



Année Universitaire : 2016-2017



Licence Sciences et Techniques : Géoresources et Environnement

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Licence Sciences et Techniques

**Etude de délimitation des zones inondables dans la région de Senhaja,  
province de Sefrou (Maroc)**

**Présenté par:**

**Khawla EL HAMROUCH**

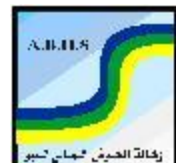
**Encadré par:**

**Pr. Faiza BENJELLOUN FST-Fès  
Ing. Abdellah BOURAK, ABHS- Fès**

**Soutenu Le 12 Juin 2017, devant le jury composé de:**

**Pr. Faiza BENJELLOUN FST-Fès  
Pr. Abderrahim LAHRACH FST-Fès  
Pr. Abdel-Ali CHAOUNI FST-Fès  
Pr. Lahcen BENAABIDATE FST-Fès**

**Stage effectué à : ABHS, Fès**





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

**Khawla EL HAMROUCH**

**Année Universitaire : 2016/2017**

**Titre : Etude de délimitation des zones inondables dans la région de Senhaja, province de Sefrou (Maroc)**

### **Résumé**

Dans un tel pays à climat semi aride comme le Maroc, et comme on sait, l'aridité favorise l'apparition de crues violentes, cependant au cours des épisodes pluvieux les zones réceptrices sont souvent

risquées par les inondations qui menacent la vie humaine ainsi que leurs secteurs.

En effet, la gestion de ce risque devient de plus en plus une nécessité qui doit inclure tous les moyens disponibles possibles.

Ce projet dont l'objectif principale est la délimitation des zones inondables dans le centre de Senhaja.

Le présent rapport comprend deux parties ; qui sont les suivant :

- La première partie est dédié à la collecte de l'ensemble des données disponibles sur la region.
- La deuxième partie est consacrée à la méthodologie suivie pour l'étude des crues et aux applications numériques.

Mots clés : **Senhaja, inondation, ArcGis, Bassin versant.**

## Remerciement

Tout un travail dans la vie nécessite d'abord la bénédiction d'ALLAH et ensuite l'aide et le support de plusieurs personnes. Je tiens donc à le remercier en premier degré ensuite à adresser ma reconnaissance à toute personne qui m'a aidé de loin ou de près afin de réaliser ce travail.

Tout d'abord, j'adresse mon grand amour à mes parents ; ma mère pour sa tendresse et son sacrifice et mes sœurs.

En suite je tiens à remercier très vivement mon encadreur du mémoire, Monsieur Abderrahim LAHRACH Professeur à la FST de Fès, pour ses qualités humaines et scientifiques, je ne pourrai jamais oublier sa gentillesse, sa générosité, son esprit de recherche et ses commentaires efficaces. Un grand merci de m'avoir donné la chance de réaliser ce modeste travail.

Puis, je remercie les membres de jury, pour le soutien et l'intérêt qu'ils ont portés à ce travail.

Après, mes remerciements vont également à mon encadreur Monsieur Abdellah BOURAK, ingénieur à l'agence Hydraulique de Sebou, pour son aide précieuse et sa disponibilité sans faille.

Et en fin, je remercie de tout mon cœur l'ensemble de mes professeurs de l'option Géorressources et Environnement, Département de Géologie.

## Liste des figures

Figure 1 : Carte des sites inondables dans le bassin du Sebou (ABHS 2013) .....	8
Figure 2: Inondation de septembre 1950 au niveau du quartier El Mellah.....	9
Figure 3 : Carte de localisation de la zone de Senhaja.....	12
Figure 4: variation moyenne annuelles des precipitations à la station Seferou periode 1950-2005.....	14
Figure 5: bassin versant de Senhaja .....	16
Figure 6: 1les types des bassins versant selon l'indice de compacité.....	19
Figure 7: la forme de bassin de Senhaja .....	20
Figure 8: les classes d'altitudes et leurs surfaces.....	21
Figure 9: Interprétation de la courbe hypsométrique (Musy, 2005) .....	22
Figure 10: Courbe hypsométrique de BV de Senhaja .....	23
Figure 11: Réctangle équivalent du bassin de Senhaja.....	25
Figure 12: Carte de pentes du bassin versant de Senhaja .....	27

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Historique des inondations dans le bassin du Sebou.....	11
Tableau 2:Hypsométrie du bassin versant de Senhaja .....	21
Tableau 3: Valeurs de calcul de la distance des courbes de niveau .....	25
Tableau 4: classe des pentes.....	26
Tableau 5: résultats de la méthode rationnelle.....	31
Tableau 6: résultats du Formule de Fuller II .....	32
Tableau 7: Pluis moyennes annuelles .....	32
Tableau 8: résultats de Formule de Mallet Gautier .....	34
Tableau 9: résultats de Formule de HAZAN - LAZAREVICK .....	34

## Table de matière

Remerciement.....	1
<b>I. Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>II. La première partie : Généralités .....</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre1: Problématique des inondations .....</b>	<b>7</b>
1. <b>Problématique des inondations au Maroc .....</b>	<b>7</b>
2. Problématique des inondations dans Sefrou .....	8
➤ Inondation du 25/09/1950 .....	8
➤ <i>Les inondations d'Août 1992</i> .....	9
➤ <i>Les inondations de Septembre 1994</i> .....	9
3. <b>Présentation de Sebou.....</b>	<b>10</b>
Chapitre2 : Cadre général de la zone d'étude .....	11
1) <b>Géographie.....</b>	<b>11</b>
2) <b>Relief.....</b>	<b>12</b>
3) <b>Cadre géologique régional.....</b>	<b>13</b>
4) <b>Géologie de la zone de projet.....</b>	<b>13</b>
5) <b>Climatologie.....</b>	<b>14</b>
6) <b>Hydrologie.....</b>	<b>14</b>
<b>III. La deuxième partie : études des crues.....</b>	<b>15</b>
1. <b>Délimitation des bassins versants .....</b>	<b>15</b>
2. <b>La détermination des caractéristiques géométriques du bassin .....</b>	<b>17</b>
3. <b>Calcul du temps de concentration.....</b>	<b>17</b>
➤ Giandotti.....	17
➤ Ventura.....	18
➤ Kirpich .....	18
➤ Van Te Chow .....	18
4. <b>Applications .....</b>	<b>18</b>
➤ Surface .....	18
➤ Périmètre .....	18
➤ Indice de compacité de Gravelius .....	19
➤ Hypsométrie du bassin versant.....	20
➤ Les altitudes caractéristiques.....	23
□ Les altitudes maximales et minimales .....	23
□ L'altitude moyenne.....	23

➤	Rectangle équivalent .....	24
➤	Les indices de pente .....	25
➤	Pente moyenne du bassin .....	28
➤	Indice de pente classique.....	28
➤	Indice de pente globale.....	28
➤	La dénivelée spécifique.....	29
<b>5.</b>	<b>Résultats</b> .....	<b>29</b>
<b>6.</b>	<b>Estimation du débit de pointe par des formules régionales</b> .....	<b>30</b>
➤	Formule Rationnelle.....	30
➤	Formule de Fuller II .....	31
➤	Formule de Mallet Gautier .....	32
➤	Formule de HAZAN - LAZAREVICK :.....	34
	Conclusion .....	35
	Annexe .....	36
	Références bibliographiques .....	37

## **I. Introduction**

L'eau peut être une aubaine comme elle peut être une source de problèmes ; elle engendre des situations contradictoires d'une fois de pénuries et d'autre fois d'inondations. Pour ce dernier cas, sa gestion a une importance capitale dans le développement de l'occupation du territoire.

De ce fait, une inondation est une submersion temporaire, naturelle ou artificielle, d'un espace avec de l'eau liquide. Ce terme est fréquemment utilisé pour décrire :

- le débordement d'un cours d'eau, en crue puis en décrue, sur les terrains voisins ; l'eau est répandue dans les talwegs et les dépressions topographiques ;
- le ruissellement très important, soit sur des terres cultivées (inondation boueuse), soit en zone imperméable urbanisée ;
- le débordement ou les conséquences de la rupture d'ouvrages artificiels hydrauliques tels que retenues d'eau, digues, canalisations (agricoles, d'eau potable, d'assainissement) ou la rupture d'une retenue naturelle comme celle d'un lac glaciaire, provoquant une inondation soudaine ;
- la remontée émergente d'une nappe phréatique ;
- l'envahissement temporaire par la mer d'une zone côtière lors d'une submersion marine.

D'après mon mémoire de fin d'étude nous allons présenter deux parties. La première partie porte sur la problématique, et la présentation du secteur d'étude. La deuxième partie, est consacrée à la méthodologie adoptée pour l'étude des crues et aux applications numériques.



