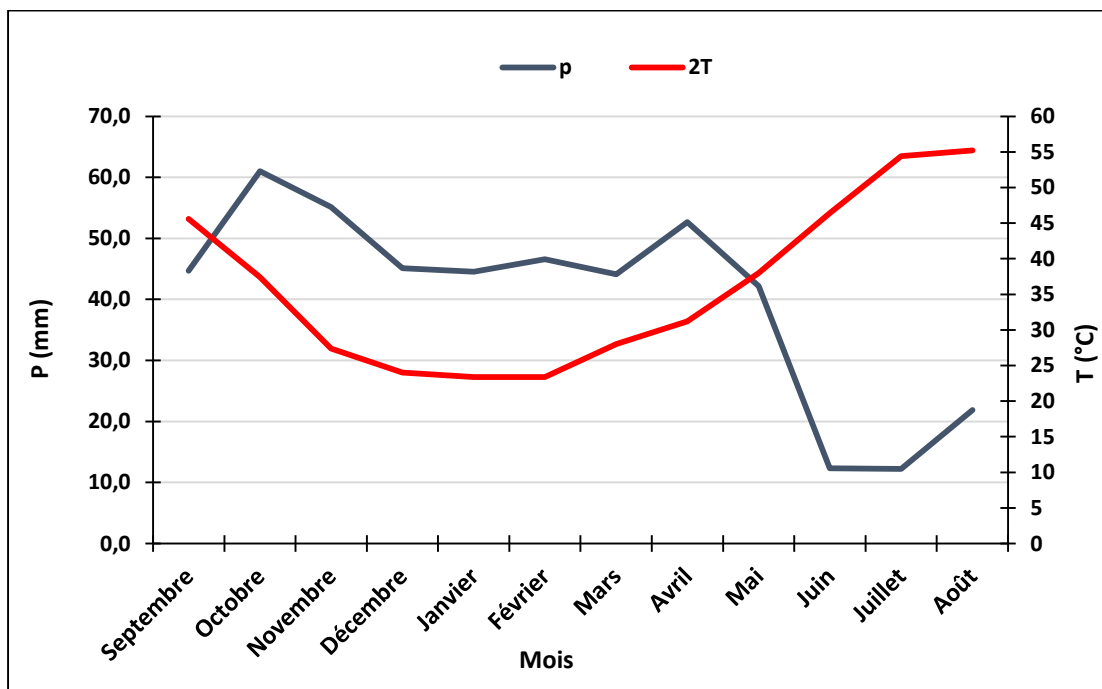


Figure 21: Diagramme ombrothermique de Gausson dans le bassin versant Haut Sebou au niveau de la station El Mers (2003-2014)

L'analyse des diagrammes ombrothermiques des stations étudiées Aguelmane Sidi Ali (Fig.20) et El Mers (Fig.21) permet de définir une égalité entre la période humide et la période sèche. La première s'étend du mois d'octobre jusqu'en Mai, par la suite une sécheresse prend le relais.

b) Quotient pluviométrique et climagramme d'Emberger :

La classification bioclimatique selon le quotient pluviométrique d'Emberger, tel que modifié par Sauvage en 1963, repose sur trois critères : la pluviométrie moyenne annuelle (mm), la moyenne des maximas thermiques du mois le plus chaud et la moyenne des minimas thermiques du mois le plus froid.

$$Q_2 = 2000 P / (M^2 - m^2)$$

Avec :

Q₂ : Coefficient d'Emberger

P : Pluviométrie moyenne annuelle (mm)

M : Moyenne des maximas thermiques du mois le plus chaud en degré Kelvin (°K)

m : Moyenne des minimas thermiques du mois le plus froid en degré Kelvin (°K)

$T^{\circ}K = 273,2 + t^{\circ}C$

Le climagramme d'Emberger comporte la moyenne des minima du mois le plus froid « m » en abscisse et le quotient pluviométrique « Q₂ » en ordonnée. Il est également subdivisé en zones correspondant à divers étages bioclimatiques méditerranéens (Fig.22).

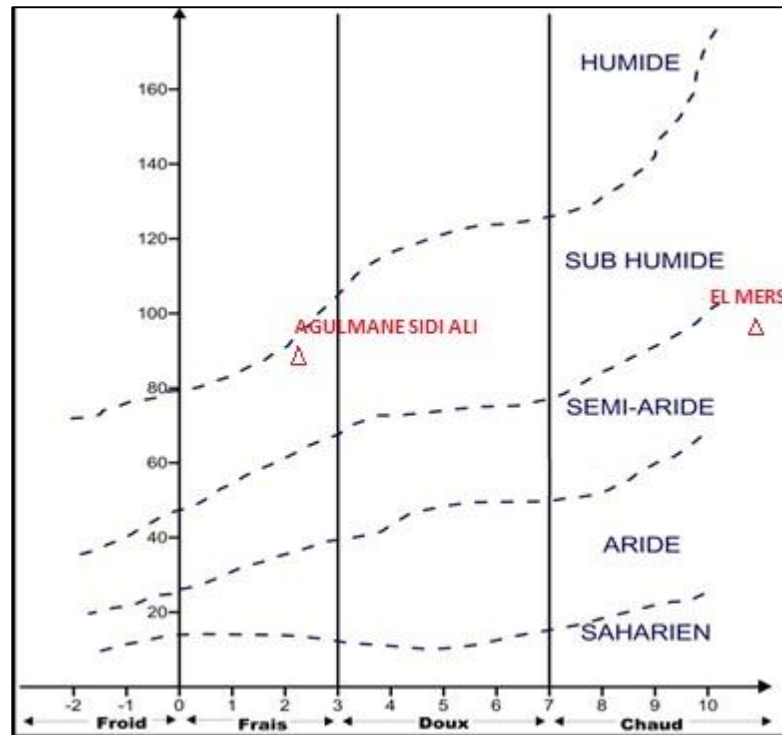


Figure 22: Climagramme d'Emberger dans le bassin versant Haut Sebou

Le climagramme pluviométrique basé sur les valeurs de Q2 calculés pour les deux stations montre que les bioclimats rencontrés dans le bassin-versant sont le Semi-Aride chaud au niveau d'El Mers et le Sub Humid frais au niveau d'Aguelmane Sidi Ali (tabl.10).

Tableau 10: Bioclimats des stations étudiées selon le système d'Emberger

Station	Alt.	P (mm)	M (°K)	m (°K)	Q2	Type de Bioclimat
EL MERS	1210	429,1	300,75	284,85	92,17	SEMI-ARIDE chaud
AGUELMANE SIDI ALI	2078	431,5	293,65	275,35	82,87	SUB HUMID frais

5. Autres Facteurs Climatiques :

a) Enneigement

Dans le bassin-versant, l'enneigement est fréquent au-delà de 1600 m d'altitude. Les chutes les plus importantes sont enregistrées devant les mois de décembre, janvier et février. D'une manière générale, les reliefs frontaux sont proportionnellement mieux enneigés que les chaînes intérieures. Ce sont les sommets

de Jbel Hebri, Michlifène, Bou Iblane et Tichoukt qui connaissent les valeurs les plus élevées en ce qui concerne l'épaisseur, la fréquence et la durée de l'enneigement.

b) Vents

Selon leurs directions, les vents dominants dans le bassin-versant sont :

Les vents océaniques du secteur Ouest et Nord-Ouest, généralement, humides et peu violents. Ces vents jouent un rôle bénéfique puisqu'ils diminuent la température et accroissent l'hygrométrie de l'air. Ils dominent en hivers et sont, généralement, responsables des précipitations abondantes.

Les vents continentaux : ces vents, du secteur Est et Sud-Est, chauds et secs, ont une action desséchante sur la végétation puisqu'ils contribuent à accroître l'évapotranspiration. En effet, en temps de chergui (été), les températures sont élevées dans tout le bassin-versant et plus accentuées dans les plaines et les vallées.

VI. Le régime hydrométrique :

1. Débit moyenne annuelle :

Le tableau n° 11 montre les données hydrologiques disponibles au niveau de six stations. Le débit moyen annuel est utilisé pour caractériser l'importance de l'écoulement des eaux au niveau de chaque station.

Tableau 11: Stations hydrométriques et leurs caractéristiques

Station hydrologique	Oued	Durée d'observation	Module annuel (m3/s)
Aïn Timedrine	Sebou	1980/81 – 2011/12	11.99
Azzaba	Sebou	1980/81 – 2011/12	13.26
Pont Mdez	Mdez	1980/81 – 2011/12	4.42
El Mers	Lamaâsser	1981/82 – 2011/12	1.17
Dar El Hamra	Zloul	1984/85 – 2011/12	2.75

L'analyse de ces données montre que le module moyen à la station El Mers est le plus faible (1,17 m3/s) comparé à celui des autres stations. Ceci est dû principalement à trois facteurs : le phénomène karstique qui permet à la plus grande partie des eaux de s'infiltrer dans le sol, l'évaporation très élevée dans la zone, et le captage des eaux à des fins d'irrigation.

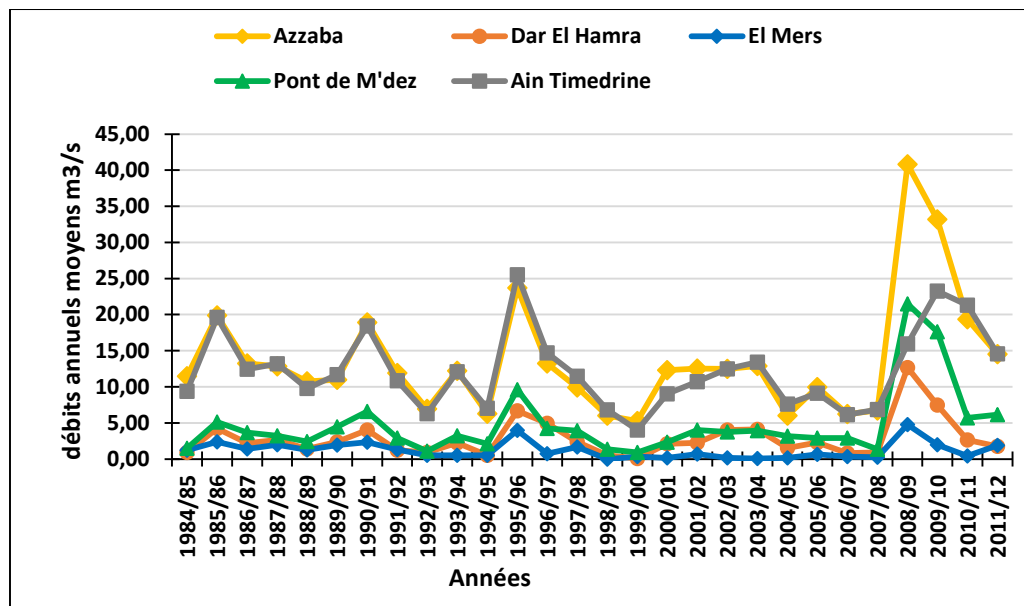


Figure 23: Variations des débits annuels moyens pour les différentes stations (1984-2012)

A partir du graphe de la Figure 23 nous pouvons constater que les débits les plus importants sont enregistrés au niveau de la station Azzaba puis Ain Timedrine.

2. Répartition Mensuelle des Débits :

L'analyse des données récapitulées dans le tableau n° 12, relatives aux débits moyens mensuels constatés au niveau des différentes stations, montre que :

- L'année est marquée par deux saisons bien distinctes : une saison sèche et une saison humide.
- 16 à 30 % des apports annuels en eau sont produits durant la saison sèche (Juin à Novembre) alors que le reste des apports annuels s'écoule entre Décembre et Mai (saison humide).
- Le débit minimum est enregistré durant le mois de juillet pour les stations de Dar El Hamra et d'El Mers et durant le mois d'août pour les stations de M'dez, Azzaba et d'Aïn Timedrine.
- Le débit maximum est enregistré durant le mois de mars pour les stations d'Azzaba, d'El Mers, de M'dez et d'Aïn Timedrine et au mois de Janvier pour la station Dar El Hamra.
- Les fluctuations des débits moyens mensuels sont liées à l'importance des précipitations.

Tableau 12: Débit liquides moyens mensuels des stations étudiées

Stations	Débits moyens mensuels (m ³ /s)												
	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Module
Ain Timedrine	5,53	6,84	7,28	13,84	13,84	19,34	21,47	19,94	15,56	9,88	6,06	4,84	11,99
Azzaba	6,63	8,09	8,41	12,97	15,31	22,06	25,00	22,09	17,09	10,47	6,25	5,41	13,26
Pont M'dez	3,44	2,75	2,63	4,50	5,41	7,31	9,22	7,59	5,06	2,38	1,50	1,47	4,42
El Mers	1,84	1,74	0,52	0,58	0,81	1,55	2,45	2,03	1,19	0,74	0,23	0,42	1,17
Dar El Hamra	0,89	1,86	3,04	5,00	6,07	5,96	5,68	3,75	1,57	0,43	0,07	0,10	2,75

La figure suivante illustre la variation des débits moyens mensuels par station.

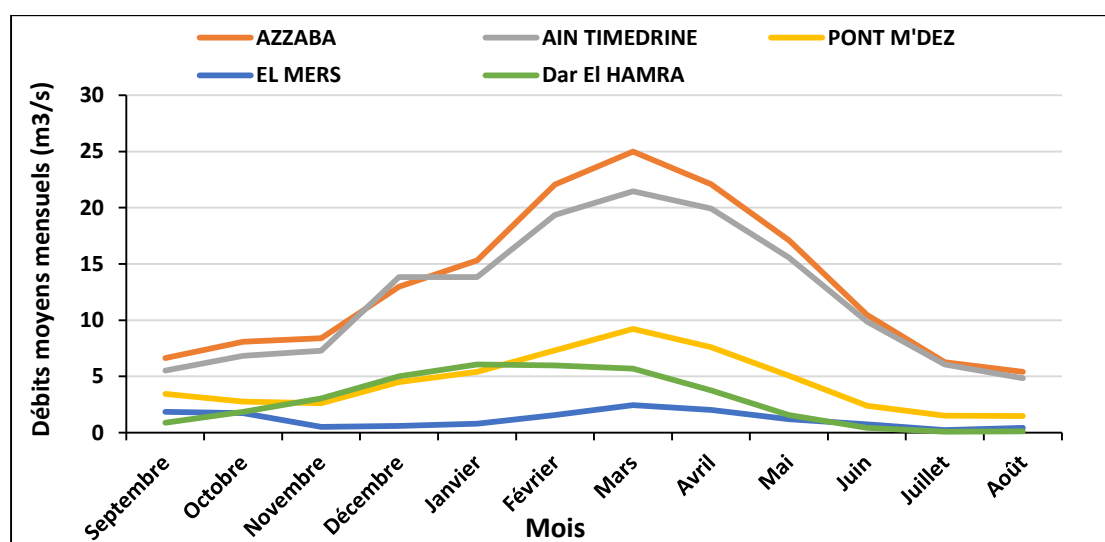


Figure 24: Variations des débits moyens mensuels dans le bassin Haut Sebou (1984-2012)

VII. Conclusion :

L'étude hydro-géomorphologique du bassin Haut Sebou a permis de caractériser ses composantes les plus importantes, et de révéler un tas d'informations.

Les caractéristiques physiques montrent que :

- ce bassin versant possède une forme allongée et que sa longueur est presque cinq fois plus grande que la largeur.

- Les terrains de pentes faibles à moyennes sont prédominants et les altitudes supérieures à 800 mètres occupent la plus grande superficie (94% de la superficie totale du bassin) et dont plus de 52% se trouvent à une altitude supérieure à 1600m. Ceci montre que le bassin-versant est une zone d'altitude. Par conséquent le réseau hydrographique est bien développé.

