



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

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques
ETUDE ET MODELISATION DES CRUES DU
TRONCON URBAIN DE L'OUED AGGAY, VILLE DE
SEFROU

Présenté par:

MERIAM LAHSAINI

Encadré par:

- Prof. TABYAOUI Hassan (FP-TAZA)
- Dr. MENGOUB Bouchera (Ministère de l'Energies des Mines, de l'Eau et de l'environnement – Rabat)
- Mr A. BOURAK (ABHS)

Soutenu Le 24 Juin 2011 devant le jury composé de:

| | |
|---------------------------------|---------------------|
| Prof. BENAABIDATE Lhacen | Président |
| Prof. TABYAOUI Hassan | Encadrant |
| Mr. BOURAK Abdallah | Co-Encadrant |
| Dr. MENGOUB. Bouchera | Co-Encadrant |
| Prof. LAHRACH Abderrahim | Examineur |

Stage effectué à : AHBS-Fès & Ministère de l'Energies des Mines, de l'Eau et de l'environnement - Rabat.





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

Nom et prénom: Meriam LAHSAINI

Année Universitaire : 2010/2011

**Titre: ETUDE ET MODELISATION DES CRUES DU TRONCON URBAIN DE L'OUED
AGGAY, VILLE DE SEFROU**

Résumé

La ville de Sefrou, de part sa position géographique, son patrimoine culturel et urbanistique, que sur le plan économique, est classée parmi les sites ayant une vulnérabilité particulière aux inondations. L'Oued Aggay, sujet de la présente étude, constitue un danger potentiel à cause de la violence de ses crues (1950-1976, 1994).

C'est dans cette optique que vient ce présent travail qui a pour objectifs : (1) mettre au point un modèle hydraulique dans la prévention des crues et l'adaptation des interventions contre les effets des crues dans les zones inondables, et (2) définir les schémas d'aménagements projetés au niveau de l'Oued Aggay. Cette étude permettra la protection contre les inondations des zones de débordement et, en deuxième lieu, la couverture de l'oued Aggay au niveau du tronçon traversant l'ancienne médina.

Les résultats obtenus de cette étude nous permettent d'une part de prévenir les débits de pointe du bassin versant d'Oued Aggay par des méthodes statistiques, et d'autre part d'optimiser les paramètres propres qui aident à la prévention des débits des crues du bassin versant d'Oued Aggay par le modèle numérique.

Mots clés:

Bassin versant, Oued Aggay, Sefrou, débit, Crue, Protection, Modèle numérique, Méthode statistique, Aménagement.

Table des matières

| | |
|---|-------------|
| <i>Dédicace</i> | <i>iii</i> |
| <i>Avant propos</i> | <i>iv</i> |
| <i>Liste des figures</i> | <i>v</i> |
| <i>Liste des tableaux</i> | <i>vii</i> |
| <i>Liste des abréviations</i> | <i>viii</i> |
| <i>Introduction générale</i> | <i>1</i> |
| <i>Partie I</i> | <i>3</i> |
| <i>Problématique, Cadre général du bassin versant de l'Oued Aggay</i> | <i>3</i> |
| <i>Chapitre I. Problématique</i> | <i>4</i> |
| <i>I-1. Problématique des inondations au Maroc</i> | <i>4</i> |
| <i>I-2. Problématique des inondations dans le bassin versant d'oued Aggay et critères de choix de ce bassin</i> | <i>5</i> |
| <i>Chapitre II. Cadre général du bassin versant de l'oued Aggay</i> | <i>7</i> |
| <i>II-1. Paramètres physiographiques du bassin versant d'oued Aggay</i> | <i>7</i> |
| II-1-1. Situation géographique | <i>7</i> |
| II-1-2. Surface..... | <i>8</i> |
| II-1-3. Périmètre | <i>8</i> |
| II-1-4. Indice de compacité de Gravelius..... | <i>8</i> |
| II-1-5. Indice de compacité de Horton : | <i>9</i> |
| II-1-6. Caractéristiques topographiques du bassin versant d'Aggay..... | <i>9</i> |
| II-1-7. Rectangle équivalent | <i>15</i> |
| II-1-8. Les indices de pente..... | <i>16</i> |
| II-1-9. Orientation du bassin versant : | <i>20</i> |
| II-1-10. Réseau hydrographique | <i>21</i> |
| II-1-11. Couvert végétal :..... | <i>25</i> |
| <i>II-2. Géologie du bassin versant d'oued Aggay</i> | <i>27</i> |
| II-2-1. Géologie régional | <i>27</i> |
| II-2-2. Géologie local..... | <i>27</i> |
| <i>II-3. Etude Climatique</i> | <i>32</i> |
| II-3-1. Acquisition des données : | <i>32</i> |
| II-3-2. Reconstitution des données manquantes : | <i>32</i> |
| II-3-3. Test d'homogénéité des données | <i>33</i> |
| II-3-4. Variation spatio-temporelle des précipitations | <i>36</i> |
| II-3-5. Variation saisonnière | <i>42</i> |
| II-3-6. Variation de la température | <i>43</i> |
| II-3-7. Régime hydrologique : | <i>44</i> |
| II-3-8. Evapotranspiration : | <i>45</i> |
| II-3-8. Bilan hydrique : | <i>46</i> |
| <i>Partie II</i> : | <i>49</i> |
| <i>Modélisation hydraulique du bassin versant d'oued Aggay</i> | <i>49</i> |
| <i>Chapitre I. Méthodologie, Présentation de la modélisation hydraulique</i> | <i>50</i> |
| <i>I-1. Contexte et antécédent</i> | <i>50</i> |
| <i>I-2. Schéma méthodologique général</i> | <i>51</i> |
| <i>Chapitre II. Etude hydrologique</i> | <i>54</i> |
| <i>II-1. Enquête de crues</i> | <i>54</i> |
| II-1-1-Inondations du 25/09/1950 : | <i>54</i> |

| | |
|--|------------------------------------|
| II-1-2-Les inondations d'Août 1992 : | 55 |
| II-1-3-Les inondations de Septembre 1994 : | 55 |
| II-2- La méthode du Gradex..... | 55 |
| II-2-1. Méthode de Gradex modifié | 57 |
| II-2-2-Estimation du débit de pointe par des formules régionales | 58 |
| II-2-3. Calcul de la lame d'eau ruisselée et du volume pour la fréquence 10 ans : | 63 |
| II-2-4. Calcul de la lame d'eau ruisselée et Qp pour différentes fréquences : | 63 |
| II-3. Débits retenus : | 64 |
| II-4. Calcul du temps de concentration :..... | 64 |
| II-5. Le temps de Lag (lag Time) :..... | 66 |
| II-6. La forme de l'hydrogramme de crue : | 66 |
| Chapitre III. Etude hydraulique..... | 68 |
| III-1. Construction du modèle de l'oued Aggay au niveau de l'aval du barrage Aggay..... | 68 |
| III-1-1. Diagnostic de la situation actuelle de l'oued Aggay | 68 |
| III-1-2. Calcul en régime permanent..... | 70 |
| III-1-3. Géométrie de profils en travers | 72 |
| III-1-4. Débits et conditions limites : | 76 |
| III-1-5. Calage et validation..... | 76 |
| III-1-6. Visualisation et discussion des résultats..... | 76 |
| III-2. Construction du modèle de l'oued Aggay au niveau de la ville de Sefrou..... | 81 |
| III-2-1. Diagnostic de la situation actuelle de l'oued Aggay | 81 |
| III-2-2. Calcul en régime transitoire | 85 |
| III-2-3. Topographie | 85 |
| III-2-3. Débit de dimensionnement : | 88 |
| III-2-4. Conditions aux limites du modèle | 88 |
| III-2-5. Simulation des crues de différentes périodes de retour | 90 |
| III-1-6. Limites du logiciel HEC-RAS..... | 97 |
| Chapitre IV. Définition des schémas d'aménagement et le Système de Prévision des crues..... | 98 |
| IV-1. Schéma d'aménagement | 98 |
| IV-1-1. Situation actuelle..... | 98 |
| IV-1-2. Situation projetée | 98 |
| IV-2. Stratégie et plan d'action..... | 99 |
| IV-2-1. Mesures de prévision et d'alerte | 99 |
| Conclusion générale..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Références bibliographiques..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Annexes | Erreur ! Signet non défini. |

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents, que je remercie infiniment pour leurs amours, leurs patiences, leurs soutiens, leurs encouragements, et leurs confiances. Rien au monde ne pourrait exprimer un jour ce que j'ai dans mon cœur pour vous deux, je vous aime,

À ma chère sœur Sara, pour sa très grande gentillesse, pour sa patience, son soutien et son aide.

À mes frères, Kamid et Simohemed

À toute ma famille.

&

À mes chers amis qu'ils trouvent dans ce travail mon profond respect.

M.E.R.S.A.M. L.A.H.S.A.S.N.S

Avant propos

Au terme de ce projet de fin d'étude de Master, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Mr. Hassan TABYAOUI, Professeur à la Faculté polydisciplinaire de Taza, pour m'avoir encadré, me prodigué les conseils pertinents et qui m'a aidé à réaliser mon projet dans les meilleures conditions possibles.

Un sincère remerciement à Mme Bouchra MENGOUB, Chef de service de la recherche et de la promotion Minière au Ministère de l'Energies, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement et à Mr. A.BOURAK, chef de service Entretien des Ouvrages Hydraulique à l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS) qui n'ont jamais hésité à m'orienter et diriger durant toute la période de stage .

Je tiens à remercier du fond du cœur Mr. Lahcen BENABIDATE, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique de Fès, Responsable du Master Hydrologie de surface et qualité des eaux pour la qualité de la formation.

Je tiens à remercier Mme Nadia HOUWARI, Chef de Division de la Promotion Minière au Ministère de l'Energies, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement pour toutes les consignes pertinentes afin mené à bien mon projet, ainsi que pour les cartes de références et la documentation SIG.

Je tiens à remercier tous les Professeurs qui m'ont encadré au cours des deux années de formation au Master Hydrologie de surface et qualité des eaux à la Faculté des Sciences et Technique de Fès. Je citerai Profs. Lahrach Soud, Rais, Jebrane, Chaouni, Hassani, Deraz, Benjeloune, Charroud, Assouik, Alilo, Khalil, Dridri, Chetioui...

Je tiens à la fin à remercier, mes amis de Master, pour leur soutien et leur aide : Souhaila Rachedi, Omar Laarossi, Haytam Messerar, Kaoutar Drif, Widian Badawi, Zineb Nasiri, Laila chwiikh, Hanane el Bahali, Fatima zehra Fakihi, Ismail Omchetak, Bader Amid, Jawad Ziad, Zakaria Wita, Koucho Aziza, Amal Lokman, Kamal Aharik,...

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1: Carte des sites inondables dans le bassin du Sebou (ABHS) | 5 |
| Figure 2: Localisation du bassin versant d'Oued Aggay dans le contexte du Sebou | 6 |
| Figure 3: Localisation du bassin versant d'Oued Aggay dans le contexte du bassin de Sebou..... | 7 |
| Figure 4: la forme du Bassin versant d'oued Aggay..... | 9 |
| Figure 5: MNT du bassin versant de l'Oued Aggay | 10 |
| Figure 6: Interprétation de la courbe hypsométrique (Musy, 2005) | 12 |
| Figure 7: Histogramme de fréquence des classes d'altitudes en fonction de la superficie | 13 |
| Figure 8: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Aggay | 14 |
| Figure 9: Rectangle équivalent du bassin versant d'oued Aggay..... | 16 |
| Figure10: Carte de pentes du bassin versant d'oued Aggay..... | 18 |
| Figure 11: Carte d'orientation du bassin versant d'oued Aggay..... | 21 |
| Figure 12: Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Aggay | 22 |
| Figure 13 : Classification descriptive des types de réseaux hydrographiques d'HOWARD (1967) (in DEFFONTAINES, 1990)..... | 23 |
| Figure 14 : Profil en long de l'Oued Aggay | 24 |
| Figure 15: Occupation des sols du bassin versant de l'oued Aggay..... | 26 |
| Figure 16: Carte structurale schématique de la région étudiée, d'après la carte géologique du Maroc au 1/1000,000 | 27 |
| Figure 17: Carte lithologique du bassin versant d'oued Aggay..... | 29 |
| Figure 18: Carte géologique du bassin versant d'oued Aggay | 31 |
| Figure 19: Double cumul Sefrou/Azzaba | 35 |
| Figure 20: Double cumul Sefrou/Fès..... | 35 |
| Figure 21: Double cumul Sefrou/Ain Timedrine..... | 36 |
| Figure 22: Evolution temporelle des précipitations annuelles des quatre stations (période 1968-69/2010-11)..... | 36 |
| Figure 23: Distribution des précipitations dans le bassin d'oued Aggay | 38 |
| Figure 24: les variations des précipitations annuelles aux stations considérées. | 39 |
| Figure 25: les variations des précipitations mensuelles aux stations considérées. | 40 |
| Figure 26: Evolution spatio-temporelle des précipitations mensuelles moyennes interannuelles (Période 1968 -2010)..... | 41 |
| Figure 27: Localisation des stations | 42 |
| Figure 28: Précipitations moyennes saisonnières (1968-69/ 2009-10) | 42 |
| Figure 29: Distribution de la température dans le bassin d'oued Aggay | 43 |
| Figure 30 :L'irrégularité du régime hydrologique dans le bassin d'oued Aggay | 45 |
| Figure 31 : Schéma Méthodologique..... | 53 |
| Figure 32: Inondation de septembre 1950 au niveau du quartier El Mellah..... | 54 |
| Figure 33: Inondation d'août 1992..... | 55 |
| Figure 34: ajustement des pluies max journalières de la station de Sefrou par la loi de Gumbel | 56 |
| Figure 35: Représentation graphique des courbes IDF pour la station de Sefrou | 61 |
| Figure 36:Hydrogramme des crues du bassin versant de l'oued Aggay | 67 |
| Figure 37: Situation du tronçon étudié et du barrage Aggay ou Hinajen | 69 |
| Figure 38: représentation des différents termes de l'équation d'énergie | 71 |
| Figure 39: Schéma méthodologique de la géométrie des profils en travers | 72 |
| Figure 40 : Résultat d'interpolation entre les profils..... | 75 |
| Figure 41: Ligne d'eau du tronçon modélisé de l'Oued Aggay | 77 |
| Figure 42 : vue du tronçon modélisé en 3D | 78 |
| Figure 43 : la zone la plus touchée par les crues..... | 79 |
| Figure 44: Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance à partir de l'exutoire | 80 |
| Figure 45: Courbes de tarage obtenu à partir de HEC-RAS..... | 81 |