## **II. La première partie : Généralités**

### **Chapitre1: Problématique des inondations**

#### **1. Problématique des inondations au Maroc**

Durant cette dernière décennie, le Maroc a connu des inondations revêtant un caractère de gravité exceptionnelle en termes de pertes de vies humaines et en conséquence économiques. On peut notamment citer à cet égard, les cas de l'Ourika en 1995, d'El Hajeb en 1997, de Settat et Mohammedia en Novembre 2002, et celle de Nador, Al-Hoceima et de Zaio en novembre 2003. Ces événements, placent bien entendu, l'aléa inondation au cœur des préoccupations du Gouvernement, puisqu'ils représentent le pourcentage le plus élevé du coût des dommages imputables aux risques naturels.

La typologie des crues affectant le territoire marocain est bien entendu de nature très différente selon la taille du bassin versant considéré, la pente des oueds, la nature du couvert végétal et la nature de la pluviométrie. La faisabilité et la qualité des systèmes de prévision et d'annonce est fonction de la typologie des crues considérées. Les phénomènes très rapides caractérisant les têtes de bassins versants ou les petits bassins versant de piémont de relief sont difficiles à prévoir car ils répondent à des événements pluviométriques rapides et intenses difficile à anticiper. Par contre la propagation d'une crue sur un grand linéaire est généralement mieux connue et laisse plus de temps aux opérations de mise en sécurité. Les moyens techniques et l'organisation de prévention et de secours devront être adaptés aux différents cas.

Le Plan national de protection contre les inondations, réalisé par la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau en 2001, a permis d'identifier 392 sites qui présentent un risque d'inondation dont 63 sont situés dans le bassin du Sebou (fig. 1). Le coût des travaux des aménagements proposés pour la protection contre les inondations de ces 392 sites est évalué à 25 milliards de dirhams.

Les sites ainsi inventoriés ont été classés selon une analyse multicritère, en fonction de l'intensité du risque et 50 de ces sites ont été jugés présentant un risque élevé à l'échelle nationale.

Les différentes typologies de crues que connaît le bassin du Sebou sont:

- Les crues lentes des grands bassins versants : c'est le cas des crues des Oueds Ouergha, Sebou et le Beht qui ont causé les inondations de la plaine du Gharb en 1970 (150.000 ha inondés), 1996 (120.000 ha inondés).
- Les crues torrentielles des petits bassins de montagne : c'est le cas des crues que connaît les villes et les centres de Taza, Sefrou, El Hajeb, Azrou, Guigou, Boulemane etc...

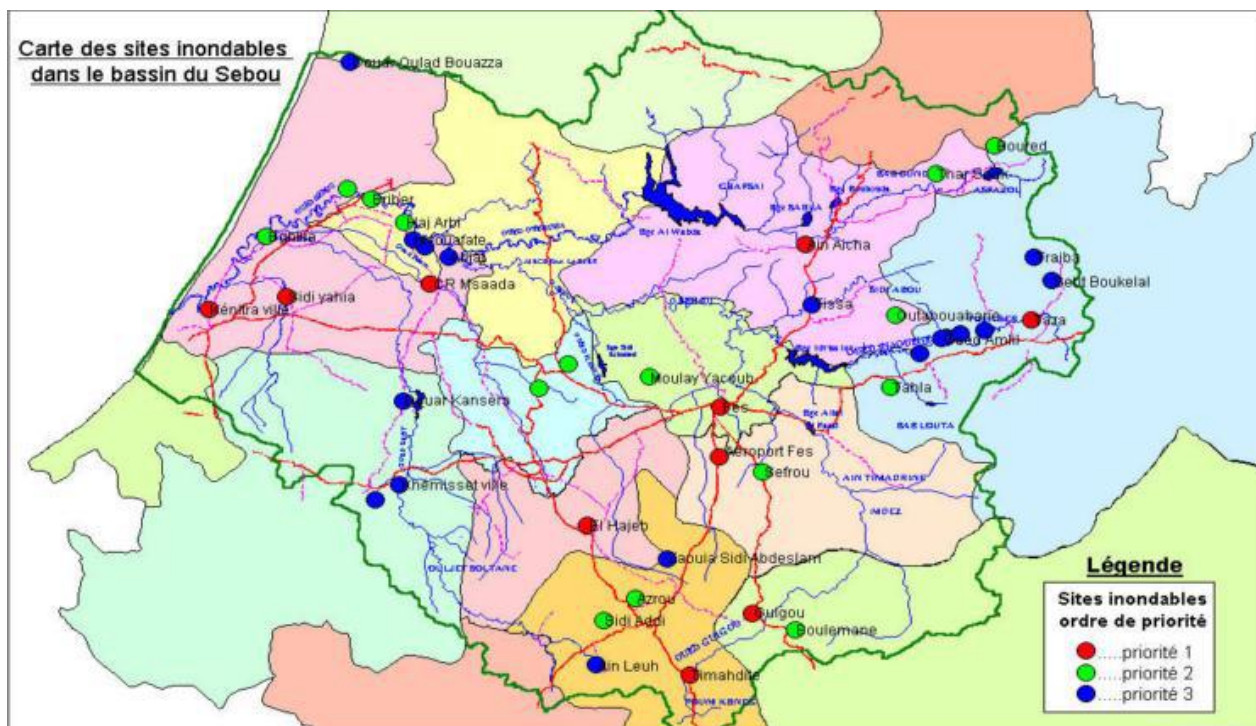


Figure 1 : Carte des sites inondables dans le bassin du Sebou (ABHS)

## 2. Problématique des inondations dans Sefrou

### ➤ Inondation du 25/09/1950

Ces inondations ont été causées par la crue qui a transité par l'oued Aggay. Elles ont touchées les quartiers de Chebbak, El Mellah, Beni Medrek, Kasbah et Nas Adloune. Les dégâts enregistrés par ces inondations au niveau de la ville de Sefrou sont l'inondation de plus de 100 habitations. Les dégâts des équipements d'infrastructures concernent :

Le barrage de prise d'eau de l'usine hydroélectrique,

L'aqueduc, conduite d'amené d'eau de l'usine électrique,

Mur de soutènement

Pont de l'usine hydroélectrique.

Conduite d'amené d'eau potable d'Ain Ghazi.

Piscine avec son rempart et ses aménagements.

Pont des laveuses et pont des moulins.

Réseaux électrique, d'AEP et d'assainissement

La voirie des rues de la médina.



Figure 2: Inondation de septembre 1950 au niveau du quartier El Mellah

Suite à ces inondations une visite royale a été effectuée par Feu Mohamed V, qui a donné lieu à l'édification d'un nouveau quartier Slaoui pour le recasement des sinistrés.

➤ *Les inondations d'Août 1992*

Ces inondations ont été causées par les crues des bassins versant des chaâbas Lalla Rquia, doukarat, Chata, El Mekhzen et de la route de Boulemane. Elles ont touchées la RR503, les habitations et les locaux administratifs situés le long de cette route.

Suite à ces inondations une opération d'approfondissement du lit de l'Oued à l'intérieur de la médina a été entamée. Cependant les travaux n'ont pas été achevés sur certains tronçons de l'oued.

➤ *Les inondations de Septembre 1994*

Ces inondations ont été causées par la crue transitée par Chaâbat Chata et Chaâba Dar El Makhzane. Elles ont touchées le boulevard Zerktouni et les quartiers de Haboune, Slaoui et Chaâba Zalagh. Les dégâts enregistrés par ces inondations au niveau de la ville de Sefrou ont concerné :

Les réseaux de voirie, d'eau potable, d'assainissement et électrique,

Le canal de dérivation.

Les locaux de : la délégation de la jeunesse et sports, la protection civil, le centre des travaux agricoles, la direction provinciale de l'équipement, la direction provincial de l'agriculture.

Le lycée Bir Anzarane.

Le parc municipal.

Suite à ces inondations les opérations suivantes ont été réalisées :

Construction du barrage collinaire Hinajen sur Oued Aggay,

Construction du barrage Kouchaat et non achevé,

Construction du barrage Ben Sassi et non achevé,

Réalisation du barrage et du canal de dérivation sur chaâba Sidi Bousserghine

Prolongement du canal de dérivation de Rfaif

Construction des seuils en gabion et reboisement de Jbel Doukkarat.

### **3. Présentation de Sebou**

Le bassin de Sebou forme une cuvette entre le Rif au Nord, le moyen Atlas et la meseta au sud, le couloir Fès-Taza à l'Est et l'océan Atlantique à l'Ouest. D'une superficie d'environ 40.000 Km<sup>2</sup>, il est l'un des bassins les plus importants du royaume et renferme actuellement une population totale de près de 6.2 millions d'habitants (recensement de 2004), dont 49% en milieu urbain et 51% en milieu rural.

Sur le plan administratif, le bassin de Sebou couvre en totalité ou en partie :

- 5 régions économiques : Fès-Boulemane, Al Hoceima-Taza-Taounate, Meknès-Tafilalt, Gharb-Chrarda-Beni Hssen et Rabat-Zemmour-Zair ;
- 3 Wilayas : Fès, Méknès et Kénitra ;
- 12 provinces et préfectures dont 5 en totalité (El Hajeb, My Yaacoub, Sefrou, Taounate, Sidi Kacem) et 7 partiellement : (Ifrane, Boulemane, Taza, Chef-chaouen, Khémisset, Khénifra et Al Hoceima).