L'étude géologique a montré que :

- ce bassin versant est situé dans le domaine du Moyen Atlas tabulaire et plissé Il est formé des schistes et des quartzites du Primaire. Des argiles rouges souvent gypsifères et salifères et des basaltes doléritiques brunâtres et verdâtres du Permo-Trias. Par contre le Jurassique, qui est essentiellement liasique en particulier dans le Moyen Atlas tabulaire, est représenté par une énorme série de dolomies et de calcaires, qui reposent directement sur le Trias dans le canyon de l'Oued Sebou et les dolomies litées qui sont caractérisées par une série de bancs calcaires dans la partie centrale du causse.

- La vallée de l'oued traverse également des marnes et des grès appartenant au Crétacé. Des molasses et des marnes grises sont attribuées au Miocène. Dans la partie haute du bassin affleurent des roches basaltiques attribuées au Quaternaire

L'analyse climatologique et hydrologique a révélé :

- Un maximum au niveau des stations situés en amont où les altitudes sont élevées et un minimum enregistré au niveau des situés en aval où les altitudes sont basses.

- La variation des pluies moyennes mensuelles a montré que les valeurs moyennes mensuelles maximales sont enregistrées entre le mois novembre et avril tandis que les valeurs minimales sont enregistrées pendant le mois de juillet. Cette variation de températures est en relation avec les caractéristiques climatiques des saisons et les facteurs géographiques.

- Le calcul de la lame d'eau précipité sur le bassin versant du Haut Sebou par des différentes méthodes (Arithmétique, Isohyètes, Polygone de Thiessen) donne des résultats relativement proches.

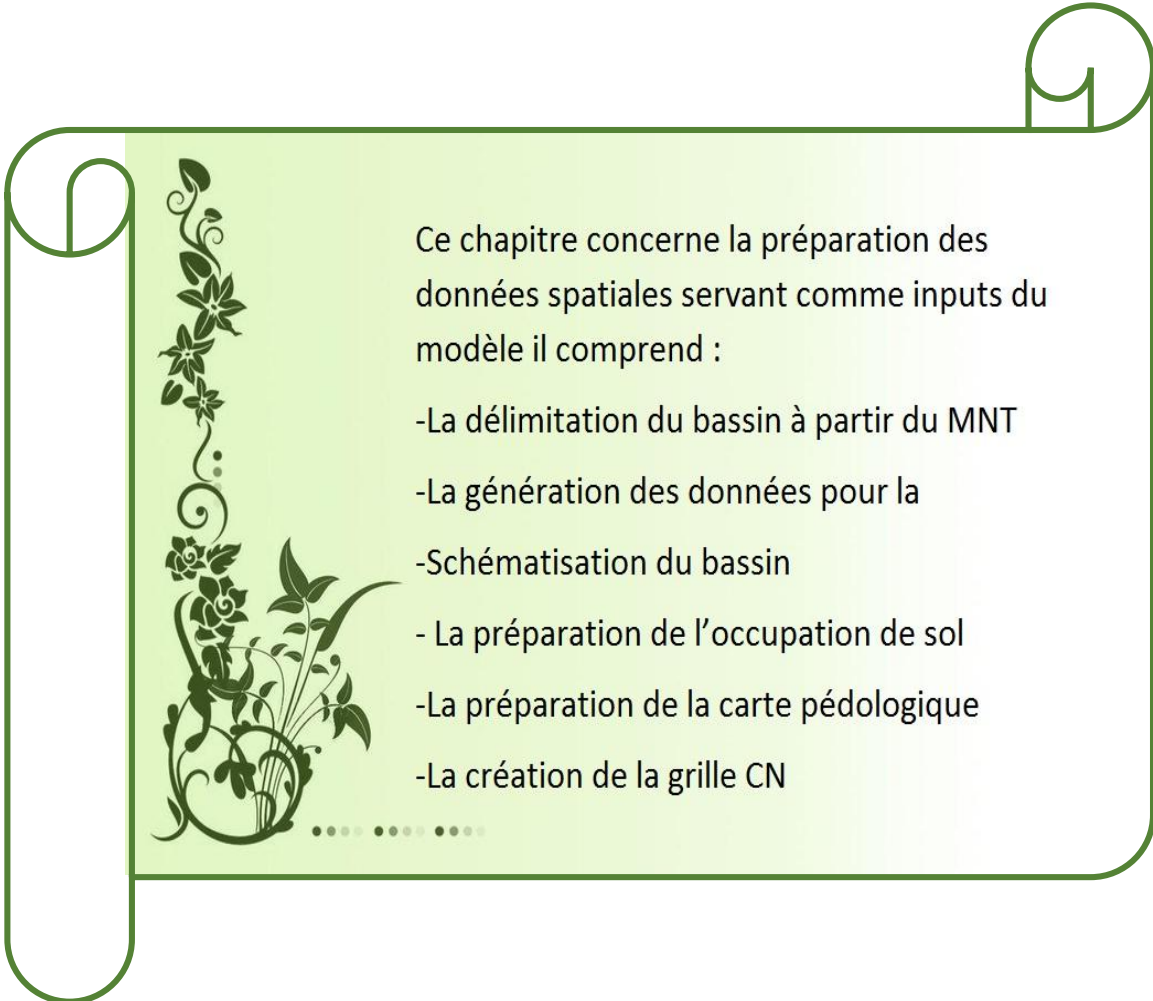
- Les valeurs de températures moyennes mensuelles maximales sont enregistrées au mois d'Aout tandis que les valeurs minimales sont enregistrées au mois de janvier. Cette variation de températures est en relation avec les caractéristiques climatiques des saisons et les facteurs géographiques.

- La combinaison entre la température et la précipitation, a montré que ce bassin versant est globalement sous un climat semi-aride à sub-humide.

- La Répartition Mensuelle des Débits montre que 16 à 30 % des apports annuels en eau sont produits durant la saison sèche (Juin à Novembre) alors que le reste des apports annuels s'écoule entre Décembre et Mai (saison humide).

Chapitre III :

Préparation des données

A decorative scroll graphic with a floral pattern on the left side, containing text about data preparation. The scroll is light green with a dark green border and contains a list of tasks. The floral pattern consists of green leaves and white flowers.

Ce chapitre concerne la préparation des données spatiales servant comme inputs du modèle il comprend :

- La délimitation du bassin à partir du MNT
- La génération des données pour la
- Schématisation du bassin
- La préparation de l'occupation de sol
- La préparation de la carte pédologique
- La création de la grille CN

I. Délimitation du bassin versant :

1. Modèle numérique de terrain (MNT) :

Avant de procéder à n'importe quelle opération de préparation d'un fichier de simulation HMS, il est primordial d'avoir en sa possession le MNT de la zone d'étude, dont le rôle est fondamental dans la caractérisation physique du bassin et le calcul des paramètres.

Le MNT est une représentation numérique du terrain en termes d'altitudes. Cette représentation peut être sous différentes formats : maillage carré (format raster), courbes de niveaux, réseau de triangles irréguliers (TIN).

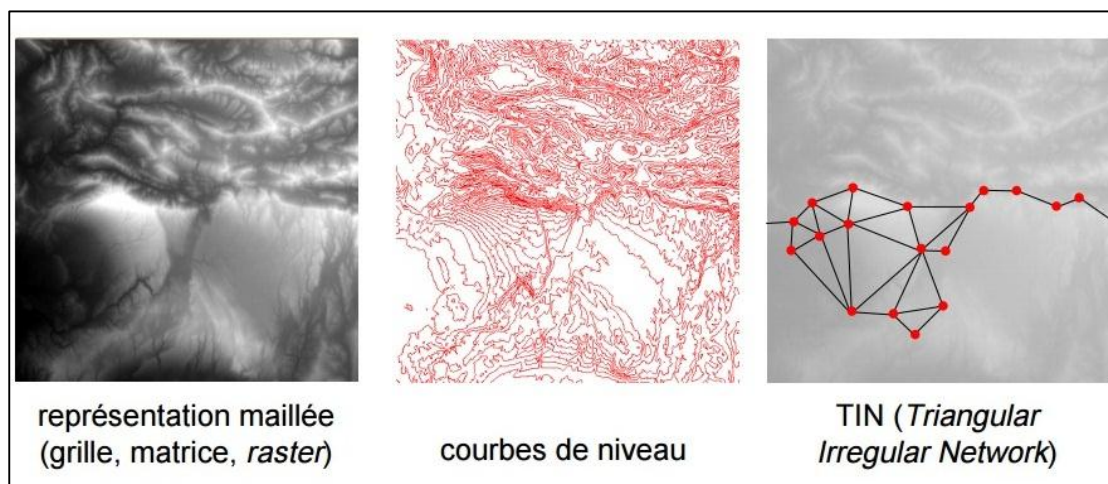


Figure 25:Formats du modèle numérique de terrain

Lorsque le MNT est représenté sous forme d'une image matricielle (format raster), il est caractérisé par sa résolution planimétrique, appelée également résolution spatiale, correspond à la taille du pixel ou de la maille, et sa résolution altimétrique relative à l'unité de mesure des valeurs d'altitude.

Selon la technique de construction du MNT, celui-ci peut présenter le sol nu, ou bien le sol ainsi que tous les objets au-dessus du sol : bâtiments, arbres, etc., que l'on appellera sursol ; dans ce cas l'altitude renseignée par le MNT est celle du toit de l'ensemble des objets de la surface topographique. Pour différencier entre les modèles suivant l'information fournie, différents termes peuvent être attribués :

- Modèle numérique de terrain : lorsque le modèle informe sur les altitudes de la surface topographique sans les éléments du sursol.
- Lorsque le sur sol est pris en compte dans l'information altimétrique. Dans ce cas, sont également employés les termes de Modèle Numérique d'Élévation (MNE), ou encore Modèle Numérique d'Altitude (MNA).

En général, on conserve le seul terme générique de MNT en spécifiant si nécessaire quelle est l'information altimétrique fournie.

2. Délimitation automatique du bassin du Haut Sebou:

Le MNT utilisé est de type ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometr–Global Digital Elevation Model) téléchargé à partir du site web USGS <http://glovis.usgs.gov>. La résolution altimétrique de ce modèle est de 30 m, et sa précision altimétrique entre 5 et 20 m.

L'objectif de cette étape est d'évaluer la qualité de la délimitation automatique à partir du modèle numérique de terrain (MNT), en se référant à la délimitation manuelle faite à partir des cartes topographiques 1/250000. Le résultat de la délimitation automatique est confronté, donc, à la délimitation définie manuellement. On note un écart entre les deux délimitations dans certaines zones (Fig.26).

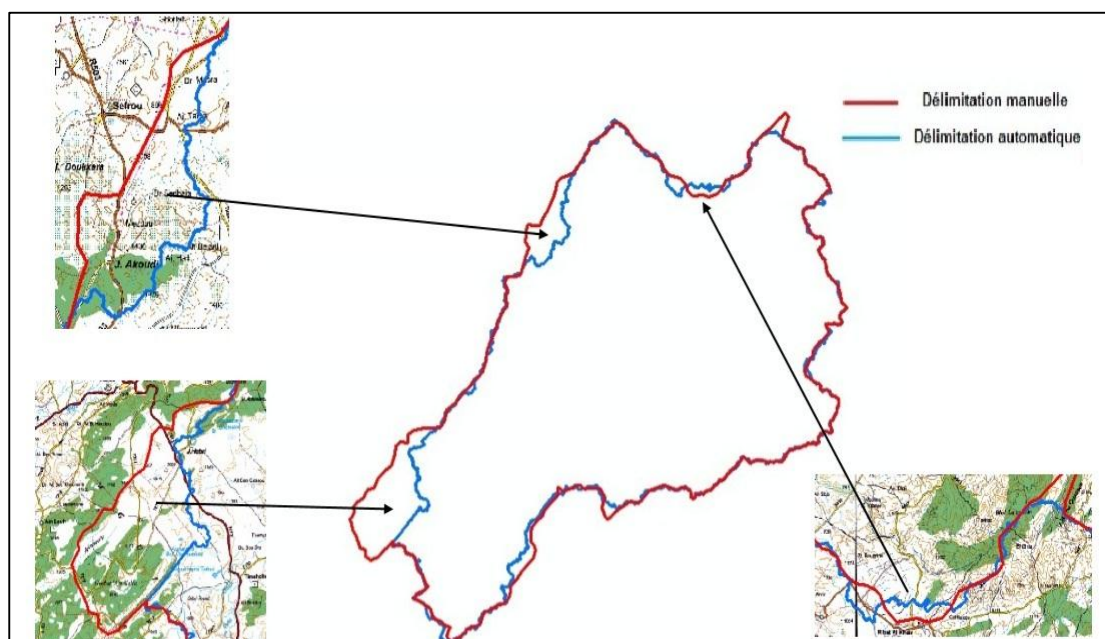


Figure 26: Comparaison entre la délimitation manuelle et la délimitation automatique

II. Schématisation du bassin versant :

1. Délimitation des sous bassins et extraction du réseau de drainage :

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 (allouer) 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 (Fig.27).

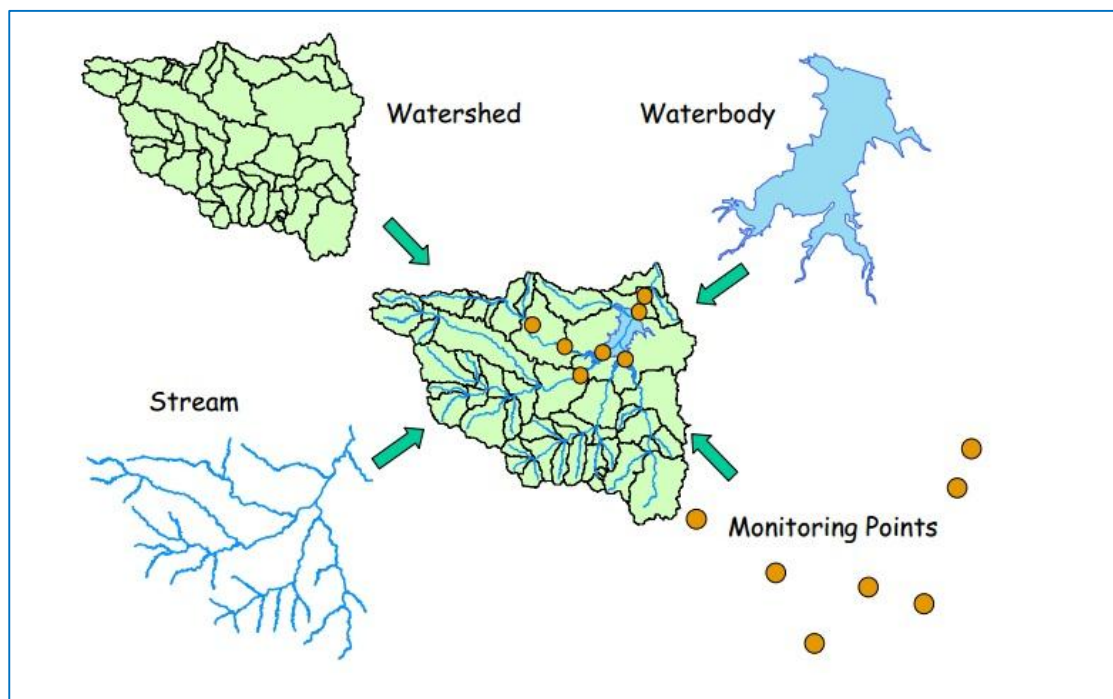


Figure 27: Modèle spatial d'Arc Hydro

b) Démarche :

Cette étape consiste principalement à délimiter les sous bassins et extraire le réseau de drainage. A partir du MNT du bassin, sont réalisées neuf opérations qui permettent d'obtenir la schématisation du modèle de bassin.

Les outils Fill Sinks et Flow Direction

Le MNT est corrigé par le remplissage des dépressions en augmentant l'altitude des cellules au niveau du terrain environnant (Fill Sinks) afin de pouvoir déterminer le sens de l'écoulement (Flow Directions) (Fig.28).