| | |
|--|------------------------------------|
| Figure 46 : Situation du tronçon étudié au centre de la ville de Sefrou..... | <i>Erreur ! Signet non défini.</i> |
| Figure 47: Volume de contrôle élémentaire pour la dérivation des équations de continuité..... | 85 |
| Figure 48: Courbe hauteur-débit..... | <i>Erreur ! Signet non défini.</i> |
| Figure 49 : Schéma de la Modélisation de l'oued Aggay..... | <i>Erreur ! Signet non défini.</i> |
| Figure 50 : ligne d'eau du tronçon modélisé de l'Oued Aggay au niveau de la ville de Sefrou | <i>Erreur ! Signet non défini.</i> |
| Figure 51: Vue en trois D de la crue vingtennale de la rive touchée par les inondations..... | 93 |
| Figure 52 : Vue en trois D de la crue vingtennale de la rive touchée par les inondations..... | 94 |
| Figure 53 : Vue en trois D du tronçon étudié de la crue cinquannennale..... | 96 |
| Figure 54: remplacement des levées au point haut des berges..... | 97 |
| Figure 55: Aménagements pour la protection contre les inondations la ville de Sefrou..... | <i>Erreur ! Signet non défini.</i> |
| Figure 56: L'organigramme illustre l'organisation de l'activité relative au système de prévision et de l'émission des avis d'alerte. | 101 |

Liste des tableaux

| | |
|---|------------------------------------|
| Tableau 1: Hypsométrie du bassin versant de l'oued Aggay | 11 |
| Tableau 2 : Hypsométrie du bassin versant de l'oued Aggay..... | 12 |
| Tableau 3: Valeurs de calcul de la distance des courbes de niveau | 16 |
| Tableau 4 : Classes de pentes | 17 |
| Tableau 5: Caractéristiques des stations météorologiques utilisées dans cette étude | 32 |
| Tableau 6 : Températures moyennes annuelles dans les stations voisines du bassin versant ... | 43 |
| Tableau 7 : Evaluation mensuelle de l'évapotranspiration et du bilan hydrique au niveau de Sefrou | 47 |
| Tableau 8: Pj max de chaque période de retour avec le Gradex | 56 |
| Tableau 9 : P ₂₄ de chaque période de retour avec le Gradex | 57 |
| Tableau 10: Coefficient d'abattement pour différents surfaces | 57 |
| Tableau 11: débit estimés par la methode de Gradex | 58 |
| Tableau 12: Valeurs de K en fonction de la nature de la surface | 59 |
| Tableau 13: débit estimés par différentes methode regionaux..... | 63 |
| Tableau 14: Lamme d'eau précipitée, volume et débit de pointe de chaque fréquence..... | 64 |
| Tableau 15: Débit retenus des différentes méthodes..... | 64 |
| Tableau 16: Tc par différents méthodes appliquées au bassin de l'oued Aggay..... | 66 |
| Tableau 17: les valeurs indicatives du coefficient de rugosité | 73 |
| Tableau 18: Débits des périodes de retour nécessaires à la modélisation | 76 |
| Tableau 19: Coefficient des pertes en charge adoptés pour les différents ouvrages..... | 88 |
| Tableau 20 : Débit de crue de l'oued Aggay au niveau de la ville de Sefrou | 88 |
| Tableau 21 : la relation hauteur-débit..... | Erreur ! Signet non défini. |

Liste des abréviations

| | |
|------------|---|
| D.R.P.E. : | Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau |
| D.P.E : | Direction Provinciale d'Equipement |
| ABHS : | Agence des Bassins Hydrauliques du Sebou |
| D.P.E: | Direction Provincial d'Equipement. |
| S.I.G : | Système d'information Géographique |
| HEC-RAS: | Hydrologic Engineering Center's River Analysis System |
| MNT : | Modèle numérique de terrain |

Introduction générale

Les crues font partie du fonctionnement naturel d'un cours d'eau. Elles peuvent être différentes d'une année à l'autre et n'entraînent pas forcément des inondations, ou du moins des grandes catastrophes. En effet, l'ampleur des inondations arrive de façon périodique et dépend des conditions météorologiques. Les crues se produisent en général suite à une forte pluie de longue durée ou d'une fonte de neige après sa saturation durant la pluie. Qu'un pays au climat semi-aride comme le Maroc subit de temps à autre les méfaits des inondations, ce n'est guère un paradoxe. On est presque tenté d'affirmer que l'aridité favorise l'apparition des crues violentes, car l'absence de couverture végétale et le type du sol soutient le ruissellement aux dépens de l'infiltration.

Aussi le risque d'inondation est le résultat de la présence à la fois d'un cours d'eau susceptible de déborder après de fortes précipitations et de la présence de biens vulnérables.

Il est à souligner que la vulnérabilité augmente fortement avec le développement urbain et que des situations de risques peuvent être créées là où il n'y en avait pas auparavant, d'où la nécessité d'une maîtrise de l'occupation des sols en zones inondables.

L'occupation des zones vulnérables est à l'origine de l'augmentation des dommages causés par les inondations. L'aggravation du risque d'inondation trouve son explication dans le fait que les mêmes flux rencontrent désormais sur le passage des zones de plus en plus densément occupées.

La ville de Sefrou se situe au Nord du Moyen Atlas, sur la RR 503 reliant la ville de Fès dans la plaine de Saïs et la ville de Boulemane dans les hauteurs du Moyen Atlas. Ses coordonnées Lambert moyenne sont : $X = 552.000$; $Y = 359.000$; et son altitude varie entre 800 et 850 m.

La situation géographique de l'agglomération de Sefrou (piémont du Moyen Atlas) fait d'elle un lieu de passage et de confluence de plusieurs oueds. Ainsi Sefrou connaît périodiquement des problèmes d'inondation plus ou moins graves causés par les crues de l'oued Aggay qui constitue un danger potentiel. Trois crues majeures ont été enregistrées en 1953, 1976, 1994.

C'est dans cette optique que vient ce présent travail qui a pour objectif dans un premier temps, la mise au point d'un modèle hydraulique dans la prévention des crues et l'adaptation des interventions contre les effets des crues dans les zones inondables. Puis dans un deuxième temps défini les schémas d'aménagements projetés au niveau de l'oued Aggay. Tout ceci s'inscrit sous un objectif final permettant, en premier lieu, une protection contre les inondations des zones de débordement et, en deuxième lieu, la couverture de l'oued Aggay au niveau du tronçon traversant l'ancienne médina.

Le travail est présenté en deux parties. La première partie porte sur la problématique, et la présentation du secteur d'étude. La deuxième partie, est étalée sur 4 chapitres, consacrée à la construction du modèle d'Oued Aggay.

Partie I.

Problématique, Cadre général du bassin versant de l'Oued Aggay

Chapitre I. Problématique

I-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...

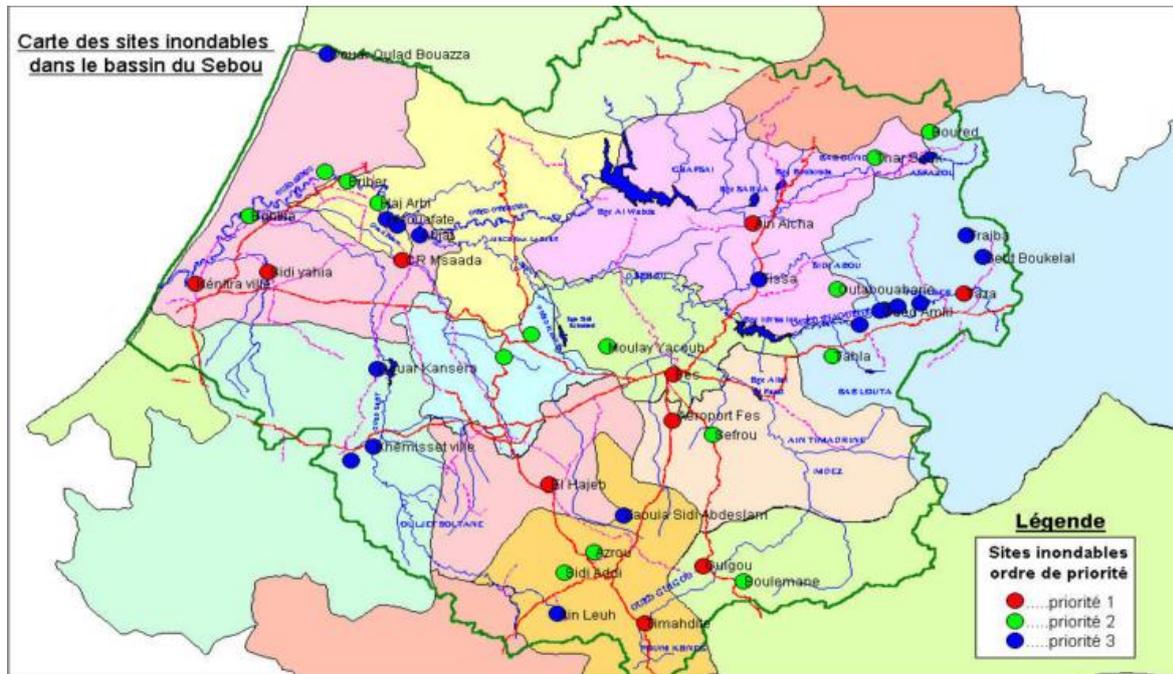


Figure 1: Carte des sites inondables dans le bassin du Sebou (ABHS)

I-2. Problématique des inondations dans le bassin versant d'oued Aggay et critères de choix de ce bassin

Le bassin de l'Oued Aggay est situé au SE du bassin hydrologique de Sebou. Il couvre une superficie de 108 km² (fig. 2). L'oued Aggay qui constitue le drain principal du bassin est progressivement alimenté tout au long de son cours par de petites sources. Son débit à l'étiage est faible, malgré la superficie appréciable de son bassin versant. Le climat est de type continental (hiver pluvieux et été chaud et sec). La pluviométrie est très irrégulière d'une année sur l'autre. La moyenne des précipitations est 553mm. Elle varie de 450 mm à 600 mm. La neige apparaît sur les reliefs élevés du Sud ouest à l'est du bassin.

Sur le plan géomorphologique, l'aval du bassin versant d'oued Aggay est connue par des roches karstifiables (calcaire et dolomie) et par des vallées sèches réceptacles d'averse qui constituent des zones d'empreintes riches en matériaux de crues.

La pente moyenne du bassin versant est de 3.3%. Cette valeur montre avec évidence l'érosion extrêmement intense qui sévit dans ce bassin et permettent de penser que le ruissellement y est très élevé.

La couverture végétale potentielle est généralement sylvaïque. La biomasse forestière protectrice est parfois très réduite. Le ruissellement superficiel favorise le décapage du sol et le démantèlement des terrasses au fond des vallées.