A l'instar des autres bassin du royaume, le bassin du Sebou a connu dans le passé des inondations plus catastrophiques, ces inondations ont causé d'énormes dégâts économiques voire parfois humains. La chronologie principale des inondations vécues dans le bassin du Sebou se présente comme suit dans le tableau ci-après :

Tableau 1 : Historique des inondations dans le bassin du Sebou

sites	Années de l'événement	Dommages encourus
<b>Plaine du Gharb</b>	1973,1989, 1996,2002	Inondation de plus de 140.000 ha (terrains agricoles, infrastructures, enclavement des agglomérations, etc...)
<b>Plaine et centre de Guigou</b>	1970, 1995, 2001et 2002.	Inondation d'environ 1500 ha de terres agricoles, la coupure de plusieurs routes et pistes rurales, l'inondation des locaux administratifs et des habitations du centre de Guigou, douars se trouvant dans la plaine.
<b>Ville de Taza</b>	1995 et 2000	Inondations des maisons (quartier El Malha, douar Chlouh et dépôt de munition) et terrains agricoles, coupures de certaines routes
<b>Centre de Timahdite</b>	1995	Inondation des logements, qui longent l'oued Guigou et de la RN13
<b>Ville d'El Hajeb</b>	1998, 2002	Inondation de la ville et de la RN 13
<b>Ville de Sefrou</b>	1950, 1992 et 1994	Inondation de la ville par les crues des chaâbas
<b>Ville de Fès</b>	1950, 1989	Inondation des quartiers qui se trouvent à l'aval des barrages My Arafa et Gaâda ainsi que ceux qui longent l'oued El Himmer

## Chapitre2 : Cadre général de la zone d'étude

### 1) Géographie

La ville de Sefrou est située au centre du royaume, à 35 Km au Sud - est de la capitale spirituelle Fès. Elle est implantée au pied Nord du Moyen-Atlas sur la RR 503 qui relie les villes de Fès et Boulemane et qui rejoint la RN 13 au nord de la ville de Midelt.

Ainsi, l'accès à la ville de Sefrou peut se faire à partir de la ville de Fès ou de Boulemane, mais également à partir de la RN8 qui relie Fès à Imouzzer Kander en empruntant la route qui mène à Bhalil puis à Sefrou.

La ville de Sefrou fait partie de la région économique de Fès - Boulemane. Elle est le chef lieu de la province. Cette dernière est limitée par les provinces suivantes :

Les Provinces de Zouagha My Yacoub, Fes El Jadid – Dar Dbibagh et Fes Medina au Nord Ouest.

La province de Taounate au Nord.

La province de Taza au Nord Est.

La province de Boulemane au Sud.

La province d'Ifrane au Sud – Ouest.

La province d'El Hajeb à l'Ouest.

La Commune de Sefrou est délimitée :

Au Nord et à l'Ouest par la commune d'Aghbalou Aqorar.

Au Nord Est, l'Est et au Sud par la commune de Sidi Youssef Ben Ahmed.

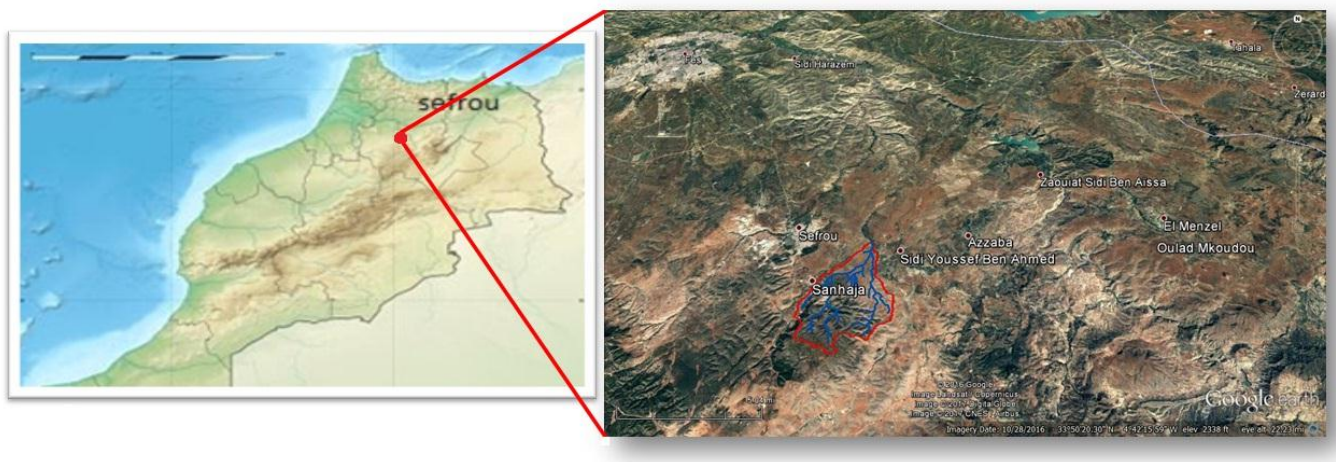


Figure 3 : Carte de localisation de la zone de Senhaja

Les coordonnées géographiques de Sefrou

Latitude : 33°49'54" Nord

Longitude : 4°49'40" Ouest

L'altitude par rapport au niveau de la mer : 809m

## 2) Relief

Les reliefs de la Région Fès-Boulemane prennent différentes formes englobant : les collines, les montagnes et les plaines. Les différents reliefs se regroupent sous forme de quatre unités qui sont connues par leurs vues naturelles :

Au nord se trouve les collines du prêt Rif hautes de 400 à 500m avec des pics plus hauts comme la montagne Zalagh (900m) qui a une vue sur le nord de la ville de Fès. La colline du Saiss se situe entre le début des collines du Rif et les montagnes du moyen Atlas, et progresse du sud vers le nord à une hauteur de 400 jusqu'à 700m. Ce passage se rétrécit vers l'Est dans la direction de la ville de Taza qui est connue comme un axe de passage entre l'Est et l'Ouest du Maroc.

A l'Est et au Sud-Est du Moyen-Atlas se situent les plaines de Moulouya centrale qui prennent de la hauteur du Sud vers le Nord (de 1200 à 700m). Concernant la terre, elle est faible et quant elle

existe, elle est enveloppée d'une couche dure, sauf au fond des vallées où il y a une terre alluviale et agricole.

Le Moyen-Atlas présente un groupe de reliefs géants qui a une vue sur la colline du Saïss et les plaines du Moulouya. Ils se constituent de deux groupes différents :

Le côté Nord-Ouest constitué de collines de lime avec une hauteur de 1000 à 1200m.

Le côté Sud-Est constitué de montagnes inclinées où on trouve les sommets les plus hauts (montagne de Tichoukt 2796m). On trouve aussi dans la région de larges dépressions avec places creuses où il y a la terre agricole et les eaux pour l'irrigation.

La zone de l'étude est située dans cette dernière zone au pied des reliefs.

### **3) Cadre géologique régional**

La zone de l'étude se trouve dans le domaine dit "Echancrure d'Azrou" correspondant à un anticlinorium hercynien faillé, dont l'orientation NE-SW est celle des grands accidents du Moyen Atlas. Les formations caractérisant ce secteur sont essentiellement les grès, les calcaires et les Quartzites.

### **4) Géologie de la zone de Sefrou**

Les formations géologiques de surface de la zone du projet sont essentiellement représentées par des calcaires grisâtres durs et compacts et des dolomies blanchâtres à rosâtres. Ces formations sont organisées en bancs d'épaisseur décimétriques montrant localement des intercalations marneuses indurées, d'épaisseur centimétrique. Stratigraphiquement, l'ensemble est rattaché à la série du Lias inférieur (Sinémurien – Lotharingien).

Ces calcaires et dolomies présentent une altération et une fracturation poussées ainsi que des cavités de dissolution particulièrement sur les horizons superficiels. Ils montrent localement en surface des encroutements de 10 à 20 cm d'épaisseur issues de la dissolution des calcaires.

Structuralement, la disposition prépondérante de ces formations correspond à celle du flanc septentrional du Moyen Atlas. On relève sur les affleurements examinés des directions variant entre N40 et N60 et un pendage de l'ordre de 30 à 45° vers le Nord-Ouest.

Le substratum calcaro-dolomitique du Lias inférieur est globalement recouvert par des dépôts de pente et des colluvions graveleuses. Ces formations superficielles d'âge Quaternaire – Actuel sont composées d'éboulis graveleux emballés dans une matrice argileuse rougeâtre. Ils sont alimentés par les produits de dégradation des calcaires en blocs décimétriques à centimétriques. L'épaisseur de ces éboulis varie de quelques mètres (5 à 10 m) sur les versants doux à quelques centimètres sur les versants redressés.

Le long des vallées entaillant ce secteur, des terrasses de faible importance se développent. Elles sont constituées de dépôts limoneux graveleux et argileux. Le long des grands oueds de la région (oueds Aguai et El Yhoudi), ces terrasses présentent localement des étendues plus importantes atteignant la centaine de mètres (terrasses cultivées très fertiles).