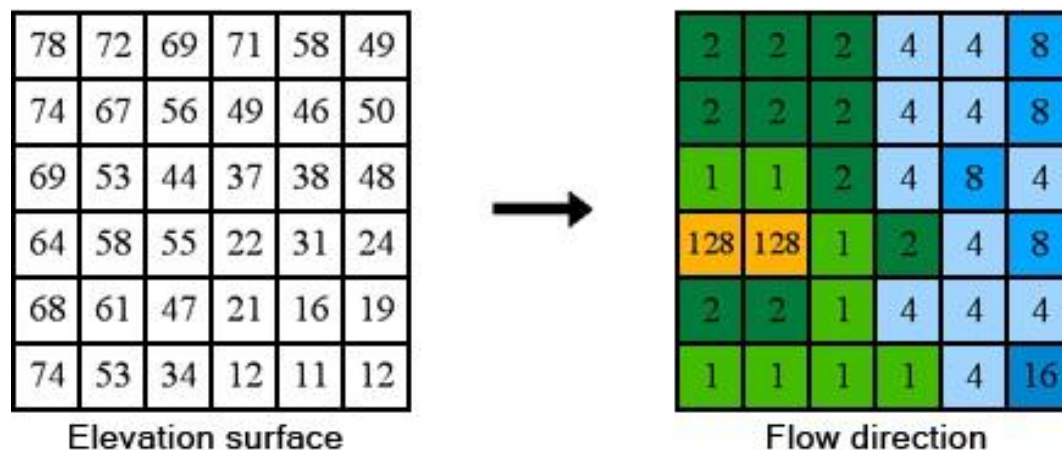
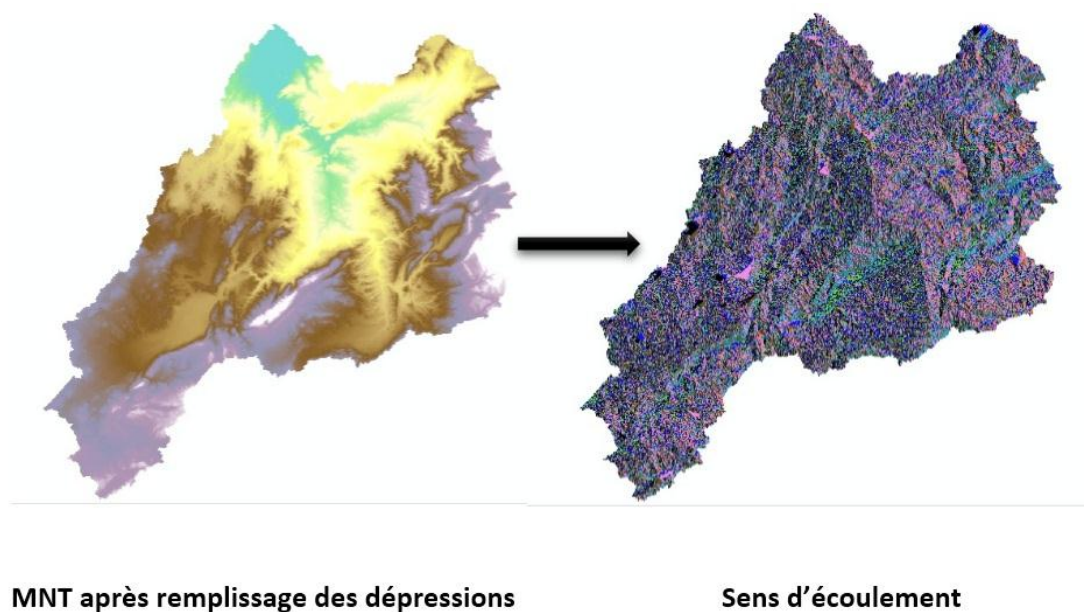


Figure 28: Principe de l'outil direction du courant (Flow Direction)



Les Outils Flow Accumulation et Stream Définition

L'accumulation de l'écoulement (Flow Accumulation) détermine le nombre de cellules ascendantes s'écoulant dans une cellule donnée (Fig.29). Elle permet la définition du réseau hydrographique (Stream Definition) qui résulte de la classification de toutes les cellules dont l'accumulation est supérieure à un certain seuil.

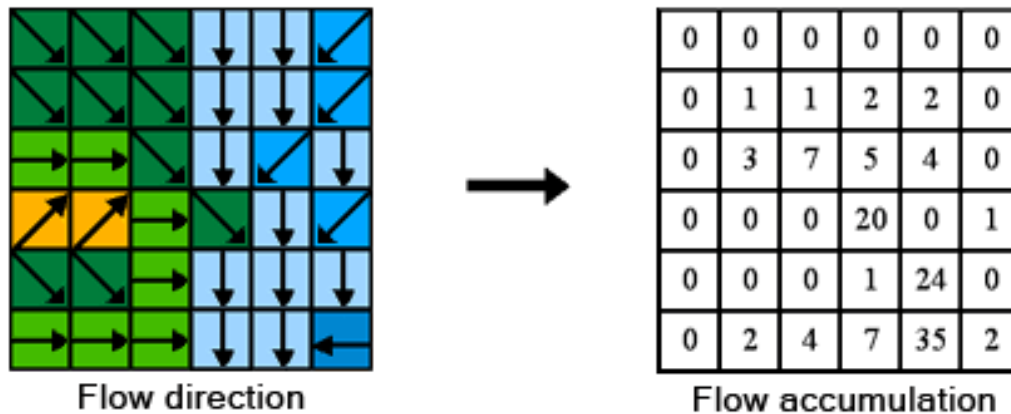
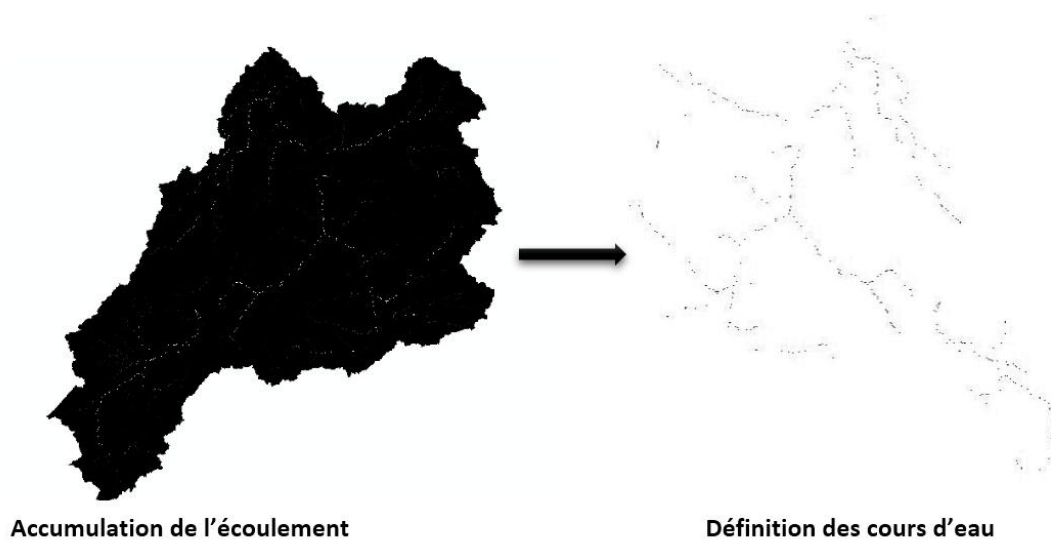
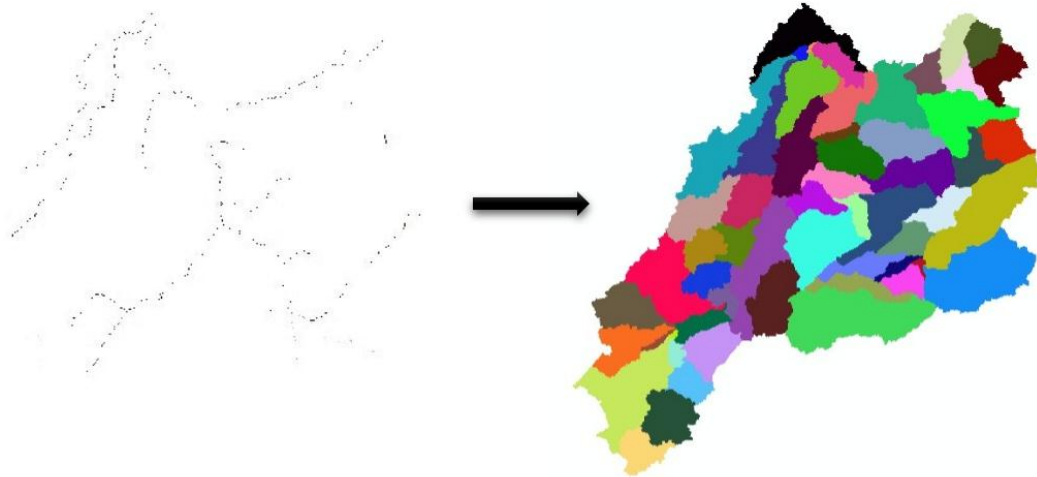


Figure 29: Principe de l'outil Accumulation de flux (Flow Accumulation)



Les Outils Stream Segmentation et Catchment Grid Delineation

La Segmentation du cours d'eau (Stream Segmentation) divise les cours d'eau en des segments. Les limites des sous-bassins sont tracées pour chaque segment de cours d'eau (Catchment Grid Delineation).

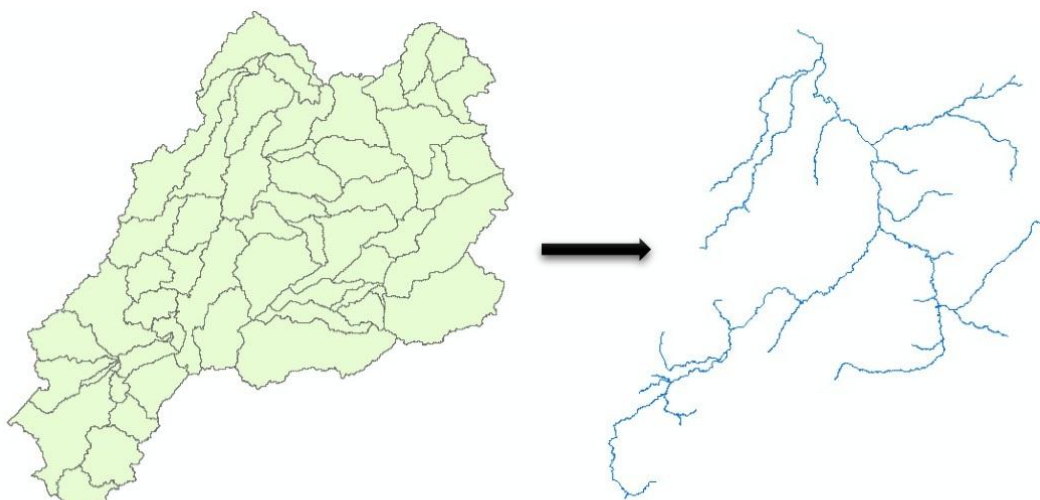


Segmentation des cours d'eau

Délimitation en sous bassins

Les Outils Catchment Polygone Processing et Drainage Line Processing

La fonction (Catchment Polygone Processing) convertit une grille de captage en une entité polygone. Elle permet de tracer les contours de chaque sous-bassin. Tandis que l'outil (Drainage Line Processing) permet de voir le détail des lignes de drains dans des sous-bassins versants.



Représentation vectorielle des sous bassins

Réseau hydrographique

L'Outil Adjoint Catchment Processing

La dernière étape constitue l'agrégation des sous-bassins à chaque confluence de ruisseaux (Adjoint Catchment Processing).



Résultat de l'outil Adjoint Catchment Processing

c) Qualité de l'extraction du réseau hydrographique :

Afin de vérifier la qualité des extractions du MNT, nous avons confronté les résultats obtenus à des données hydrologiques externes, notamment à la délimitation et au réseau hydrographique défini à partir des cartes topographiques. On note un écart entre le tracé du réseau hydrographique extrait du MNT (« DrainageLine ») et le réseau hydrographique exogène.

Il existe des méthodes de correction de plan altimétrique le long des rivières à l'aide desquelles on peut « forcer » le MNT avec le réseau hydrographique connu. Une technique est proposée par (Hellweger, 1997; Maidment et Djokic, 2000) dans l'algorithme AGREE. Elle consiste à abaisser, d'une valeur choisie par l'utilisateur, les altitudes de toutes les cellules appartenant au réseau hydrographique connu. Cette manipulation est réalisée avec l'outil DEM Reconditioning dans HEC-GeoHMS.

Toutefois, nous avons opté pour une autre méthode qui consiste à détecter les zones qui présentent des problèmes de définition des cours d'eau, convertir le MNT en un fichier de points à l'aide de la fonction Raster to Point, puis modifier les altitudes des points correspondants à ces zones en abaissant leurs altitudes dans la table attributaire.

Cette démarche a permis de redéfinir le réseau hydrographique et obtenir des résultats en cohérence avec les données externes (Fig.30)

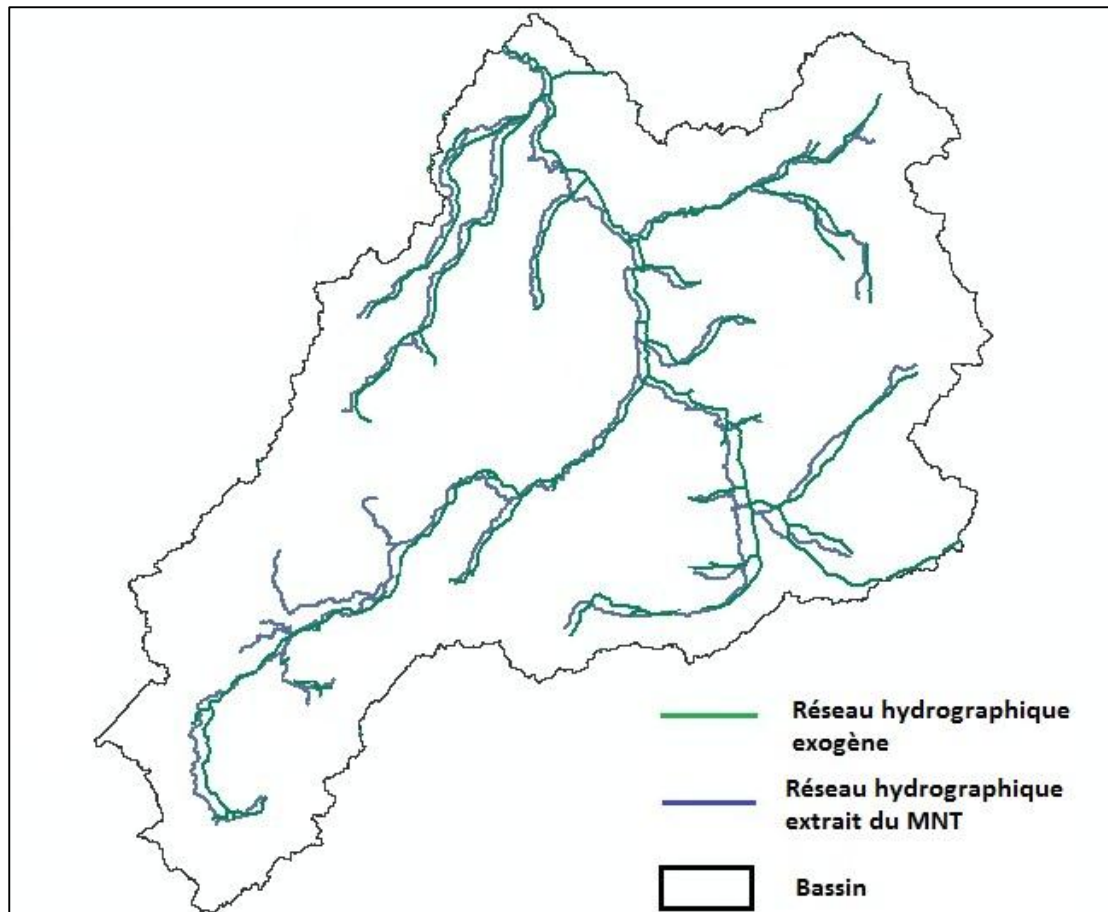


Figure 30: Comparaison entre le tracé de réseau extrait du MNT, avant et après modification, et le réseau hydrographique de référence

Conclusion :

La précision de l'extraction automatique du réseau hydrographique à partir d'un MNT dépend de plusieurs paramètres tels que la qualité et la précision du MNT utilisé. Cette précision est liée elle-même aux limites conceptuelles du modèle, du fait qu'il est impossible de représenter complètement une surface continue avec un modèle discret de résolution finie, et au processus d'interpolation lors de la construction du MNT ou de son exploitation.