La très forte densité d'urbanisation au centre de la ville de Sefrou, un habitat diffusé au Nord et au Sud du BV, se faisant souvent en lit majeur des crues et dans les zones altimétriquement basses.

L'action combinée de l'anthropisme et des facteurs naturels a intensément fragilisé le bassin versant d'Oued Aggay. Cette double fragilisation à l'aval du BV et l'expansion urbaine exposée au risque d'inondation ont fait de la ville de Sefrou un site dont les problèmes d'aménagement sont épineux, nécessitant des outils de planification adéquats et des interventions coordonnées et efficaces en matière d'aménagement.

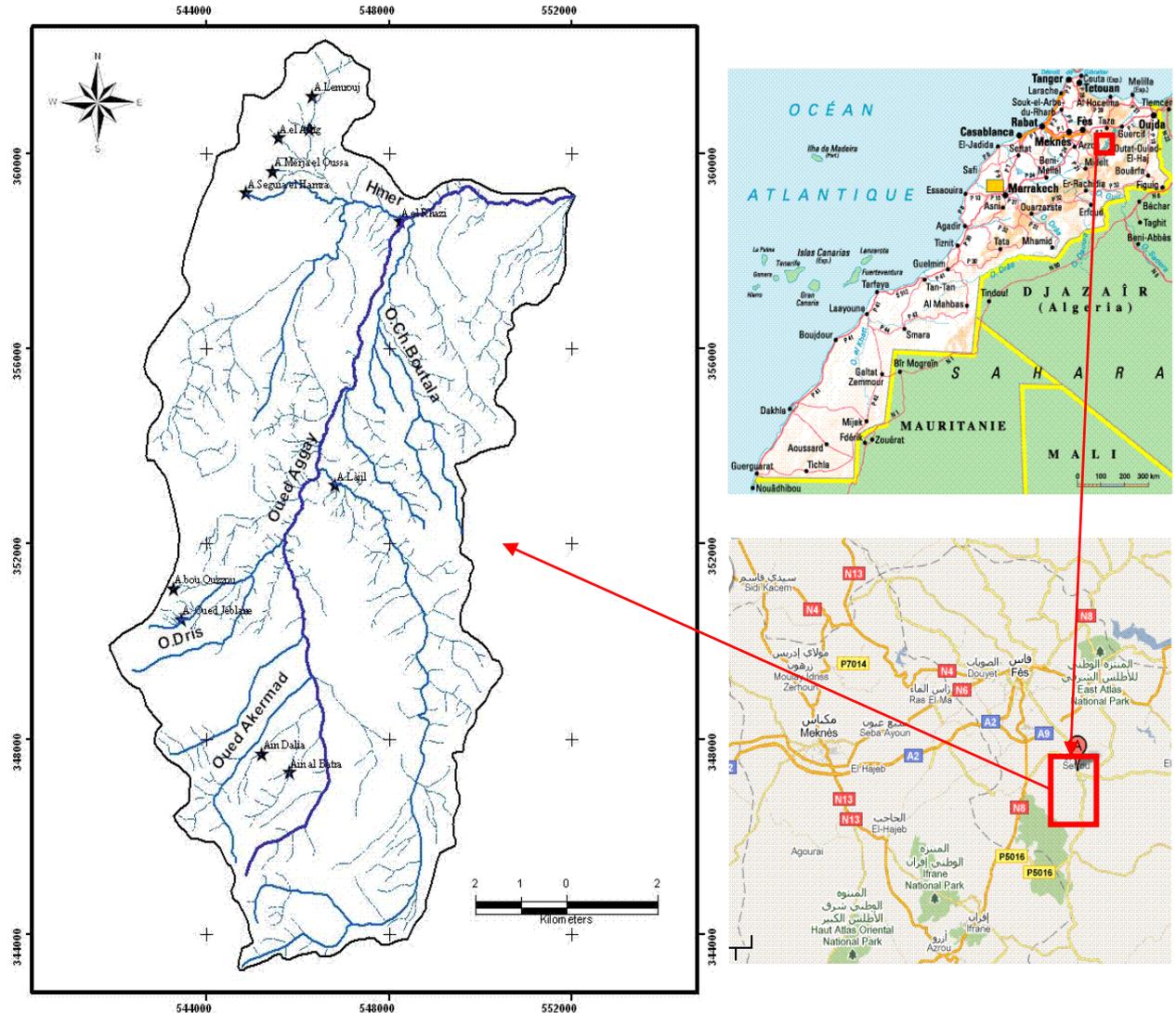


Figure 2: Localisation du bassin versant d'Oued Aggay dans le contexte du Sebou

Chapitre II. Cadre général du bassin versant de l'Oued Aggay

II-1. Paramètres physiographiques du bassin versant d'Oued Aggay

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage. Le temps de concentration t_c , caractérise en partie la vitesse. L'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations, est influencée par diverses caractéristiques morphologiques : en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son élévation, sa pente et son orientation. A ces facteurs s'ajoutent encore le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Ces facteurs, d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir de cartes topographiques de 1/50 000 ou en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques.

II-1-1. Situation géographique

La région étudiée appartient à la partie septentrionale du causse moyen atlasique, à 20 km à vol d'oiseau au SE de la ville de Fès et à 46 km au NW de Bouloumane. Elle s'étend entre les coordonnées Lambert $X_1= 540000$, $X_2= 568000$, $Y_1= 332000$, $Y_2= 368000$ (fig. 3). Elle est limitée au Nord par la plaine de Sais, à l'Ouest et au SW par le causse d'Imouzzer au Sud par le causse de Guigou et à l'Est par le Moyen atlas plissé.

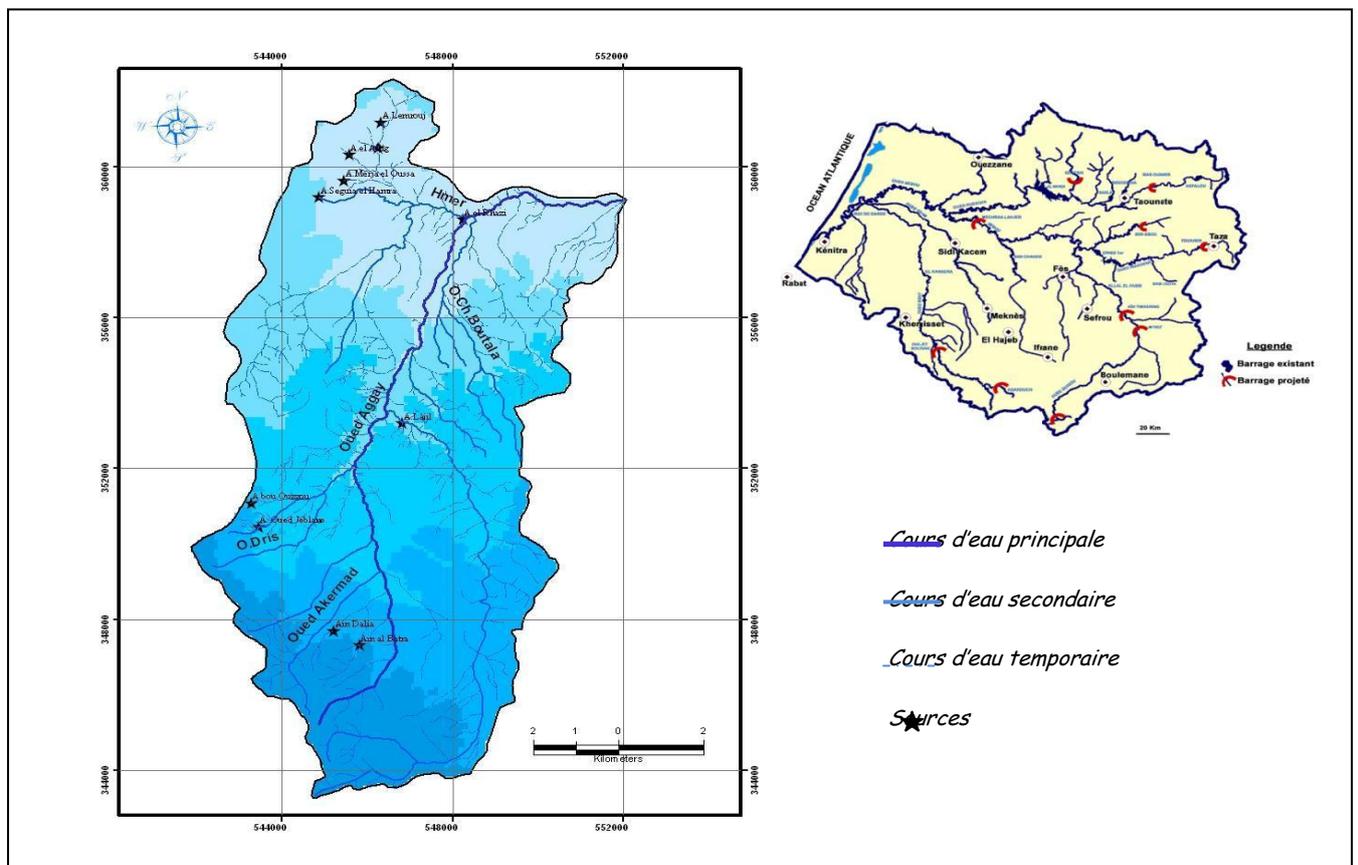


Figure 3: Localisation du bassin versant d'Oued Aggay dans le contexte du bassin de Sebou

II-1-2. Surface

La surface du bassin versant est l'une des caractéristiques les plus importantes. Elle s'obtient par planimétrage 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 km².

$$\mathbf{A = 107.89 \text{ Km}^2}$$

II-1-3. 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.

$$\mathbf{P = 55.43 \text{ Km}}$$

II-1-4. 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. Ce dernier est obtenu en comparant le périmètre d'un bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface (Roche, 1963):

$$\mathbf{Kc = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad Kc = 1,49}$$

Avec :

Kc: indice de compacité de Gravelius ;

P : périmètre du bassin versant (Km) ;

A : surface du bassin versant (Km²)

Le bassin est considéré comme bien drainé si son indice de compacité tend vers 1. La figure 4 correspond à la forme du bassin de l'Oued Aggay en fonction de leur indice de compacité.

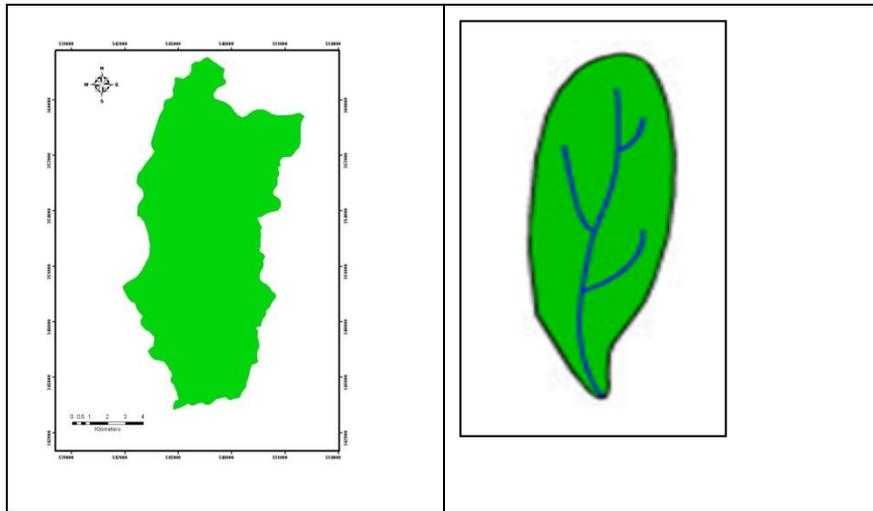


Figure 4: la forme du Bassin versant d'Oued Aggay

Le bassin d'Oued Aggay a un indice de compacité égale à 1,49. Sa forme est allongée, elle est liée essentiellement à la présence de failles de direction NNE-SSW dont la faille de Dayet Aoua. 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.

II-1-5. Indice de compacité de Horton :

Cet indice exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal.

$$K_H = A/L^2 \quad K_H = 0,16$$

Avec :

A : surface du bassin (km²)

L : longueur du cours d'eau principal (km)

II-1-6. Caractéristiques topographiques du bassin versant d'Aggay

II-1-6-1. Le relief

L'altitude moyenne du bassin versant de l'Oued Aggay est de 430 m avec un sommet à 1735m et un exutoire à 880 m. L'amont de ce bassin est étroit et il s'élargit progressivement en allant vers l'aval (fig. 5). Ce qui permet de constater que le bassin versant d'Aggay est caractérisé par une topographie très contrastée. Ce contraste est matérialisé principalement par l'effet de la tectonique cassante.