Les lits mineurs de ces oueds sont essentiellement comblés par des sables grossiers et des graviers peu arrondis de taille centimétrique à décimétrique. L'épaisseur de ces alluvions varie de visu entre 1 et 5 m.

## 5) Climatologie

La province de Sefrou est caractérisée par un climat de types continental : hiver généralement pluvieux et été chaud et sec.

Les précipitations moyennes annuelles se situent entre 450 mm et 600 mm. La neige apparaît sur les reliefs élevés du sud ouest à l'est de la province. On y distingue deux étages bioclimatiques différents :

Un étage semi aride dans la partie Nord et Nord Ouest,

Un étage humide aux alentours des jbel Kander et Bouyablane.

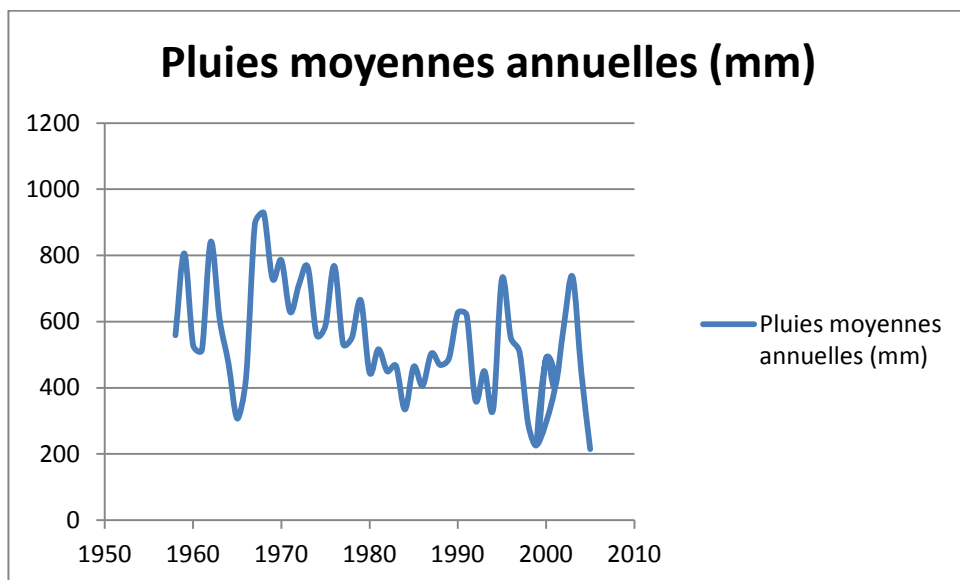


Figure 4: variation moyenne annuelle des précipitations à la station Sefrou période 1958-2005

Au niveau de la ville de Sefrou, la station pluviométrique située à 850 mNGM donne une précipitation moyenne annuelle de 583.3 mm (moyenne 1958 – 2002).

Les températures moyennes annuelles sont de 16.46°C avec un maximum moyen de 23.05°C et un minimum de 9.8 °C

## 6) Hydrologie

Le réseau hydrographique, constitué par plusieurs cours d'eau et des nappes phréatiques, présente une importance favorisant le développement de la province.

Les cours d'eau importants qui traversent ou qui se situent dans la province de Sefrou sont : oued Zeloul, Sebou, Guigou, Maasser et Lihoudi.



### **III. La deuxième partie : études des crues**

#### **1. Délimitation des bassins versants**

Sur la base de la carte topographique 1/50000 de la zone Sefrou, la délimitation des bassins versants a été effectuée. L'outil utilisé à cet effet est le logiciel ArcGIS.

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.

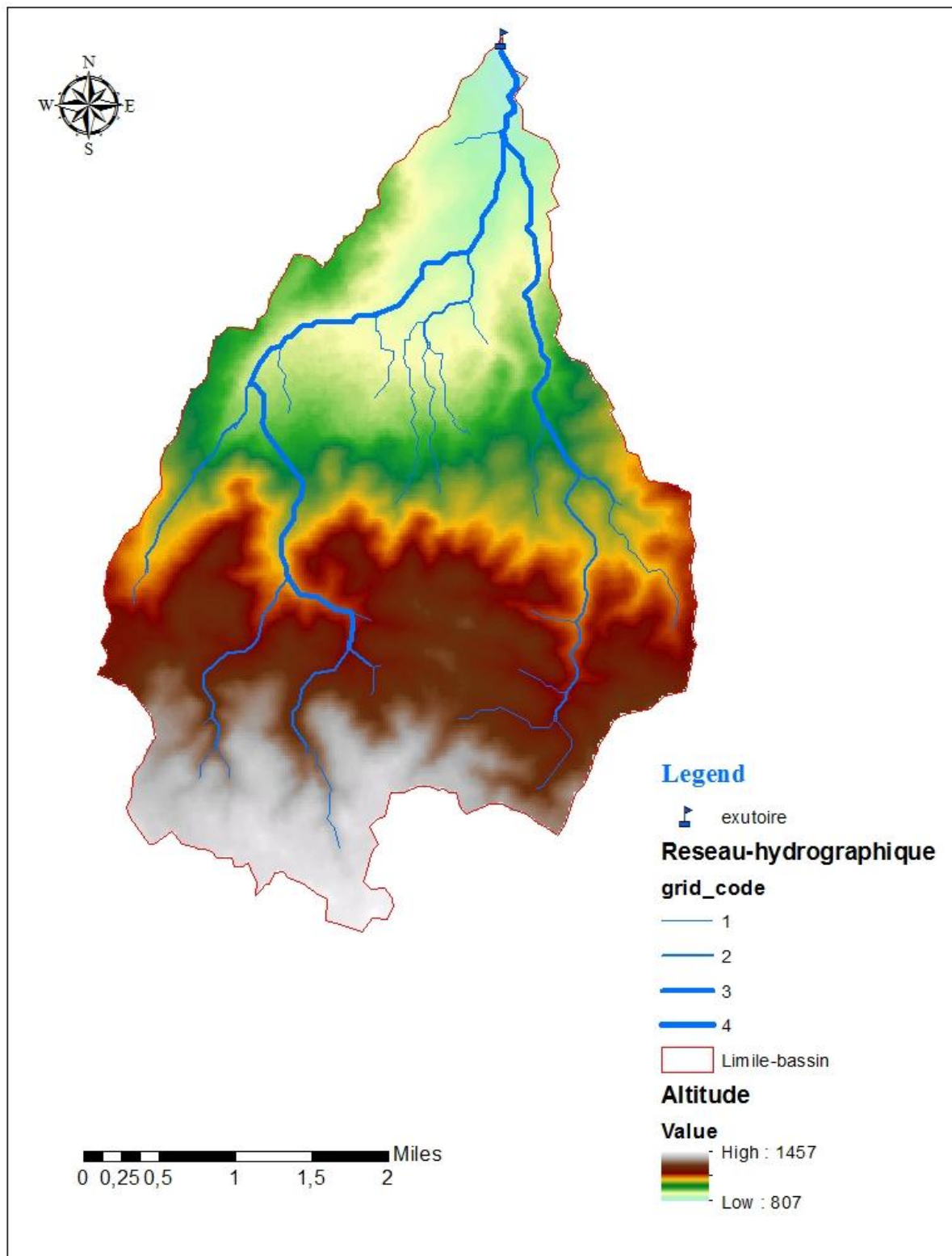


Figure 5: bassin versant de Senhaja

## 2. La détermination des caractéristiques géométriques du bassin

Superficie

Longueur de Talweg

Dénivelée maximal

Périmètre

Pente

H moy

Coefficient de compacité  $K = 0.282 * \frac{p}{\sqrt{S}}$

P et S étant respectivement le périmètre (Km) et la superficie (Km<sup>2</sup>) du bassin versant.

## 3. Calcule du temps de concentration

Le calcule des volumes et des hydrogrammes des crues et des débits des petits bassins versant, fait intervenir le concept du temps de concentration.

Le temps de concentration c'est le temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis le point le plus éloigné du bassin jusqu'à son exutoire ou jusqu'à point de calcul.

L'évaluation du temps de concentration est basée en général sur l'hypothèse que les gouttes de pluie se déplacent perpendiculairement aux lignes de niveau.

Son calcul se fait par plusieurs formules

➤ Giandotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{D}}$$

Où

Tc : temps de concentration en heurs

S : surface du BV en Km<sup>2</sup>

L : longueur du Talweg en Km

D : dénivelée du BV en m

➤ Ventura

$$Tc = 76.3 * \left( \frac{S}{I} \right)^{0.5}$$

Où :

Tc : temps de concentration en min

S : Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>

I : La pente moyenne en %

➤ Kirpich

$$Tc = L^{0.77} * I^{-0.385}$$

Où :

Tc : Temps de concentration

L : Longueur de Talweg en m

I : Pente moyenne en m/m

➤ Van Te Chow

$$Tc = 60 * 0.123 * \left( \frac{L * I^{0.5}}{1000} \right)^{0.64}$$

Où :

Tc: Temps de concentra en min

L : Longueur en m

I : Pente moyenne en m/m

#### 4. Applications

➤ Surface

La surface du bassin versant est l'une des caractéristiques les plus importantes. Elle s'obtient par planimétrie sur une carte topographique après que l'on y ait tracé les limites topographiques et éventuellement hydrogéologiques ou bien par la technique de la digitalisation à l'aide de l'Arc Map. La surface « A » d'un bassin s'exprime généralement en km<sup>2</sup>.

