



Université Sultan Moulay Slimane
Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal
Département des Sciences de la Terre



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention de

Licence Es-Sciences et Techniques

(Option : Géomatique et Aménagement du Territoire)

**Spatialisation des pluies et étude
physiographique du sous bassin versant
de Tillouguite à l'aide des outils de
modélisation géospatiale**

Préparé par :

Hamza OUATIKI

Soutenue le 08 juillet 2014 devant la commission d'examen :

Abdelkrim ARIOUA

Professeur à la Fac. Sc. et Techniques, Béni Mellal.

Président

Brahim BEN KABBOUR

Professeur à la Fac. Sc. et Techniques, Béni Mellal.

Examineur

Abdelghani BOUDHAR

Professeur à la Fac. Sc. et Techniques, Béni Mellal.

Encadrant interne

Année universitaire 2013/2014

*Le présent travail a été effectué au sein du laboratoire de
Télédétection et SIG appliqués aux géosciences et à l'Environnement,
à la Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal*

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'aide et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

En second lieu, Je remercie très vivement mon encadrant Mr Abdelghani BOUDHAR (encadrant interne) professeur à la faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal, pour sa disponibilité, sa patience, ses conseils et son aide précieuse qu'il m'a apporté tout au long de ce travail.

J'adresse mes remerciements également à Mr El Mostafa BACHAOUI et Mr Abderrazzak EL HARTI, professeurs à la faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal et responsables du laboratoire de Télédétection et SIG appliqués aux géosciences et à l'Environnement, de m'avoir accueillie au sein dudit laboratoire.

J'exprime ma profonde gratitude à Mlle khadija OUTALEB, étudiante en thèse à la Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal, pour son sens de collaboration.

Mes vifs remerciements vont aussi aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

J'exprime mes sincères remerciements à tous mes professeurs de la Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal et du département des sciences de la terre qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Je remercie tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement ma famille qui m'a accordé la liberté d'action et me donne le soutien nécessaire autant moral que financier.

Je n'oublie bien évidemment pas mes collègues de formation, je les remercie chaleureusement pour tous ces agréables moments passés ensemble.

RESUME

Les zones montagnardes constituent un château d'eau très important, elles jouent un rôle très significatif pour l'alimentation en eau des zones avales. Ce qui est le cas pour le bassin versant de Tillouguite (Zone d'étude). Cependant, la compréhension de ces zones devienne une forte nécessité, autant en terme physique que hydro-climatique.

Le présent travail a pour objectif d'extraire les caractéristiques physiographiques de la zone d'étude, ainsi que d'estimer la pluie moyenne à l'échelle de ladite zone, en utilisant un ensemble de méthodes de spatialisation, à savoir la moyenne arithmétique, les polygones de Thiessen, krigeage, IDW et la méthode du gradient altitudinal des précipitations.

Un comparatif des cinq méthodes par rapport au débit observé au niveau de l'exutoire du bassin versant de Tillouguite, a été effectué afin de savoir laquelle d'entre elles a pu donner un résultat de plus en plus proche à ce qu'était en réalité. A l'issue de ce comparatif, on a pu distinguer que la méthode du gradient altitudinale des précipitations c'est celle qui peut être adapté pour la spatialisation des précipitations a l'échelle du bassin versant de Tillouguite.

En outre, un ensemble de modèles et d'outils de géotraitement sous le logiciel ArcGIS ont été préparés pour réaliser ce travail. Ces modèles nous ont permis d'automatiser les processus de traitement sous l'application ModelBuilder avec des outils diversifiés, notamment, l'extension "Spatial Analyst" pour appliquer les méthodes de spatialisation, l'outil "Arc-Hydro" pour extraire les caractéristiques hydrographiques de la zone d'étude.

Mots clés : Tillouguite, physiographie, spatialisation, pluie moyenne, ModelBuilder.

ABSTRACT

The mountain areas are a very important water tower, they play a very significant role in water supply for downstream areas. This is the case for the Tillouguite basin (study area). However, understanding these zones becomes a strong necessity, both in physical and hydro-climatic term.

The present work aims to extract the physiographic features of the study area, as well as to estimate the average rainfall across the zone, using a set of methods for spatialization, namely the arithmetic mean, Thiessen polygons, kriging, IDW and method altitudinal gradient of precipitation.

A comparison of five methods used in relation to the observed flow was performed to determine which of them could give a result closer the reality. At the end of this comparison, we could distinguish that the method altitudinal gradient of precipitation is the one that can be adapted to the spatialization of rainfall across the watershed Tillouguite.

In addition, a set of models and geoprocessing tools in ArcGIS software were prepared for this work. These models allowed us to automate the process in the Model Builder application with a variety of tools, including the Spatial "Analyst extension" to apply the methods of spatialization tool "Arc Hydro" to extract hydrographic characteristics of the study area.

Key words: Tillouguite, physiography, spatialization, the average rainfall, ModelBuilder.

TABLE DES MATIERES

RESUME -----	v
ABSTRACT -----	vi
ACRONYMES -----	ix
LISTE DES FIGURES -----	x
LISTE DES TABLEAUX -----	xii
Introduction générale -----	13
Chapitre I : Données, outils et méthodologies du travail -----	14
I.1 Situation de la zone d'étude -----	14
I.2 Données disponibles -----	16
I.2.1 Précipitation et débits-----	16
I.2.2 Modèle Numérique de Terrain (MNT)-----	16
I.3 Le contexte hydro-climatique -----	16
I.3.1 Pluviométrie-----	17
I.3.2 Température-----	18
I.3.3 Evaporation-----	18
I.3.4 Débit-----	19
I.4 Outils de Géo- traitement -----	20
I.4.1 ArcGIS-----	20
I.4.2 ArcHydro-----	20
I.4.3 ModelBuilder-----	21
I.4.4 Excel-----	25
I.5 Méthodes de spatialisation de la pluviométrie -----	25
I.5.1 La moyenne arithmétique-----	25
I.5.2 Polygones de Thiessen-----	26
I.5.3 Gradient altitudinale des précipitations-----	27
I.5.4 Krigeage-----	27
I.5.5 IDW (Interpolation par Inverse des Distance)-----	28
Chapitre II : Extraction des caractéristiques Physiographiques du sous bassin versant de Tillouguite -----	30
II.1 Les altitudes -----	30
II.1.1 Modèle de création des tranches d'altitudes-----	30
II.1.2 Hypsométrie-----	32
II.1.3 Altitudes caractéristiques :-----	33

II.2	La pente	35
II.2.1	Modèle de création des classes de pentes	35
II.2.2	Description	36
II.3	Le réseau hydrographique	38
II.3.1	Densité de drainage	38
II.3.2	La pente moyenne du cours d'eau principale	38
II.4	Surface	40
II.5	Périmètre	40
II.6	La forme	40
II.7	Le rectangle équivalent	41
II.8	Le temps de concentration	41
Chapitre III : Modèles de géo-traitement et spatialisation de la pluie à l'échelle du bassin versant de Tillouguite		43
III.1	Les Modèles de géotraitement créés	43
III.1.1	Modèle pour le Krigeage et IDW	43
III.1.2	Modèle pour les polygones de Thiessen	45
III.2	Résultats des méthodes de spatialisation	46
III.2.1	Krigeage et IDW	46
III.2.2	Les Polygones de Thiessen	47
III.2.3	Gradient des précipitations	48
III.3	Etudes comparative des méthodes	48
III.3.1	Lien pluie-pluie	48
III.3.2	Lien Pluie-Débit	51
Conclusion et Perspectives		54
Bibliographie		55
Webographie		57

ACRONYMES

ABHOER	Agence du B assin H ydraulique d' O um E r- R bia
ASTER	A dvanced S paceborne T hermal E mission and R eflection R adiometer
ERSDAC	E arth R emote S ensing D ata A nalysis C enter
ESRI	E nvironmental S ystems R esearch I nstitute
hab	habitan
IDW	I nverse D istance W eighting
LP DAAC	The L and P rocesses D istributed A ctive A rchive C enter
MNT	M odel N umérique du T errain
NASA	N ational A eronautics and S pace A dministration
SIG	S ysteme d' I nformation G éographique

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Situation géographique du sous bassin versant de Tillouguite.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 2 : Pluies moyennes mensuelles mesurées dans station de Tillouguite (2000 - 2010).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 3 : Pluies annuelles mesurées dans la station de Tillouguite (2000 - 2010).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 4 : Température moyenne mensuelle mesurées dans la station de Tillouguite (2000 - 2010)</i>	<i>18</i>
<i>Figure 5 : Evaporation moyenne mensuelle mesurée dans la station de Tillouguite (2000 – 2010)</i>	<i>18</i>
<i>Figure 6 : Débits moyen annuels mesurés dans la station de Tillouguite (2000 - 2010).....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 7 : Débits moyens mensuels mesurés dans la station de Tillouguite (2000 - 2010).....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 8 : Les principaux éléments d'un modèle</i>	<i>22</i>
<i>Figure 9 : Exemple d'un modèle exécuté à partir de l'interface ModelBuilder</i>	<i>23</i>
<i>Figure 10 : Exemple d'un modèle exécuté à partir de la boîte de dialogue.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 11 : Exemple d'application de l'iteration par La Propriété "Liste of values".....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 12 : Schéma explicative du principe des polygones de Thiessen.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 13 : Modèle pour la création des tranches d'altitudes et l'extraction de leurs statistiques</i>	<i>31</i>
<i>Figure 14 : La courbe hypsométrique du bassin versant de Tillouguite</i>	<i>32</i>
<i>Figure 15 : Répartition des tranches d'altitudes dans le bassin versant de Tillouguite.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 16 : La carte des tranches d'altitudes du bassin versant de Tillouguite</i>	<i>34</i>
<i>Figure 17 : Modèle pour la création des pentes et l'extraction de leurs statistiques.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 18 : Répartition des classes de pentes dans le bassin versant de Tillouguite.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 19 : La carte des pentes du bassin versant de Tillouguite.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 20 : La carte du réseau hydrographique du bassin versant de Tillouguite.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 21 : Modèle pour l'application des méthodes de spatialisation (Krigage et IDW).....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 22 : Modèle pour l'application de la méthode des polygones de Thiessen.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 23 : La spatialisation des pluies par la methode krigage pour le mois de février (1) et juin (2) (2004 - 2005).....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 24 : La spatialisation des pluies par la méthode IDW pour le mois de février (3) et juin (4) (2004 - 2005)</i>	<i>46</i>

<i>Figure 25 : Découpage du bassin versant de Tillouguite en zone d'influence par la méthode des polygones de Thiessen.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 26 : La pluie moyenne estimée sur le bassin versant de Tillouguite par les cinq méthodes de spatialisation utilisées (2000 – 2005).....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 27 : La pluie moyenne estimée par les cinq méthodes et le débit mensuel observé sur la durée 2000 - 2005.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 28 : La pluie moyenne estimée et le débit mensuel observé sur les mois pluvieux de la durée 2000 – 2005.....</i>	<i>53</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Les caractéristiques des stations hydro-climatiques utilisées</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 2 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiographiques du bassin versant de Tillouguite.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 3 : Les caractéristique des zones d'influences obtenues par la méthode des polygones de Thiessen.....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 4 : Pluie moyenne estimée sur le bassin versant de Tillouguite par les cinq méthodes utilisées (2004 – 2005)</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les différentes méthodes de spatialisation sur tous les mois de la durée 2000 – 2005.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 6 : Matrice de corrélation entre les pluies moyennes estimées par les cinq méthodes et le débit mensuel sur sur tous les mois la durée 2000 - 2005</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 7 : Matrice de corrélation entre les pluies moyenne estimées et le débit mensuel sur les mois pluvieux de la durée 2000 – 2005</i>	<i>52</i>

Introduction générale

Le Maroc, pays à climat essentiellement semi-aride à aride dans la majeure partie de son territoire, est confronté au problème du développement et de la gestion durable de ses ressources en eau. En effet, bien que disposant d'importantes chaînes de montagnes qui constituent un véritable château d'eau, d'une large ouverture maritime, ces ressources en eau sont limitées vis à vis d'une forte demande qui résulte de la croissance démographique, de l'amélioration des conditions de vie, du développement des différentes industries et de l'extension de l'irrigation.

En termes de ressources mobilisables, le Maroc dès le début des années 80, franchi le seuil des 1000 m³/hab/an admis comme seuil critique indiquant l'apparition de stress hydraulique, de 1.271 m³/hab/an en 1971 le seuil atteindra 688 m³/hab/an en l'an 2000. A l'horizon 2020, à l'exception de l'Oum Er-Rbia, l'ensemble des bassins versants du pays seront en dessous de ce seuil (Souad RIAD, 2003).

Par rapport à la plus part des bassins du Royaume, l'Oum Er-Rbia est un bassin riche en ressources hydriques renouvelables avec plus de 3.600 Mm³, soit un quart des ressources du Maroc (25%). Celles-ci sont principalement des eaux de surface (90%). Il transfère une quantité de 1 595 Mm³/an vers six grandes directions. Et Grâce à une puissance installée de 629 MW, il participe également une production moyenne de 1 866 millions de KWH/an d'énergie hydroélectrique, soit plus de 70% de la production nationale. Il constitue la région la plus agricole du Maroc avec une superficie de 493.600 ha (soit 27% de la surface agricole utile irriguée du Maroc) (ABHOER).

Le lien entre les ressources hydriques du bassin avec son comportement socio-économique, rend la connaissance de cette ressource une préalable indispensable. Et ce à travers la prise en compte de l'évolution des précipitations principalement dans les zones montagneuses. Dans certaine zone notamment celle du bassin versant de Tillouguite (Zone d'étude) équipées d'un réseau de mesures hydro-climatiques d'autant plus lâche (faible densité et absence de mesures en haute altitudes), la connaissance de la répartition des précipitations est rendue difficile. Dans les secteurs peu instrumentés, comme l'est notre zone d'étude, il apparaît un jour ou l'autre un besoin de connaître plus ou moins précisément les hauteurs de précipitation en vue de bien gérer l'irrégularité des apports en eau que cette zone peut fournir, et principalement qu'elle joue un rôle très important dans l'alimentation du barrage Bin El-Ouidane.

L'objectif du présent travail est d'utiliser un ensemble de méthodes de spatialisation afin d'estimer la pluie moyenne à l'échelle de la zone d'étude, à l'aide des outils de géotraitement (SIG), en se basant seulement sur les mesures fournies par le réseau. Ce travail va aussi servir à soulever un peu l'ambiguïté entourant notre zone d'étude, tout en assurant l'extraction de ses caractéristiques physiographiques.

Chapitre I : Données, outils et méthodologies du travail

I.1 Situation de la zone d'étude

Le bassin versant d'Oum Er-Rbia, l'un des plus grands bassins du Royaume, d'une superficie de 35.000 km², il est limité du Nord par les Bassins Hydrauliques de Bouregeg et de Sebou, au Nord Est par le Bassin Hydraulique de la Moulouya, au Sud Est par les Bassins Sud Atlasiques, au Sud par le Bassin Hydraulique de Tensift et à l'Ouest par l'Océan Atlantique où se situe son exutoire.

Les cours d'eau du bassin sont constitués de l'Oued Oum Er-Rbia le plus grand fleuve marocain, avec une longueur de 550 km, et de ses affluents de la rive gauche qui sont l'Oued Tessaout, El Abid, Derna, Dai et l'Oued Srou, en conséquence on distingue six sous bassin localisés dans la partie amont du bassin d'Oum Er-Rbia qui sont respectivement le sous bassin Tassawt, Oued El-Abid, Derna, Dai, Srou et le sous bassin de la source d'Oum Er-Rbia. Le cours d'eau principale du bassin Prenant ses sources dans le Moyen Atlas à 1800 m d'altitude, il traverse la chaîne du Moyen Atlas, la plaine du Tadla et la Meseta côtière avant de se jeter dans l'Océan Atlantique à environ 16 km au Nord de la ville d'El Jadida.

Le bassin versant de Tillouguite (zone d'étude) fait partie du sous bassin Oued El-Abid, il s'étend sur une superficie de 2410 km² avec un périmètre de 412 km, il se situe entre les latitudes 32°15'N et 31°40'N et les longitudes 6°20'O et 5°20'O. Il est drainé par un cours d'eau principale d'une longueur de 140 km qui constitue avec Oued El-Abid, les deux principales sources d'eau qui alimentent le barrage de Bin El-Ouidane. Il se caractérise dans sa partie majoritaire par des formations montagneuses dont les altitudes varient de 1073 à 3428 m et les pentes de 0 à 78°.