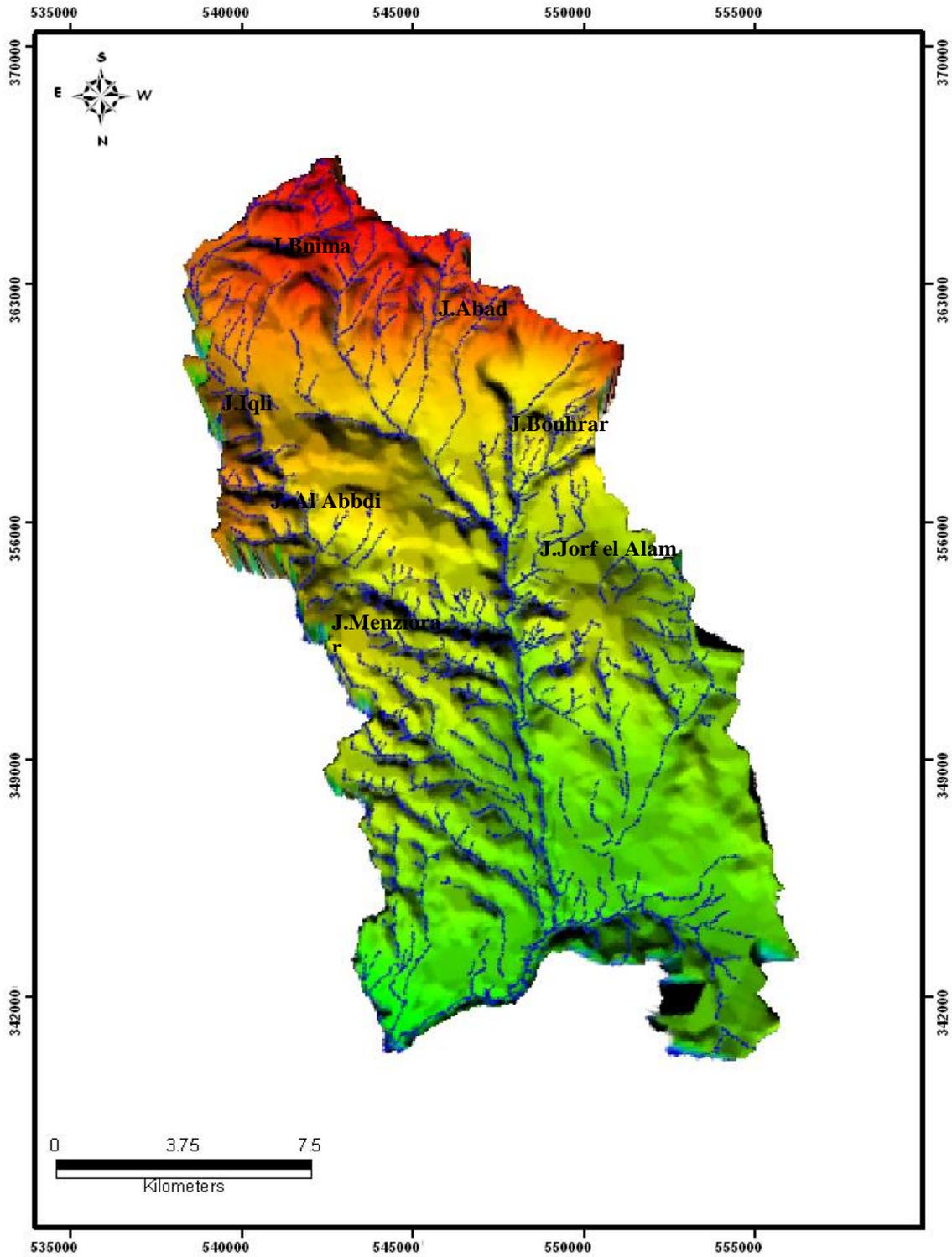


Figure 5: MNT du bassin versant de l'Oued Aggay

II-1-6-2. 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 l'Oued Aggay, on va appliquer une méthode statistique qui permet grâce à un histogramme et 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 des cumulées (Tabl.1& 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. 6). 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 l'Oued Aggay, on a commencé par le calcul des surfaces en fonction des altitudes, puis les pourcentages des surface cumulées.

| Classes d'altitude en (m) | Surface en (Km ²) | % au dessus |
|---------------------------|-------------------------------|-------------|
| 1735 | 0.00 | 100.00 |
| 1700 | 0.05 | 99.96 |
| 1600 | 2.65 | 97.55 |
| 1500 | 24.41 | 77.46 |
| 1400 | 42.14 | 61.09 |
| 1300 | 64.14 | 40.76 |
| 1200 | 79.80 | 26.31 |
| 1100 | 91.47 | 15.53 |
| 1000 | 99.65 | 7.97 |
| 900 | 107.13 | 1.06 |
| 880 | 108.28 | 0.00 |

Tableau 1: Hypsométrie du bassin versant de l'oued Aggay

| Classes d'altitudes en (m) | Surface en (Km ²) | % du totale |
|----------------------------|-------------------------------|-------------|
| 1735-1700 | 1.15 | 1.06 |
| 1700-1600 | 7.48 | 6.91 |
| 1600-1500 | 8.18 | 7.56 |
| 1500-1400 | 11.67 | 10.78 |
| 1400-1300 | 15.65 | 14.46 |
| 1300-1200 | 22.01 | 20.32 |
| 1200-1100 | 17.37 | 16.37 |
| 1100-1000 | 21.76 | 20.10 |
| 1000-900 | 2.6 | 2.4 |
| 900-880 | 0.05 | 0.04 |

Tableau 2 : Hypsométrie du bassin versant de l'Oued Aggay

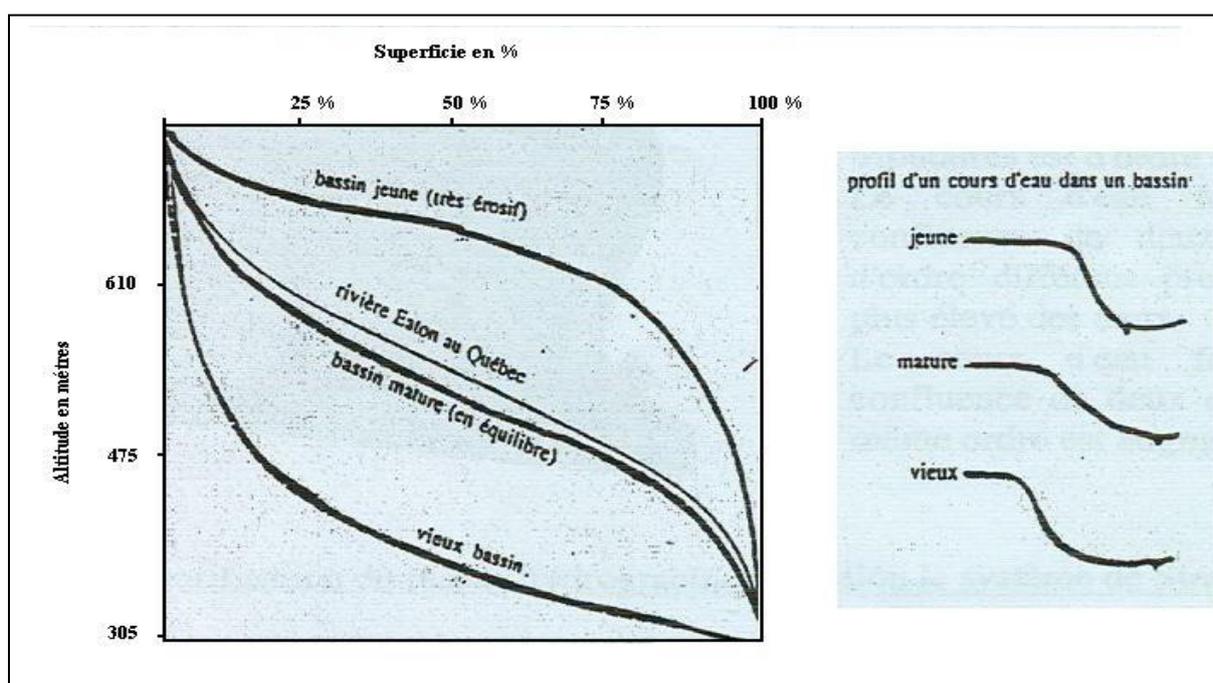


Figure 6: Interprétation de la courbe hypsométrique (Musy, 2005)

Toutes ces données en été réparti sur un graphique (Fig. 8) qui va permettre de dégager les différentes caractéristiques :

Altitude la plus fréquente :

Elle correspond au maximum de l'histogramme des fréquences altimétriques. C'est, en d'autres termes, l'altitude de la plus grande surface élémentaire comprise entre deux courbes de niveau successives. Au niveau de l'Oued Aggay, l'altitude la plus

fréquente est celle de la classe 1300 avec une superficie de 22 Km² localisée dans la partie médiane et aval du bassin.

Altitude de fréquence ½ (la médiane) :

Correspond au point d'ordonnée 50% de la courbe hypsométrique. La médiane du bassin versant de l'Oued Aggay est la classe 1200 m (Fig. 7).

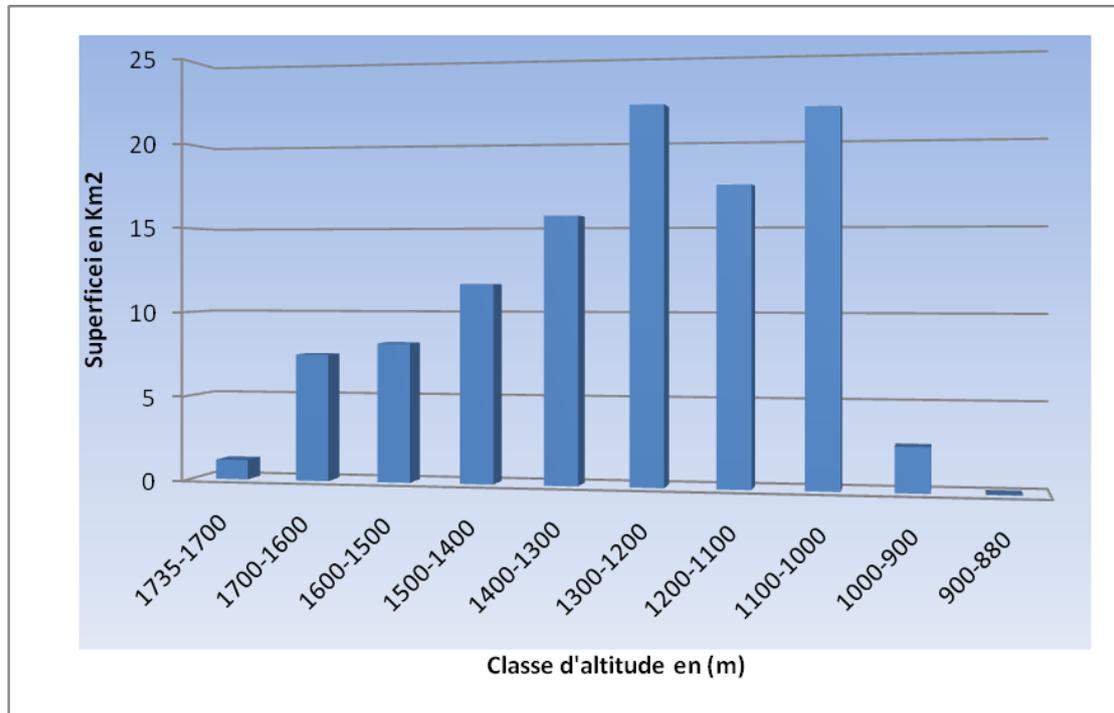


Figure 7: Histogramme de fréquence des classes d'altitudes en fonction de la superficie

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.

Dans le cas du bassin versant d'Oued Aggay, la courbe hypsométrique (Fig. 8) obtenue renferme une pente très forte.