Mais, comme ces procédures sont automatiques et permettant de répondre à certains besoins d'applications hydrologiques, elles sont employées malgré leurs imprécisions. C'est pourquoi, il semble primordial de pouvoir évaluer les résultats d'extraction pour juger son adéquation avec les besoins d'ordre hydrologique.

L'analyse de la qualité d'extraction met en évidence la nécessité de compléter l'information fournie par le MNT avec des données hydrologiques exogènes, afin de modifier le plan altimétrique pour satisfaire des critères de qualité d'ordre hydrologique. C'est ce qu'on appelle la ré-ingénierie du MNT. (Julie CHARLEAUX –DEMARGNE, 2001)

d) Découpage en sous bassins :

Le découpage initial en sous-bassins, obtenu dans le paragraphe (1) peut être amendé par l'utilisateur. Pour ce faire, il faut d'abord créer un nouveau projet et définir la zone d'étude en indiquant l'exutoire du bassin versant. Puis, fusionner les sous bassins en fonction des positions des stations hydrométriques et des barrages. Le découpage final est composé de 8 sous-bassins, présentés sur la Figure 31.

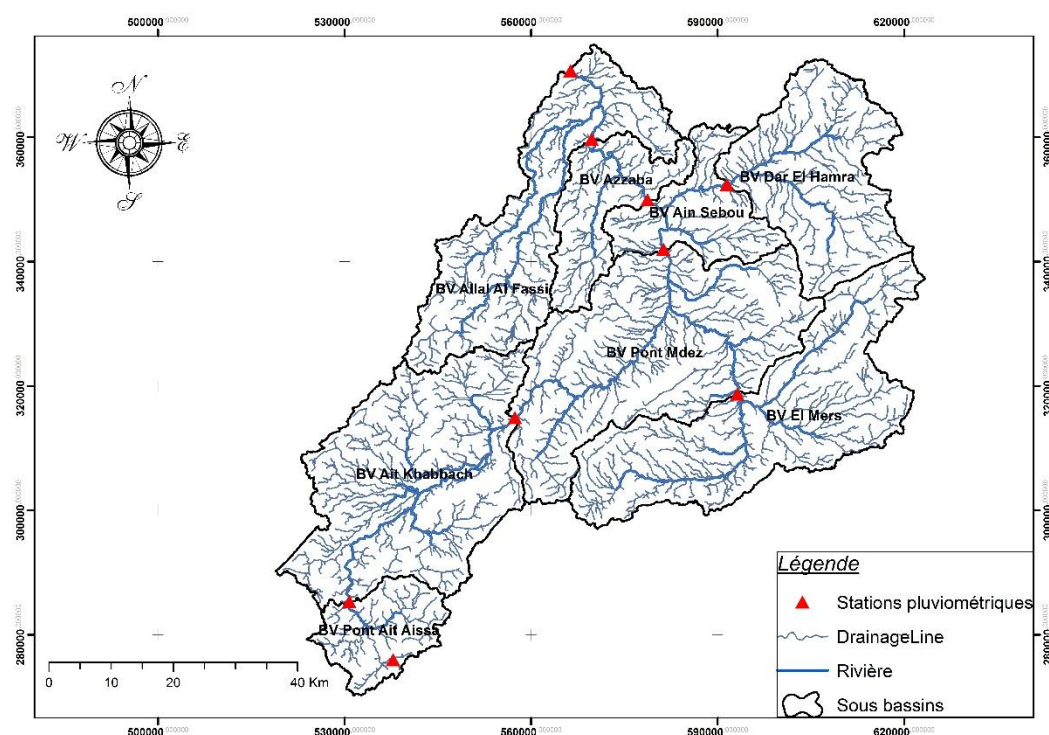


Figure 31: Découpage final des sous bassins

e) Paramètres morphologiques des sous bassins

Le calcul des caractéristiques des sous bassins est fait sous HEC-GeoHMS, la superficie, le périmètre, le plus long chemin hydraulique, le temps de concentration ainsi que le coefficient de stockage par sous bassin. Ces caractéristiques sont données dans le Tableau 13.

La Figure 32 présente le plus long chemin hydraulique de chaque sous bassin, calculé à l'aide de HEC-GeoHMS.

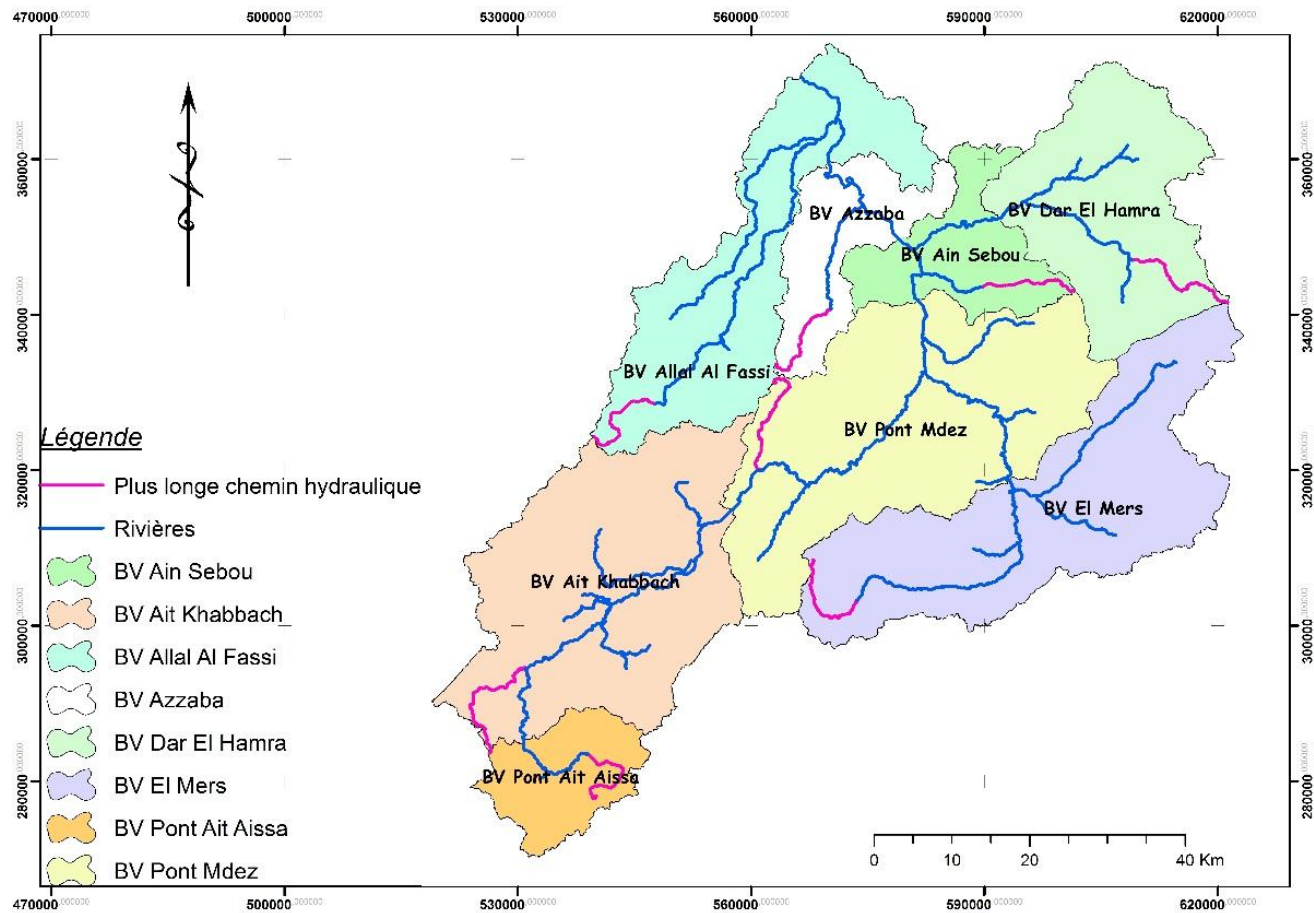


Figure 32: Plus long chemin hydraulique par sous bassins

Les plus longs chemins hydrauliques interviennent dans le calcul du temps de concentration qui est estimé par la méthode de Kirpich :

$$t_c = 0.945 \frac{L^{1.155}}{D^{0.385}} \quad (\text{heure})$$

Avec :

L : Plus long chemin hydraulique en km

D : Différence d'altitude entre les extrémités du talweg le plus long en m

Le coefficient de stockage est calculé par la formule :

$$c_s = 1.631 t_c \quad (\text{heure}) \quad (\text{D'après un tutoriel de WMS})$$

Le tableau ci-dessous récapitule caractéristiques de tous les sous bassins:

Tableau 13: Caractéristiques des sous bassins

Sous-BV	Superficie (km ²)	Périmètre (Km)	Plus long chemin hydraulique (km)	H _{max}	H _{min}	Temps de concentration (heure)	Coef de stockage (heure)
Ain Sebou	308.27	168.74	31.24	2228	640	2.94	4.79
Ait Khabbach	1061.50	268.31	66.44	2460	1466	8.44	13.76
Allal Al Fassi	757.92	301.85	84.34	2051	385	9.11	14.85
Azzaba	310.91	170.11	46.82	1837	474	4.98	8.12
Dar El Hamra	663.76	189.27	43.84	3070	756	3.77	6.14
El Mers	982.37	293.01	58.27	3071	1221	5.71	9.31
Pont Ait Aissa	248.41	117.59	28.52	2416	1883	4.03	6.57
Pont Mdez	1130.69	261.98	68.75	2800	732	6.62	10.79

III. Occupation du sol :

1. Impact de l'occupation de sol sur le comportement hydrologique :

L'occupation de sol influence significativement le ruissellement. Le couvert végétal retient, selon sa densité, sa nature et l'importance des précipitations, une proportion variable de l'eau atmosphérique. Cette eau d'interception est en partie soustraite à l'écoulement.

Ce paragraphe décrit l'impact des différents types d'occupations des sols sur le comportement hydrologique du bassin versant.

Les plans d'eau :

Parmi les éléments de la couverture du sol qui influencent le comportement hydrologique d'un bassin versant, on doit prendre en compte la présence de surfaces d'eau libre telles que les lacs et les dayas, qui jouent un rôle important du fait de leur capacité de stockage temporaire d'un certain volume d'eau. Ce stockage a pour effet de laminier les crues, c'est-à-dire de réduire le débit de pointe de la crue.

Les surfaces urbanisées :

Elles sont généralement caractérisées par une forte imperméabilité. Les surfaces imperméables jouent un rôle très important en hydrologie urbaine : elles augmentent l'écoulement de surface et réduisent les infiltrations.

Les territoires agricoles :

Pour ce type d'exploitation, dont le couvert végétal est caractérisé par une forte variabilité temporelle à l'échelle de la saison voire du mois, les conséquences sur le comportement hydrologique sont principalement dues aux modifications des propriétés hydrauliques du sol provoquées par les pratiques agricoles (compactage par les roues des engins agricoles, labour, drainage agricole...).

La forêt :

La forêt intercepte une partie de l'averse par sa frondaison. Elle exerce une action limitatrice importante sur le ruissellement superficiel. La forêt régularise le débit des cours d'eau et amortit les crues de faibles et moyennes amplitudes. Par contre, son action sur les débits extrêmes causés par des crues catastrophiques est réduite (Andréassian, 2002).

2. Choix de l'image satellite :

L'image satellite utilisée est une image Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper), acquise en 09 Novembre 2002. Le tableau 14 présente les bandes de cette image :

Tableau 14: Bandes Landsat ETM+

Bande	Domaine spectral (μm)	Résolution spatiale (m)	Applications
1	0.45 –0.52 (Bleu)	30	discrimination entre le sol et la végétation, bathymétrie/cartographie côtière; identification des traits culturels et urbains
2	0.52 –0.60 (Vert)	30	cartographie de la végétation verte (mesure du sommet de réflectance); identification des traits culturels et urbains
3	0.63 –0.69 (Rouge)	30	discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles; (absorption de chlorophylle); identification des traits culturels et urbains
4	0.76 –0.90 (Proche IR)	30	identification des types de végétation et de plantes; santé et contenu de la masse biologique; délimitation des étendues d'eau; humidité dans le sol
5	1.55 - 1.75 (Moyen IR)	30	sensible à l'humidité dans le sol et les plantes; discrimination entre la neige et les nuages
6	10.4 –12.5 (IR thermique)	60	discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol relié au rayonnement thermique; cartographie thermique
7	2,08 - 2,35 (Moyen IR)	30	discrimination entre les minéraux et les types de roches; sensible au taux d'humidité dans la végétation
8	0.52 – 0.90 (Panchromatique)	15	Etat de la végétation

Source : CCT, 2008

Pour composer cette image, on a téléchargé les différentes bandes à partir du site web USGS <http://glovis.usgs.gov>, puis, on a procédé à la composition de ces bandes à l'aide d' ArcGIS (ArcToolbox > Data management / composite Bands) afin d'obtenir une image multi spectrale.

Le choix des bandes se fait en fonction du besoin. La composition 1, 2 et 3 donne une image en couleurs pseudo-naturelles. Mais, pour des raisons de discrimination, on change cette composition pour obtenir une image dite fausses

couleurs. Pour une meilleur discrimination, soit au niveau de l'interprétation visuelle, soit pour la classification, on a opté pour la composition 5, 4 et 3.

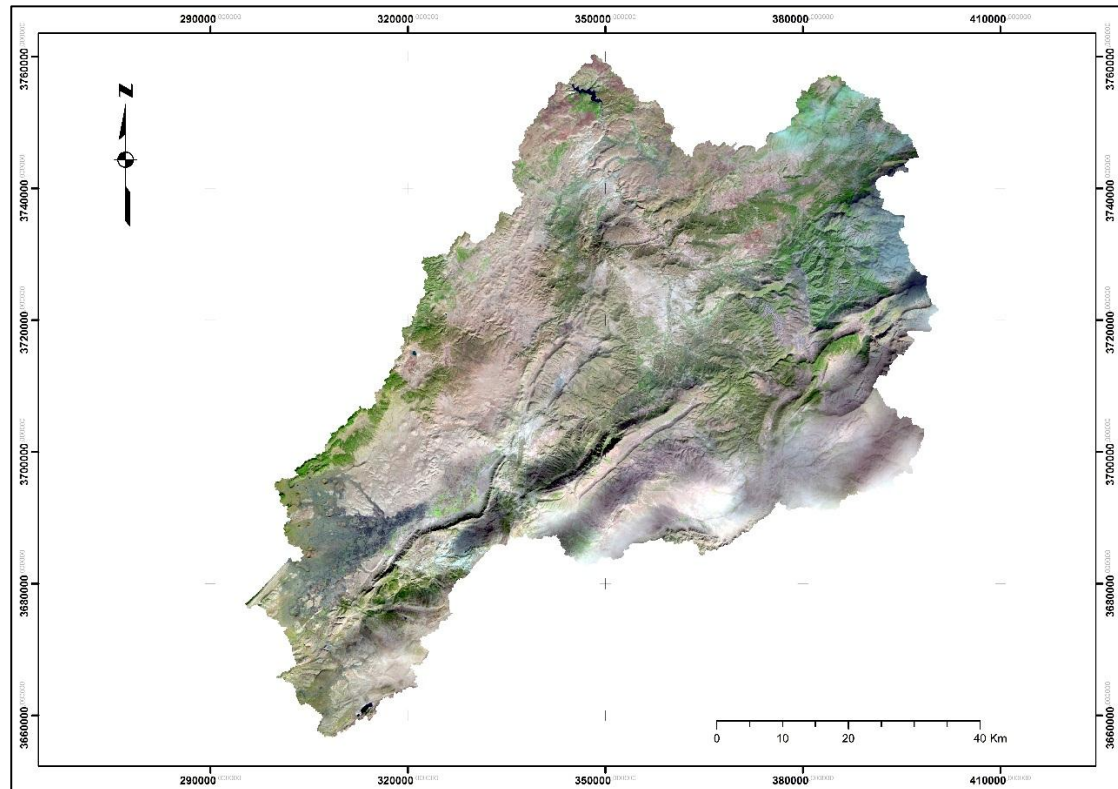


Figure 33: Image multi spectrale du Haut Sebou

3. Classification de l'image satellite :

La classification consiste à affecter les pixels de l'image à des classes homogènes. Elle a pour objectif la traduction des informations spectrales en classes thématiques. Autrement dit, partitionner l'image en classes thématiques en identifiant la classe à laquelle appartient chacun des objets contenus dans l'image analysée.