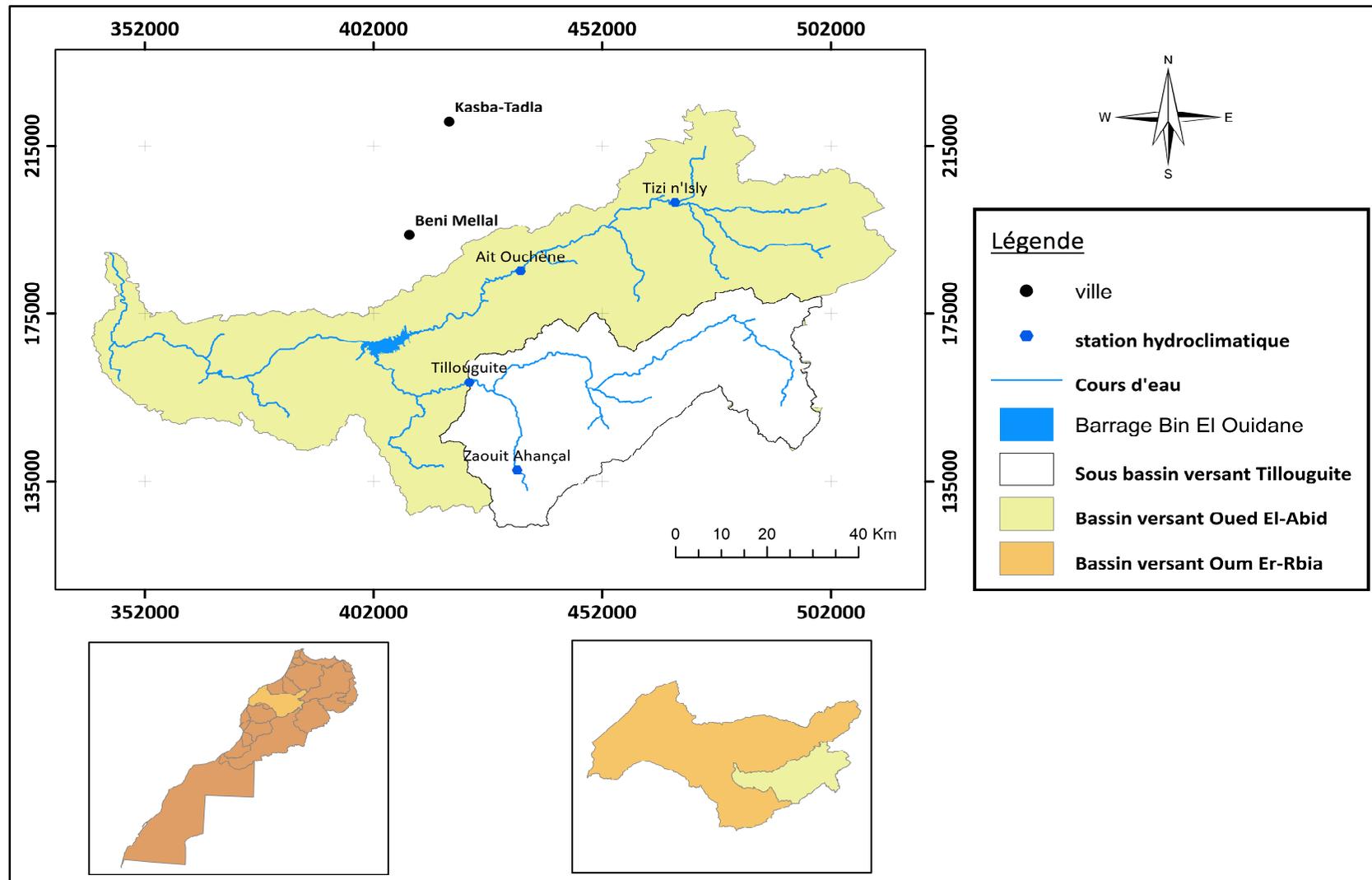


Figure 1 : Situation géographique du sous bassin versant de Tillouguite

I.2 Données disponibles

I.2.1 Précipitation et débits

Les données hydro-climatiques utilisées lors de ce travail sont fournies par l'Agence du Bassin Hydraulique d'Oum Er-Rbia (ABHOER). Ces données concernent les mesures mensuelles de quatre stations, dont deux parmi eux se situent à l'intérieur de la zone d'étude, on parle ici de la station de Tillouguite et la station de Zaouit Ahançal, et les deux autres se situent à proximité, qui sont la station d'Ait Ouchène et la station de Tizi N'Isly. La localisation géographique des quatre stations est montrée sur la carte de situation (Figure 1).

Les caractéristiques de chacun des quatre stations sont représentées sur le tableau ci-dessous :

Numéro de la station	Nom de la station	Coordonnées Lambert			Paramètres disponibles	Bassin versant
		X	Y	Z		
46	Ait Ouchène	434148	185170	990	P	Ait Ouchène
33	Tillouguite	422942	158716	1100	P, T, Eva, Q	Tillouguite
47	Tizi N'Isly	467905	201550	1356	P	Ait Ouchène
32	Zaouit Ahançal	433403	137685	1595	P, Q	Tillouguite

Tableau 1 : Les caractéristiques des stations hydro-climatiques utilisées

I.2.2 Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Dans le présent travail, nous avons utilisé un MNT ASTER avec une résolution spatiale de 30 mètres. Il a été élaboré par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) en collaboration avec le Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie du Japon. Les MNT ASTER sont gratuitement disponibles pour les utilisateurs à partir de ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center) du Japon et la plateforme électronique de la NASA (LP DAAC : <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>).

Le MNT a été principalement utilisé pour :

- La création de cartes de relief (altitudes et pentes)
- L'extraction des caractéristiques de la zone d'étude (Physiques et hydrographiques)

I.3 Le contexte hydro-climatique

L'analyse Hydroclimatique suivante, est basée sur les enregistrements entre l'année 2000 et 2010 de la station de Tillouguite située à une altitude de 1100 m. Les mesures concernant la pluie et le débit sont fournies par toutes les stations du bassin, alors que les mesures de la température et l'évaporation ne sont disponibles que par la station de Tillouguite.

1.3.1 Pluviométrie

Au niveau de la station de Tillouguite, les pluies mensuelles moyennes (*Figure 2*) varient entre 8,6 mm pour le mois de juillet (le mois le plus sec) et 60,6 mm pour le mois de décembre (le mois le plus humide). Les quantités de pluie moyenne mensuelle les plus importantes durant la période analysée ont été marquées pendant novembre (58,4 mm), décembre (60,6 mm), janvier (52,2 mm) et février (56,8 mm), tandis que les pluies les plus faibles ont été enregistrées pendant juin (15,4 mm), juillet (8,6 mm) et Août (17,4 mm).

Les quantités de pluies mesurées pendant les mois de juin, juillet et août (les plus secs), sont généralement dues aux averses orageuses brutales qui causent généralement des écoulements très forts.

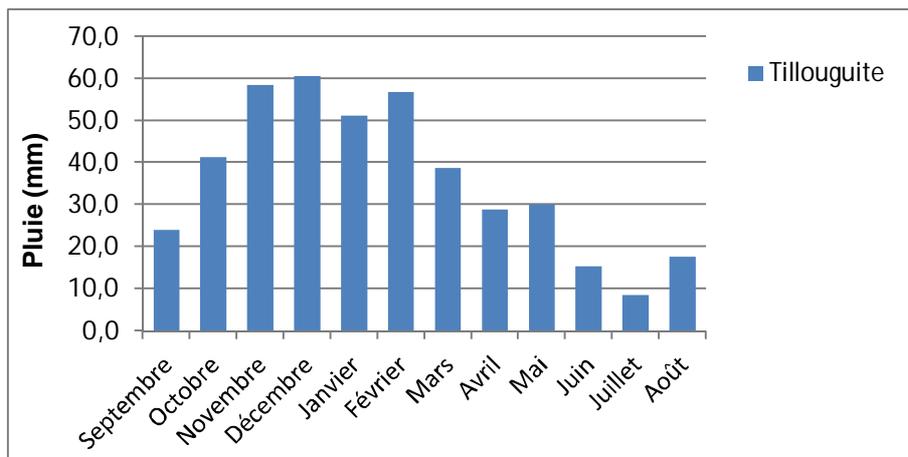


Figure 2 : Pluies moyennes mensuelles mesurées dans station de Tillouguite (2000 - 2010)

La pluviométrie annuelle au niveau de la station de Tillouguite varie de 260 à 698 mm, avec une moyenne annuelle respectivement de l'ordre de 432 mm. D'après le graphe ci-dessous (*Figure 3*), on note que la saison la plus humide est enregistrée pendant la saison 2009 - 2010 (698 mm), et la plus sèche c'était pendant la saison 2006 - 2007 (260 mm).

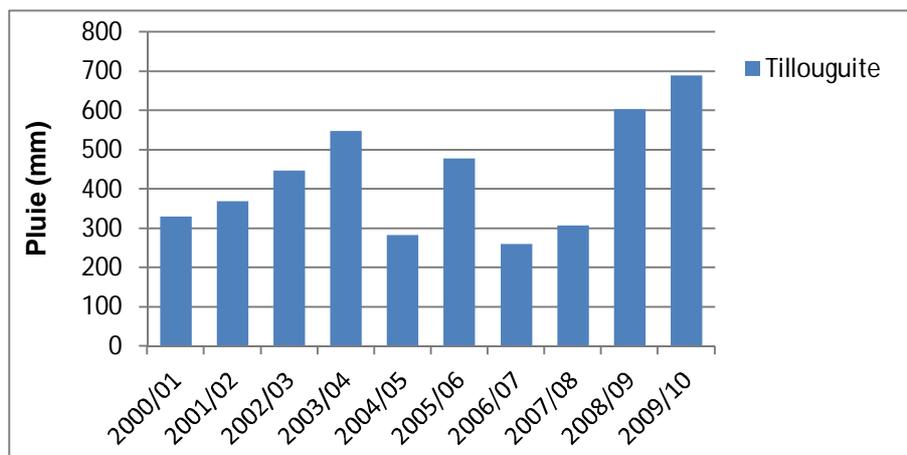


Figure 3 : Pluies annuelles mesurées dans la station de Tillouguite (2000 - 2010)

1.3.2 Température

Le graphe ci-dessous (Figure 4) représente La température moyenne mensuelle enregistrée dans la station de Tillouguite entre 2000 et 2010.

D'après la figure 4 La température a connu une valeur maximale au mois de juillet (le mois le plus chaud) avec 27 °C, puis elle a commencée à baissée Graduellement pour atteindre une valeur minimale de 8 °C au mois de janvier (le mois le plus froid).

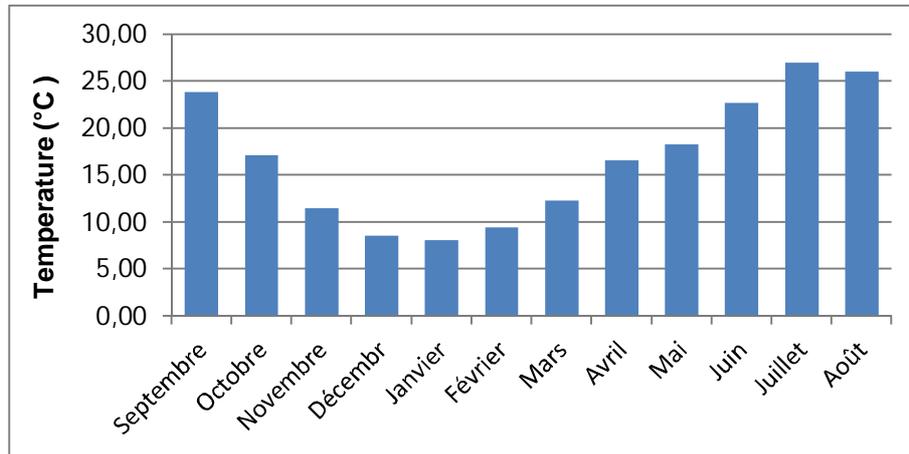


Figure 4 : Température moyenne mensuelle mesurées dans la station de Tillouguite (2000 - 2010)

1.3.3 Evaporation

Une fois la pluie est arrêtée, une partie non négligeable de l'eau arrivée au sol est immédiatement rééaporée.

Dans notre zone d'étude, la valeur minimale de l'évaporation moyenne mensuelle (Figure 5) au niveau de la station de Tillouguite, est mesurée en mois de décembre avec 50,3 mm, et la valeur maximale en mois de juillet avec 287,6 mm, tandis que l'évaporation annuelle varie entre 1400 et 2082 mm/an.

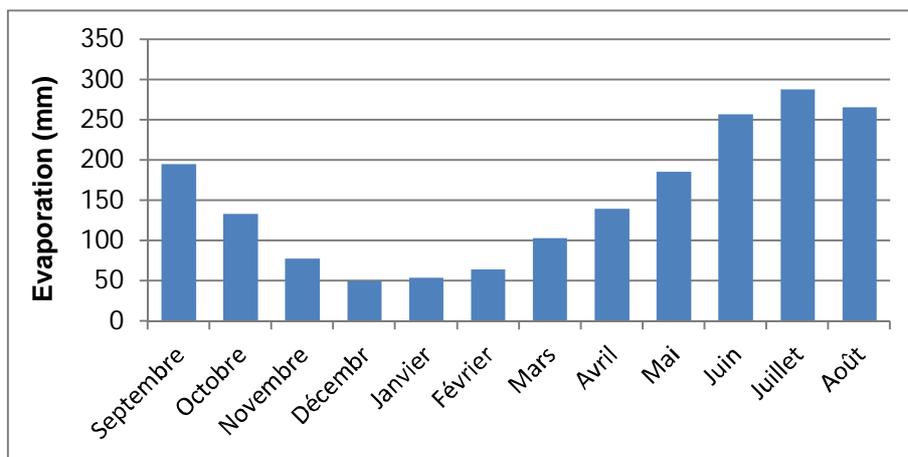


Figure 5 : Evaporation moyenne mensuelle mesurée dans la station de Tillouguite (2000 – 2010)

1.3.4 Débit

Les débits mesurés au niveau de la station de Tillouguite au cours de la durée qui s'étend entre 2000 et 2010, présentent des variations irrégulières d'une année à l'autre (Figure 6). Ils ont connu des valeurs faibles de l'ordre de 2,92 et 4,08 m³/s respectivement pendant la saison 2007/2008 et la saison 2004/2005. Les fortes valeurs sont enregistrées pendant les deux saisons 2008/2009 avec 21,58 m³/s et 2009/2010 avec 15,42 m³/s.

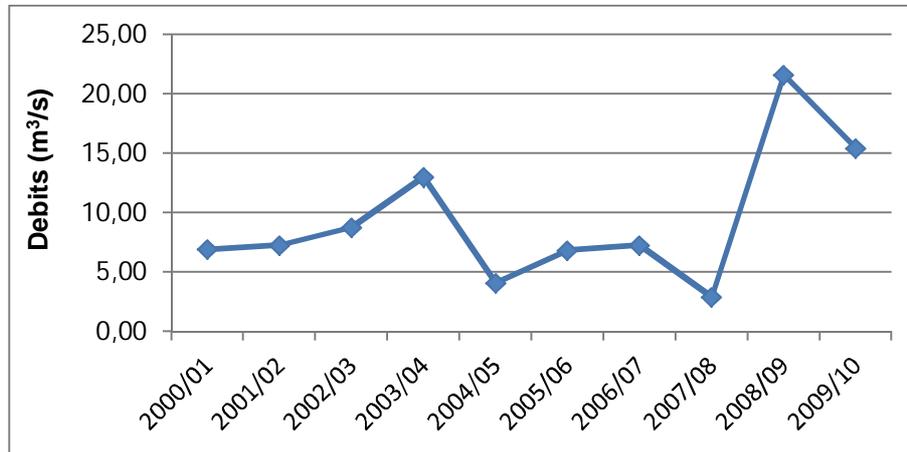


Figure 6 : Débits moyen annuels mesurés dans la station de Tillouguite (2000 - 2010)

À partir de la figure 7, qui représente la variation des débits moyens mensuels au niveau de la station de Tillouguite, on note que pendant les 10 saisons analysées, les débits connaissent deux périodes distincts :

- Période d'accroissement qui commence du mois de Septembre (2,7 m³/s) où les débits commencent à augmenter jusqu'à une valeur maximale au mois de Mars (24 m³/s).
- Période d'abaissement entre Mars et Août où les débits diminuent en continu pour atteindre une valeur minimale de 4,40 m³/s.

En comparant le graphe qui représente la variation de la pluie moyenne mensuelle (Figure 2), avec celui qui représente la variation des débits moyenne mensuelle (Figure 7) au niveau de la station de Tillouguite, on constate que le débit n'a atteint une valeur maximale qu'en mois de mars où la pluie commence à diminuer. Ce décalage peut être témoin de la contribution de la fonte des neiges dans le débit du cours d'eau.

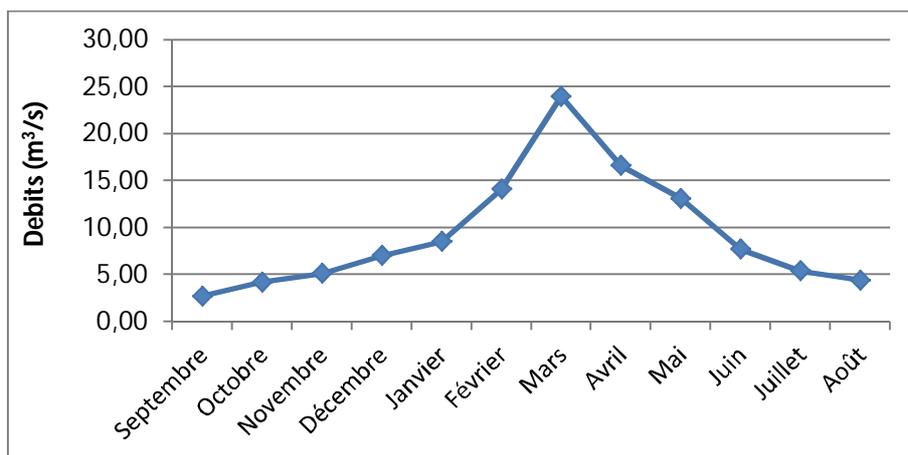


Figure 7 : Débits moyens mensuels mesurés dans la station de Tillouguite (2000 - 2010)

I.4 Outils de Géo- traitement

I.4.1 ArcGIS

Les systèmes d'information géographiques (SIG) sont considérée comme l'une des technologies de l'information les plus performantes, car elle vise à intégrer des connaissances provenant de sources multiples et à crée un environnement pluri-secteurs. Il réunit un environnement de visualisation performant et une puissante infrastructure d'analyse et de modélisation spécialement adaptée à la géographie.