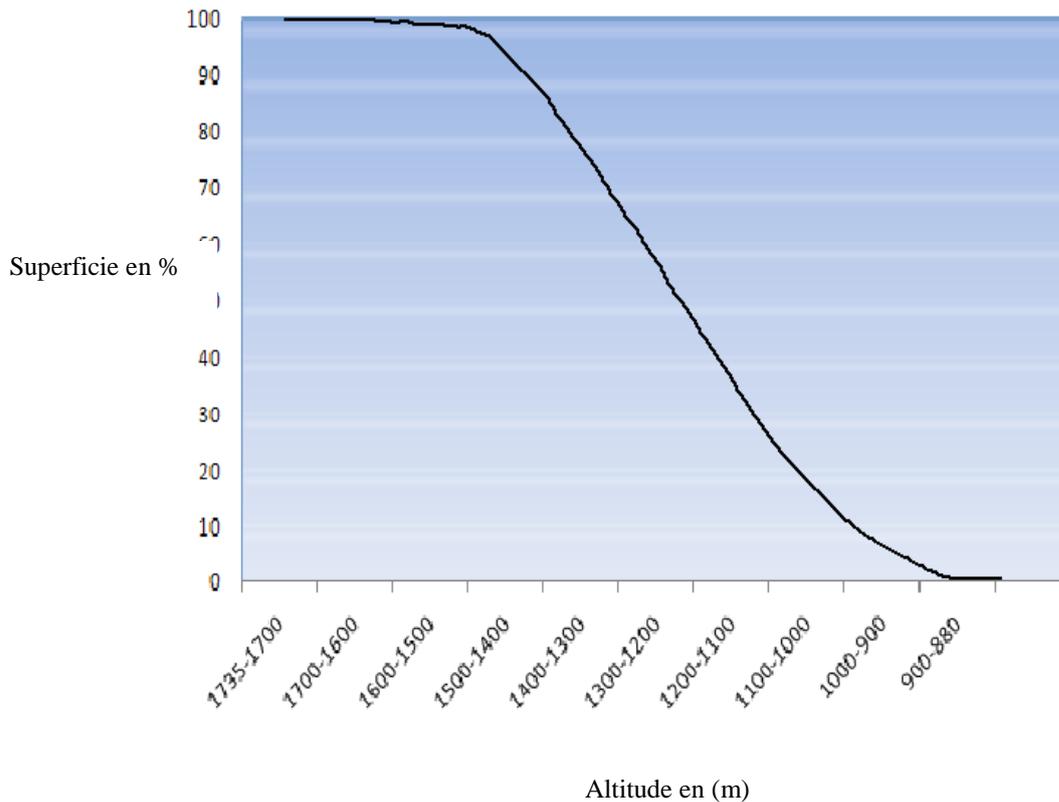


Figure 8: Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Aggay

II-1-6-3. 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=1735 m

Alt min=880 m

☞ L'altitude moyenne

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

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A} \quad \mathbf{H\ moy = 430\ m}$$

Avec :

H_{moy} : altitude moyenne du bassin [m] ;

A_i : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²] ;

h_i : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ;

A : superficie totale du bassin versant [km²].

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.

II-1-7. Rectangle équivalent

Pour comparer le comportement hydrologique de deux bassins, on utilise la notion du rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius. C'est une représentation purement géométrique dans laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie (Fig. 9). Ainsi, les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits cotes du rectangle et l'exutoire est l'un de ses petits cotes soit « L » et « l » les cotes des rectangles, « P » le périmètre du bassin et « A » sa surface (Roches, 1963), on a :

La longueur L :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \text{ si } K_G \geq 1.12 \quad \mathbf{L = 22,94 Km}$$

La largeur l :

$$l = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right) \text{ si } K_G \geq 1.12 \quad \mathbf{l = 4,70 Km}$$

Avec :

K_G : indice de compacité de Gravelius ;

A : surface du bassin versant en Km²

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 le bassin versant de l'Oued Aggay.

| X_i | L | D_i |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 0.01 | 22.94 | 0.229 |
| 0.024 | 22.94 | 0.550 |
| 0.2 | 22.94 | 4.588 |
| 0.163 | 22.94 | 3.739 |
| 0.203 | 22.94 | 4.656 |
| 0.143 | 22.94 | 3.280 |
| 0.107 | 22.94 | 2.454 |
| 0.007 | 22.94 | 0.160 |
| 0.069 | 22.94 | 1.582 |

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

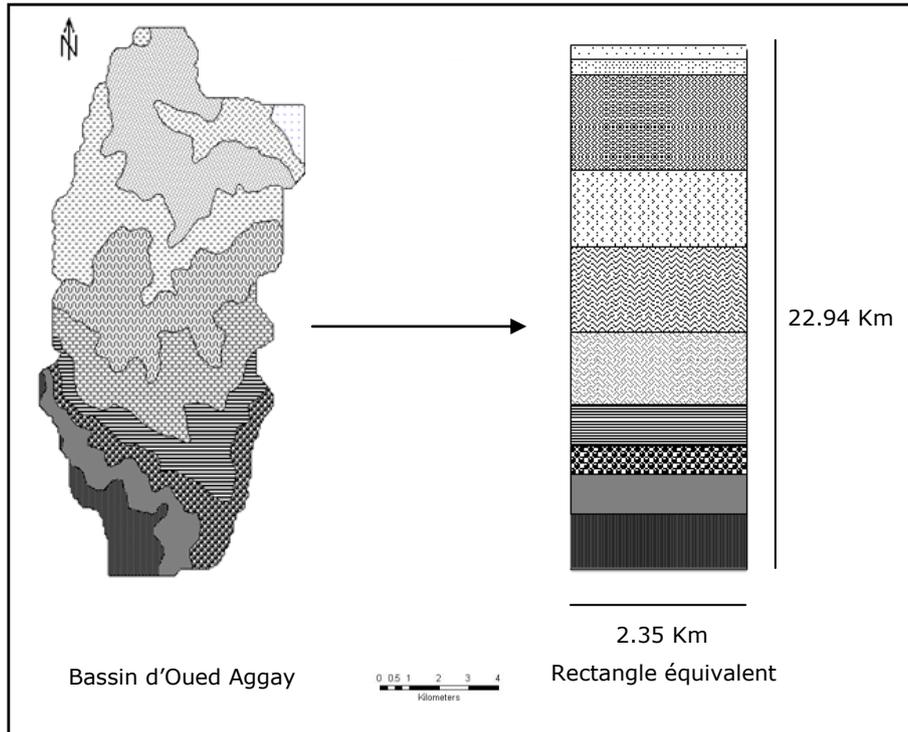


Figure 9: Rectangle équivalent du bassin versant d'oued Aggay

II-1-8. 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.

II-1-8-1. Réalisation de la carte des pentes

Les classes de pente (Tabl. 4) sont déduites d'un modèle numérique de terrain. Le MNT est extrait du SRTM du Maroc (Résolution 30 m de coté de pixel).

| Classe | Type de pente |
|---------------|------------------------|
| 1. | Nulle à faible (0-3%) |
| 2. | Modérée (3%-12%) |
| 3. | Abrupte (12%-20%) |
| 4. | Très abrupte (20%-35%) |
| 5. | Extrême (> 35%) |

Tableau 4 : Classes de pentes

A partir du profil, on peut déduire que les pentes au niveau du bassin d'Aggay (Fig. 10) sont en majorité très faibles (inférieur à 3%). Géographiquement, cette classe de pente occupe surtout la cuvette de Sefrou, le bassin d'El Glat, Mimet, et l'extrémité est de Targa-Mesra. Les faibles pentes (3 à 12%) caractérisent les unités qui ont la forme d'un plateau comme le plateau d'El Boukaia et celui d'El Haricha à l'amont. Alors que les pentes moyennes (12 à 20%) à fortes (20%) caractérisent essentiellement les versants de Jbel Kander, Jbel Ksikou et Jbel Abbad.

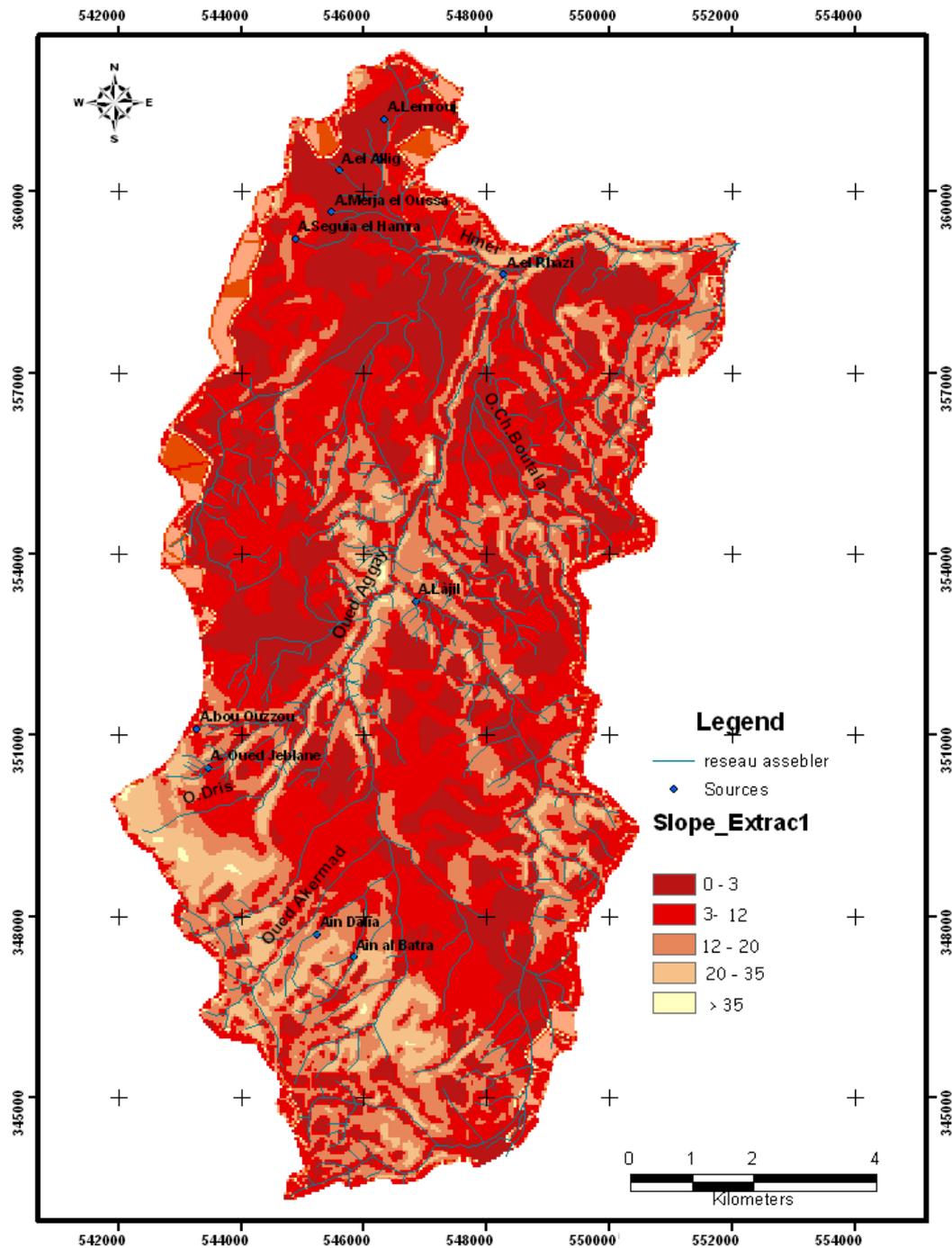


Figure10: Carte de pentes du bassin versant d'oued Aggay

II-1-8-2. Pente moyenne du bassin

La pente moyenne est égale au quotient de la différence entre les hauteurs extrêmes par la longueur du rectangle équivalent. Elle renseigne sur la topographie du bassin, donc elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux

averses. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices.

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

$$P_{\text{moy}} = 2 H_{\text{moy}}/L$$

$$P_{\text{moy}} = 32,9 \text{ m/km} = 3,29 \%$$

Avec :

P_{moy} : pente moyenne du bassin ;

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

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

II-1-8-3-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.

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

$$I_{\text{classique}} = 37,27$$

Avec :

$I_{\text{classique}}$: indice de pente classique ;

H_{max} : altitude maximale ;

H_{min} : altitude minimale ;

L_{eq} : longueur du rectangle équivalent.

II-1-8-4-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.

$$I_g = \frac{D_u}{L_{\text{eq}}}$$

$$I_g = 22,97 \text{ m/km}$$

Avec :

D_u : $H_{5\%} - H_{95\%} = 600 \text{ m}$, la dénivelé utile est l'altitude entre laquelle s'inscrit 90% de la surface du bassin.

$H_{5\%}$: altitude correspondant à 5% de la surface totale du bassin au dessus de $H_{5\%}$;

$H_{95\%}$: altitude correspondant à 95% de la surface totale du bassin versant de $H_{95\%}$;

I_g : indice de pente globale ;

L_{eq} : longueur du rectangle équivalent.

L'indice de pente influence la réponse du bassin au niveau du volume écoulé, de la forme de l'hydrogramme de débit écoulé et très particulièrement au niveau de la durée de l'écoulement et de l'enregistrement du débit max.

II-1-8-5-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.

$$D_s = I_g \sqrt{A} \qquad D_s = 239,04 \text{ m}$$

Avec :

D_s = dénivelée spécifique ;

A = surface du bassin versant (Km²) ;

I_g = indice de pente globale.