La stratégie de classification adoptée est la classification supervisée (dite aussi assistée ou dirigée). C'est le type de classification le plus adaptée aux images de haute résolution. C'est une classification qui présuppose que l'on connaisse la localisation et la nature de certaines zones d'entraînement dans l'image pour définir les classes. On cherche alors, sur l'image, des objets (groupes de pixels) dont on connaît la nature, donc semblables à des objets de référence qui sont les sites d'entraînement.

La première étape est l'ouverture de l'image sur ArcGIS avec la composition colorée la plus discriminante et la saisie d'une ou plusieurs zones d'entraînement selon la nature des classes recherchées à l'aide de la barre d'outils **Classification des images**.

Dans notre cas cinq classes d'utilisation du sol ont été définies à partir de l'image satellite : Eau, agriculture, végétation, sol nu et forêt (Fig.34).

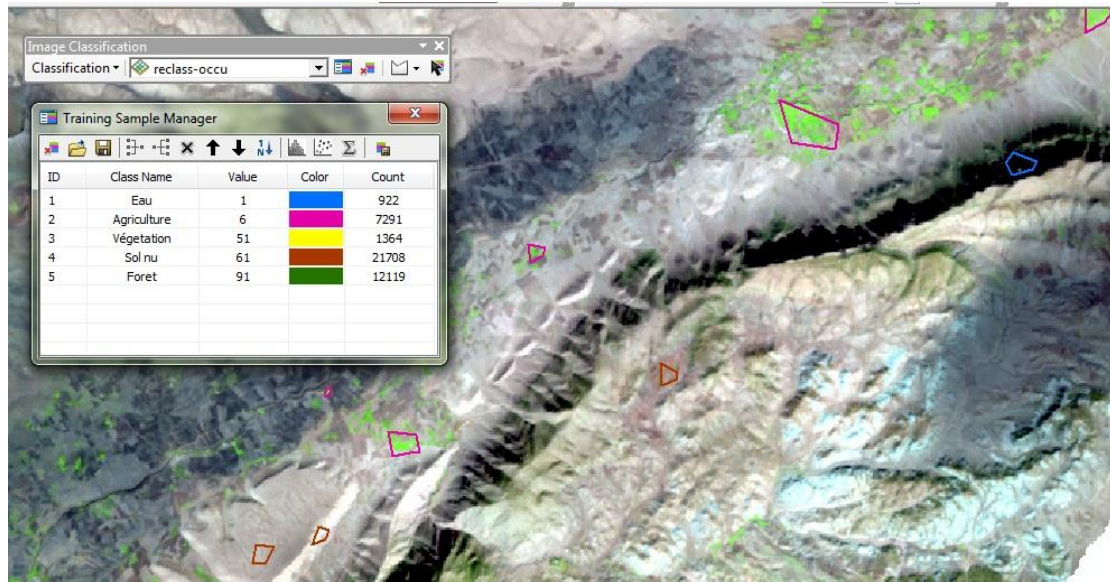


Figure 34: Echantillons d'apprentissage

Pour une classification correcte, la qualité des échantillons d'apprentissage a été analysée à l'aide des outils d'évaluation des échantillons d'apprentissage du **Gestionnaire d'échantillons d'apprentissage** (Fig.35).

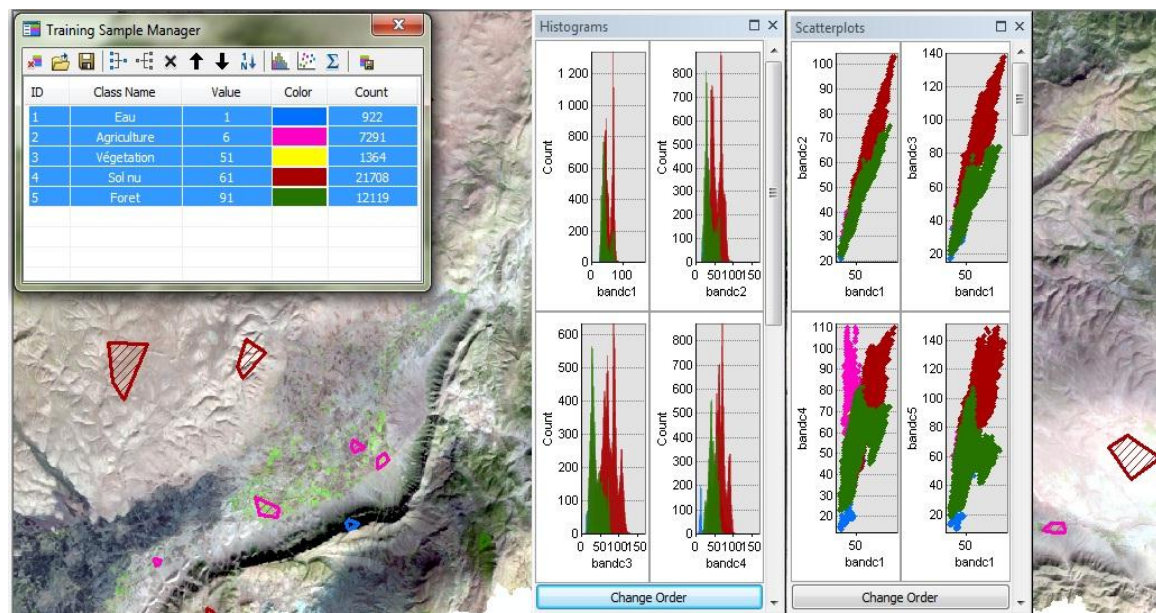


Figure 35: Evaluation d'échantillons d'apprentissage

A l'aide de la barre d'outils Classification des images et du Gestionnaire d'échantillons d'apprentissage, il a été déterminé que les échantillons d'apprentissage étaient représentatifs de la zone et statistiquement distincts. Par conséquent, une classification de vraisemblance maximale a été effectuée à partir de la barre d'outils. L'image classée a ensuite été nettoyée pour créer la carte d'occupation des sols définitive, représentée ci-dessous.

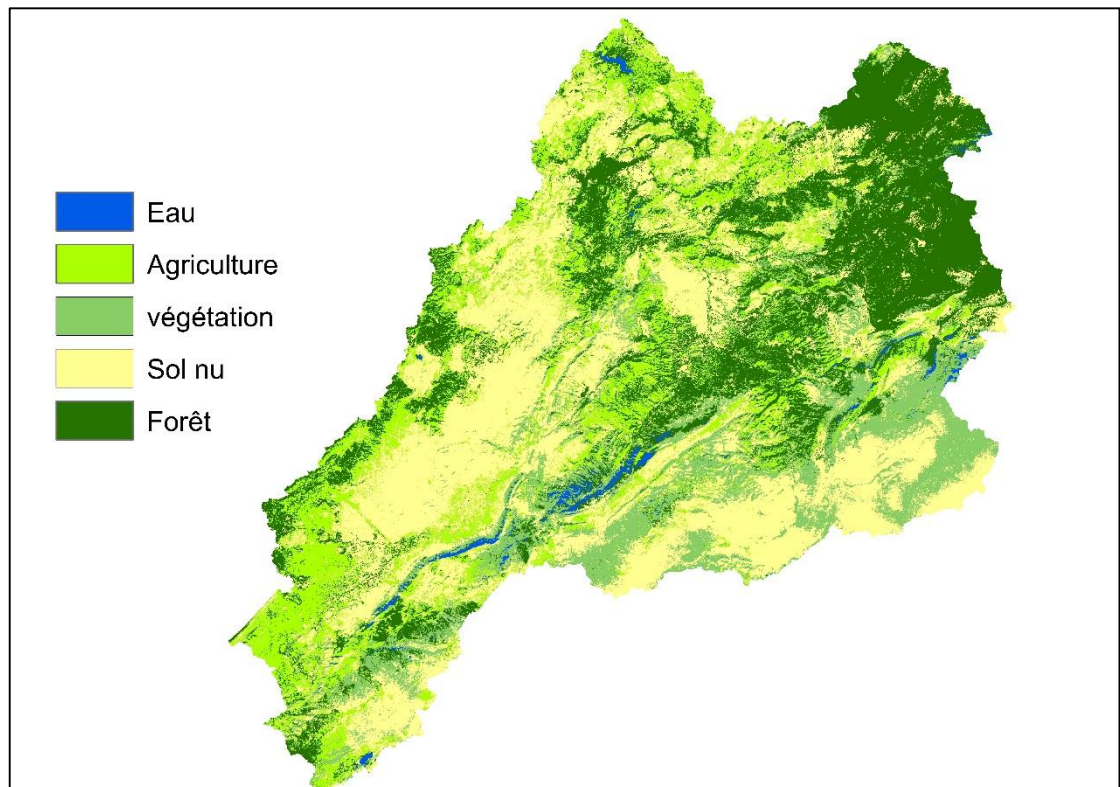


Figure 36: Carte d'occupation des sols classée en sortie

IV. Pédologie :

La nature du sol intervient sur la rapidité de montée des crues et sur leur volume. En effet, le taux d'infiltration, le taux d'humidité, la capacité de rétention, les pertes initiales, le coefficient de ruissellement (Cr) sont fonction du type de sol.

Une carte de type de sol de base, selon la classification pédologique, a été récupérée auprès de la Direction des Eaux et Forêts de Fès sous forme image que nous avons numérisé par la suite à l'aide du logiciel ArcGIS Afin d'obtenir la carte suivante.

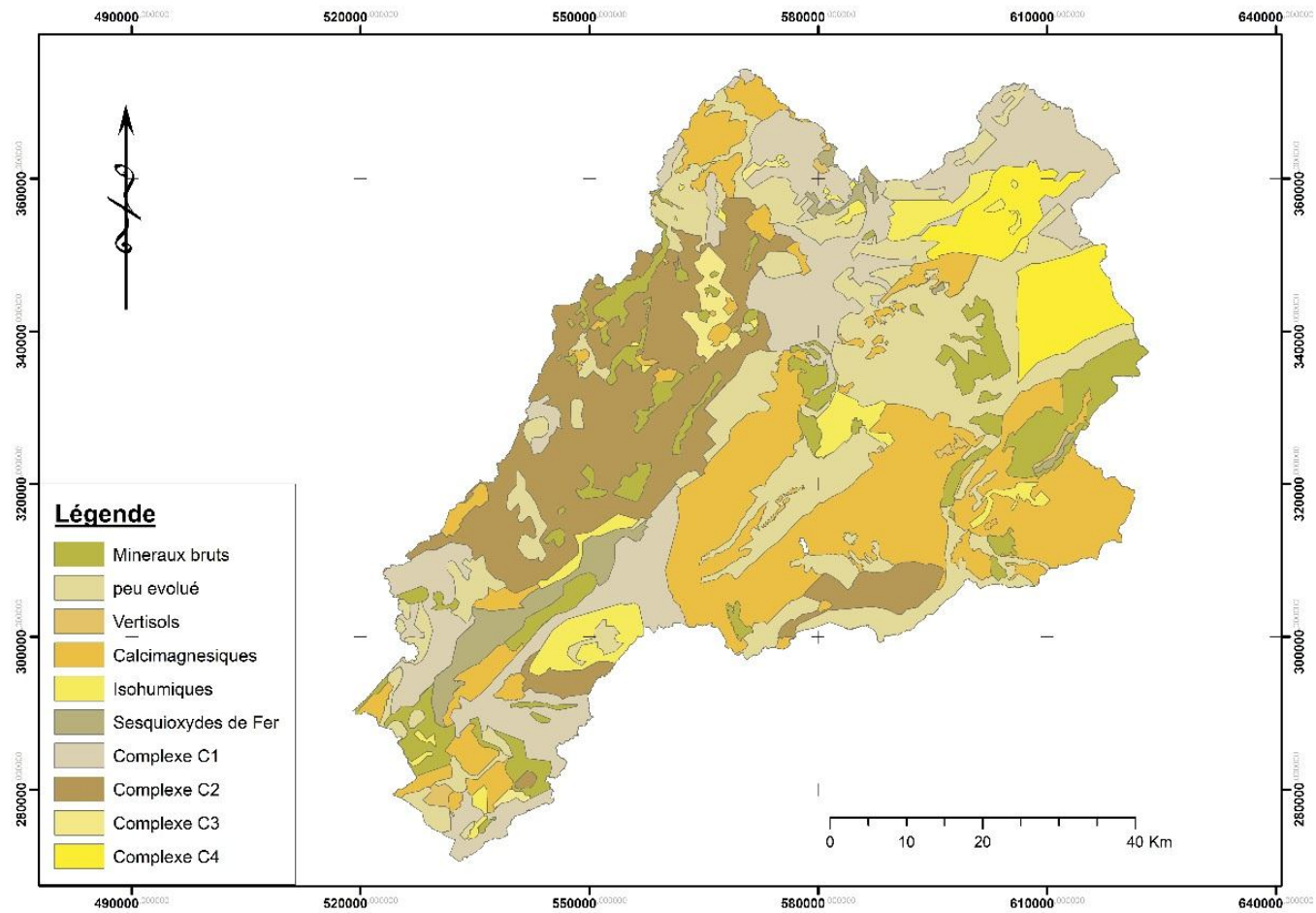


Figure 37: Classification pédologique des sols – BV Haut Sebou

Les classes distinguées au niveau du bassin-versant sont au nombre de sept :

- Les minéraux bruts
- Les sols peu évolués
- Les calcimagnésiques
- Les vertisols
- Les sols isohumiques
- Les sols à sesquioxyde de fer
- Les unités complexes.

L'importance et la répartition spatiale de ces classes identifiées sont illustrées par la figure 38.