Dans ce projet, tous les traitements des données spatiales ont été effectués à l'aide du Système d'Information Géographique ArcGIS 10, Qui constitue une famille de logiciels développés par la compagnie américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute) leader mondial des SIG. Il comprend une suite d'applications intégrées les unes aux autres qui sont ArcMap, ArcToolbox et ArcCatalog.

ArcMap : l'application principale d'ArcGis qui permet de cartographier et de traiter les données.

ArcToolBox : la boite qui contienne tous les outils qui s'applique sous ArcMap

ArcCatalog : est un explorateur de données cartographiques. Il permet d'organiser, de pré visualiser, de rechercher, de décrire des données géographiques (méta données).

I.4.2 ArcHydro

C'est une extension qui comprend un ensemble d'outils qui facilitent les analyses souvent effectuées dans le domaine des ressources hydrologiques. Ils fonctionnent dans l'environnement ArcGIS, dont certaines de leurs fonctions nécessitent l'extension Spatial Analyst. Les outils de l'extension ArcHydro permet notamment de déterminer les caractéristiques hydrographiques d'un espace géographique (la délimitation des bassins versants, la génération de réseaux hydrographique...) à partir des valeurs altimétriques d'un modèle numérique du terrain.

Dans ce travail les outils de l'extension ArcHydro, ont été utilisés principalement pour l'extraction des caractéristiques du réseau hydrographique de la zone d'étude. Cette opération nécessite l'intervention d'une façon successive de neuf outils :

- **Fill Sinks** : c'est en quelque sorte une correction du MNT d'entrée, qui sert à remplir les puits, qui sont en générale des creux localisés sur un seul pixel et formant une sorte de "fracture". Ces trous génèrent des discontinuités au niveau du réseau de drainage, ce qui peut donner des résultats non représentatifs (résultat sous format Raster).
- **Flow Direction** : permet le calcul de la direction vers laquelle le flux d'eau sort de la cellule considérée, en fonction des altitudes des cellules avoisinantes (résultat sous format Raster).
- **Flow Accumulation** : il calcule le flux cumulé en une cellule depuis tous les chemins potentiels de drainage amont (résultat sous format Raster).
- **Stream Definition** : permet d'identifier le réseau hydrographique (résultat sous format Raster).
- **Stream Segmentation** : permet de découper le réseau hydrographique en segment. Les pixels parcourus par un même segment porte la même valeur (résultat sous format Raster).
- **Catchment Grid Delineation** : permet de définir les sous bassins de la zone d'intérêt en fonction des segments du réseau hydrographique (résultat sous format Raster).
- **Catchment Polygon Processing** : permet de transformer les sous bassin définis, en un format vecteur.
- **Drainage line Processing** : Transforme le réseau hydrographique segmenté en un format vecteur.
- **The longest Flow path** : permet d'extraire le cours d'eau principale qui draine le bassin.

L'ordre chronologique de ces outils est obligatoire, car chacun se base sur le résultat de l'outil qui le précède.

1.4.3 ModelBuilder

Faisant partie du cadre du géotraitement ArcGIS, ModelBuilder est une application utilisée pour l'automatisation des processus de SIG à travers la création, la modification et la gestion des modèles. Il peut également être considéré comme un langage de programmation graphique. Cependant, Un modèle est une séquence d'outils et de données enchaînées, où la sortie d'un outil est liée à l'entrée d'un autre. En plus de l'enchaînement et l'automatisation du travail, ModelBuilder a l'avantage que les modèles créés peuvent être enregistrés sous forme d'un outil dont on peut utiliser à tout moment. Cela est particulièrement significatif lorsqu'on effectue très souvent une opération. Alors, au lieu de refaire tous le travail à nouveau on effectue seulement un simple changement de paramètres et on relance le modèle pour obtenir de nouveaux résultats.

Un modèle est constitué de trois principaux éléments (*Figure 8*) :

Outils : Les outils de géotraitement sont les blocs de base pour la création d'un modèle. C'est ceux qui effectue les diverses opérations sur des données géographiques ou tabulaires. A noter, que tous les outils disponibles dans "ArcToolbox" sont applicables sous ModelBuilder.

Variables : sont les éléments d'un modèle qui possèdent une valeur ou une référence à des données stockées. Ils peuvent être sous forme de données (Raster ou vecteur) ou sous forme de valeurs (des nombres...).

Connecteurs : ils connectent les variables (données et valeurs) avec les outils, où Les points des flèches des connecteurs indiquent le sens de traitement.

I.4.3.1 Création d'un Modèle

Un modèle est créé en combinant les trois éléments cité ci-avant. On commence par l'ajout des outils en les glissant vers le "Canvas" (Espace de travail) à partir de la boîte à outils "ArcToolbox", puis on spécifie les variables de chaque outil. Ensuite on assure La connexion entre les variables et les outils à l'aide des connecteurs.

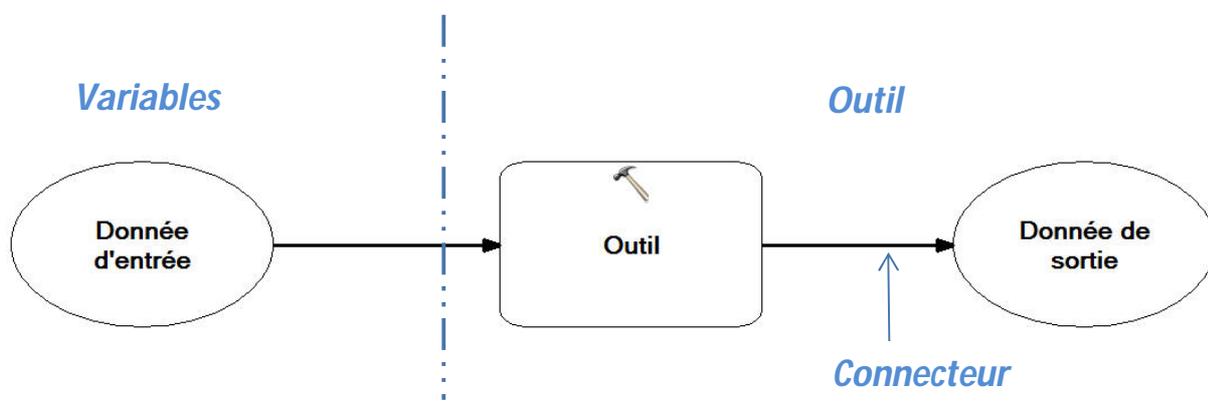


Figure 8 : Les principaux éléments d'un modèle

I.4.3.2 Exécution d'un modèle

Just après la création, les éléments du modèle persistent sans couleur (*Figure 8*), ce qui signifie que le modèle n'est pas encore prêt à être exécuté. À cet effet, on distingue deux modes d'exécution d'un modèle :

- À partir de l'interface ModelBuilder, en exécutant le modèle immédiatement après la définition des données d'entrées de l'outil, ce qui permet aux éléments du modèle d'avoir des couleurs, où les entrées sont en bleu, les outils en jaune et les sorties en couleurs verte. Cette coloration signifie que le modèle est prêt à fonctionner. Après l'exécution, les outils et les sorties du modèle deviennent avec des ombres derrière (*Figure 9*).

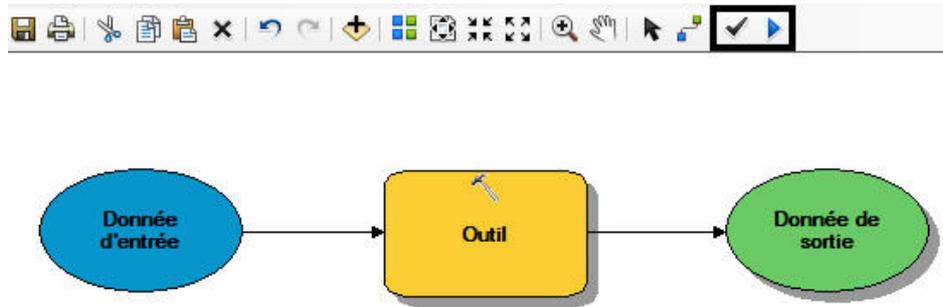


Figure 9 : Exemple d'un modèle exécuté à partir de l'interface ModelBuilder

- A partir d'une boîte de dialogue, où les champs à remplir sont les variables et les sorties qui sont définies comme des paramètres du modèle au moment de la création (les éléments avec des P au coin supérieur droit). Ce mode d'exécution est plus flexible que le premier, puisque il donne aux utilisateurs la possibilité de modifier les paramètres d'entrées avant d'exécuter le modèle sans avoir ouvrir la fenêtre d'édition de celui-ci.

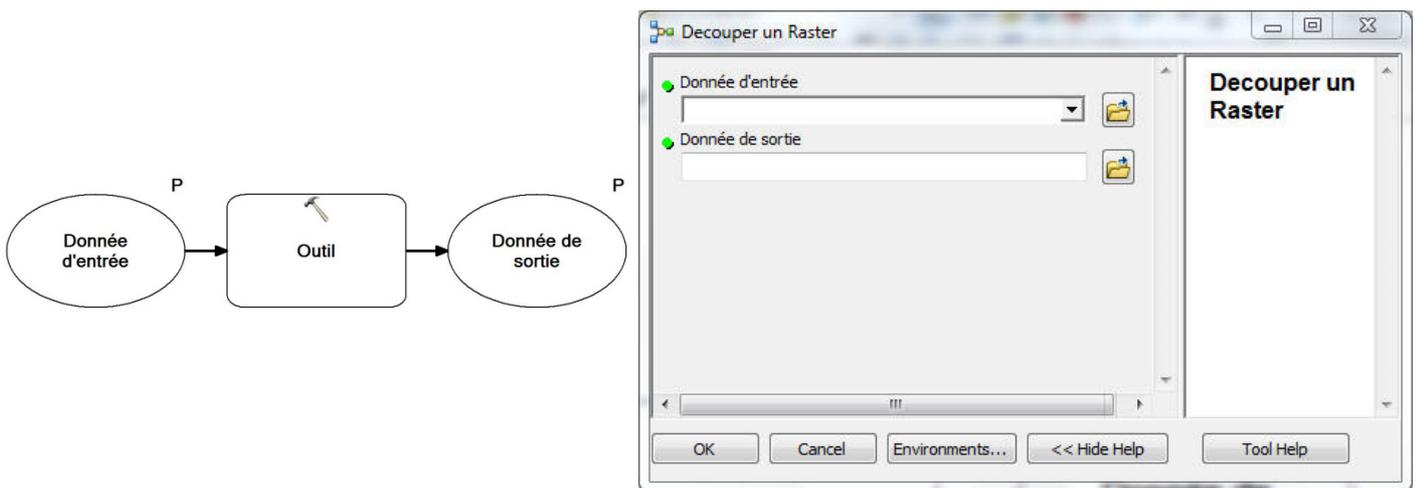


Figure 10 : Exemple d'un modèle exécuté à partir de la boîte de dialogue

I.4.3.3 Outil d'itération

Un itérateur est un outil de ModelBuilder qui consiste à exécuter plusieurs fois un même processus d'automatisation, mais avec des données et des paramètres différents dans chaque itération. Cet outil est fortement utile lorsqu'on dispose d'un nombre important de données à traiter d'une façon répétitive. Il permet de réaliser beaucoup d'opérations avec moins d'effort et en un temps court.

Parmi les itérateurs fournis par ModelBuilder, il y a celui lié aux propriétés des éléments qui représentent les données d'entrée de chaque outil (les variables). Par défaut, dans un modèle les données d'entrées des outils se définissent comme étant une seule valeur (A single value), ce qui fait que le modèle s'exécute pour une seule fois puis il s'arrête.

L'itérateur dont on parle (Liste of Values) permet ainsi de modifier cette propriété de telle façon à spécifier à l'interface ModelBuilder que les données à traiter avec le processus d'automatisation sont sous forme d'une liste de valeurs. Cette opération donne la possibilité de lister dès le début, l'ensemble des données d'entrée. En conséquence, le modèle peut être exécuté plusieurs fois pour plusieurs données d'entrée, sans avoir demandé à chaque fois l'intervention de l'utilisateur.

Pour éclaircir d'avantage cette notion d'itérateur, on cite l'exemple de l'outil "Clip" qui permet de découper un raster selon une étendue de modèle (souvent un polygone) :

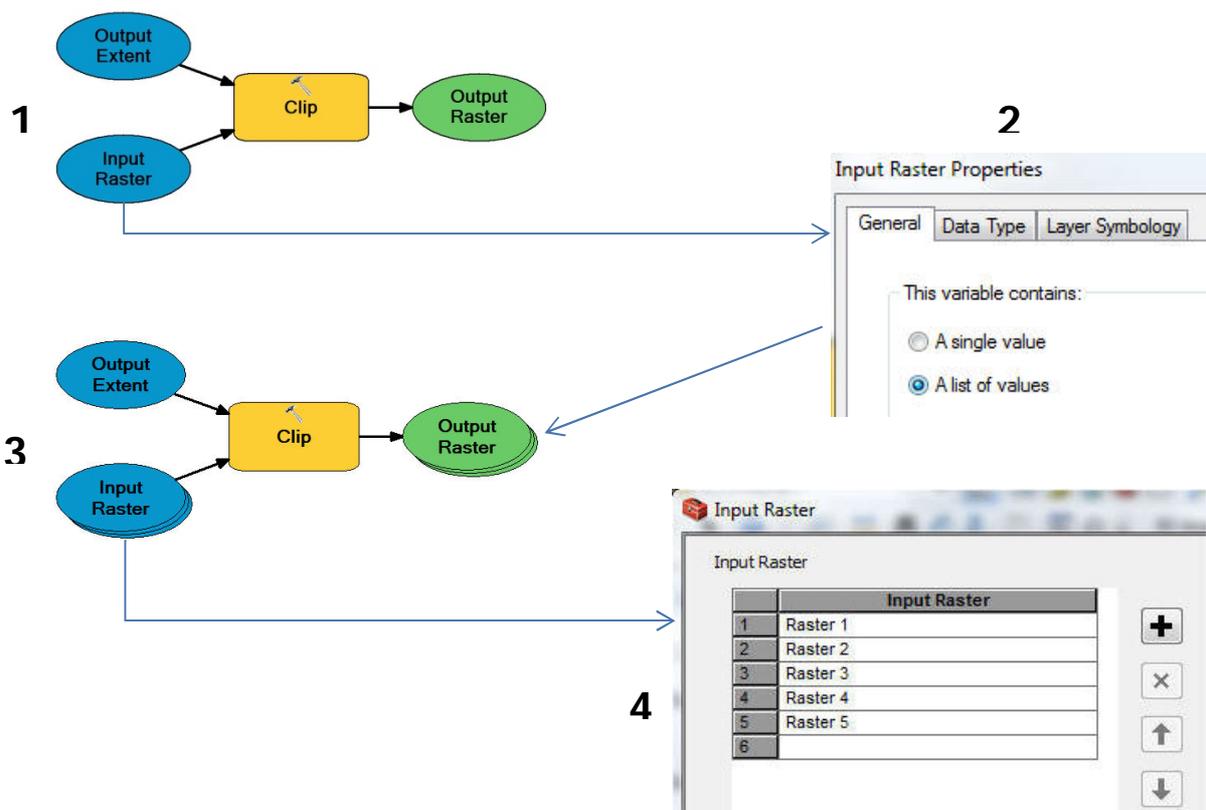


Figure 11 : Exemple d'application de l'iteration par La Propriété "Liste of values"

L'exemple cité ci-dessus (Figure 11), décrit une situation où on dispose d'un ensemble de données raster (de 1 à 5) à découper en se basant sur une même étendue de forme. Le processus de découpage va être exécuté pour chacune des rasters jusqu'à ce qu'il parcourt toute la liste définie.

1.4.4 Excel

Excel est un tableur développé et distribué par Microsoft, il fait partie de la famille Microsoft Office. Il possède plusieurs fonctionnalités dont les principaux sont le calcul, la présentation des résultats des calculs sous forme de graphiques et l'analyse des résultats.

Excel a été utilisé dans ce travail pour les objectifs suivants :

- L'organisation des données climatiques utilisées dans la spatialisation ;
- Le calcul des caractéristiques physiographique de la zone d'étude ;
- Le calcul de la pluie moyenne sur la zone d'étude ;
- La création des graphes et des courbes à partir des résultats de calcul.
- Calcul du critère d'évaluation (Coefficient de corrélation) lors de l'analyse des résultats finals.