II-1-9. Orientation du bassin versant :

Comme on vient de le voir, 68% du bassin est orienté vers le Nord (Fig. 11). Cette disposition est peu favorable à l'enneigement. Ceci explique que malgré une altitude moyenne plus élevée, les neiges y fondent beaucoup plus rapidement. Cette fonte des neiges précoces favorise les crues des mois de Mars et d'Avril.

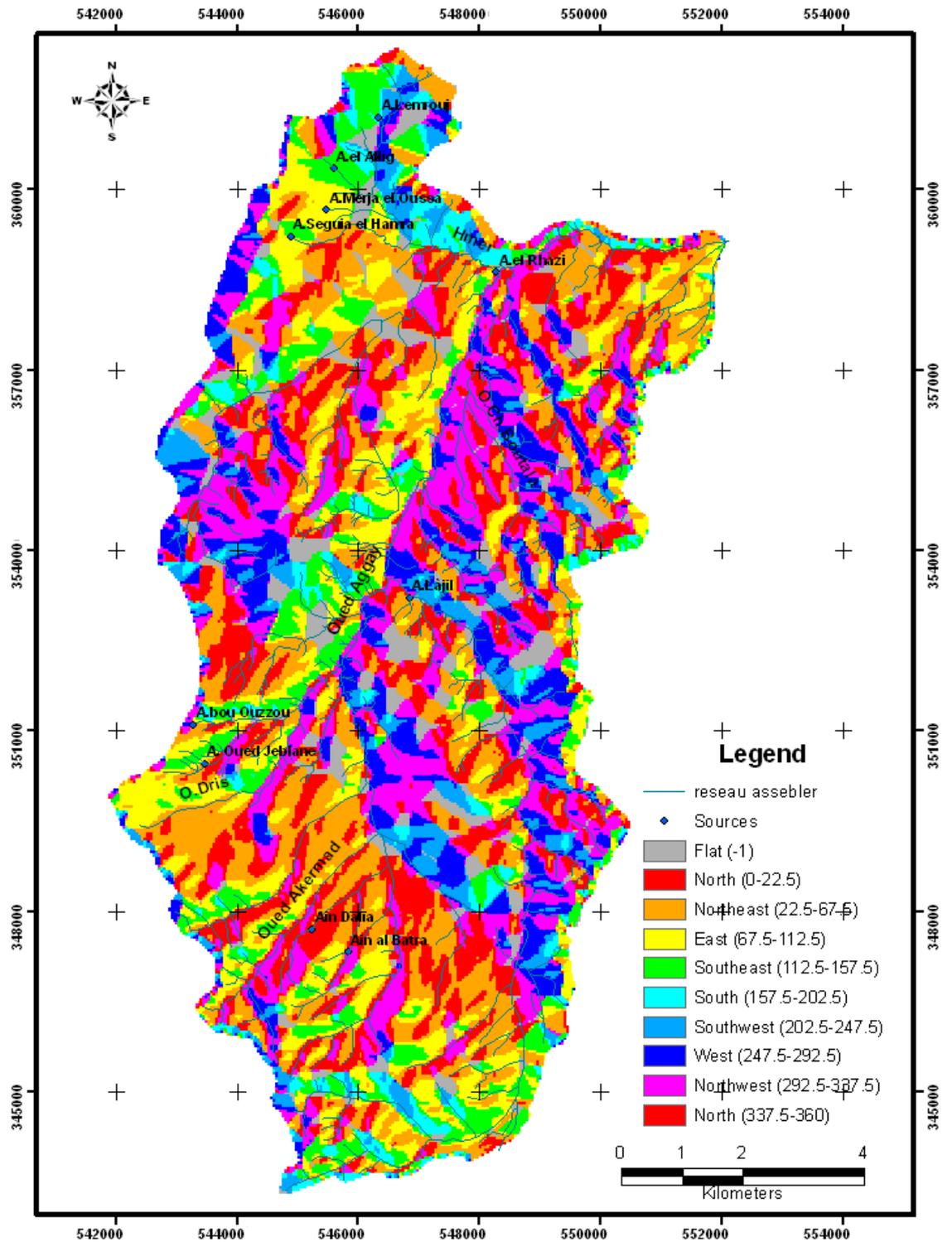


Figure 11: Carte d'orientation du bassin versant d'oued Aggay

II-1-10. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique désigne l'ensemble des canaux de drainage naturels, permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent les eaux provenant du ruissellement

ou restituées par les nappes souterraines sous forme de source ou de restitution le long des lits des cours d'eau. Dans le secteur d'étude, l'oued Aggay est le cours d'eau principal. Il draine sur une longueur de 26.11 km. Il prend sa naissance au Sud du bassin versant de Sefrou grâce à l'affleurement de la nappe et à l'émergence de certaines sources de faible débit (Fig 12).

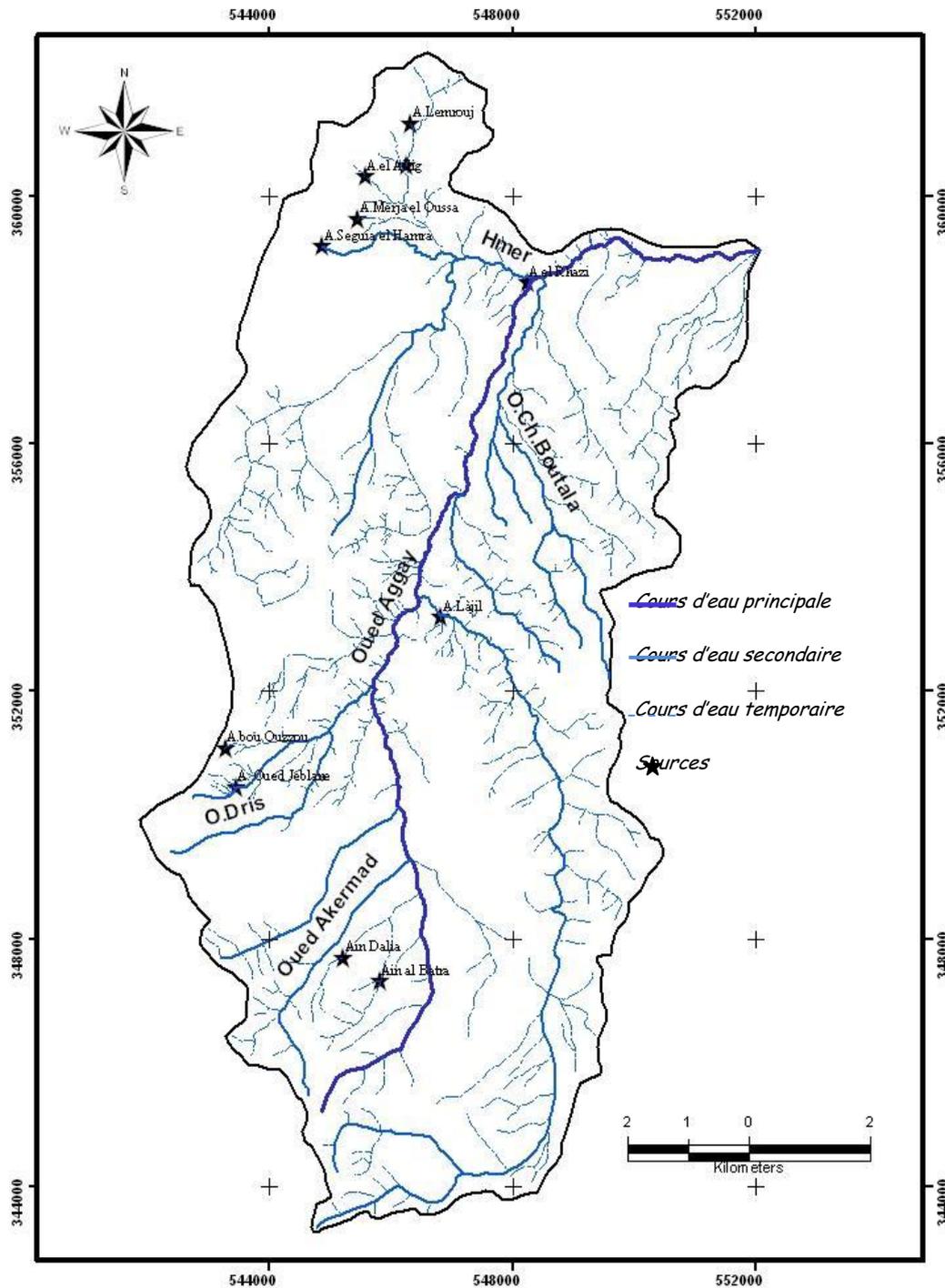


Figure 12: Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Aggay

On peut subdiviser l'oued Aggay en deux parties : le haut Aggay, et le bas Aggay.

Le haut Aggay : Sa limite inférieure est représentée par la zone de passage de la faille de Sefrou-Bhalil. Les branches supérieures de l'Oued Aggay prennent naissance au niveau de Jbel Abbad. D'autres branches prennent leur sources à Bnima dans les dolomies ou émerge la source de Dalya. Il a un affluent coté gauche, l'oued Akermad à écoulement saisonnière ne débitant qu'en périodes pluvieuses.

Il est caractérisé par une sinuosité généralement réduite qui due à l'élévation de la pente longitudinale du lit. Le réseau hydrographique apparait bien développé, avec de longs talwegs et des ramifications qui peuvent atteindre le quatrième ordre. Ceci peut être expliqué par l'importance de la pente de talwegs qui défavorise l'infiltration des eaux. Ainsi, d'après la classification descriptive d'Howard (1967), qui résume les différents types de base de réseaux hydrographiques (Fig. 13), le haut Aggay est caractérisé par un réseau dendritique.

D'autre part, on constate que toutes les vallées inscrites dans cette partie convergent vers la vallée principale de l'Oued Aggay et vers la ville de Sefrou, ce qui constitue une menace d'inondation pour cette dernière qui s'installe au niveau d'une dépression tectonique.

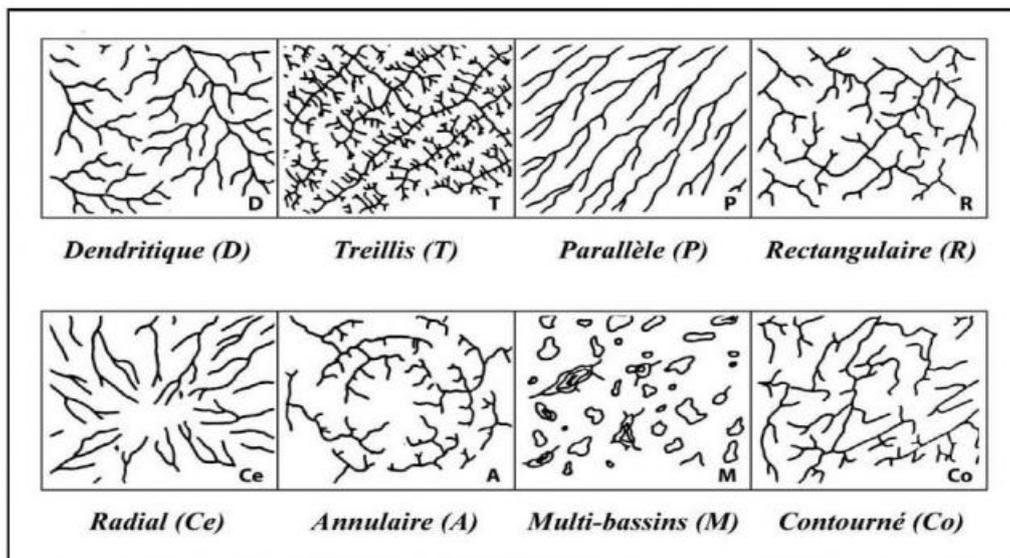


Figure 13 : Classification descriptive des types de réseaux hydrographiques d'HOWARD (1967) (in DEFFONTAINES, 1990).

Le bas Aggay s'étend de la zone du passage de la faille de Sefrou-Bhalil orientée N140, jusqu'à Bou Oughioul. Dans cette partie, l'oued pénètre dans les compartiments Nord affaissés de Sefrou entraînant ainsi le creusement d'une vallée profonde de 100 m et de forme U. Ce creusement est généré par l'effondrement d'âge quaternaire moyen-récent qui affecte les dépôts datés à 220 000 ans (Hinaj et al., 2002).

Le bas Aggay est caractérisé par un réseau hydrographique moins développé, voir même absent, dans certaines localités. Il a un affluent : l'oued Hmer, à écoulement pérenne, alimenté par de nombreuses sources. En effet, certains talwegs marquent une disparition brutale qui perturbe la continuité du réseau. Ceci peut être expliqué par l'importance de l'infiltration des eaux qui favorisée par l'aplanissement, la karstification (au niveau des plans de failles) et la fracturation qui affectent le terrain (El Fellah, 2002).