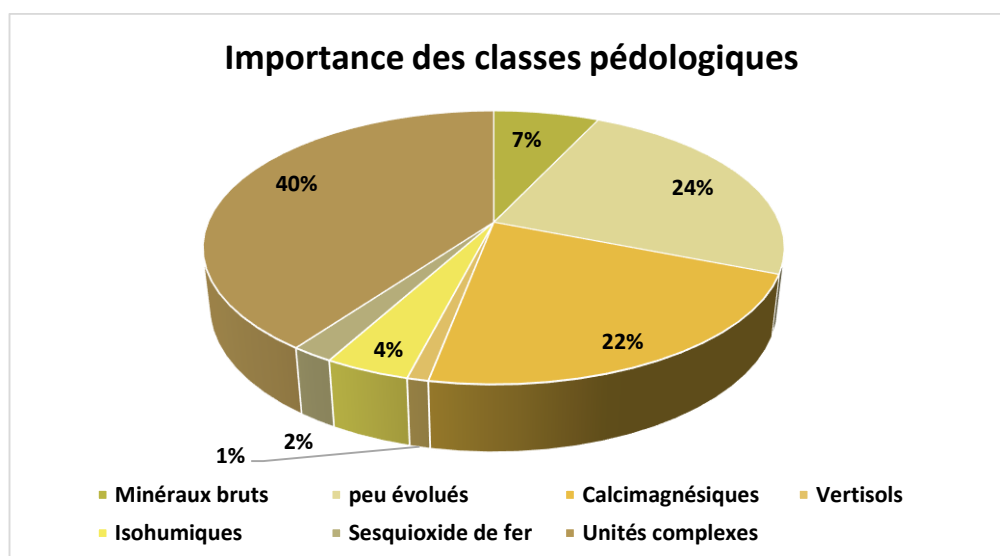


Figure 38: importance des classes pédologique du Haut Sebou

La classe des unités complexes prédomine. Elle totalise à elle seule 234 706 ha, soit 40.7% de la superficie du bassin-versant. Les classes des sols peu évolués et des sols calcimagnésiques couvrent, respectivement, 23.8% et 22.5% de la superficie du bassin.

La classification des sols retenue par la méthode SCS est la classification hydrologique. C'est une classification qui consiste à regrouper les sols sous quatre groupes hydrologiques (A,B,C,D) en se basant sur les estimations de leur potentiel d'infiltration. Les sols sont affectés à un groupe parmi les quatre en fonction de leur taux d'infiltration.

Groupe A : (faible potentiel de ruissellement) : Sols présentant des taux élevés d'infiltration même lorsque saturés et étant principalement constitués en profondeur de sable ou gravier bien drainés ou excessivement bien drainés. Ces sols possèdent un haut taux de transmission de l'eau infiltrée.

Groupe B : Sols avec des taux d'infiltration moyen lorsque saturés, composés essentiellement de sable ou gravier modérément drainés à bien drainés sur des profondeurs modérées à importantes, avec des textures modérément fines à modérément grossières. Ces sols possèdent un taux modéré de transmission de l'eau

Groupe C : Sols présentant des taux d'infiltration lents lorsque saturés, composés principalement de sols avec une couche qui retarde le mouvement vertical de l'eau ou de sols avec une texture modérément fine à fine. Ces sols ont un taux de transmission de l'eau qu'on peut qualifier de faible

Groupe D (potentiel élevé de ruissellement) : Sols avec de très faibles taux d'infiltration lorsque saturés, constitués principalement d'argile en surface ou à une faible profondeur ou de sols avec une nappe phréatique haute en permanence. Ces sols présentent un très faible taux de transmission de l'eau.

Le passage de la classification pédologique à la classification hydrologique se fait en renseignant sur la texture des sols en fonction de sa composition en sable, limon, argile et matière organique. Les valeurs de ces composantes sont données dans le tableau suivant :

Tableau 15: texture des sols en fonction de leurs compositions

Sols	Limon+ Sable fin (%)	Sable Grossier (%)	Argile (%)	Matière Organique (%)	Texture du Sol
SMB	35,75	48,20	15,55	0,50	Modérément fines à modérément grossières
SPE	63,16	9,59	25,34	1,91	Texture grossière
V	51,19	2,43	44,75	1,63	Texture très fine
CMG	67,42	9,70	20,40	2,48	Texture grossière
ISH	61,37	3,33	32,87	2,43	Texture modérément fine à fine
SF	68,50	7,71	21,92	1,87	Texture grossière

Avec :

SMB	Sols Minéraux brutes
SPE	Sols peu évolués
V	Sols Vertiques
CMG	Sols Calcimagnésique
ISH	Sols Isohumiques
SF	Sols à Sesquioxydes de fer

Les groupes hydrologiques obtenus selon la texture des sols sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 16: la classification hydrologique des sols

Sols	Groupe hydrologique
Sols Minéraux brutes	B
Sols peu évolués	A
Sols Vertiques	D
Sols Calcimagnésique	A
Sols Isohumiques	C
Sols à Sesquioxydes de fer	A

La figure 39 présente la carte pédologique du Haut Sebou obtenue.

D'après cette carte on constate que la classe la plus dominante est la classe A ce qui montre que les sols présentent des taux élevés d'infiltration.

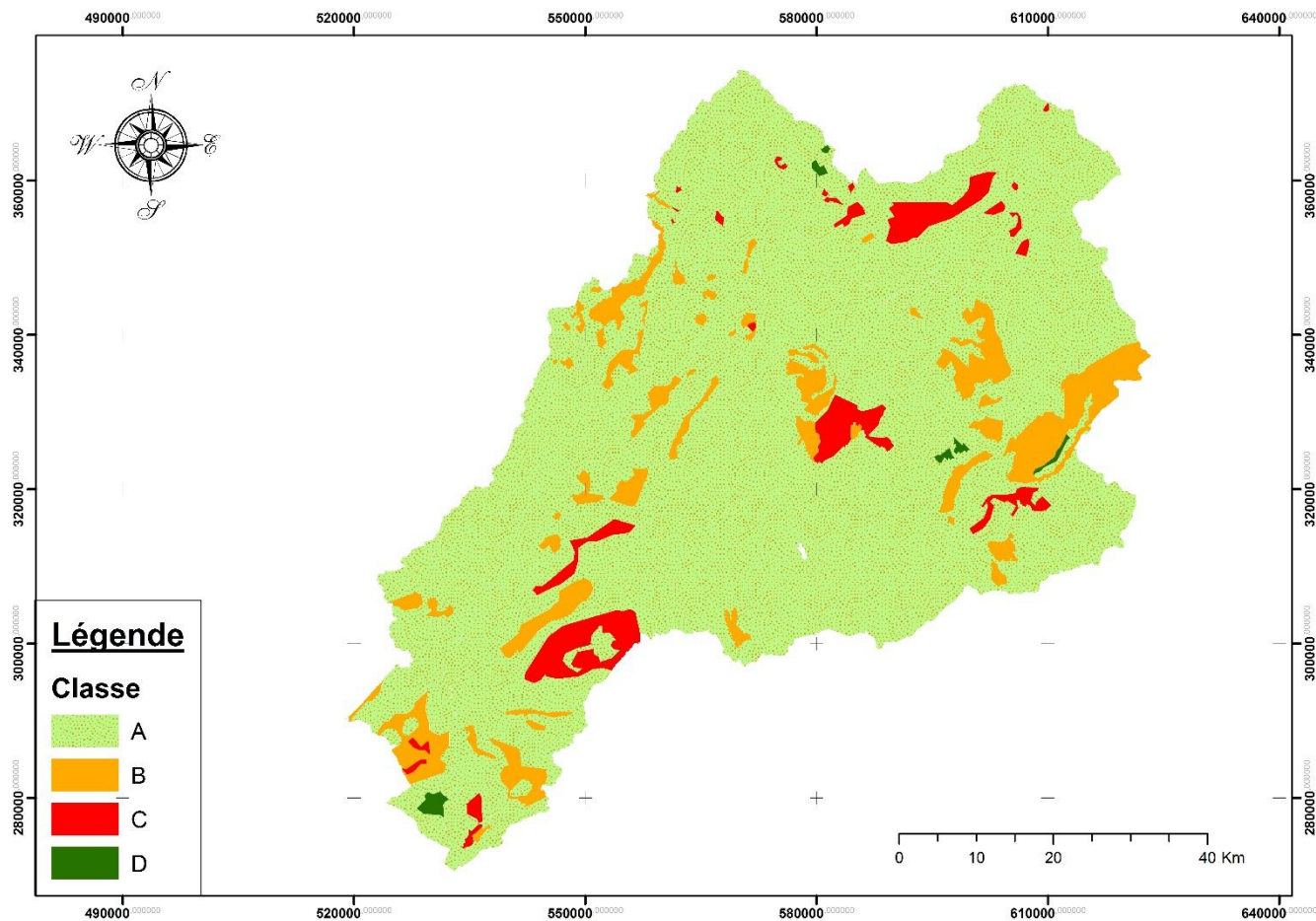


Figure 39 : Pédologie du Bassin versant Haut Sebou selon la classification hydrologique

V. Calcul de la grille CN :

La méthode du SCS-CN (USDA-SCS, 1972), permet de déterminer le ruissellement de surface à partir d'un événement pluvieux et des caractéristiques du bassin versant dans lequel il survient. Celle-ci met en jeu un paramètre empirique représentant le potentiel de génération de ruissellement du sol : le Curve Number (CN). Plus celui-ci est élevé, plus la lame ruisselée est importante. L'attribution des valeurs de CN constitue le point clé de la mise en œuvre de la méthode.

La valeur du Curve Number dépend du groupe hydrologique du sol, de l'occupation du sol et des conditions d'humidité initiale, sa valeur varie entre 100 (surface d'eau) et 30 pour des sols très perméables à haut potentiel d'infiltration.

1. Génération de la grille CN :

Estimation du Curve Number :

Le Curve Number est estimé pour un bassin de drainage à partir de la combinaison du type de sol et de l'utilisation de sol.

La classification hydrologique (groupes A,B,C,D) retenue par la méthode SCS pour déterminer le Curve Number permettra d'indiquer la perméabilité de chaque type de sol.

a) Préparation des données d'occupation des sols pour le CN Grille :

Cette étape permet le reclassement des types de sols et convertir les données des grilles reclassées dans une classe d'entités polygones qui sera fusionnée avec les données du sol plus tard.

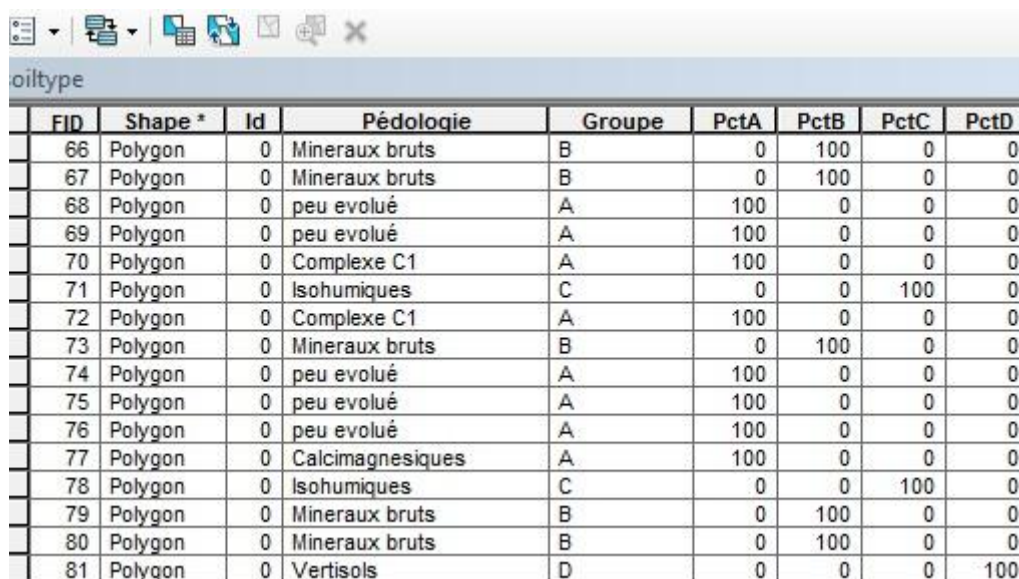


Figure 40: reclassification et conversion de la carte d'occupation des sols en polygone

b) Préparation des données de sol pour le CN Grille :

Cette étape consiste à ajouter quatre champs nommés PctA, PctB, PctC, et PctD à la table attributaire contenant les données de groupe du sol (A, B, C, D).

PctA va définir quel est le pourcentage de la superficie dans le polygone à groupe de sol A, PctB va définir le pourcentage de la superficie dans le polygone à groupe de sol B et ainsi de suite.



FID	Shape *	Id	Pédologie	Groupe	PctA	PctB	PctC	PctD
66	Polygon	0	Minéraux bruts	B	0	100	0	0
67	Polygon	0	Minéraux bruts	B	0	100	0	0
68	Polygon	0	peu évolué	A	100	0	0	0
69	Polygon	0	peu évolué	A	100	0	0	0
70	Polygon	0	Complexe C1	A	100	0	0	0
71	Polygon	0	Isohumiques	C	0	0	100	0
72	Polygon	0	Complexe C1	A	100	0	0	0
73	Polygon	0	Minéraux bruts	B	0	100	0	0
74	Polygon	0	peu évolué	A	100	0	0	0
75	Polygon	0	peu évolué	A	100	0	0	0
76	Polygon	0	peu évolué	A	100	0	0	0
77	Polygon	0	Calcimagnésiques	A	100	0	0	0
78	Polygon	0	Isohumiques	C	0	0	100	0
79	Polygon	0	Minéraux bruts	B	0	100	0	0
80	Polygon	0	Minéraux bruts	B	0	100	0	0
81	Polygon	0	Vertisols	D	0	0	0	100

Figure 41: Préparation des données de sol

c) Combinaison du type et d'occupation de sol :

Pour fusionner les données du sol et utilisation des sols, on utilise l'outil « Union ». Le résultat de l'union / fusion héritent des attributs caractéristiques des deux classes d'entités qui sont utilisés comme entrée.

Dans le tableau ci-dessus les colonnes qui commencent par FID _.... donnent les identifiants des objets de caractéristiques de l'occupation de sol et de la pédologie.

FID	Shape	FID pédo	Id	Pédologie	Groupe	PctA	PctB	PctC	PctD	FID occ po	ID 1	GRIDCODE	LandUse	CN
1406	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351699	35170	5	5	88
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351700	35170	4	4	79
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351701	35170	5	5	86
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351702	35170	4	4	79
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351703	35170	3	3	83
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351704	35170	5	5	86
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351705	35170	3	3	83
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351706	35170	5	5	86
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351707	35170	5	5	86
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351708	35170	4	4	79
1407	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351709	35171	4	4	79
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351710	35171	3	3	83
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351711	35171	3	3	83
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351712	35171	5	5	86
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351713	35171	4	4	79
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351714	35171	4	4	79
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351715	35171	3	3	83
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351716	35171	4	4	79
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351717	35171	3	3	83
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351718	35171	3	3	83
1408	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351719	35172	5	5	86
1409	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351720	35172	4	4	79
1409	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351721	35172	3	3	83
1409	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351776	35177	5	5	86
1409	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351777	35177	5	5	86
1409	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351778	35177	5	5	86
1409	Polygon	21	0	Isohumiques	C	0	0	100	0	351779	35178	4	4	79

Figure 42: les résultats de l'union

Cela termine le traitement de données spatiales pour créer la grille Curve Number. L'étape suivante a pour but la préparation de la table de correspondance (look-up) qui contiendra le Curve Number pour différentes combinaisons de l'utilisation des sols et des groupes de sols. Dans ce cas, nous allons utiliser les numéros de courbe SCS qui sont disponibles de la littérature (rapports SCS, ou tables SCS). Les caractéristiques spatiales en collaboration avec la table de correspondance (look-up) peuvent ensuite être utilisées pour créer le Curve Number grille.

d) Table de correspondance type –occupation de sol :

Cette table a pour objectif de définir les valeurs de CN pour chaque combinaison occupation de sol –groupe hydrologique. Elle doit, donc, contenir les champs suivants:

- ✚ LUValue (type: short integer)
- ✚ Description (type: text)
- ✚ A (type: short integer)
- ✚ B (type: short integer)
- ✚ C (type: short integer)
- ✚ D (type: short integer)

Le tableau suivant présente les valeurs de Curve Number attribuées à chaque combinaison occupation de sol –groupe hydrologique .Ces chiffres sont obtenus à partir SCS TR55 (1986).