A= 33.45Km<sup>2</sup>

➤ Périmètre

Le périmètre est la longueur, de la ligne de contour du bassin, généralement exprimée en km; sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre ou mieux automatiquement par le logiciel Arc Map.

P= 27.98Km

➤ **Indice de compacité de Gravelius**

Un bassin versant est défini en premier lieu par son contour qui a une certaine forme et renferme une certaine superficie « A ». Il est évident que cette forme va avoir une influence sur l'écoulement global.

Un bassin allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme ramassé. Cette forme est déterminée par l'Indice de Compacité dit aussi l'Indice de Gravelius.

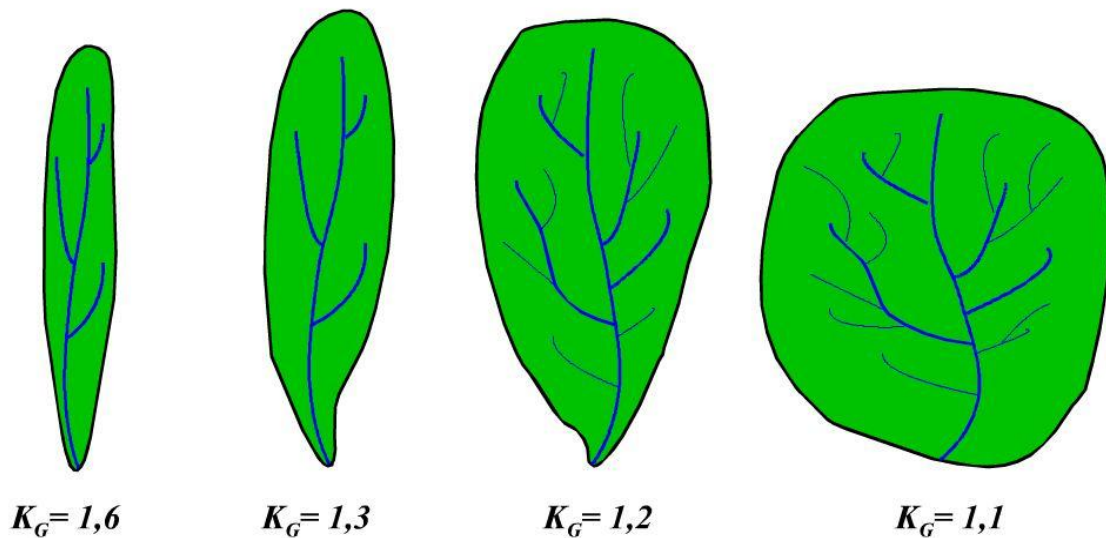


Figure 6: les types des bassins versant selon l'indice de compacité

Ce dernier est obtenu en comparant le périmètre d'un bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface :

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad K_c = 1.35$$

Avec :

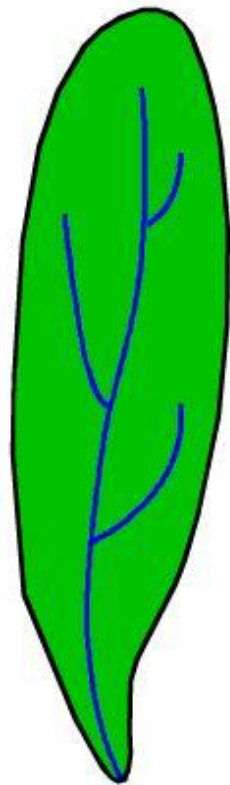
Kc: indice de compacité de Gravelius ;

P : périmètre du bassin versant (Km) ;

A : surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>)

Le bassin est considéré comme bien drainé si son indice de compacité tend vers 1.

La forme de notre bassin sera



$$K_G = 1,3$$

Figure 7: la forme de bassin de Senhaja

Le bassin de senhaja a un indice de compacité égale à 1.35. Sa forme est allongée, La forme du bassin témoigne d'un faible drainage qui va minimiser le temps de rassemblement des eaux et diminuer les charges transportées par l'eau. Mais cela peut aussi être en faveur des crues car cette forme montre une faible largeur donc il permet de rassembler les eaux à l'exutoire du bassin versant plus court.

#### ➤ Hypsométrie du bassin versant

Puisque la plupart des facteurs climatiques et hydrologiques sont en fonction de l'altitude, il est donc important de déterminer la répartition du bassin versant par les tranches d'altitudes et de dégager les différents paramètres de reliefs du bassin versant étudié.

Pour mieux comprendre les variations d'altitudes au sein du bassin versant de Senhaja, on va appliquer une méthode statistique qui permet grâce à une courbe hypsométrique de traduire la répartition des altitudes à l'intérieur de la zone d'étude et permet en outre de déterminer les altitudes caractéristiques.

La méthode statistique consiste à calculer les pourcentages des surfaces en fonction des altitudes, puis le calcul des pourcentages au-dessus du cumulées (Tabl 2). L'histogramme de fréquence des altitudes est un graphique sur lequel les valeurs des altitudes sont réparties sur l'axe des abscisses

La surface, en % de la surface totale comprise entre deux altitudes successives, est reportée sur l'axe des ordonnées.

L'interprétation de la courbe hypsométrique se fait sur la base des recherches récentes qui ont montré l'aspect générale des courbes selon l'état d'érosion d'un bassin versant (Fig. 9). Pour les bassins versants jeunes, la superficie est faible par rapport au changement d'altitude, ce qui caractérise des versants abrupts. Les vieux bassins présentent l'inverse, une plaine douce près d'un cours d'eau où l'altitude varie peu malgré une superficie importante. En ce qui concerne le bassin versant de senhaja, on a commencé par le calcul des surfaces en fonction des altitudes, puis les pourcentages des surface cumulées.

Tableau 2:Hypsométrie du bassin versant de Senhaja

Classe d'altitude	Surface en km <sup>2</sup>	Surface cumulée
1400-1457 m	17,438	100,000
1300-1400 m	17,006	82,562
1200-1300 m	18,74	65,556
1100-1200 m	20,788	46,816
1000-1100 m	14,47	26,028
900-1000 m	11,546	11,55
807-900 m	0,004	0,004