I.5 Méthodes de spatialisation de la pluviométrie

Un pluviomètre est un appareil de mesure de pluie ponctuelles et pour raisons techniques et économiques, la densité des réseaux pluviométriques est nécessairement limitée. Se pose alors la question de l'estimation des pluies entre les postes pluviométriques et celle de l'estimation de la pluie moyenne sur une surface considérée (Bassin versant de Tillouguite pour notre cas) pour les besoins de bilan de modélisation hydrologique. Or, L'interpolation spatiale est une procédure qui consiste à l'estimation de la valeur d'une variable (les hauteurs de pluie), en un site à partir des valeurs de la même variable mesurées en des sites voisins.

Cette partie est consacrée à la présentation des différentes méthodes de spatialisation utilisées pour calculer la pluie moyenne sur le bassin versant de Tillouguite.

1.5.1 La moyenne arithmétique

La méthode la plus simple à utiliser qui consiste à calculer la moyenne arithmétique des valeurs des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin ou à proximité, elle donne des résultats de plus en plus représentatifs si la pluie est répartie de façon relativement homogène et si la répartition des postes est suffisamment homogène sur la région d'étude.

La pluie moyenne sur le bassin, est calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n_i}$$

Avec :

P_i : Les hauteurs des précipitations mesurées dans les stations

n_i : Le nombre des stations

1.5.2 Polygones de Thiessen

La plus couramment utilisées, la méthode des polygones de Thiessen consiste à partitionner l'espace géographique, en définissant pour chaque station pluviométrique P_i , un polygone d'influence de tel façon que chaque point du polygone soit plus proche de P_i que de tout autre station. Ces polygones dépendent uniquement de la configuration géométrique et non pas des valeurs observées. Ils sont obtenus en traçant les médiatrices des segments joignant la station P_i aux stations voisins.

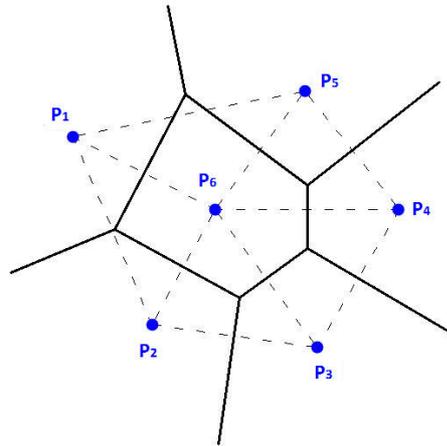


Figure 12 : Schéma explicative du principe des polygones de Thiessen

Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération le poids de chaque station pluviométrique. Cette estimation s'effectue en attribuant pour l'ensemble des points appartenant à un polygone d'influence, où l'aire constitue le facteur de pondération, la même valeur de la station correspondante.

Alors, la pluie moyenne sur un bassin est égale à la somme de la hauteur pluviométrique P_i mesuré à chaque station, multiplié par la surface de sa polygone d'influence (facteur de pondération), le tout divisé par la surface S_T total du bassin, d'où la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times S_i}{S_T}$$

Avec :

P_{moy} : La pluie moyenne sur le bassin

P_i : La hauteur pluviométrique mesurée au niveau de chaque station

S_i : La surface de chaque polygone

P_T : La surface totale du bassin

n : Le nombre des stations

1.5.3 Gradient altitudinale des précipitations

Dans les régions montagneuse à l'exception des surface situés à très haute altitude, La topographie affecte de façon très importante les processus météorologiques, et sur une petite et une grande échelle. En fonction de l'altitude Les précipitations augmentent avec un certain gradient en raison de l'effet orographique, qui contribue à un refroidissement de l'air avec l'altitude. Mais au-delà d'un certain seuil, les masses d'air finissent par s'adresser et les précipitations diminuent.

Le principe de cette méthode consiste à découper la zone d'étude en tranches d'altitudes, et une hauteur de pluie est affectée à chaque tranche en fonctions du gradient, de la différence d'altitude entre la station de référence, l'altitude de la tranche et La pluie mesurée au niveau de la station de référence.

La pluie au niveau d'une tranche se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$P_{Tr} = P_{St} + \frac{P_{St} \times \Delta_{alt} \times Gr}{100}$$

Avec :

P_{Tr} : Pluie de la tranche

P_{St} : La pluie mesurée au niveau de la station de référence

Δ_{alt} : La différence d'altitude entre la station de référence et la tranche

Gr : Le gradient pluviométrique en mm

Or, la pluie moyenne à l'échelle du bassin est obtenue par la fomule suivante :

$$P_{Tr} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Tri} \times S_{Tri}}{S_T}$$

Avec :

P_{Tri} : Pluie de la tranche i

S_{Tri} : La surface de la tranche i

S_T : La surface totale du bassin

n : Le nombre des tranches

1.5.4 Krigeage

Krigeage est une méthode d'interpolation applicable à des données spatiales. Il s'appuie sur la géostatistique linéaire, notamment le variogramme. La théorie du krigeage a été développée par un mathématicien français (G. Matheron) à partir des travaux de l'ingénieur minier sud-africain D.G.Krige. Dans les années 50, Krige a développé une série de méthodes statistiques afin de déterminer la distribution de minerais à partir d'un ensemble de forages. Différents types de krigeage existent. Citons entre autres, le krigeage simple, le krigeage ordinaire (utilisé) et le krigeage universel (*Hengl, 2007 ; Arnaud et Emery, 2000 ; Wakernagel, 1993*).

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique qui tient compte à la fois de la configuration géométrique des points observés et de la structure de dépendance spatiale des données. Il estime les valeurs d'une variable (Z) à chaque point de l'espace sur la base des valeurs proches connues, en tenant compte de la valeur de pondération estimée par le variogramme. Cependant, ce dernier est sous forme d'une fonction continue caractérisant complètement la variance en fonction de la distance entre les paires de points de mesure.

La formule générale utilisée par cette méthodes d'interpolation consiste en une somme pondérée des données, ou :

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i)$$

Avec :

$Z(S_i)$ = valeur relevée à l'emplacement i

λ_i = pondération inconnue de la valeur relevée à l'emplacement i (déterminée à partir du variogramme)

S_0 = emplacement de prévision

N = nombre de valeurs relevées

En théorie, le krigeage générerait les interpolations spatiales les plus précises. Cette précision dépend alors de plusieurs facteurs, à savoir, Nombre d'échantillons et la qualité des données en chaque point, Position des échantillons et la distance entre les échantillons et le point dont on veut estimer la valeur.

1.5.5 IDW (Interpolation par Inverse des Distance)

L'interpolation par inverse des distances c'est la méthode d'interpolation déterministe la plus employée. Elle ne tient pas compte de la position relative des points d'observations entre eux, seule la distance entre les sites échantillonnés et le point à estimer est considérée. IDW consiste à attribuer un poids inversement proportionnel à la distance entres les sites échantillonnés et le point à estimer, de telle façon que ce poids diminue avec la distance qui le sépare du point de l'espace dont on veut estimer la valeur, ce qui fait que le poids le plus important est donné aux points les plus proches. En outre, les valeurs interpolées sont toujours comprises entre les valeurs minimales et maximales du champ d'observation.

La valeur prédite pour un point de l'espace est :

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{d_i^k}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^k}}$$

Avec :

Z : La variable estimée

Z_i : La valeur connue au site de mesure *i*

d_i : La distance entre le point à estimer et le point de mesure *i*

N : Le nombre de sites utilisés pour l'interpolation

k : La puissance à laquelle est élevée la distance

La puissance mathématique **k** joue un rôle considérable dans le processus d'estimation, elle contrôle la signification des points connus sur les valeurs interpolées en fonction de leur distance par rapport au point en sortie. Une puissance plus élevée permet une concentration sur les points les plus proches. Ainsi, les données proches auront plus d'influence, tandis qu'une valeur de puissance moins élevée accorde plus d'influence aux points environnants les plus éloignés.

Chapitre II : Extraction des caractéristiques Physiographiques du sous bassin versant de Tillouguite

Pour mieux comprendre le comportement du bassin versant envers une quantité de précipitations recueillis lors d'une averse, il est indispensable de faire une analyse de ses caractéristiques physiographiques. Ces derniers interviennent dans les modalités de l'écoulement superficiel et ils influencent fortement la réponse hydrologique du bassin.

L'ensemble des caractéristiques utilisées dans cette étude sont calculées à partir du Model Numérique de Terrain (d'une résolution de 30m) qui correspond à la zone d'étude.

II.1 Les altitudes

L'altitude constitue un caractère très important pour comprendre le régime hydrologique d'un bassin versant, vu que la plus part des paramètres météorologiques (précipitations, température...) et hydrologiques sont en fonction de celle-ci.

II.1.1 Modèle de création des tranches d'altitudes

La création des tranches d'altitudes s'appuie dans un premier lieu sur deux outils principales disponibles dans "ArcToolbox" d'ArcGIS. Ce sont l'outil "Reclassify" et l'outil "Stat As Table" dont la deuxième s'appuie sur le résultat de sortie de la première. Mais, le fait de se reporter à chaque fois vers la boîte d'outils "ArcToolbox" et de chercher les outils à appliquer, ça rend le travail pénible, ennuyeux et il contribue à une perte de temps. Pour éviter ces problèmes on se réfère à l'application ModelBuilder pour assurer l'enchaînement du travail tout en réalisant un modèle qui regroupe l'ensemble des outils à utiliser. Ce modèle permet aussi de rendre ce processus plus générale, tout en ajoutant d'autres outils, à savoir l'outil "Clip", "Define project" et l'outil "Table to dBase".

Comme donnée d'entrée on a le model numérique du terrain (MNT) du sous bassin d'Oued El-Abid et le "Shapefile" de la zone d'étude (bassin Tillouguite).

Le modèle créé (*Figure 13*) permet dans un premier temps d'extraire la zone d'intérêt en découpant le MNT d'Oued El-Abid à l'aide de l'outil "Clip" en utilisant le "Shapefile" de ladite zone comme une étendue de forme. Mais, avant qu'ils participent dans l'outil "Clip", le "MNT" et le "Shapefile" doivent être dotés d'un même système de coordonnées, c'est pour cela on a ajouté l'outil "Define Projection" qui permet la modification, en même temps, les systèmes de coordonnées des deux données d'entrée à travers le paramètre "Coordinate Système".

En deuxième lieu, l'outil "Reclassify" en se basant sur le résultat de sortie de l'outil "Clip", vient pour assurer la classification du MNT (MNT Tillouguite) résultant, en fonction des tranches convenables (à pas de 400 m), dont on peut spécifier manuellement grâce au paramètre "Reclassification".

Après la classification, l'outil "Zonal Statistics as Table" permet le calcul des statistiques de chaque tranche définie, en faisant une sorte de comparaison entre le MNT classifié et le MNT issu de l'outil "Clip", qui constituent tous les deux les données d'entrées pour cette outil. Elle Donne comme résultat, une table contenant un ensemble des statistiques concernant chaque tranche.

Le dernier outil dans ce processus, c'est l'outil "Table to dBASE" qui permet d'exporter la table des statistiques sous un format ".dbf" supportée par les feuilles de calcul Excel.

Le résultat final du modèle proposé, est sous forme d'une carte de tranches d'altitude (Figure 16) et une table contenant les statistiques relatives aux tranches créées, y compris la surface et la moyenne d'altitude de chaque tranche qui nous intéresse le plus. Ces statistiques sont par la suite exploitées pour élaborer la courbe hypsométrique (Figure 14) du bassin versant de Tillouguite.

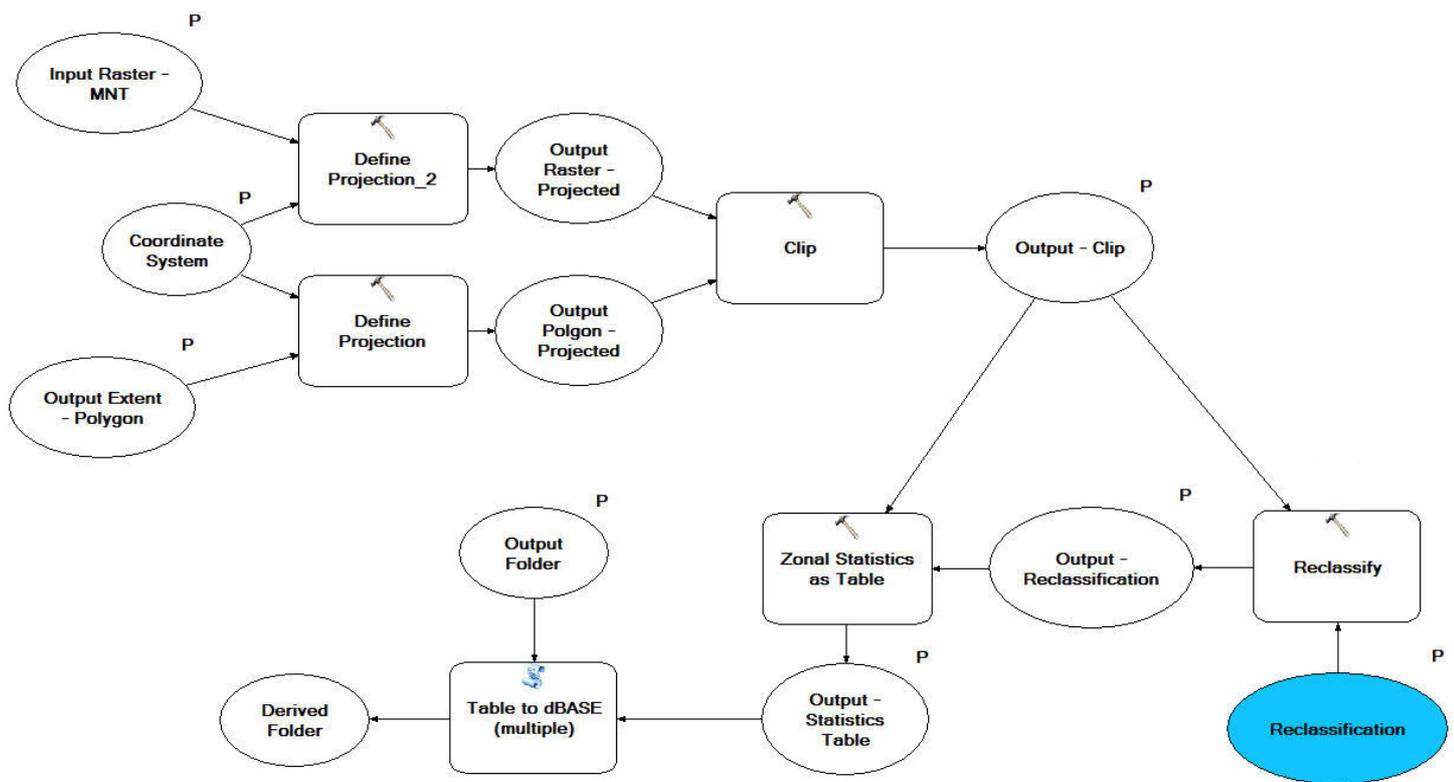


Figure 13 : Modèle pour la création des tranches d'altitudes et l'extraction de leurs statistiques

II.1.2 Hypsométrie

Pour avoir une idée synthétique sur les différentes altitudes qui caractérisent le bassin versant de Tillouguite, en plus de la carte des tranches d'altitude (*figure 16*) issue du modèle ci-dessus, on a élaboré la courbe hypsométrique qui représente la répartition des tranches d'altitudes caractérisant le bassin en fonction de la surface qu'elles occupent. D'une autre manière, elle exprime la surface ou le pourcentage de surface (qui porte en abscisse), au-dessus d'une certaine altitude (représentée en ordonnée).

En plus de la vue synthétique du relief, la courbe hypsométrique peut aussi nous servir lors de la détermination de la pluie moyenne sur le bassin en utilisant la méthode du gradient altitudinale des précipitations.

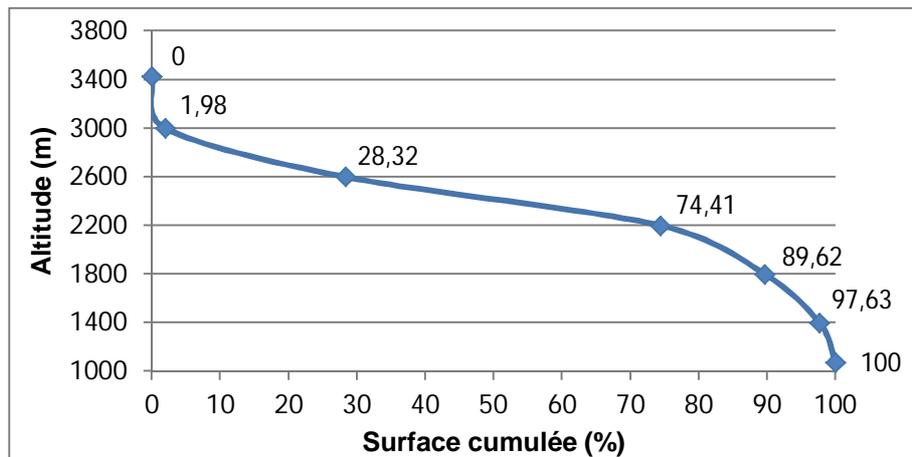


Figure 14 : La courbe hypsométrique du bassin versant de Tillouguite

Comme déjà mentionné, le bassin versant de Tillouguite est principalement de nature montagneuse ce qui est bien illustré sur la courbe hypsométrique (*Figure 14*) et le graphe de la Figure 15. À partir de cette dernière on peut aisément distinguer que les altitudes appartenant aux tranches 2200 – 2600m et 2600 – 3300 m sont les plus abondantes en termes de surface avec des pourcentages respectivement de 46,09 % et 26,34 %, et ceux comprises entre 1073 et 2200 m sont présentes en totale avec un pourcentage de 25,59 %, bien que les altitudes supérieures à 3000 m sont les moins présentes avec seulement 1,98 % rapport à la surface totale du bassin.