OBJECTID	LUvalue	Description	A	B	C	D
1	1	Eau	100	100	100	100
2	2	Foret	30	58	71	78
3	3	Agriculture	67	77	83	87
4	4	vegetation	49	69	79	83
5	5	Sol nu	68	79	86	89

Figure 43: Table attributaire de correspondance entre occupation et type de sol –Sol

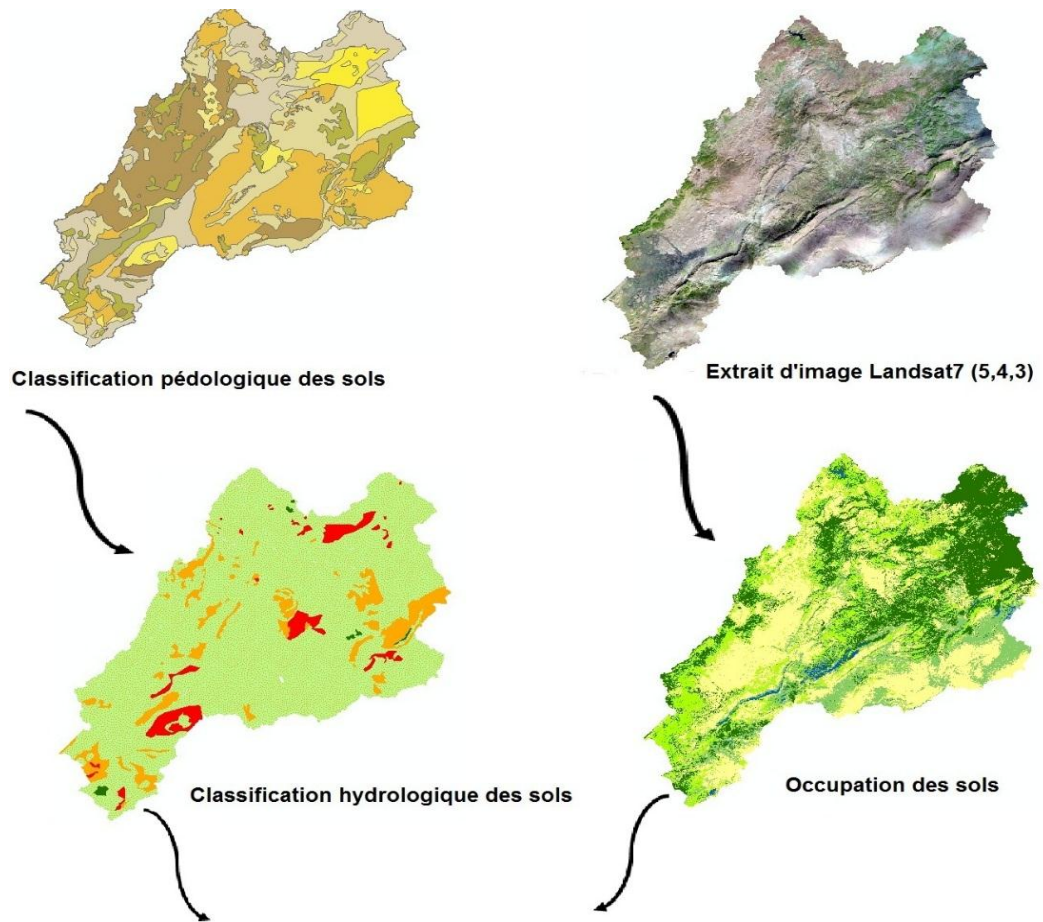
On note que les valeurs CN dépendent de l'antécédent de l'humidité du sol. On distingue trois états : Etat I (sec), Etat II (moyen) et Etat III (humide). Pour un même sol, la valeur de CN augmente de l'état I à l'état II et de l'état II à l'état III.

La relation entre le Curve Number (CN) et les conditions initiales d'humidité est détaillée dans le paragraphe suivant.

e) Création de la grille CN :

Pour la création de la grille CN, on utilise HEC-GeoHMS. Pour ce faire, on introduit le résultat d'union entre le type et l'occupation de sol, la table CNLookup, ainsi que le MNT du bassin. Mais avant de procéder, il faut ajouter un nouveau champ nommé «LandUse» dans la table de l'union. Ce champ va contenir l'information des catégories d'utilisation de sol, et permettra de lier la table de l'union à la table «CNLookup».

La figure ci-dessous montre les différentes étapes de la création de la grille CN.



LVALUE	DESCRIPTION	A	B	C	D
1	Eau	100	100	100	100
2	Forêt	30	58	71	78
3	Agriculture	67	77	83	87
4	Végétation	49	69	79	84
5	Sol nu	68	79	86	89

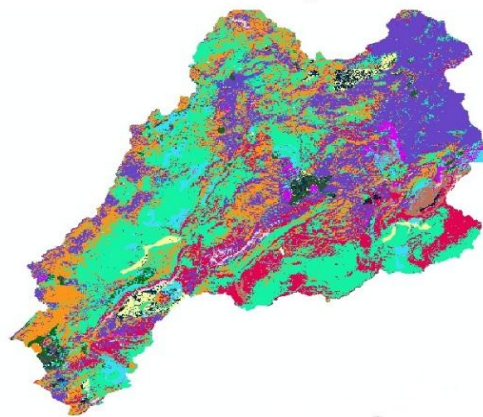


Figure 44: Etapes de création de la grille Curve Number (CN Grid)

2. Prise en compte de l'état d'humidité de sol :

Le choix du Curve Number dépend, en plus du type et de l'occupation de sol, des conditions d'humidité initiale du sol. Celle-ci peuvent être sèches (I), moyennes (II) ou humides (III). Les valeurs fournies dans le Table attributaire de la fig.40 sont représentatives des conditions d'humidité initiales moyennes (CNII) et les Curve Number CNI et CNIII sont calculés directement à l'aide des équations ci-dessous :

$$CN(I) = \frac{4.2 \times CN(II)}{10 + 0.058 \times CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + 0.13 \times CN(II)}$$

Source : Applied Hydrology, page 149, équations 5.5.7

L'état de l'humidité de sol est déterminé en fonction des précipitations au niveau du bassin versant pendant les cinq derniers jours qui précèdent l'évènement étudié, et selon la saison, comme le montre le tableau suivant :

Condition antécédente	Saison pluvieuse Pluie tombée dans les 5 derniers jours	Saison d'été Pluie tombée dans les 5 derniers jours
Etat sec (I)	Moins de 35 mm	Moins de 12,7 mm
Etat moyen (II)	De 35 mm à 53 mm	De 12mm à 28 mm
Etat humide (III)	Plus que 53 mm	Plus que 28 mm

Figure 45: Choix de l'état d'humidité pour le calcul de CN

Les cartes CN dans les trois états I, II et III sont données dans les figures suivantes :

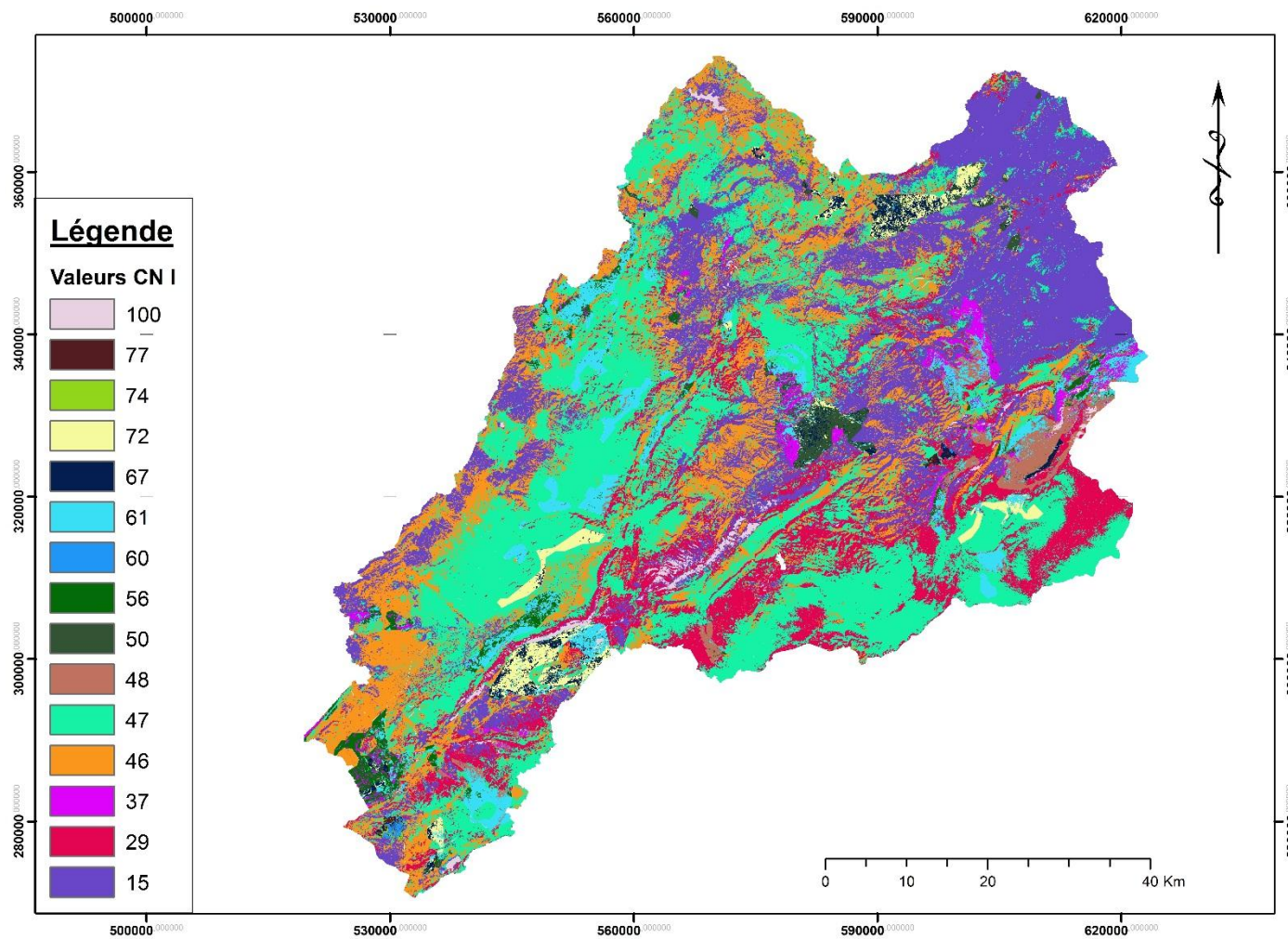


Figure 46: Carte CN du BV du Haut Sebou à l'état sec (CN I)

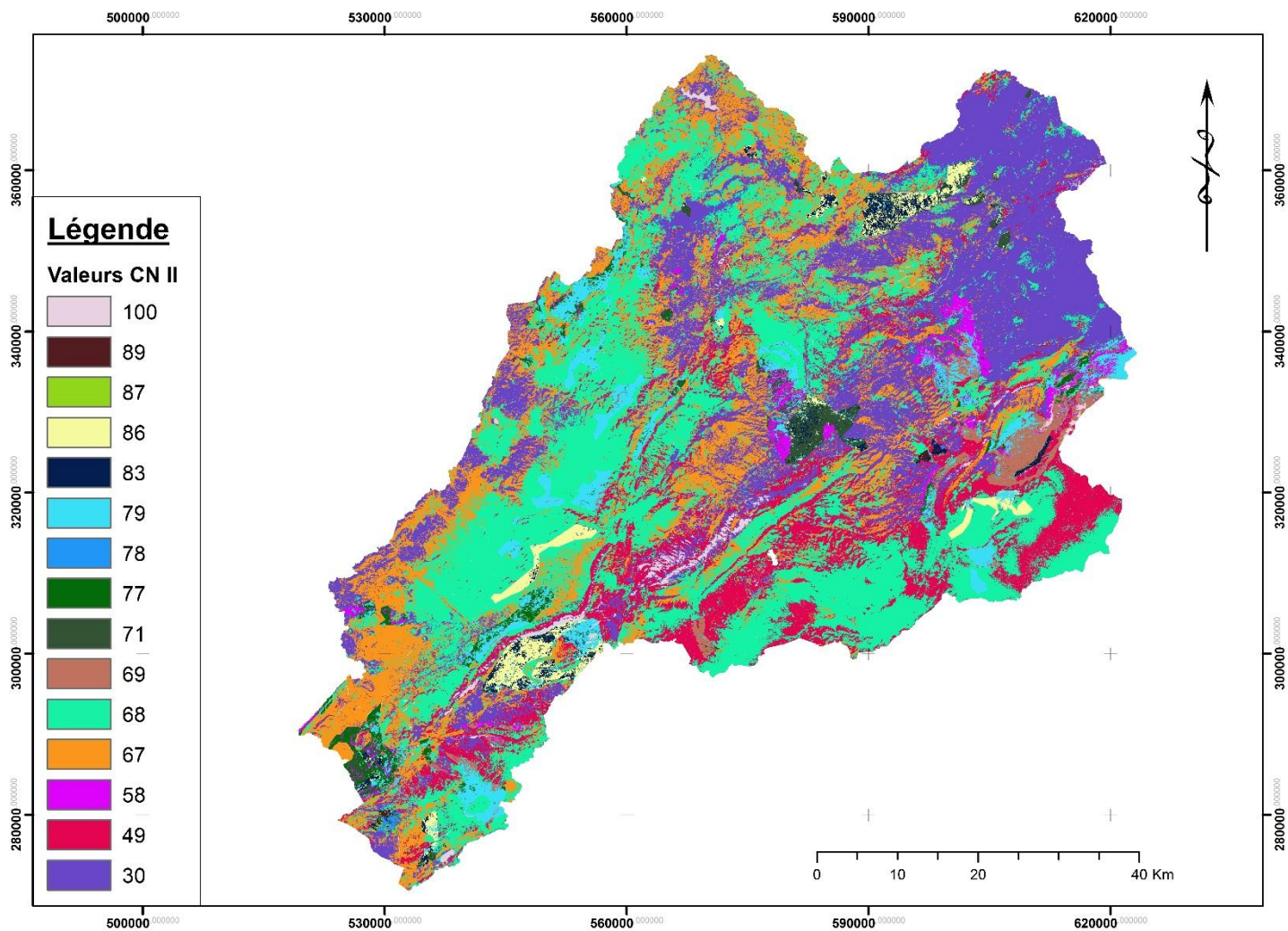


Figure 47: Carte CN du BV du Haut Sebou à l'état moyennement humide (CN II)