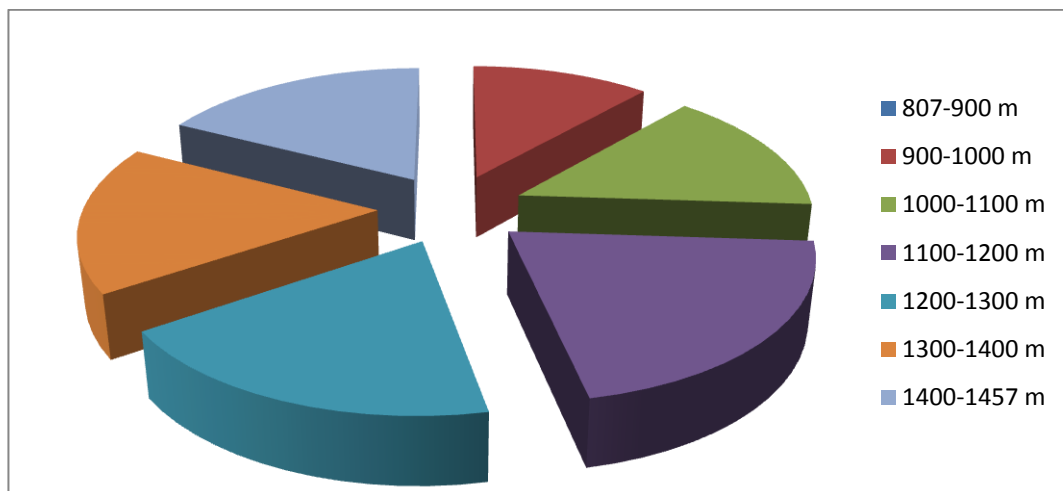


Figure 8: les classes d'altitudes et leurs surfaces

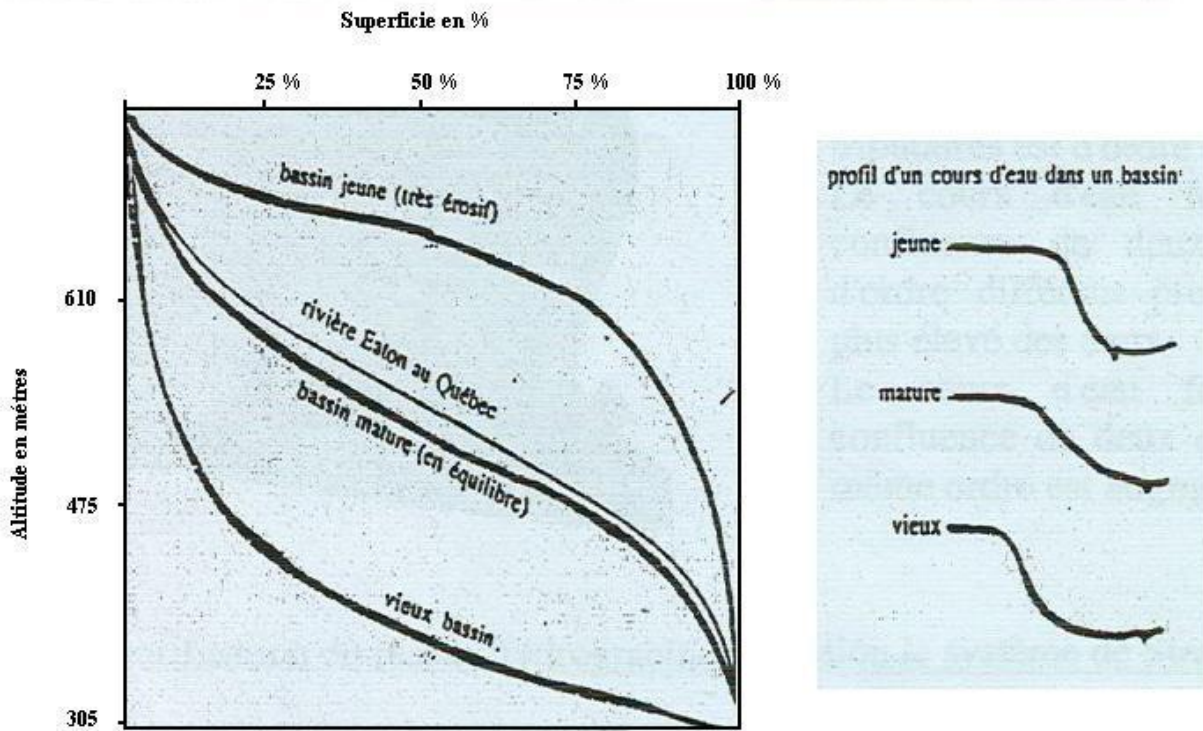


Figure 9: Interprétation de la courbe hypsométrique (Musy, 2005)

**Courbe hypsométrique :** est construite sur le graphique avec des ordonnées représentant la surface du bassin qui se trouve au-dessus des cotes d'altitudes portées en abscisse.

En général, l'utilité de cette courbe est qu'elle fournit des renseignements qualitatifs sur l'allure des reliefs. En effet, une pente forte à l'origine (vers les plus basses altitudes d'altimétrie) indique souvent des plaines ou des pénéplaines pouvant constituer de vastes zones d'inondations. Une pente forte dans le milieu ou dans les hautes altitudes indique probablement un grand plateau.



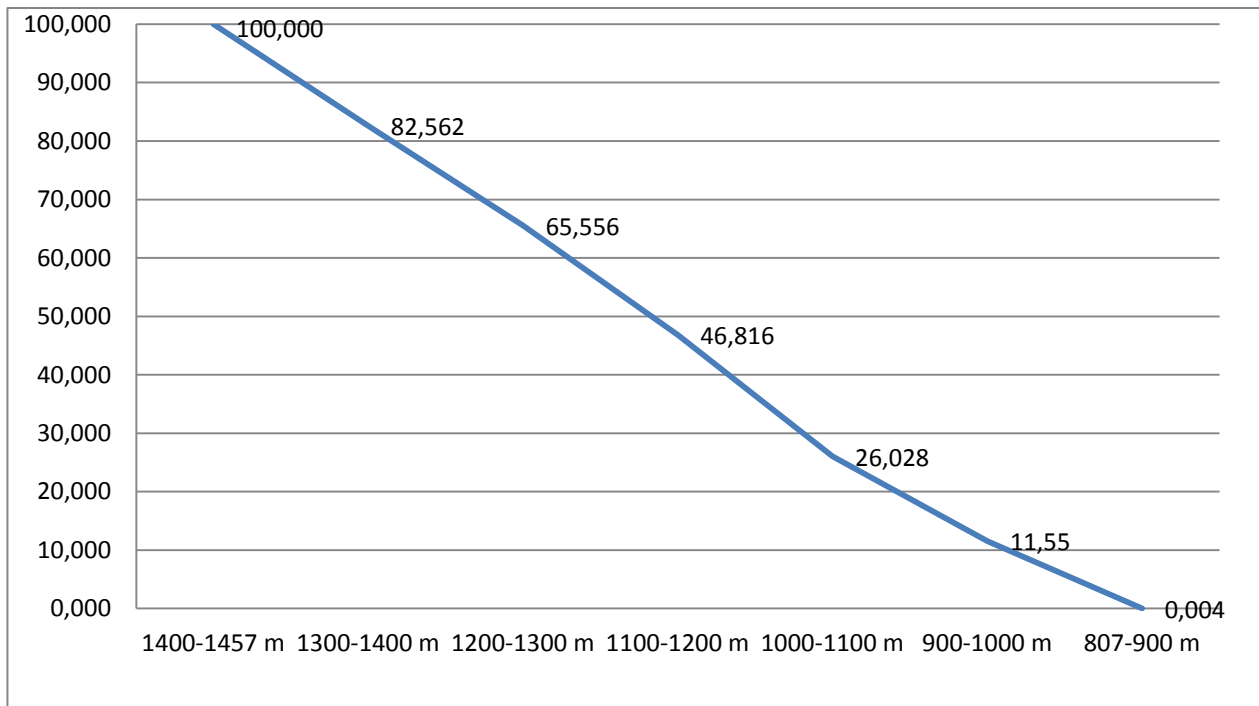


Figure 10: Courbe hypsométrique de BV de Senhaja

➤ Les altitudes caractéristiques

□ Les altitudes maximales et minimales

Elles sont obtenues directement à partir de cartes topographiques. L'altitude maximale représente le point le plus élevé du bassin tandis que l'altitude minimale considère le point le plus bas, généralement à l'exutoire. Ces deux données deviennent surtout importantes lors du développement de certaines relations faisant intervenir des variables climatologiques telles que la température, la précipitation et le couvert neigeux. Elles déterminent l'amplitude altimétrique du bassin versant et interviennent aussi dans le calcul de la pente.

Alt max=1457 m

Alt min= 807m

□ 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 :

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

$H_{moy} = 18.12$  m

Avec :

$H_{moy}$  : Altitude moyenne du bassin [m]

$A_i$  : Aire comprise entre deux courbes de niveau [km<sup>2</sup>]

$h_i$  : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m]

A : superficie totale du bassin versant [km<sup>2</sup>]

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre de modèles hydrologiques.

### ➤ Rectangle équivalent

C'est une représentation purement géométrique dans laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie. Ainsi, les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits cotés du rectangle et l'exutoire est l'un de ses petits cotés soit « L » et « l » les cotés des rectangles, « P » le périmètre du bassin et « A » sa surface.

La longueur L :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \text{ Si } K_G \geq 1.12 \quad L=10.12 \text{ Km}$$

$$l = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \text{ Si } K_G \geq 1.12 \quad l=4.98 \text{ Km}$$

Avec :

KG: indice de compacité de Gravelius ;

A : surface du bassin versant en Km<sup>2</sup>

L : longueur du rectangle équivalent en Km

l : largeur du rectangle équivalent en Km

On peut déterminer la distance des courbes de niveau on utilisant la formule  $D_i = X_i \times L$ . le tableau 3 montre les valeurs de calcul pour notre bassin versant.

Tableau 3: Valeurs de calcul de la distance des courbes de niveau

Xi	Li	Di
0.0004	10.12	0.000408
0.12	10.12	1.214
0.14	10.12	1.416
0.2	10.12	2.024
0.19	10.12	1.92
0.17	10.12	1.72
0.176	10.12	1.76

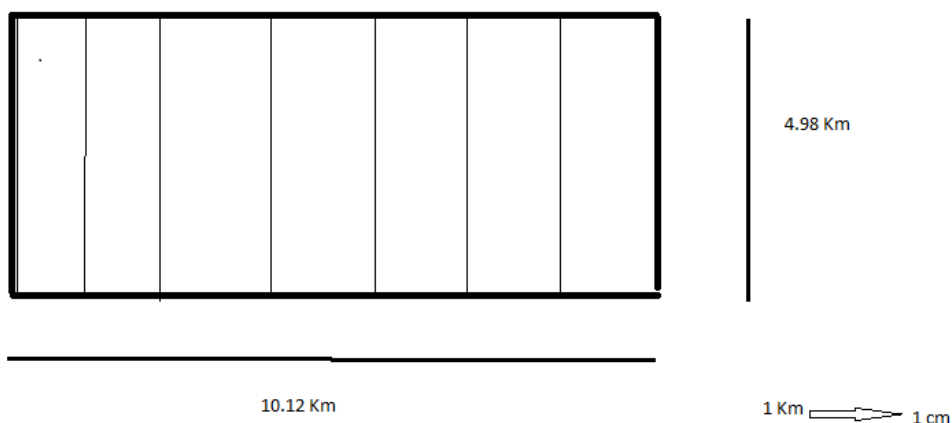


Figure 11: Rectangle équivalent du bassin de Senhaja

### ➤ Les indices de pente

Leur connaissance est d'une grande importance car il est évident que les eaux ruissellent d'autant plus que la pente des versants est grande. C'est ainsi qu'en montagne, on rencontre, pour une averse donnée, des crues plus importantes qu'en plaine ou les pentes sont beaucoup plus faibles.