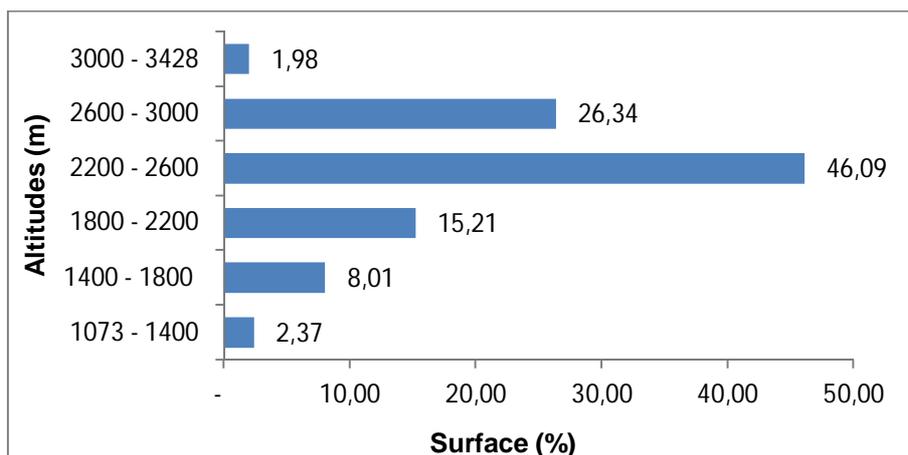


Figure 15 : Répartition des tranches d'altitudes dans le bassin versant de Tillouguite

II.1.3 Altitudes caractéristiques :

Les différents paramètres altitudinaux jouent un rôle informatif très important en matière de la connaissance de la morphologie du bassin, particulièrement lorsqu'on traite le développement de certains variables climatiques en relation avec l'orographie. En outre, ils constituent des indicateurs de la rapidité avec laquelle le bassin draine l'eau précipitée vers l'exutoire. Ces paramètres sont l'altitude maximale, minimale et l'altitude moyenne.

- Altitude maximale et minimale

L'altitude maximale H_{max} correspond au sommet le plus haut du bassin et l'altitude minimale H_{min} est le point le plus bas qui représente l'exutoire.

Pour le bassin versant de Tillouguite : $H_{min} = 1073 \text{ m}$ et $H_{max} = 3428 \text{ m}$

- Altitude moyenne

L'altitude moyenne du bassin se calcule en utilisant la formule suivante :

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

Avec :

A_i : L'aire entre deux hauteurs h_a et h_{a+1} (km²)

h_i : L'altitude moyenne entre h_a et h_{a+1} (m)

A : La surface totale du bassin (km²).

Pour le bassin versant de Tillouguite : $H_{moy} = 2\,363,87 \text{ m}$

- Altitude médiane

L'altitude médiane est celle qui correspond au point d'ordonnées 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique.

L'altitude médiane du bassin Tillouguite est comprise entre l'altitude 2200 et 2600 m. Elle est approximativement de l'ordre de 1420 m.

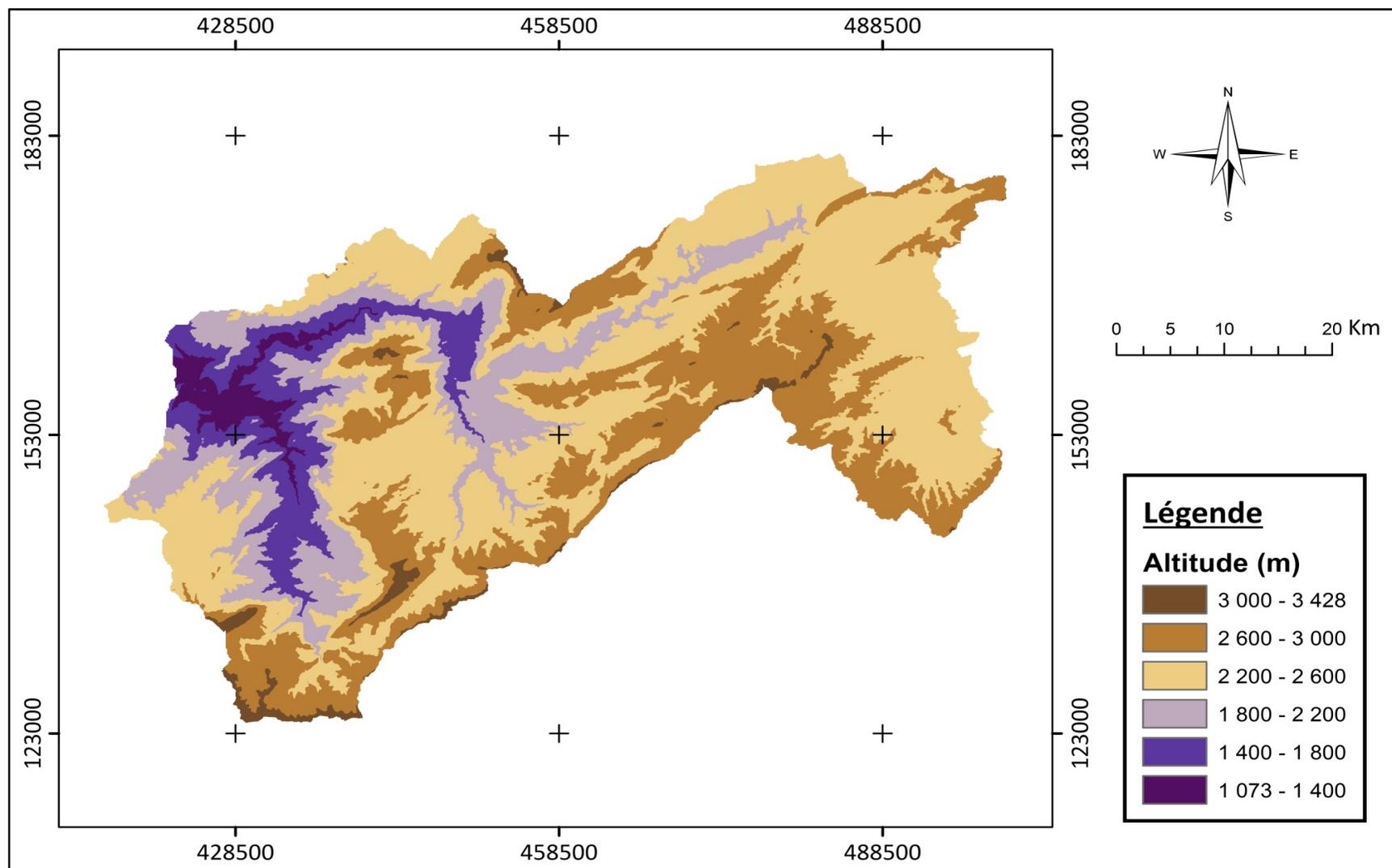


Figure 16 : La carte des tranches d'altitudes du bassin versant de Tillouguite

II.2 La pente

La pente autant que l'altitude, constitue une caractéristique très importante qui renseigne sur la topographie du bassin. La connaissance des pentes caractérisant le bassin demeure une chose indispensable vue l'influence qu'elle possède sur l'infiltration, le ruissellement des eaux et sur le temps de concentration au niveau du bassin. Elle peut favoriser soit l'infiltration des eaux vers le sol (pour les faibles pentes), soit le ruissellement (pour les fortes pentes).

II.2.1 Modèle de création des classes de pentes

Le modèle relatif à la création des classes de pentes (Figure 17), fonctionne de la même façon que celui des tranches d'altitudes (Figure 13), sauf que cette fois-ci, avant qu'il subisse la classification à l'aide de l'outil "Reclassify" et par la suite poursuivre le processus jusqu'à l'exportation de la table des statistiques, le résultat de l'outil "Clip" (MNT Tillouguite) participe d'abord dans l'outil "Slop", qui permet d'identifier la pente au niveau de chaque pixel du MNT en se basant sur le facteur altimétrique Z. Ce Modèle nous donne comme résultat, une carte des classes de pentes (Figure 19) et une table de statistiques utilisées pour calculer la proportion de chaque classe par rapport à la surface totale du bassin versant de Tillouguite (Figure 18).

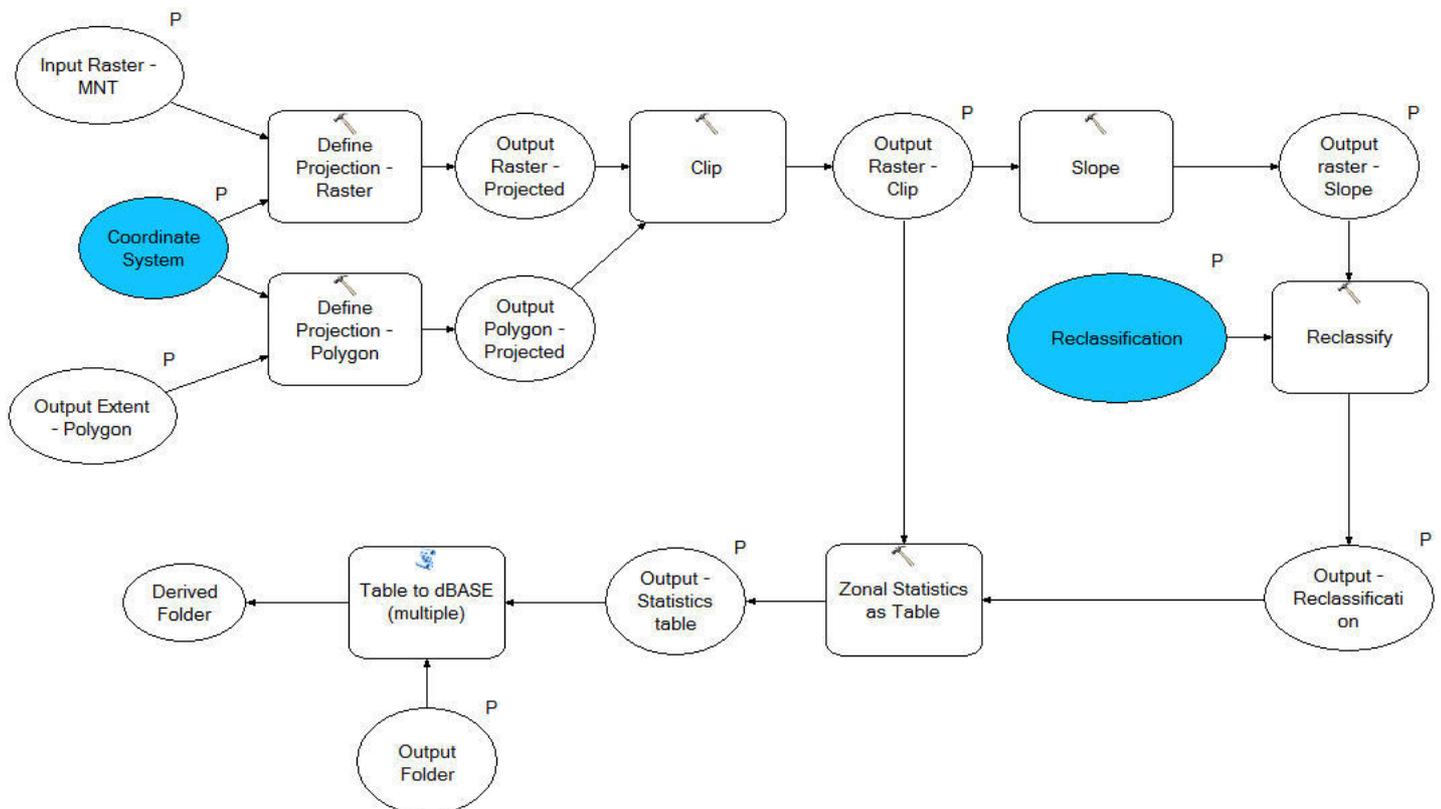


Figure 17 : Modèle pour la création des pentes et l'extraction de leurs statistiques

II.2.2 Description

La carte des pentes (*Figure 19*) du bassin Tillouguite montre que les pentes du bassin sont comprises entre 0 et 78 degré.

D'après le graphe ci-dessous (*Figure 18*) qui représente la répartition des pentes en fonction de la superficie qu'ils occupent, on note que les pentes les plus représentés en termes de surface sont ceux compris entre 0 et 30 degré avec un pourcentage de 84,76 % par contre les pentes qui sont supérieur à 30 degré occupe une faible superficie avec un pourcentage de 15,24.

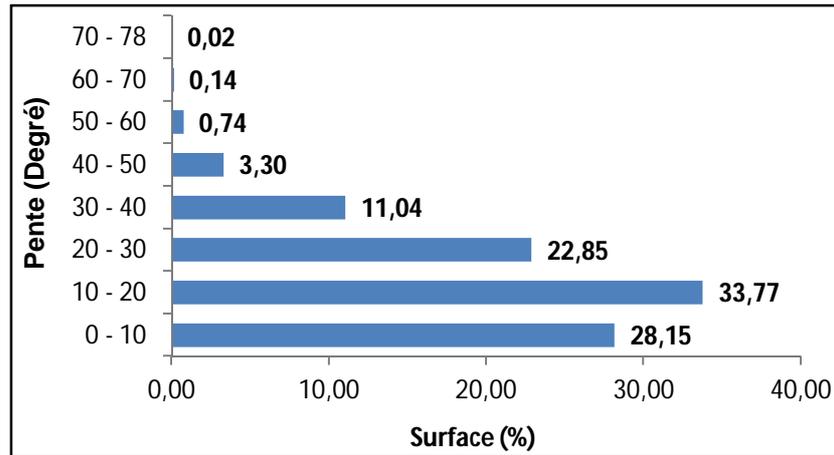


Figure 18 : Répartition des classes de pentes dans le bassin versant de Tillouguite

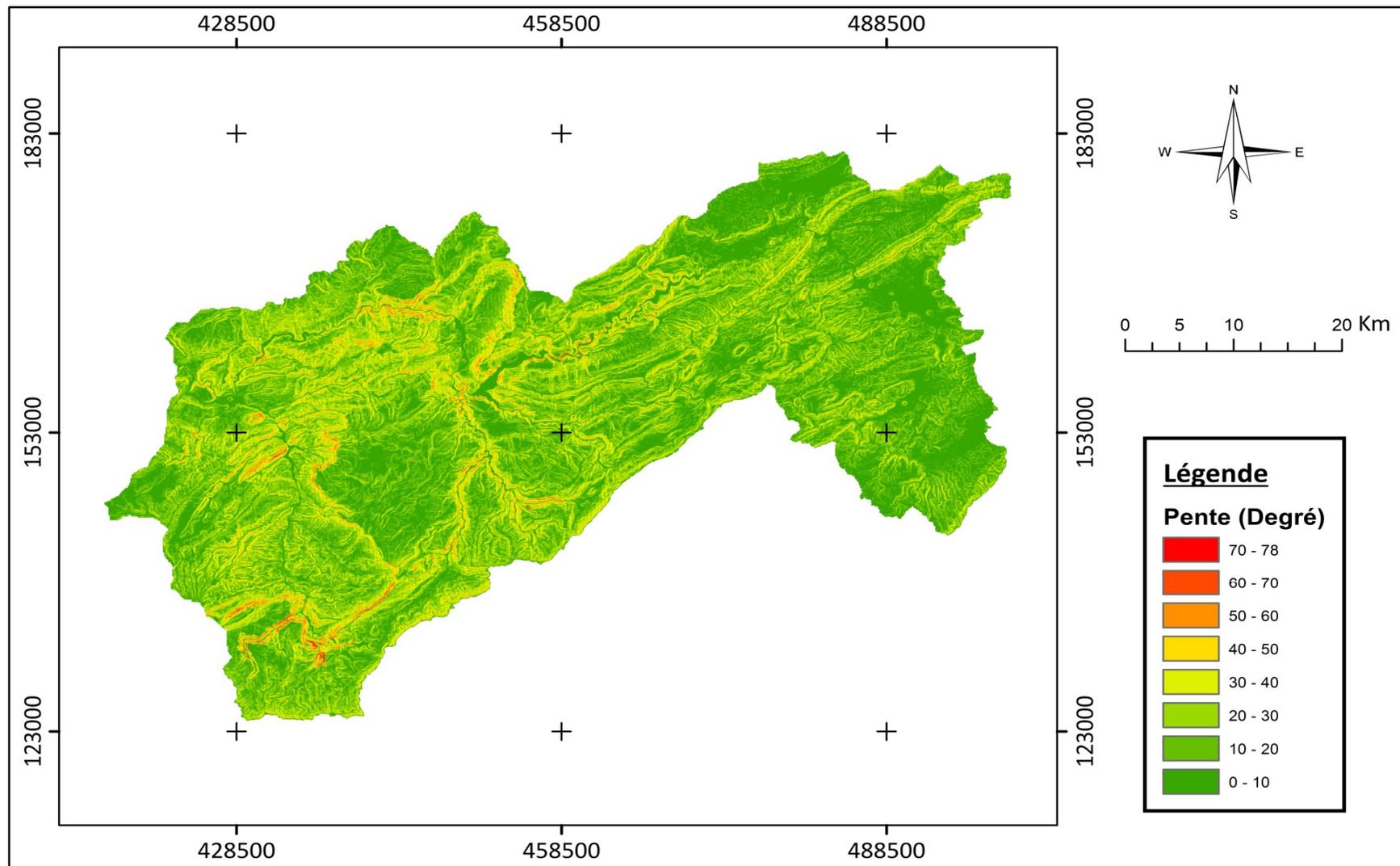


Figure 19 : La carte des pentes du bassin versant de Tillouguite

II.3 Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique, l'un des caractéristiques les plus importantes affectant le cheminement de l'eau dans un bassin, est l'ensemble hiérarchisés et structurés de cours d'eau naturel ou artificiel, permanent ou temporaire, qui assurent le drainage superficiel d'un bassin. La forme et la densité du réseau hydrographique d'un bassin est en fonction principalement de la géologie, le climat, la pente du terrain et l'activité humaine. Le réseau hydrographique est d'autant plus dense et de forme modifiée que le climat est plus humide, que les pluies sont plus abondantes, les pentes plus fortes, les formations géologiques moins perméables.