Le réseau hydrographique est caractérisé par :

❖ Profil en long du cours d'eau principal

Le profil en long du cours d'eau principal (fig. 14) est un graphique représentant les différentes élévations du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'embouchure ou l'exutoire. Ce profil donne une idée sur l'allure du cours d'eau. Il permet d'une part de donner une idée sur la vitesse de l'eau dans le chenal, et d'autre part de mettre en évidence les zones de grande et de faible pente et par conséquent les zones de grande ou de faible vitesse d'eau.

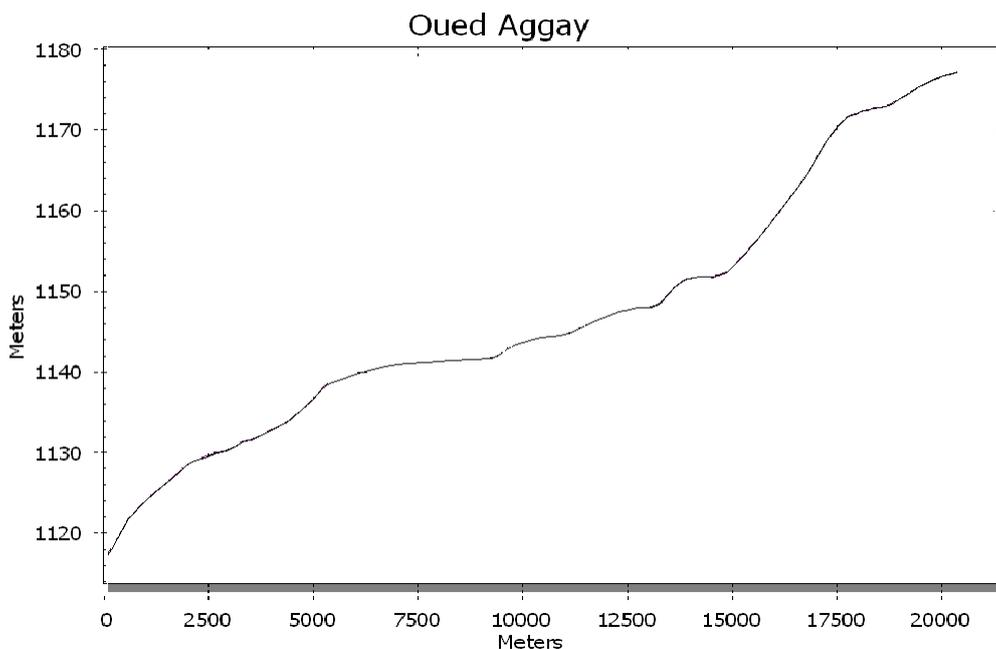


Figure 14 : Profil en long de l'Oued Aggay

❖ Densité de drainage

La densité de drainage (D_d) est définie comme le rapport entre la longueur totale du réseau hydrographique (L_i = longueur de tous les cours d'eau, pérennes ou temporaires) et la superficie du bassin versant.

La densité de drainage est exprimée en Km/Km².

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

$$D_d = 2.62 \text{ km}^{-1}$$

Avec :

Li : longueur totale des cours d'eau en Km ; Li=284.2 Km

A : superficie du bassin versant en Km²

La densité de drainage est, en quelque sorte, un reflet de la dynamique du bassin, de la stabilité du réseau hydrographique et du type de ruissellement de surface. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevés.

II-1-11. Couvert végétal :

La couverture végétale potentielle est généralement sylvatique (Labhar, 1998). Elle présente trois groupements végétaux :

- ✓ Le premier est à la base de l'oléo-lentisque sur les bordures ;
- ✓ Le deuxième est la chaîne pure à chêne vert entre 1000 m et 1500 m.
- ✓ Le dernier groupement est la zénaie mésophile au dessus de 1500 m.

Les écosystèmes forestiers sont loin du climax. Ils ont subi des perturbations parfois considérables sous l'effet de l'impact anthropique séculaire. La biomasse forestière protectrice est parfois trop réduite. L'ouverture de plus en plus avancée du tissu forestier limite la protection du sol contre l'érosion accélérée. Le ruissellement superficiel favorise le décapage du sol et le démantèlement des terrasses au fond des vallées.

Les pratiques sylvo-agro-pastorales sont marquées dans le paysage par la progression des cultures au fond des vallées en berceau et sur des pentes fortes au détriment du couvert forestier. Les coupes délictueuses de bois sont fréquentes et même dégradantes du milieu. Lorsque les prélèvements sont importants, le surpâturage est bien évident. Il est souvent marqué par le fort piétinement et le tassement du sol.

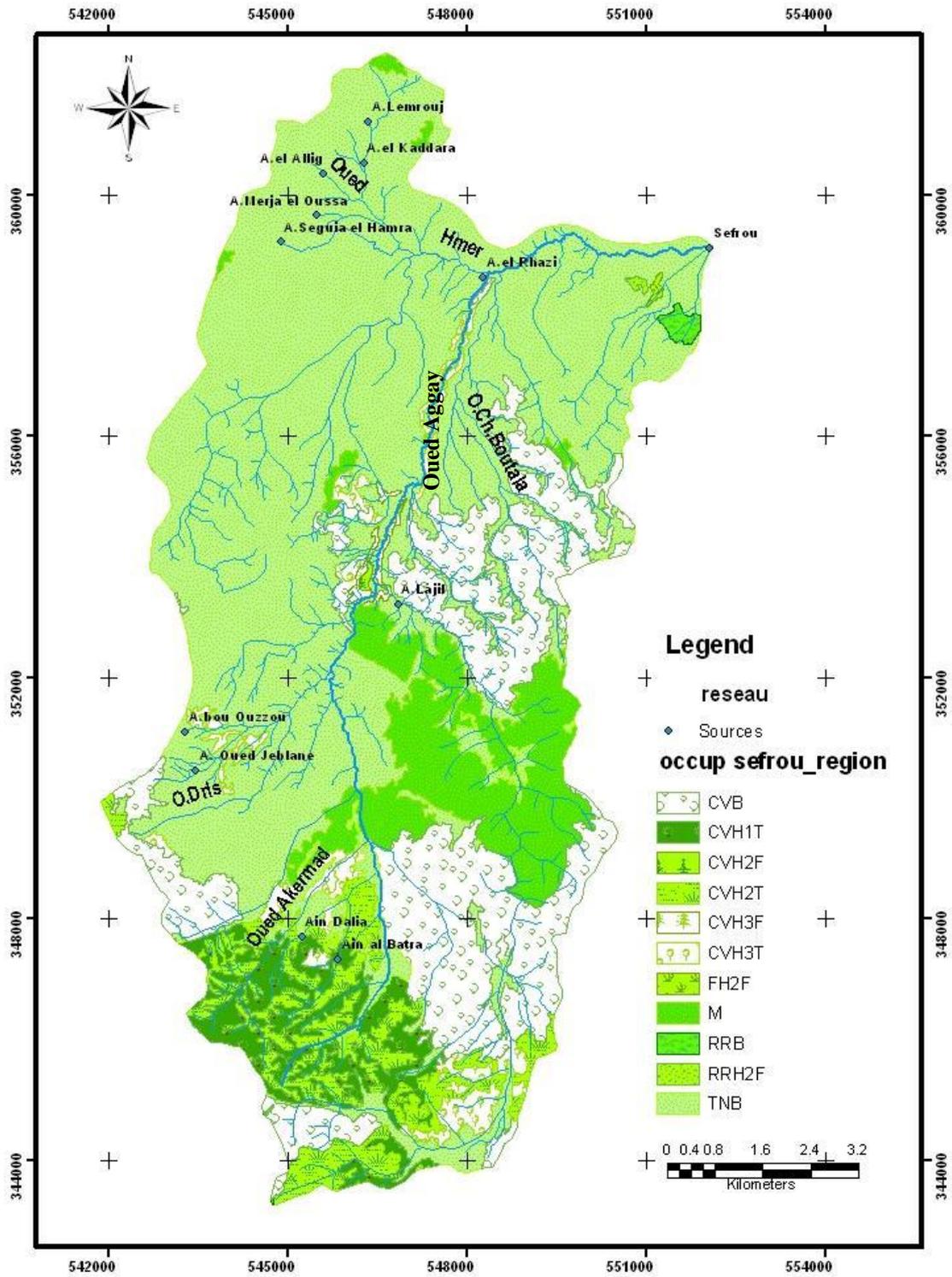


Figure 15: Occupation des sols du bassin versant de l'oued Aggay

II-2. Géologie du bassin versant d'Oued Aggay

La partie géologique est basée essentiellement sur les études qui ont été déjà réalisées sur le Moyen Atlas marocain. On citera en particulier ceux de Termier(1936), Choubert et Faure Muret (1956), Bentayeb et Leclerc (1977), Martin (1977-81), Bouabdeli (1985).

II-2-1. Géologie régionale

Le terme de Causse moyen-atlasique (Termier, 1936) est réservé aux régions tabulaires situées directement au nord et nord-ouest de l'accident nord-moyen-atlasique (Fig.16) qui les sépare du Moyen Atlas plissé situé à l'est (Colo, 1961).

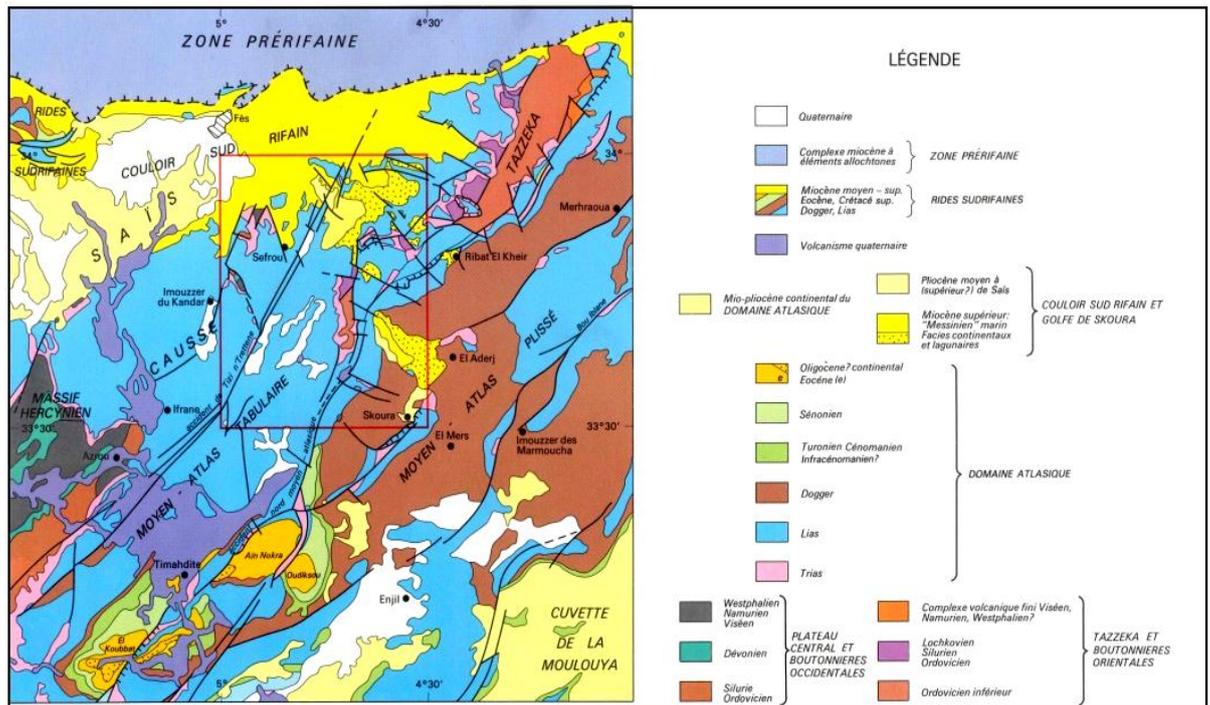


Figure 16: Carte structurale schématique de la région étudiée, d'après la carte géologique du Maroc au 1/1000,000

II-2-2. Géologie local

Le secteur d'étude est une unité structurale située dans la partie centrale du causse moyen atlasique. Il s'agit du causse de Sefrou. Ce secteur est constitué essentiellement des terrains du Lias inférieur (Fig. 17). Ses bordures N et NW s'ennoient sous les formations miocènes du couloire sud-rifain.

II-2-2-1-Géologie stratigraphique

❖ Paléozoïque :

Les terrains paléozoïques affleurent sur les bordures occidentales du secteur d'étude, dans la boutonnière occidentale de Bhalil. Les dépôts sont d'âge Viséen et sont dégagés suite au jeu alpin de certaines failles (Charrière, 1990). Charrière (1983)

et Ouarhache (1987) distinguent trois formations : une série pélagique noire, un ensemble flysch et des grès ferrugineux.