Réalisation de la carte des pentes

Les classes de pente (Tabl. 4) sont déduites d'un modèle numérique de terrain.

Tableau 4: classe des pentes

Classe	Type de pente
1	Nulle à faible 0-5%
2	Modérée 5-10%
3	Abrupte 10-15%
4	Très abrupte 15-25%
5	Extrême >25%

A partir du profile, on peut déduire que les pentes au niveau du notre bassin sont en majorité de faibles (inférieur à 5 %) à modérées.

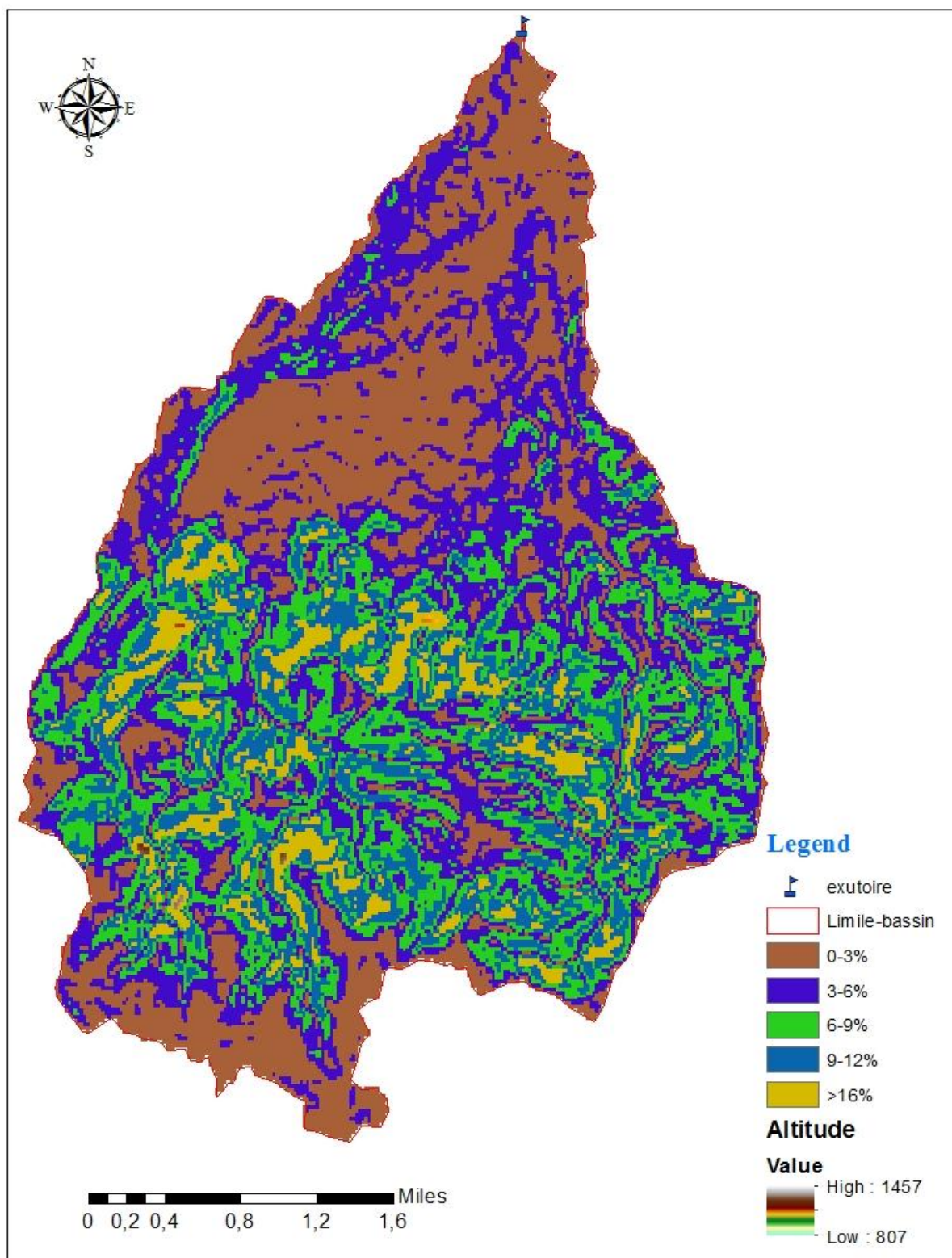


Figure 12: Carte de pentes du bassin versant de Senhaja

### ➤ Pente moyenne du bassin

Elle renseigne sur la topographie du bassin, donc elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant.

Donc la pente du bassin et sa nature font que l'inondation sera plus ou moins importante ; plus la pente est forte, plus l'inondation ne sera importante.

On estime la pente moyenne à partir de la courbe hypsométrique du bassin.

$$P_{moy} = \frac{2H_{moy}}{L} \qquad P_{moy} = 2.9 \text{ m/Km} = 0.29 \%$$

Avec :

$P_{moy}$  : Pente moyenne du bassin ;

$H_{moy}$  : L'altitude moyenne du bassin(m) ;

L : Longueur du cours d'eau principal en (Km).

### ➤ Indice de pente classique

L'indice de pente classique consiste à rapporter le dénivelé d'altitude entre les deux points extrêmes du bassin à la longueur du bassin définie par la longueur du rectangle équivalent.

$$I_{classique} = \left( \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{eq}} \right) \qquad I_{classique} = 64.22$$

Avec :

I classique : indice de pente classique ;

H max : altitude maximale ;

H min : altitude minimale ;

$L_{eq}$  : Longueur du rectangle équivalent.

### ➤ Indice de pente globale

Pour éviter les valeurs extrêmes, L'Institut de Recherche et Développement en France (IRD) a proposé la définition d'un indice global de pente d'un bassin versant, il sert à classer le relief des bassins.

$$I_g = \frac{D_u}{L_{eq}} \qquad I_g = 49.41 \text{ m/Km}$$

Avec :

Du : H5% - H95% = 600 m, la dénivelé utile est l'altitude entre laquelle s'inscrit 90% de la surface du bassin.

H5%: altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin au dessus de H5%;

H95%: altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin versant de H95%;

Ig : indice de pente globale ;

Leq : longueur du rectangle équivalent.

➤ La dénivelée spécifique

L'indice de pente global décroît pour un même bassin lorsque sa surface augmente. La comparaison des pentes de bassins de taille différente se fait en se basant sur le dénivelé spécifique qui dérive de la pente globale en la corrigeant de l'effet de la surface.

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

$$D_s = 285.7 \text{ m}$$

Avec :

Ds : Dénivelée spécifique ;

A : Surface du bassin versant (Km<sup>2</sup>) ;

Ig : Indice de pente globale.

## 5. Résultats

Tableau 5: résultat de calcul de temps de concentration de bassin versant de Senhaja

Bv	Giandotti	Ventura	Kirpich	Van The Chow	Valeur Retenue [h]
Senhaja	3.1	3.96	4	4.05	3.78

Le temps de concentration retenu pour notre bassin versant est la moyenne des temps de concentrations calculés par les formules qui donnent des valeurs comparables et assez voisines.

## 6. Estimation du débit de pointe par des formules régionales

Les méthodes de calcul recensées en utilisant différentes formules empiriques tiennent compte de deux facteurs essentiels :

- ✚ La taille du bassin versant ;
- ✚ Le gradient topographique du bassin versant.

### Petits bassins versants (<100 ha)

Mac Math

Rationnelle

### Grands bassins versants (>100 ha)

Rationnelle

Mallet Gauthier

Fuller II

Hazan Lazarevic

Ces méthodes largement utilisées en ingénierie, élaborées ailleurs, et utilisées au Maroc sur la base des données hydrologiques locales, sont présentées ci-après :

#### ➤ Formule Rationnelle

La méthode rationnelle, décrite dans les Recommandations pour l'Assainissement Routier SETRA de 1982, s'énonce comme suit :

$$Q_t = \frac{C * I(T, T_c) * A}{3,6}$$

Où :  $Q_t$  : Débit de pointe en m<sup>3</sup>/s pour la période de retour T.

I : Intensité de la pluie en mm/h.

T : Période de retour (ans)

T<sub>c</sub> : Temps de concentration en min

A : Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>.



C : Coefficient de Ruissellement Ce coefficient a été pris égal à 0.5.