Les caractéristiques hydrographiques du bassin versant de Tillouguite sont extraites à la base du MNT à l'aide de l'outil ArcHydro, dédiée aux travaux liés à l'hydrologie.

Le réseau hydrographique du bassin Tillouguite (figure 20) est d'une longueur totale égale à 1029 km, où le cours d'eau principale est d'une longueur de l'ordre de 140 km.

II.3.1 Densité de drainage

La densité de drainage est le rapport de la longueur totale du réseau hydrographique à la surface totale du bassin versant. Elle reflète la dynamique du bassin et le type de ruissellement. Les réseaux ayant une densité élevée favorisent le drainage rapide du bassin.

La densité de drainage se calcule par la formule suivante :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Avec :

$\sum L_i$: La longueur totale du réseau en km (des cours d'eau)

A : La surface du bassin versant en km²

La densité de drainage dans le bassin versant de Tillouguite est égale à : $D_d = 0,43 \text{ km}^{-1}$

II.3.2 La pente moyenne du cours d'eau principale

La pente moyenne du cours d'eau est un paramètre qui agit d'une façon importante sur le temps de concentration. Pour une pente plus ou moins élevés, l'écoulement superficiel est plus accéléré par rapport à une pente faible ou nulle qui donne le temps suffisant pour que l'eau s'infiltrer vers sol. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente moyenne du cours d'eau consiste à diviser la différence d'altitude entre les points extrêmes du profil longitudinale du cours d'eau, par la longueur totale de celui-ci, d'où la formule suivante :

$$\alpha_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L}$$

Avec :

ΔH_{max} : Dénivellation maximale du cours d'eau en m

L : Longueur du cours d'eau principal en km

Pour le cours d'eau du bassin versant de Tillouguite : $P_{moy} = 16,82 \text{ m/km}$

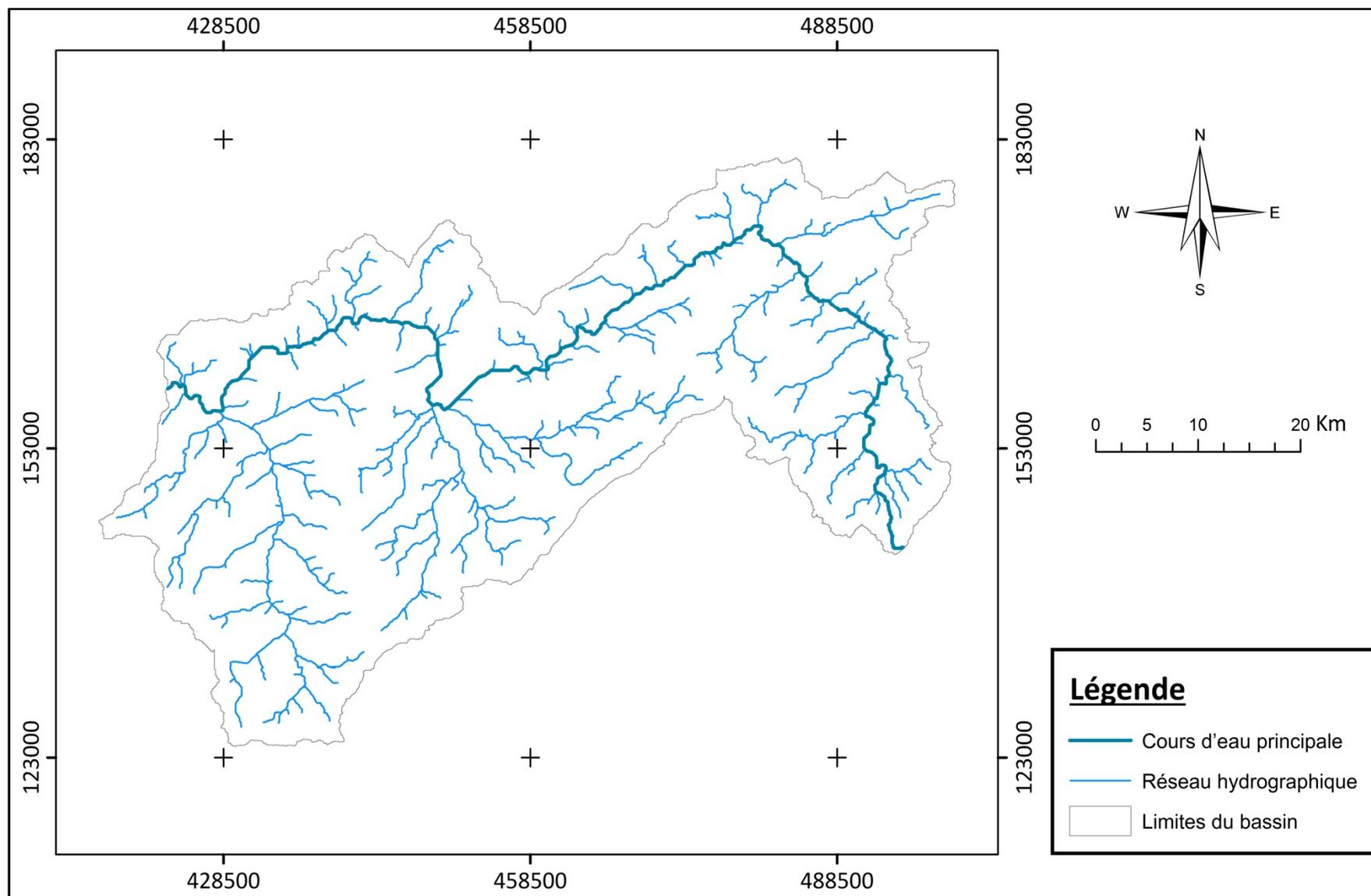


Figure 20 : La carte du réseau hydrographique du bassin versant de Tillouguite

II.4 Surface

La surface du bassin est l'aire limitée par la ligne de partage des eaux, il constitue la zone de réception des précipitations qui alimente le cours d'eau principale du bassin. Plus elle est grande plus la quantité des précipitations qu'il reçoit est importante. Elle est parmi les paramètres du bassin, ayant l'effet le plus important sur la quantité d'eau drainée.

La surface **A** du bassin versant de Tillouguite est de l'ordre de : $A = 2410 \text{ km}^2$

II.5 Périmètre

Le périmètre est la longueur en km du contour du bassin. Ce dernier commence dès l'exutoire et passe par les points les plus élevés du bassin (ligne du partage des eaux) pour atteindre l'exutoire, mais cette fois-ci de l'autre côté.

Le périmètre **P** du bassin versant de Tillouguite est : $A = 412 \text{ km}$

II.6 La forme

La forme est un élément essentiel d'un bassin versant, elle a une grande influence sur l'écoulement globale et surtout sur l'allure de l'hydrogramme (à l'exutoire du bassin versant) après une averse donnée.

Les bassins versant existent sous différentes formes allant de celle allongée vers une forme plus ou moins circulaire. Au niveau des bassins ayant une forme allongée, une goutte d'eau nécessite un temps de parcours plus important par rapport aux autres formes, ce qui diminue sa chance de rejoindre l'exutoire. En effet, on peut distinguer que pour deux bassins versant ayant une même superficie mais avec des formes différentes, une même quantité de pluie peut engendrer au niveau de l'exutoire des débits variés (faible pour la forme allongée et faible pour celle circulaire).

Il existe différentes indices qui nous permettent de caractériser ou bien déterminer la forme de notre bassin, notamment l'indice de compacité de Gravelius K_G . Ce dernier se définit comme étant le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface, d'où la formule suivante :

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

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

P : périmètre du bassin [km]

A : surface du bassin versant [km²]

Le coefficient de Gravelius K_G est supérieur à 1 lorsque la forme du bassin est allongée, et proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire.

Pour le bassin versant de Tillouguite $K_G = 2,35$. Alors, il est d'une forme allongée.

II.7 Le rectangle équivalent :

Introduit par Roche (1963), le rectangle équivalent est la transformation totalement géométrique du bassin versant en un rectangle ayant les mêmes caractéristiques physiques (Superficie, périmètre, répartition hypsométrique...). Il est particulièrement utile lors de la réalisation d'une comparaison entre des bassins en vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

La longueur et la largeur du rectangle équivalent se calculent à l'aide des deux formules suivantes :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right] \quad \text{et} \quad l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right]$$

Avec :

L : la longueur du rectangle équivalent en km

l : la largeur du rectangle équivalent en km

K_G : l'indice de compacité de Gravius

A : Superficie du bassin versant.

Pour le bassin versant de Tillouguite la longueur et la largeur du rectangle équivalent sont :

$$L = 193,55 \text{ km} \quad ; \quad l = 12,45 \text{ km}$$

II.8 Le temps de concentration :

C'est le Temps nécessaire pour une goutte d'eau, provenant de la partie du bassin la plus éloignée pour atteindre l'exutoire. Il représente généralement la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. C'est un paramètre très important qui traduit le comportement du bassin lors et après une averse continue.

Le temps de concentration T_c se calcule par la formule suivante :

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

Avec :

L : Longueur du rectangle équivalent en km

H_{min} : Altitude minimale du bassin en m (l'exutoire)

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin en m

A : Surface du bassin en km.

Le temps de concentration du bassin versant de Tillouguite est : $T_c = 16h 56min$

Le tableau ci-dessous récapitule tous les caractéristiques physiographique du bassin versant de Tillouguite abordés ci-avant.

	<i>Bassin de Tillouguite</i>
<i>Surface (km²)</i>	2410
<i>Périmètre (km)</i>	412
<i>Altitudes importantes (m)</i>	2200 – 2600
<i>H_{min} (m)</i>	1073
<i>H_{max} (m)</i>	3428
<i>H_{moy} (m)</i>	2363,87
<i>Altitude médiane</i>	1420
<i>Pentes importantes (Degré)</i>	10 – 20
<i>Indice de compacité</i>	2,35
<i>Longueur du rectangle équivalente (km)</i>	193,55
<i>Largeur du rectangle équivalente (km)</i>	12,45
<i>la longueur totale du réseau hydrographique (km)</i>	1029,09
<i>Longueur du cours d'eau principale (km)</i>	140
<i>la densité de drainage Km⁻¹</i>	0,43
<i>la pente moyenne du cours d'eau (%)</i>	16,85
<i>Temps de concentration</i>	16h 56min

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des caractéristiques physiographiques du bassin versant de Tillouguite

Chapitre III : Modèles de géo-traitement et spatialisation de la pluie à l'échelle du bassin versant de Tillouguite

III.1 Les Modèles de géotraitement créés

Les données pluviométriques utilisées pour la spatialisation, sont celles enregistrées pendant la période 2000 à 2005 au niveau des quatre stations Tillouguite, Zaouit Ahençal, Ait Ouchène et la station de Tizi N'Isly (*Tableau 1*).

Les trois méthodes de spatialisation (krigeage, IDW et Polygones de Thiessen), appliquées sous ArcGIS, demandent un jeu de données d'entrée de type ponctuelle pour qu'elles soient exécutées. À partir de ces données, chacune des méthodes selon le principe de fonctionnement qu'elle adopte, génère des cartes d'estimation sous forme de tranches (Krigeage et IDW) ou bien des zones d'influence (Polygones de Thiessen).

L'application de ces méthodes ne se limite pas seulement à l'outil qui permet la création des cartes d'estimation, mais elle comprend aussi d'autres outils qui aident à l'extraction et à la manipulation des données estimées, notamment l'outil "Clip", "Extract By Mask", "Zonal Statistics As Table" et l'outil "Table To dBase".

III.1.1 *Modèle pour le Krigeage et IDW*

Pour automatiser l'application des méthodes de spatialisation, un modèle comprenant l'ensemble des outils de base cités ci-dessus avec d'autres outils complémentaires a été créé (*Figure 21*).

Le modèle proposé fonctionne de la manière suivante :

Pour que le modèle soit correctement exécuté, deux données d'entrées sont nécessaires. La première c'est le "shapfile" qui correspond aux sites mesurés (stations pluviométriques), c'est celui qui suit tous le flux du processus. La deuxième c'est le "shapefile" qui représente les limites de la zone d'intérêt (bassin versant de Tillouguite), qui ne s'engage dans le processus que lorsqu'il est nécessaire.

La première opération qui s'effectue lors de l'exécution du modèle, c'est la mise à jour ou bien la définition du système de coordonnées pour les deux données d'entrée, à l'aide de l'outil "Define projection". Ensuite, l'outil relatif à la spatialisation "Spatialization tool" (Krigeage, IDW) reçoit le jeu de données ponctuelles projetées qui contient les valeurs (Z) à spatialiser, sur lequel il se base pour assurer l'estimation des sites non mesurés à travers l'élaboration des cartes d'estimation. Dans la plus part des cas, les cartes produites ne comprennent pas l'ensemble de la zone d'intérêt, mais seulement la partie où les sites mesurés sont regroupés. Pour faire face à ce problème on a utilisé le paramètre d'environnement "Extent" (le connecteur en trait discontinu), qui demande de la donnée de sortie d'être alignée par rapport à une étendue de forme à spécifier ("Study area polygon"). L'utilisation de ce paramètre permet que la carte produite par l'outil de

spatialisation, couvre entièrement la zone d'étude, mais cette couverture ne suit pas exactement la géométrie de l'étendue spécifiée, plutôt elle est sous forme d'un rectangle qui englobe cette dernière. Afin d'éliminer les parties qui existent à l'extérieur de la zone d'intérêt, on a utilisé l'outil "Extract By Mask" qui permet d'extraire les pixels d'un raster à l'aide d'un masque qu'on peut définir (Study area polygon).

Après l'extraction de la zone d'intérêt, l'outil "Zonal Statistics As Table" intervient dans le processus pour calculer les statistiques (Min, Max, Surface...) de la carte d'estimation, en fonction du "shapefile" qui représente les limites de la zone d'intérêt (Study area polygon).

En fin, l'outil "Table to dBase" est utilisé pour exporter La table résultante de l'outil "Zonal Statistics As Table", sous forme d'un fichier ".dbf" exploitable sous Excel.

Le résultat obtenu à travers ce modèle est sous forme d'une carte d'estimation (Figure 23 et 24) des pluies et une table de statistique à partir de laquelle on extrait la pluie moyenne de notre bassin.

Le modèle cité ci-avant ne produit qu'une seule carte d'estimation (avec les statistiques) à la fois. Concernant le cas de la spatialisation des pluies mensuelles, en utilisant les deux méthodes de spatialisation Keigeage et IDW, une carte d'estimation doit être créée pour chaque mois. En tenant compte de la durée d'étude, on constate qu'une centaine de cartes sont à élaborer par chacune des deux méthodes. Dans ce cas-là, l'utilisation d'un simple modèle reste insuffisante.

A cet effet, on fait recours à l'outil d'itération "Liste of Values" (paragraphe I.3.3.3.), cet outil donne la possibilité de lister l'ensemble des mois comme des données d'entrée, ce qui permet au modèle de se régénérer automatiquement pour chacun des mois jusqu'à la fin de la liste précisée. Dans ce cas-là, l'élément à définir comme liste de valeur c'est la variable "Z value field" qui correspond aux valeurs de pluie échantillonnées en chaque mois.