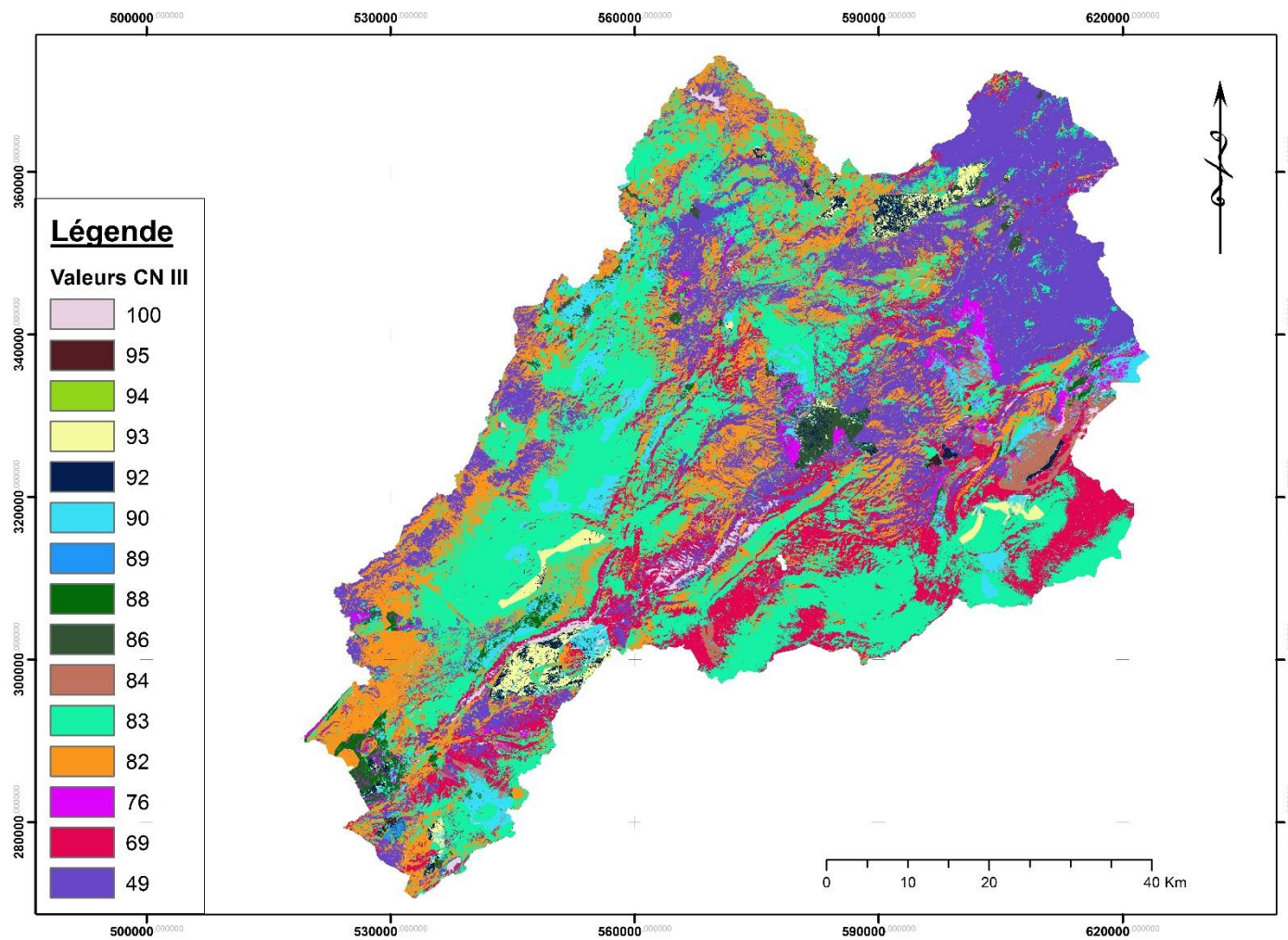


Figure 48: Carte CN du BV du Haut Sebou à l'état humide (CN III)

La valeur du Curve Number dépend du groupe hydrologique du sol, de l'occupation du sol et des conditions d'humidité initiale, sa valeur varie entre 100 et 30 .

L'analyse des cartes montrent que la plupart des sols du Haut Sebou sont très perméables à haut potentiel d'infiltration.

VI. Importation du modèle du bassin sous HEC-HMS :

L'avantage de passer par HEC-GeoHMS est de pouvoir importer la géométrie et les paramètres hydrauliques des bassins, créés à l'aide des SIG directement dans le modèle HEC-HMS .

En tenant compte des données hydrologiques disponibles ainsi que les emplacements des barrages, le découpage en sous bassin présenté dans la Figure 49 a été exporté vers HEC-HMS. Ainsi le découpage final adopté comprend les éléments suivants :



1 exutoire



8 sous bassins



9 jonctions



9 tronçons de rivières

Ce découpage est illustré dans la figure 50

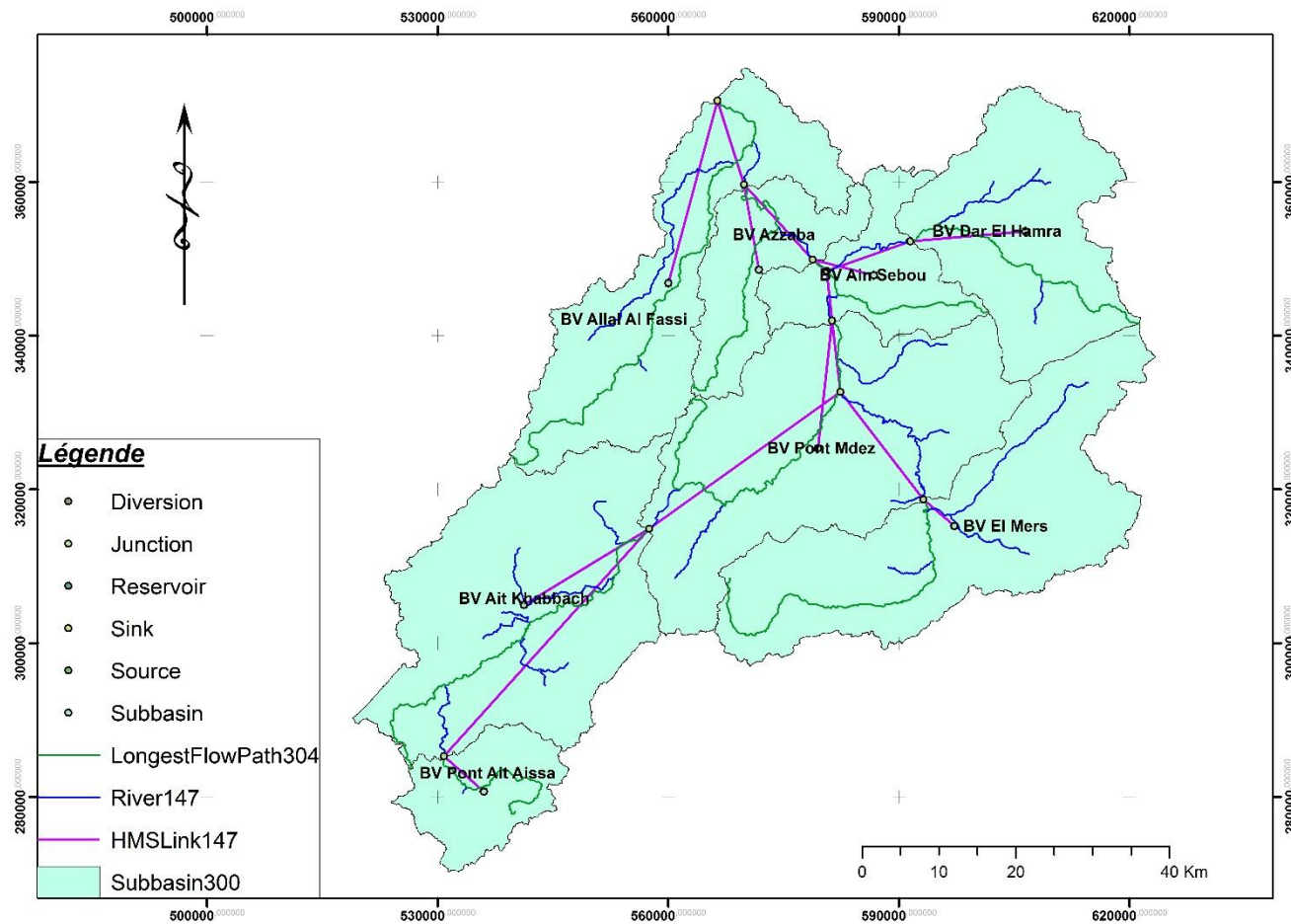


Figure 49: Modèle physique du bassin versant du Haut Sebou

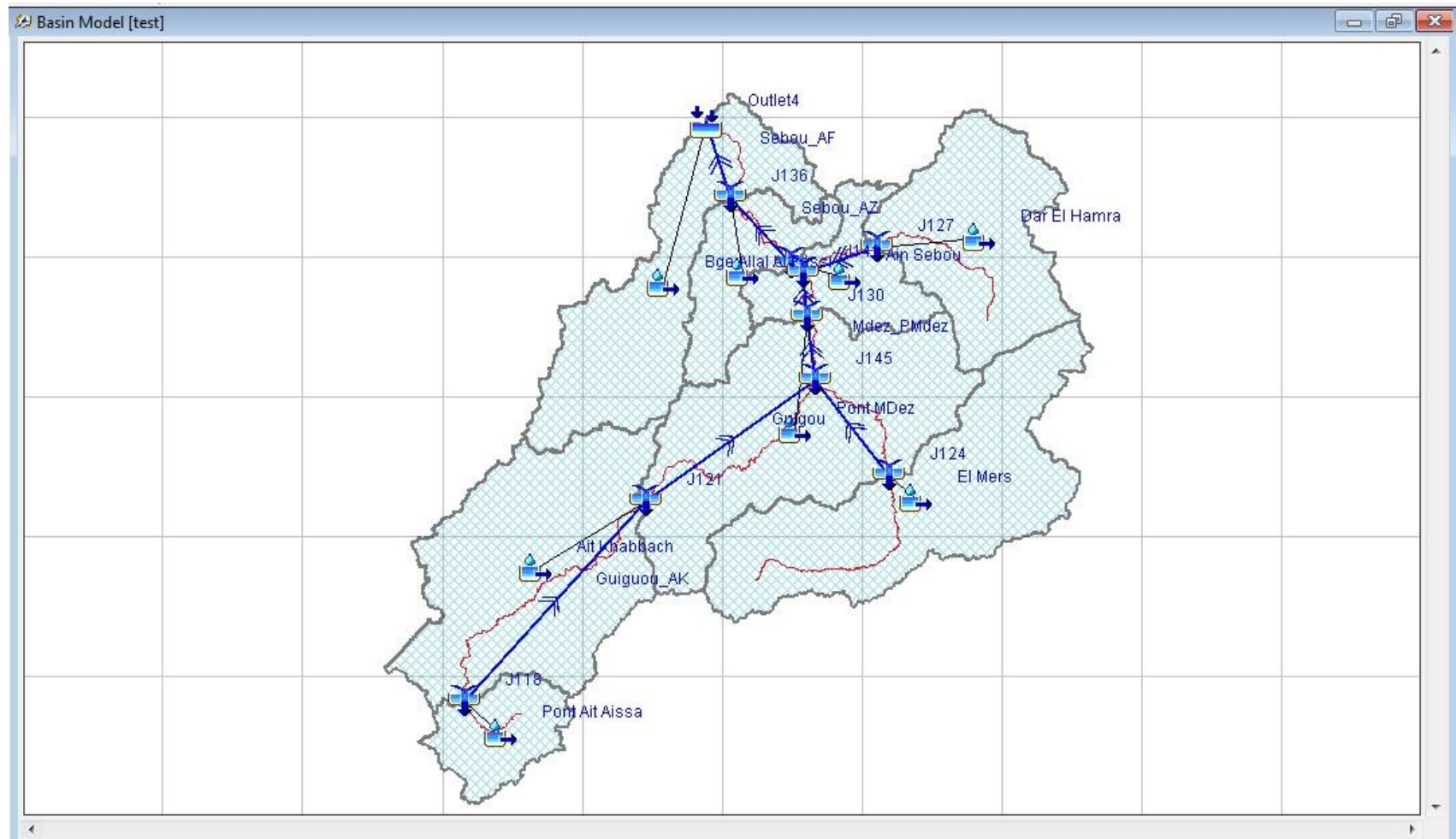


Figure 50: Modèle hydrologique finale du bassin du Haut Sebou

Le logiciel HEC-HMS permet la modélisation hydrologique avec un nombre important de modèles que ça soit pour la modélisation des pertes de précipitations, du ruissellement, de l'écoulement de base ou de l'écoulement fluvial (voir chapitre II ci-dessus Modélisation sous HEC-HMS)

Parmi toutes les modèles qu'il propose, une seule permet la modélisation spatialisée du ruissellement qui est la méthode ModClark.

Avec ce modèle de modélisation du ruissellement, on peut utiliser deux modèles pour la modélisation des pertes en précipitations qui sont :

- Gridded SCS Curve Number
- Gridded Soil Moisture Accounting

Le premier a été développé pour la modélisation des événements extrêmes, alors que le deuxième pour la modélisation en continu sur de longues périodes et qui peut prendre en considération une alternance de temps sec et de période de pluie, ce modèle est utilisé aussi pour l'évaluation du bilan hydrique.

Notre projet est une étude perspective qui s'insère sur la préparation des données nécessaires pour la modélisation hydrologique spatialisée, donc si on souhaite terminer par la suite la modélisation on doit adopter le premier modèle ainsi on doit avoir les données pluviométriques et hydrométriques historiques enregistrées au niveau des différents points de mesure existants dans la zone étudiée (Débits instantanés et précipitations instantanée) par ce qu'ils ont une grande importance dans les prévisions de crues.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de fin d'études avait pour but de décrire une nouvelle méthodologie pour la préparation à la modélisation hydrologique et l'application de cette méthodologie au bassin versant du Haut Sebou .

Dans ce contexte, une méthode de modélisation, reflétant du mieux possible la réalité du terrain, est recherchée. La méthodologie retenue consiste à l'utilisation des systèmes d'informations géographique et de la télédétection afin de construire la géométrie du modèle du bassin et de calculer ses paramètres.

La première phase de ce travail a pour objectif de présenter le secteur d'étude et déterminer ;

- ✓ les caractéristiques physiques du Haut Sebou comprenant la superficie et le périmètre, l'indice de compacité, Courbe hypsométrique, le rectangle équivalent, les altitudes caractéristiques, la pente, réseau hydrographique et densité de drainage.
- ✓ La climatologie du bassin versant, englobant l'étude des précipitations et des températures.
- ✓ Le régime hydrométrique.

La deuxième phase avait fait l'objet de la collecte des données géographiques nécessaires pour une telle étude, à savoir,

- ✓ Le modèle numérique de terrain MNT pour la délimitation et la schématisation du bassin.
- ✓ l'image satellite de type Landsat7 ETM+, acquise en Novembre 2002, est traitée sous ArcGIS pour en sortir la carte d'occupation de sol.
- ✓ les données pédologiques de la zone d'étude sont transformées d'une classification selon la texture à une classification hydrologique.

La troisième phase consiste la création de la grille du Curve Number et l'élaboration des cartes (CN) dans trois états : secs, moyennement humide et humide puis l'importation du modèle du bassin Haut Sebou sous HEC-HMS.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie :

André Musy. (2005): Cours d'Hydrologie générale du professeur.

Afkir E., 1985 : Le bassin versant de l'Inaouène : caractéristiques climatiques et comportement hydrologique. Thèse 3ème cycle, Univ, Toulouse-le Mirail, 249p.

A. BENKKA et M. OUADGHIR, 2013 : Modélisation hydrologique spatialisée du bassin versant de l'Oued El Maleh, Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Ecole Hassania des Travaux Publics.

Direction des Eaux et Forêt Fès, Evaluation de l'érosion et de ses conséquences du bassin versant à l'amont du barrage Allal El Fassi, Rapport N°2. Décembre 1997.

Direction des Eaux et Forêt Fès, Milieu physique et socio économie du bassin versant à l'amont du barrage Allal El Fassi, Rapport N°1. Décembre 1997.

Hervé Pella, Jérôme Lejot, Nicolas Lamouroux, Ton Snelder. (2003) : Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux

James H. Doan, P.E (2010): Development and Application of Geospatial Hydrologic Model Extension HEC-GeoHMS.

Julie CHARLEAUX –DEMARGNE. (2001): Qualité du MNT pour l'hydrologie

Hydrologic Engineering Center. (2008): Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual Version 3.2. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers.

M. Gilles Rivard. (2011): Guide de gestion des eaux pluviales, Evaluation quantitative du ruissellement Aspects_ hydrologique, chapitre 6.

Singhroy V, Pierce RR, Johnson AI, Hansen DT. (2003): Spatial Methods for Solution of Environmental and Hydrologic Problems, page44.

USDA, Technical Release 55 (TR-55), juin 1986.

Venkatesh Merwade. (2012): Creating SCS Curve Number Grid using HEC-GeoHMS.

Données internes :

Agence du bassin hydraulique de Sebou. Fès (ABHS).

La direction régionale des eaux et forêt et la lutte contre l'érosion et la désertification de Fès Boulemane (DREFLCD).

Webographie:

<http://resources.arcgis.com/>

<http://glovis.usgs.gov>

<http://www.esri.com/>