L'intensité est calculée par la formule de Montana qui s'exprime :  $I = 60 * a * t^{(-b)}$

A défaut de courbes IDF représentatives de la ville de Sefrou, les paramètres a et b de Montana de la ville de Fes située à moins de 30 km de la zone de l'étude sont extraits de l'étude de crues au niveau du bassin du et sont pris égale à :

Tableau 6: débit calculé par la méthode rationnelle

	<b>T10</b>	<b>T20</b>	<b>T50</b>	<b>T100</b>
<b>A</b>	6.794	8.106	9.808	11.085
<b>B</b>	0.672	0.673	0.673	0.674
<b>I</b> <b>(mm/h)</b>	10.65	12.64	15.3	17.19
<b>Q<sub>t</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	49.5	58.70	71.03	79.84

➤ Formule de Fuller II

$$Q_t = (1 + a * \log(T)) * (S^{0.8} + 8/3 * S^{0.5}) * 4/3 * N / 100$$

Avec :

$Q_t$  : Débit de pointe en m<sup>3</sup>/s de récurrence T.

T : Période de retour égale à (10, 20, 50 et 100 ans).

a : Coefficient variant entre 0,7 et 3 au Maroc.

**0.7 < a < 0.8** : Pour les grands bassins versants et pour les régions bien arrosées ;

**0.8 < a < 2** : Pour les régions arides ;

**3 < a < 3.5** : Pour les régions sahariens ;

Le bassin versant en question est situé dans une zone bien arrosée et accidentée. L'IC a donc opté pour les valeurs suivantes : **a=0,8**

S : Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>

N : Coefficient régional pris égal à 80 en plaine, 85 en région accidentée et 100 en montagne.

Nous prenons N=85 pour le bassin versant de la zone de l'étude

Tableau 7: débit calculé par la Formule de Fuller II

	<b>T10</b>	<b>T20</b>	<b>T50</b>	<b>T100</b>
<b><math>Q_t(m^3/s)</math></b>	116.5	122.8	149.32	169.4

➤ Formule de Mallet Gautier

$$Q_t = 2 \times k \times \log_{10}(1 + aH) \times \frac{A}{\sqrt{L}} \times \sqrt{1 + 4 \times \log_{10} T - \log_{10} A}$$

Avec :

**Q** : Débit maximal en m<sup>3</sup>/s, temps de retour T = (10, 20, 50, 100 ans).

**K** : Coefficient variant de 0,50 à 6,00 (on prend k = 2)

**H** : Hauteur moyenne annuelle de pluie en m

**A** : Superficie du bassin versant en Km<sup>2</sup>

**a** : Coefficient variant de 20 à 30 (au Maroc, on prend a = 25)

**L** : Longueur du drain principal en Km

**T** : temps de retour en années (T = 10, 20, 50, 100 ans).

Tableau 8: Pluies moyennes annuelles

<b>Années</b>	<b>Pluies moyennes annuelles (mm)</b>
1958	558.80
1959	806.40

<b>Années</b>	<b>Pluies moyennes annuelles (mm)</b>
1984	334.60
1985	464.10

1960	528.70
1961	514.50
1962	841.40
1963	609.10
1964	475.40
1965	307.10
1966	430.80
1967	895.10
1968	928.90
1969	729.30
1970	785.30
1971	628.90
1972	711.90
1973	764.40
1974	559.40
1975	588.50
1976	768.10
1977	532.60
1978	551.90
1979	664.50
1980	445.80
1981	516.70
1982	449.70
1983	466.10

1986	406.40
1987	503.70
1988	469.00
1989	489.00
1990	627.10
1991	619.50
1992	361.90
1993	450.70
1994	334.60
1995	729.90
1996	551.80
1997	507.20
1998	286.70
1999	231.10
2000	488.70
2001	401.70
1999	231.10
2000	488.70
2001	401.70
2002	584.40
2003	735.8
2004	444.8
2005	214.9
moyenne	583.3

Tableau 9: débit calculé par la Formule de Mallet Gautier

	<b>T10</b>	<b>T20</b>	<b>T50</b>	<b>T100</b>
<b><math>Q_t(\text{m}^3/\text{s})</math></b>	24.66	28.62	33.13	49.00

➤ Formule de HAZAN - LAZAREVICK :

$$Q_t(1000) = k1 * S^{k2}$$

Où :

$Q(1000)$  = Débit de pointe en  $\text{m}^3/\text{s}$  de récurrence 1000 ans

$S$  = Superficie du bassin versant en  $\text{Km}^2$

$k1$  = 13.51

$k2$  = 0.613

La transposition des débits des crues millénales aux débits de récurrence T se fera par la formule du Fuller I qui s'écrit comme suit :

$$Q_t(T) = Q(1000) * (1 + a * \log(T)) / (1 + a * \log(1000))$$

$Q(T)$  : Débit de pointe en  $\text{m}^3/\text{s}$  de récurrence T.

$a$  : Coefficient régional variant de 0,8 à 2 pour la partie nord du Maroc,

2 à 3,5 pour le Rif Occidental

Nous prenons  $a=2$

Tableau 10: débit calculé par la Formule de HAZAN - LAZAREVICK

	<b>T10</b>	<b>T20</b>	<b>T50</b>	<b>T100</b>
<b><math>Q_t(\text{m}^3/\text{s})</math></b>	93.04	116.06	146.5	169.5

## Conclusion

La province de Sefrou se situe dans le piémont du Moyen-Atlas avec une pluviométrie oscillant entre 400 et 1020 mm/an. Le relief est caractérisé par une altitude allant de 800 m à 1800 m et par l'importance des pentes. En effet, les bassins versants qui la dominent présentent une érosion élevée en raison des fortes pentes qui occupent plus de 50% des BVs (60% de la superficie des BVs à une pente de 25%).

Le déplacement des systèmes orageux bloqués localement sur les flancs des sous-petits bassins engendrant des pluies à fortes intensités et qui génèrent des crues rapides de montagnes. Les eaux pluviales transitées par les Chaâbas et par oued Aggay vers les artères principales de la ville menacent les populations et les infrastructures administratives. De ce fait la ville de Sefrou est exposée aux inondations dans les plus importantes sont celle de 1950 et 1994.

Notre projet de fin d'étude s'articulait autour d'une étude hydraulique qui consiste à évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux ; le but de l'étude hydrologique est de déterminer les débits des crues pour différentes fréquences, pour les cours d'eau inventoriés dans notre étude et qui risquent de causer des inondations à la ville de Sefrou.

L'aménagement pour la protection de la ville de Sefrou contre les inondations est un processus qui a été entamé il y a plus d'un demi-siècle (creusement de l'oued, protection des berges par de la maçonnerie, construction des petites barrages,... etc.)

Il y a lieu de signaler que la protection contre les inondations ne passera pas que par les travaux d'aménagement, mais aussi par des mesures de prévision et de prévention, souvent moins coûteuses. Ces dernières concernent la cartographie des zones à risques d'inondations, la réglementation de l'occupation des sols, l'entretien des cours d'eau et surtout l'aménagement des bassins versants.

Quelques soient les efforts curatifs déployés pour la protection contre les inondations, on ne sera jamais à l'abri des risques et que les actions menées ne permettent que la réduction de la vulnérabilité des zones à ces risques. La sensibilisation et l'information des acteurs et des citoyens sur ces risques demeurent une question essentielle pour limiter les dégâts.

## **Annexe**

### Présentation de l'ABHS

L'agence du bassin hydraulique de Sebou est un établissement public doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière, il a pour mission d'évaluer, de planifier, de gérer, de protéger les ressources en eau et de délivrer les autorisations et concessions relatives au domaine public hydraulique au niveau de leur zone d'action.

Elle est gérée par Mr.Bendaoud BOUCHENOUCH, comme directeur général de l'agence.

Cette agence est constituée de quatre divisions, un service et une délégation répartie comme suit :

- division de ressources humaines et financières
  - division de développement et de gestion des ressources en eau
  - division de l'entretien des ouvrages et suivi des ressources en eau
- division d'aide et de redevance
- service de la protection de la qualité de l'eau
- délégation de KENITRA

Ces divisions sont liées organiquement entre elles et collaborent dans leur travail de façon harmonieuse.

## Références bibliographiques

**AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU SEBOU**, décembre 2009 *étude de protection contre les inondations de la ville de Sefrou*, 40p

**AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU SEBOU**. Décembre 2009 *étude de diagnostic de la situation existante, étude hydrologique, étude topographique, étude hydraulique et définition des schémas d'aménagement*, 39p

**AMRAOUI F, 2005**. *Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : cas su Lias de la plaine du Sais et du Causse Moyen Atlasique tabulaire (Maroc)*, Thèse de Doctorat d'État. Université Hassan II-Ain Chock. 237 p.

**EL FELLAH IDRISSE B, (2001)** – *Etude hydrologique et aménagement du bassin versant de l'Oued Aggay*.

**LAHSAINI, Juin 201**. *Étude et modélisation des crues du tronçon urbaine de l'oued Aggay*, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de Master Fst Fès, 121 p