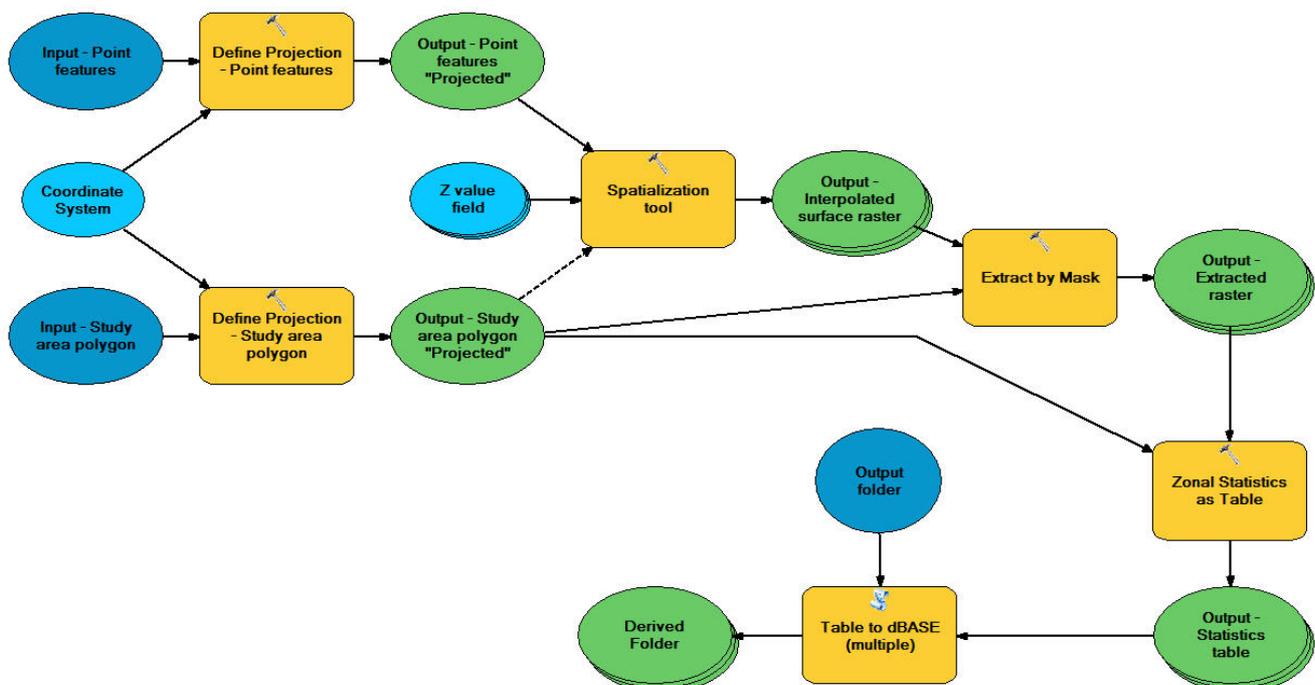


Figure 21 : Modèle pour l'application des méthodes de spatialisation (Krigage et IDW)

III.1.2 Modèle pour les polygones de Thiessen

Le modèle relatif à l'application de la spatialisation par Polygones de Thiessen (Figure 22), comprend la plus part des outils utilisés dans le modèle précédent (krigeage et IDW). Mais, Il y a deux points de différence qui existent, un au niveau de l'outil utilisé pour la spatialisation et l'autre au niveau de l'outil permettant de l'extraction de la zone d'intérêt.

Après la définition du système de coordonnées, l'outil "Create Thiessen Polygons" se base sur le jeu de donnée ponctuel projeté pour créer des zones d'influence pour chacun des sites d'échantillonnage (Stations pluviométriques). De même que pour le modèle cité ci-dessus, le paramètre d'environnement "Extent" est utilisé aussi pour induire les zones résultantes à englober la zone d'intérêt. Et pour éliminer tous ce qui est hors de cette dernière on a utilisé cette fois-ci l'outil "Clip" relatif au découpage des entités de type vecteur, vue que le résultat de l'outil de spatialisation est sous forme de polygones. Concernant La partie restante du modèle elle est à cent pour cent similaire à celle du modèle précédent.

Le modèle des polygones de Thiessen donne comme résultat, une carte qui représente le découpage de la zone d'intérêt en zones d'influences (Figure 25) et une table de statistiques contenant les caractéristiques de chacune des zones (Tableau 3).

L'application de la méthode des Polygones de Thiessen sous ArcGIS pour la spatialisation des pluies mensuelles ne nécessite pas l'utilisation d'un itérateur, car une seule carte est applicable pour tous les mois.

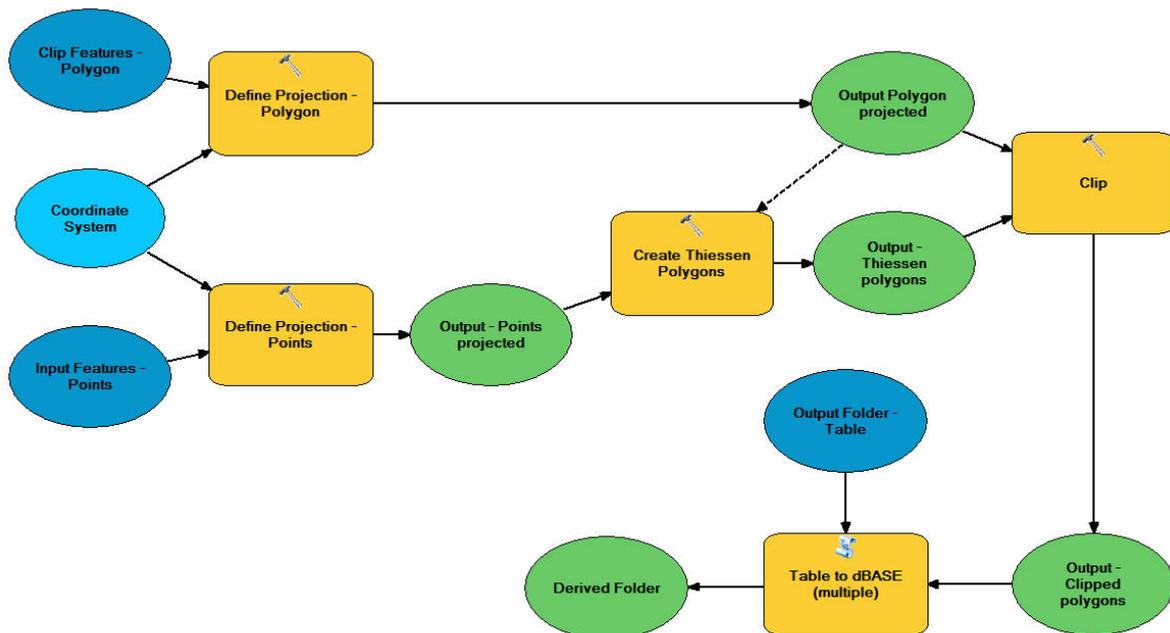


Figure 22 : Modèle pour l'application de la méthode des polygones de Thiessen

III.2 Résultats des méthodes de spatialisation

Dans les parties suivantes on va présenter les résultats des méthodes de spatialisation utilisées pour l'estimation de la pluie moyenne sur le bassin de Tillouguit.

Les modèles décrites ci-dessus, nous ont permis d'automatiser les processus de spatialisation des pluies. Nous avons eu en sortie de chaque modèle les cartes des pluies de chaque mois depuis septembre 2000 à Aout 2005.

III.2.1 Krigeage et IDW

Les figures 23 et 24 montrent les cartes d'estimation des pluies sur le bassin versant de Tillouguite, obtenues respectivement, par la méthode Krigeage (ordinaire) et la méthode IDW. Ces cartes sont relatives au mois de février et au mois de juin 2004.

D'abord, on constate globalement que les deux méthodes (krigeage et IDW) donnent des intervalles de valeurs estimées presque similaires (pour le mois de juin, IDW donne un intervalle de 7 à 18,99 mm et le krigeage donne un intervalle de 6,87 à 18,98 mm), sauf qu'il y a une légère différence dans la répartition des sous intervalles d'une méthode à l'autre.

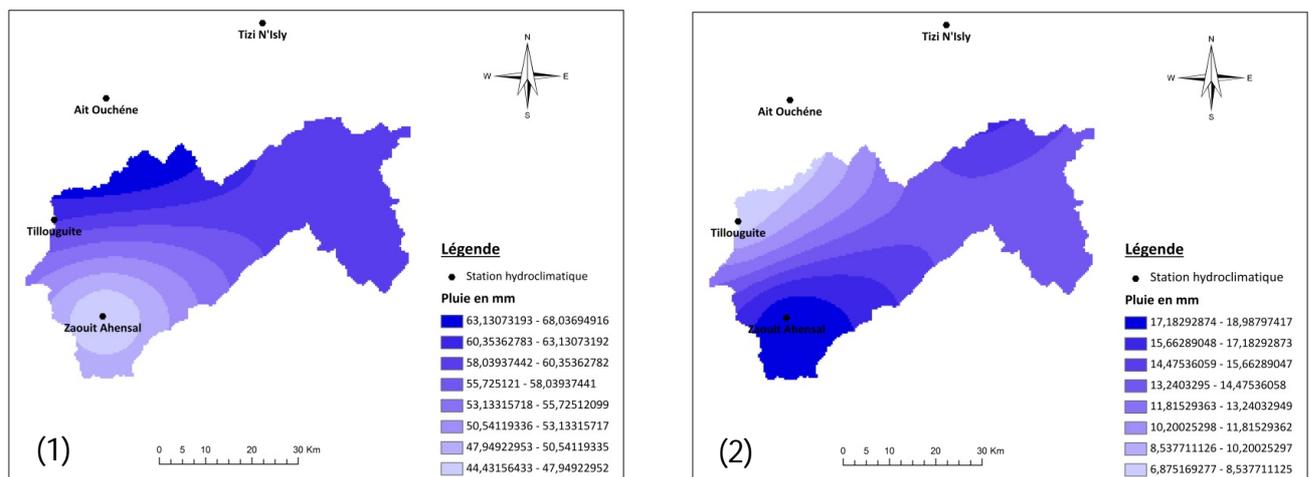


Figure 24 : La spatialisation des pluies par la méthode krigeage pour le mois de février (1) et juin (2) (2004 - 2005)

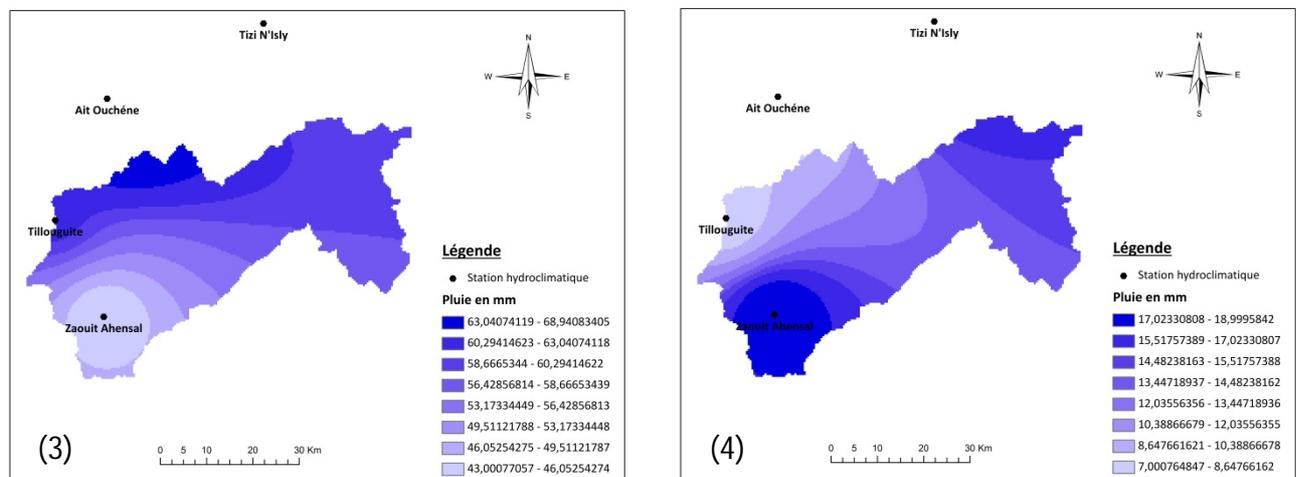


Figure 23 : La spatialisation des pluies par la méthode IDW pour le mois de février (3) et juin (4) (2004 - 2005)

III.2.2 Les Polygones de Thiessen

La spatialisation par la méthode des polygones de Thiessen principalement basée sur la configuration géométrique des stations pluviométrique. Elle consiste à attribuer une zone d'influence pour chacune de ces stations.

Pour le bassin versant de Tillouguite, quatre stations (*paragraphe 1.5.2*) sont utilisée pour effectuer l'opération de la spatialisation, en conséquence quatre zone d'influence sont définit :

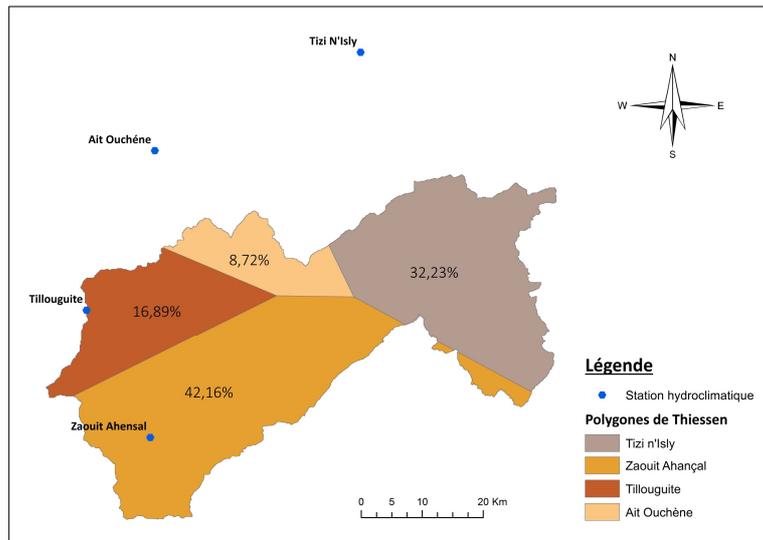


Figure 25 : Découpage du bassin versant de Tillouguite en zone d'influence par la méthode des polygones de Thiessen

Les caractéristiques de chaque zone obtenue, sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Zone	Nom de la Station	Périmètre (km²)	Surface (km²)	Surface (%)
1	Zaouit Ahançal	234,93	1015,95	42,16
2	Tizi n'Isly	179,55	776,85	32,23
3	Tillouguite	112,06	407,13	16,89
4	Ait Ouchène	97,73	210,03	8,72

Tableau 3 : Les caractéristique des zones d'influences obtenues par la méthode des polygones de Thiessen

D'après le découpage obtenu, la pluie moyenne sur le bassin versant de Tillouguite est calculée à l'aide de la moyenne pondérée par le poids de chaque station :

$$P_{moy} = P_{Zaouit\ Ahançal} \times 0,4216 + P_{Tizi\ n'Isly} \times 0,3223 + P_{Tillouguite} \times 0,1689 + P_{Ait\ Ouchène} \times 0,872$$

III.2.3 Gradient des précipitations

Pour appliquer cette méthode sur le bassin versant de Tillouguite, on s'est appuyé sur la carte des altitudes du bassin, découpée en tranches à pas de 400m (courbe hypsométrique de la *figure 14*).

Chaque tranche est dotée d'une hauteur de pluie en prenant comme référence les valeurs enregistrées au niveau de la station la plus proche, de telle manière que pour chaque 100 m de différence d'altitude (entre la tranche et la station de référence), la pluie augmente avec un gradient de 0,03 mm.

Le gradient utilisé est calculé à partir de données enregistrées au niveau de la station d'Ifre (1525 m) et de Mgoun (3840 m) situé dans le bassin versant de Mgoun. L'utilisation des données de ces deux stations a été imposée par le fait qu'au niveau du bassin versant de Tillouguite on ne dispose pas de mesures de précipitations dans les hautes altitudes qui peuvent nous permettre de calculer le gradient des précipitations. Ces données sont obtenues à partir du travail de C. de Jong et al, 2007.

Après le calcul de la pluie au niveau de chaque tranche, la pluie moyenne sur le bassin versant de Tillouguite est obtenue par la moyenne pondérée par la surface de chaque tranche d'altitude (voir courbe hypsométrique de la *figure 14*) :

$$P_{moy} = P_{Tranche1} \times 0,0273 + P_{Tranche2} \times 0,801 + \dots + P_{Tranche6} \times 0,098$$

III.3 Etudes comparative des méthodes

Dans cette partie on va évaluer les différentes méthodes de spatialisation utilisées et par la suite déterminer laquelle entre eux est la plus adapté à notre contexte. À cet effet, on va utiliser dans un premier temps une évaluation basée sur une comparaison graphique. Ensuite on va utiliser le coefficient de corrélation R pour une comparaison quantitative.

III.3.1 Lien pluie-pluie

Le tableau ci-dessous représente la pluie moyenne estimée sur le bassin versant de Tillouguite, par les différentes méthodes pour la saison 2004 – 2005 :

	Précipitation Moyenne (mm)				
	<i>Moyenne arithmétique</i>	<i>Polygone de Thiessen</i>	<i>Gradient des précipitations</i>	<i>IDW</i>	<i>Krigeage</i>
Septembre	7,25	7,67	7,38	6,63	7,00
Octobre	44,75	42,59	51,94	42,90	43,28
Novembre	57,50	58,91	84,26	57,77	57,55
Décembre	41,50	37,31	40,44	39,39	40,49
Janvier	1,75	1,48	0,05	1,42	1,39
Février	59,50	53,52	63,92	56,23	56,69
Mars	23,50	20,89	16,55	21,03	21,67
Avril	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mai	0,75	0,66	0,05	0,71	0,74
Juin	13,25	16,48	27,77	13,92	13,98
Juillet	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Août	14,00	12,80	25,01	14,45	14,50

Tableau 4 : Pluie moyenne estimée sur le bassin versant de Tillouguite par les cinq méthodes utilisées (2004 – 2005)

D'après la figure 26 qui représente les pluies moyennes estimées par les cinq méthodes utilisées, en fonction de la durée d'étude (2000 – 2005), on constate que les résultats issus de la moyenne arithmétique, les polygones de Thiessen, IDW et le krigeage sont presque similaires entre eux, à l'exception de certaines petites différences au niveau de quelques mois, où certaines méthodes marquent des valeurs inférieures que d'autres marquent des valeurs supérieures.

Quant à la méthode du Gradient des précipitations, elle est plus au moins proche aux autres, mais elle présente dans la plus part du temps des valeurs supérieures que les autres, sauf au niveau de quelques mois où ces valeurs sont inférieures ou bien égales à zéro.

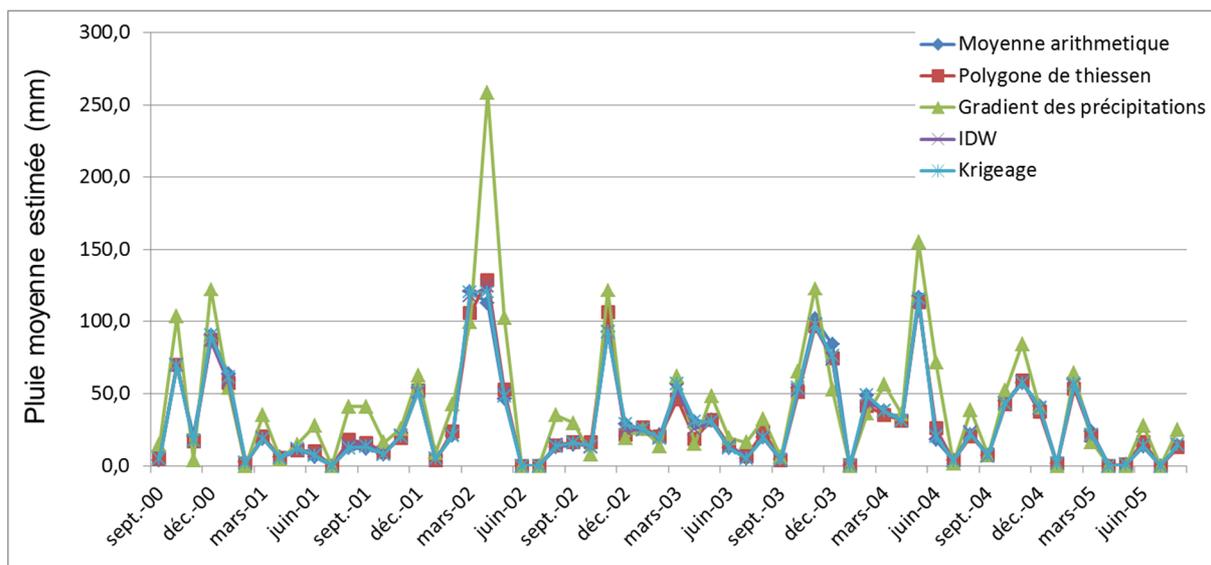


Figure 26 : La pluie moyenne estimée sur le bassin versant de Tillouguite par les cinq méthodes de spatialisation utilisées (2000 – 2005)

Afin de bien cerner cette similarité entre les résultats des différentes méthodes, une matrice de corrélation, qui mesure le lien de dépendance entre chaque paire de méthodes, a été élaboré.

Le coefficient de corrélation est un critère d'évaluation qui mesure la relation de dépendance entre deux variables, celui-ci est compris entre -1 et 1 (1 : corrélation positive parfaite, 0 : pas de corrélation, -1 : corrélation négative).

La formule permettant de calculer le coefficient de corrélation "R" est la suivante :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Avec :

- x : représente une valeur de la première distribution
- \bar{x} : représente la moyenne de la première distribution
- y : représente une valeur de la deuxième distribution
- \bar{y} : représente la moyenne de la deuxième distribution

D'après la matrice de corrélation (*Tableau 5*) on distingue clairement qu'il y a une forte dépendance des quatre méthodes entre elles, où les coefficients de corrélation R sont comprises entre 0,99 et 1, on parle ici sur la méthode du Moyenne arithmétique, des polygones de Thiessen, krigeage et IDW. À titre d'exemple, par rapport à la méthode de la moyenne arithmétique le coefficient R est de 0,99 avec les polygones de Thiessen, 1 avec le krigeage et 1 avec IDW. En effet, on peut conclure que dans le cadre d'un réseau de mesure de faible densité, la méthode de la moyenne arithmétique et des polygones de Thiessen, demeurent avec les mêmes performances que les méthodes krigeage et IDW.

La méthode du gradient des précipitations possède aussi des coefficients forts variant entre 0,87 (avec la moyenne arithmétique) et 0,92 (avec les polygones de Thiessen). Cependant, On distingue qu'à l'exception de la méthode du gradient, la méthode de la moyenne arithmétique, polygones de Thiessen, krigeage et IDW présentent des valeurs de corrélation assez identiques entre elles.

	<i>Moyenne arithmétique</i>	<i>Polygones de Thiessen</i>	<i>Gradient des précipitations</i>	<i>IDW</i>	<i>Krigeage</i>
<i>Moyenne arithmétique</i>	1,00				
<i>Polygones de Thiessen</i>	0,99	1,00			
<i>Gradient des précipitations</i>	0,87	0,92	1,00		
<i>IDW</i>	1,00	1,00	0,91	1,00	
<i>Krigeage</i>	1,00	0,99	0,89	1,00	1,00

Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les différentes méthodes de spatialisation sur tous les mois de la durée 2000 – 2005

III.3.2 Lien Pluie-Débit

En plus de la comparaison des différentes méthodes, la matrice de corrélation permet également de mettre en évidence la relation de dépendance entre la pluie moyenne estimée par chacune des cinq méthodes de spatialisation et le débit mensuel observé au niveau de l'exutoire du bassin (station de Tillouguite).

	<i>Moyenne arithmétique</i>	<i>Polygone de Thiessen</i>	<i>Gradient des précipitations</i>	<i>IDW</i>	<i>Krigeage</i>	<i>Débit (m3/s)</i>
<i>Débit (m3/s)</i>	0,40	0,40	0,43	0,40	0,41	1,00

Tableau 6 : Matrice de corrélation entre les pluies moyennes estimées par les cinq méthodes et le débit mensuel sur sur tous les mois la durée 2000 - 2005

D'après le Tableau 6, on remarque que tous les méthodes ont des coefficients de corrélation faible. Pour la méthode de la moyenne arithmétique, les Polygones de Thiessen et IDW $R = 0,40$ et pour la méthode krigeage $R = 0,41$ tandis que la méthode du gradient des précipitations possède le coefficient le plus élevé entre eux $R = 0,43$. La faiblesse de ces coefficients peut-être La faiblesse de ces coefficients peut-être due à différents facteurs : 1) Répartition spatiales faible des stations de mesures des pluies à l'échelle du bassin versant, 2) Apport non mesuré des neiges qui influence l'écoulement à l'exutoire pendant la période de fonte et 3) Pertes par des processus d'évapotranspiration et d'infiltration.

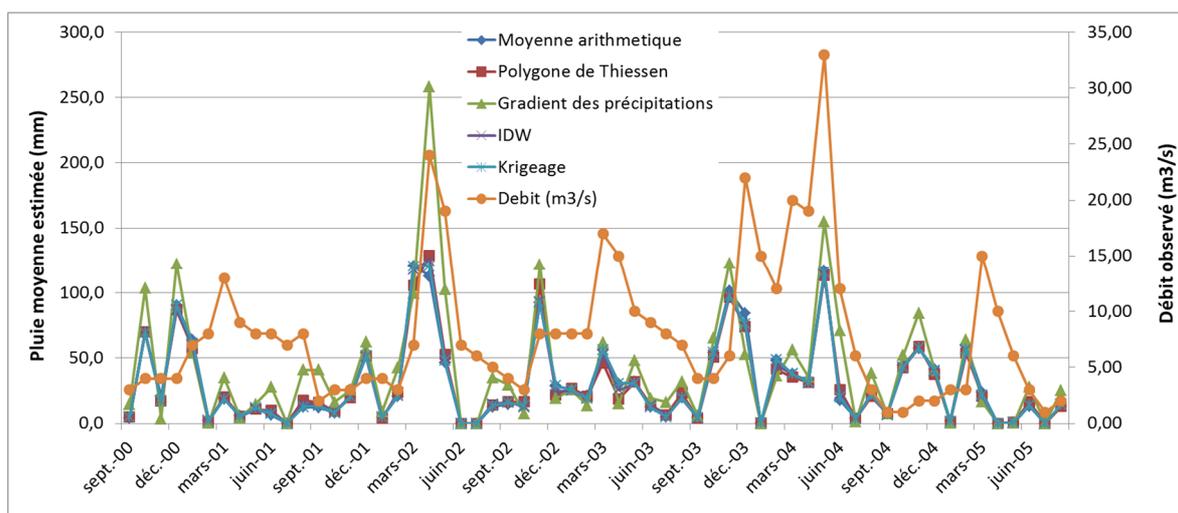


Figure 27 : La pluie moyenne estimée par les cinq méthodes et le débit mensuel observé sur la durée 2000 - 2005

A ce stade là on ne peut pas dire que les pluies estimées ne sont pas liées aux débits. Mais on va essayer d'améliorer ces coefficients tout en élaborant une nouvelle matrice de corrélation, qui va être cette fois-ci limitée seulement sur les mois les plus pluvieux où la contribution dans l'écoulement à l'exutoire est principalement assurée par les pluies. Les mois choisis sont janvier, février, mars, avril et mai de la durée 2000 à 2005.

	Moyenne arithmétique	Polygones de Thiessen	Gradient des précipitations	IDW	Krigeage	Débit (m^3/s)
Débit (m^3/s)	0,51	0,55	0,61	0,53	0,52	1,00

Tableau 7 : Matrice de corrélation entre les pluies moyenne estimées et le débit mensuel sur les mois pluvieux de la durée 2000 – 2005

D'après le tableau 7, on constate qu'après l'élimination des mois où le débit est susceptible d'être influencé par la fonte des neiges, les coefficients de corrélation ont connus une certaine augmentation. Cela support l'hypothèse de la contribution de la fonte des neiges dans l'écoulement à l'exutoire. Mais ces valeurs restent encore inférieures de l'optimales, ce qui signifie que cet écoulement n'interagit pas seulement avec les précipitations, mais aussi avec d'autres phénomènes, notamment la perte par l'évapotranspiration et par infiltration.

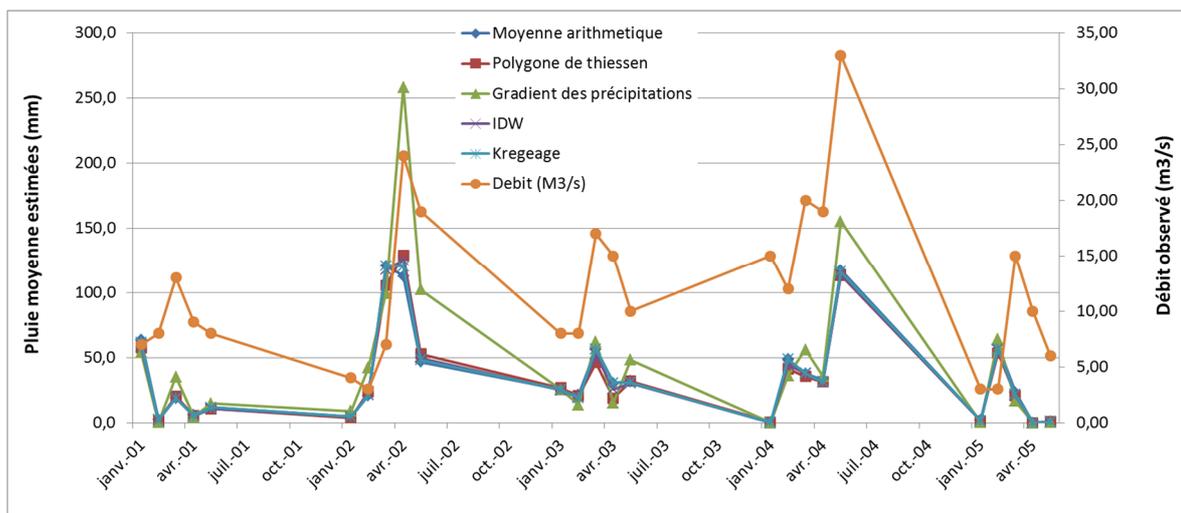


Figure 28 : La pluie moyenne estimée et le débit mensuel observé sur les mois pluvieux de la durée 2000 – 2005

En se basant sur les coefficients obtenus par la matrice de corrélation (*Tableau 7*), on peut dire que la méthode du gradient des précipitations ($R = 0,61$), c'est celle qui donne des signes d'adaptation pour la spatialisation des pluies au niveau du bassin versant de Tillouguite.

Conclusion et Perspectives

L'application ModelBuilder constitue un outil très important qui permet d'automatiser les processus de géo-traitement, à travers la création des modèles de traitement qui assurent l'enchaînement de plusieurs actions en une seule opération. Dans ce travail quatre modèles ont été créés, dont deux entre eux permet l'extraction des caractéristiques physiques (altitudes et pentes) de la zone d'étude, et les deux autres pour l'application des méthodes de spatialisation (krigeage - IDW et polygones de Thiessen).

L'analyse physiographique de la zone d'étude, a pu montrer que cette dernière, se caractérise principalement par des altitudes élevées, dont les dominants sont celles comprises entre 2200 et 3000 m, des pentes raides où les plus présents sont de 0 à 30°, une densité de drainage de l'ordre de $0,43 \text{ km}^{-1}$ et un temps de concentration égale à 16h : 56min.

En termes de la spatialisation, une analyse de corrélation entre les pluies moyennes estimés par chacune des méthodes et le débit mesuré au niveau de la station de Tillouguite, sur la durée de 2000 à 2005, a montré qu'il y a une faible dépendance entre les pluies estimés et le débit mesuré avec des coefficients de corrélation qui varient entre 0,4 et 0,43. Une deuxième analyse a été menée sur la même durée, mais seulement sur les mois les plus arrosés, a montré une certaine augmentation au niveau des coefficients. Cette deuxième analyse nous a permis dans un premier temps, de s'assurer qu'il y a une contribution de la fonte des neiges dans le débit du cours d'eau, et dans un deuxième lieu de distinguer que la méthode qui donne des signes d'adaptation pour la spatialisation des pluies à l'échelle du bassin versant de Tillouguite, c'est celle du gradient des précipitations, avec un coefficient de corrélation de 0,61. Mais, ce dernier nécessite encore d'amélioration pour qu'il s'approche de plus en plus de l'optimale.

Dans une perspective d'amélioration du coefficient obtenu, il est nécessaire de tenir en compte l'ensemble des facteurs qui peuvent influencer, dans un premier lieu sur la répartition des pluies sur la zone d'étude notamment les types d'expositions, et dans un deuxième lieu sur le débit mesuré à l'exutoire, à savoir, l'infiltration, l'évapotranspiration et l'équivalent en eau de la fonte des neiges. Cela implique l'utilisation d'un ensemble de techniques et outils comme la télédétection et les modèles hydrologiques.

Bibliographie

ANCTIL, F. ROUSSELLE, J. LAUZON, N (2005). Hydrologie : cheminement de l'eau. s.l : presses internationales polytechnique et universitaires romandes. 317 p – (s.c)

CHAPONNIERE, A (2005). Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Thèse de Doctorat : Hydrologie et télédétection. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 181 p

DE JONG, C. CAPPY, S. and. FINCKH, M. FUNK, D (2007). A transdisciplinary analysis of water problems in the mountainous karst areas of Morocco. Engineering Geology. 18 p

DESPAGNE, W (2006). Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2d/3d des données spatiales. Mémoire de Master, Vannes : Université de Bretagne Sud Institut Universitaire Professionnalisé Informatique et Statistique, 67 p

ESRI (2011). Arc Hydro Tools – Tutorial, Version 2.0

FRANCOU, B. VINCENT, C (2007). Les glaciers à l'épreuve du climat. s.l : IRD éditions. 317 p – (s.c)

GUILLOT, G (2004). Introduction à la géostatistique. Cours. Institut National Agronomique de Paris-Grignon, 28 p

HAZIZA, E (2003). Modélisation mensuelle pluie-débit/ apports de la spatialisation - cas des données de sols. Diplôme d'Etudes Approfondies : sciences de l'eau dans l'environnement continental. Montpellier : Université Montpellier II Faculté Des Sciences Et Techniques du Languedoc, 87p.

MUSY, A. HIGY, C (2004). Hydrologie : une science de la nature. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. 314 p – (Gérer l'environnement)

RIAD, S (2003). Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse de doctorat : hydrologie de surface. Université Ibnou Zohr d'Agadir, 154p.

ROCHE, P-A. MIQUEL, J. GAUME, E (2012). Hydrologie quantitative: processus, modèles et aide à la décision. France : springer science & business. 617 p – (s.c)

YONIOD, F (1973). Étude hydrologique de l'Oum er R'bia (Maroc). Cah. O.R.S.T.O.M., ser. Hydrol., vol. X, (n° 2). Pp 153 – 170

Webographie

<http://www.abhoer.ma/index.cfm?gen=true&id=28>

http://www.water.gov.ma/index.cfm?gen=true&id=13&ID_PAGE=44

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//002w0000007v000000>