❖ **Trias supérieur :**

Les terrains triasiques affleurent au N et au SW sur la bordure de la boutonnière de Bhalil. Ces terrains sont constitués des formations rouges comprises entre le socle hercynien et les Carbonates du lias inférieur.

Ces dépôts triasiques reposent en discordance angulaire sur le substratum paléozoïque déformé par plusieurs phases tectoniques (Michard, 1976 ; Charrière, 1990 ; Hinaje, 1995). Ces dépôts ont été attribués au Permo-Trias par Gentil (1914-1916).

❖ **Le Jurassique :**

Dans le causse de Sefrou, et partout dans la chaîne atlasique, les dépôts du Lias inférieur et moyen forment la majeure partie des terrains mésozoïques. Ces dépôts sont représentés par des dolomies qui couvrent, en concordance sur les formations rouges triasico-liasiques, la grande partie de la zone d'étude. Le Lias inférieur-moyen est caractérisé par une sédimentation carbonatée où les apports détritiques sont rares ou absents. Cette formation est observée sur les bordures de Mimet (Charrière, 1990).

❖ **Néogène :**

Les formations néogènes reposent en discordance angulaire sur les dolomies liasiques. Elles affleurent au Nord de la zone, dans la dépression de Sefrou et l'aval pays du causse de Sefrou (Martin, 1981 ; Charrière, 1990 ; El Hamzaoui, 1994-2000 ; Sabaoui, 1998 ; Hinaje et al., 2002).

Les dépôts néogènes sont constitués par plusieurs formations : les paléo-éboulis d'âge anté-Miocène, les calcaires de Bhalil qui forment la base des couches Messéniennes suivies par les silts ocres de Sefrou, et enfin les marnes bleues de Fès (Charrière, 1990).

❖ **Plio-Quaternaire :**

Cette période est caractérisée par des dépôts continentaux fluvio-lacustres et travertineux. Ces dépôts sont localisés dans des bassins intra-montagneux à style tectonique extensif (Hinaje, 2004). Le Plio-Quaternaire est représenté par :

- ✓ Des calcaires lacustres qui constituent un affleurement réduit au Nord de la ville de Sefrou. Ces calcaires à intercalation conglomératique passent latéralement à des travertins de barrages en cascades et en retenues (Hinaje, 2004).
- ✓ Des conglomérats et des grès de cônes de déjection qui se localisent surtout au Sud de Sefrou (El Fellah Idrissi et al., 2009).
- ✓ Des travertins, des calcaires lacustres, des silts et des sables travertineux oncholitiques. Ils sont attribués au Quaternaire moyen.
- ✓ Des travertins, des grès et des dépôts de basses terrasses fluviales d'âge Holocène (Gourari et al., 2002).

A ces formations d'origine sédimentaire, s'ajoutent les laves volcaniques d'âge Quaternaire moyen (Martin, 1981 ; Charrière, 1990).

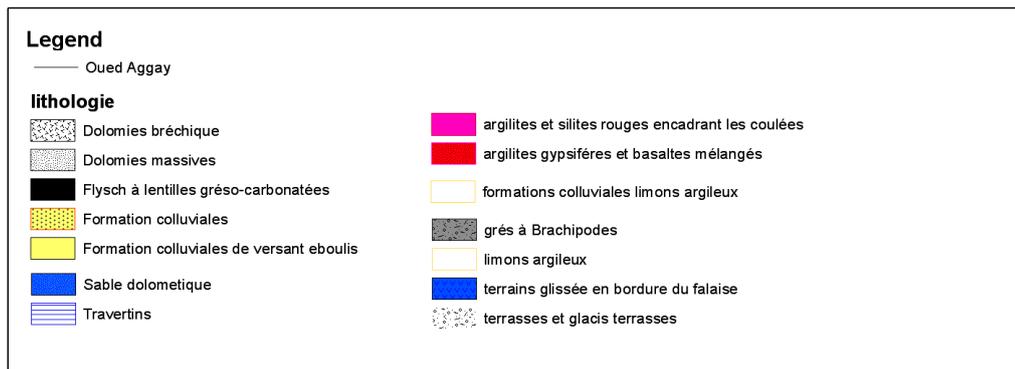
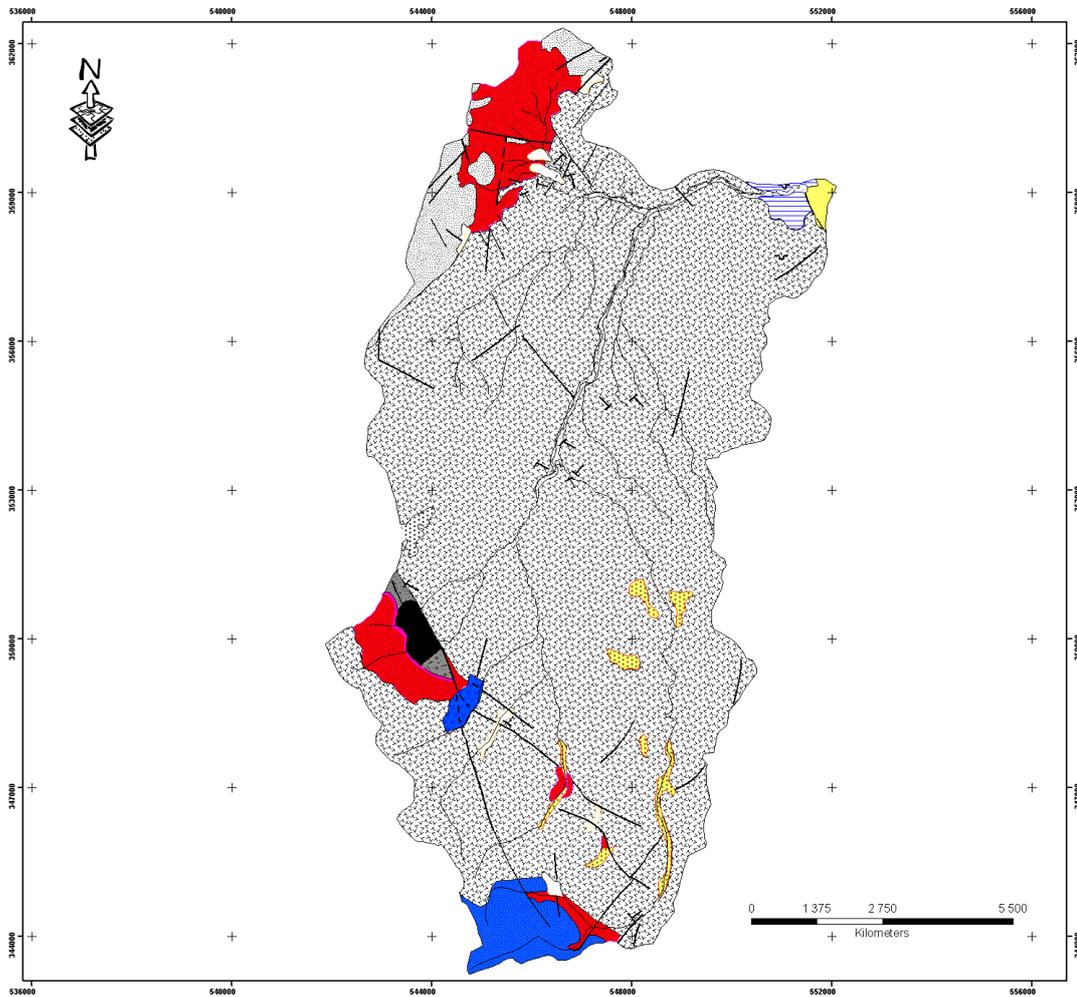


Figure 17: Carte lithologique du bassin versant d'oued Aggay

II-2-2-2-Géologie Structurale

Deux familles de failles ont joué un rôle primordial dans la structuration de la zone d'étude, Il s'agit de la famille NE-SW (failles longitudinales) et NW-SE (failles transversales).

D'après le positionnement de ces failles, Le bassin de Sefrou appartient à la zone de transition entre deux domaines structuraux : la Moyen Atlas au Sud et le sillon sud-rifain au Nord. Ce bassin présente une évolution tectonique polyphasée responsable de la genèse des structures d'effondrements néogènes et quaternaires (Hinaje et al., 2002). Cet effondrement s'effectue vers le golf marin d'âge miocène supérieur, Sefrou-Tahla-Skoura-Rbiat El Kheir, orienté NW-SE et correspondant à un graben subsidence d'échelle kilométrique (Hinaje et al., 2001).

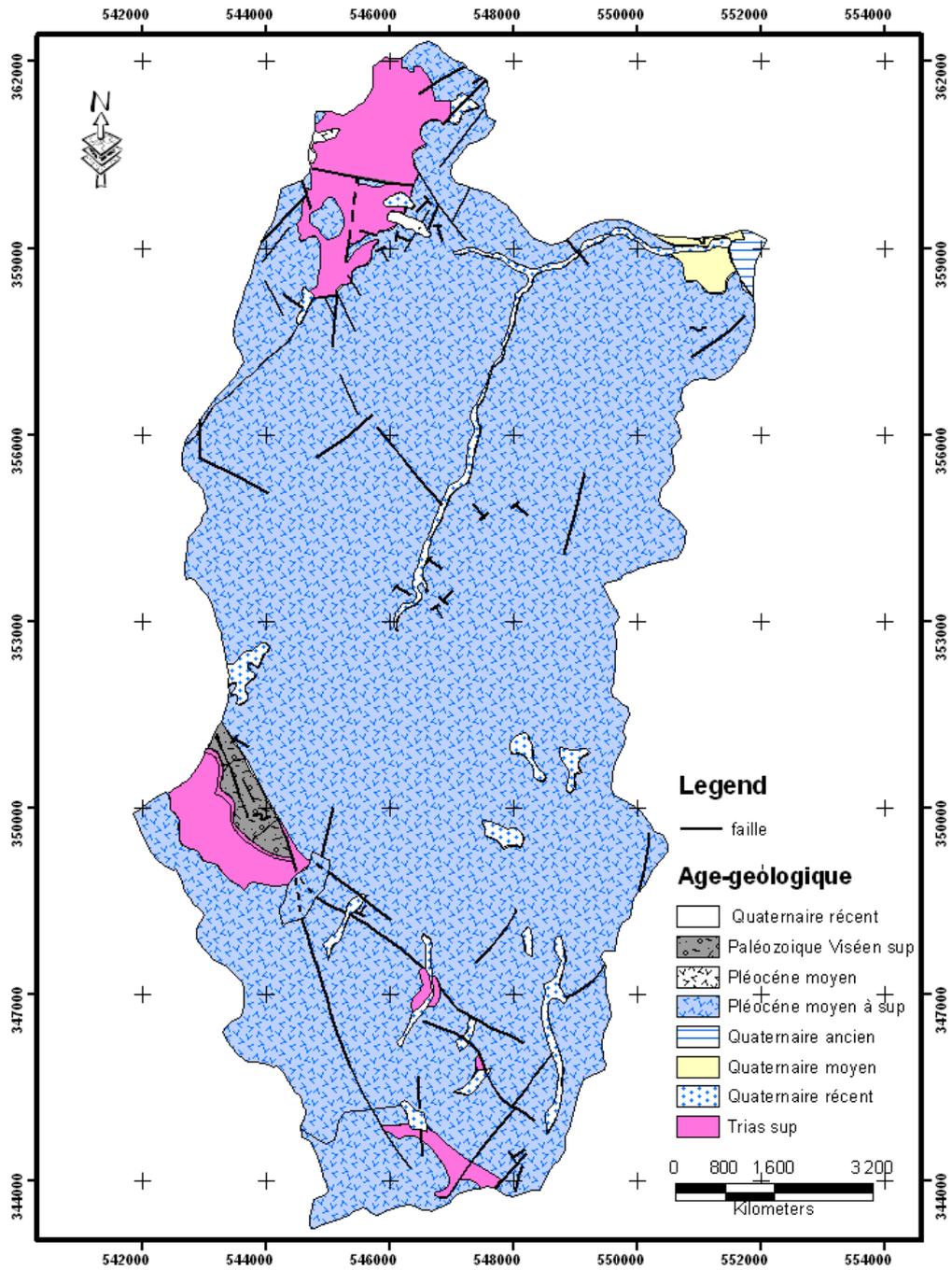


Figure 18: Carte géologique du bassin versant d'oued Aggay

II-3. Etude Climatique

Introduction

L'étude des données climatiques est nécessaire à la compréhension des mécanismes intervenant dans la circulation des eaux superficielles et souterraines, et l'évolution des ressources en eau.

Pour cette étude, on a travaillé avec les données de cinq stations météorologiques : Sefrou, Fès, Azzaba, Ain Timedrine, et Alla al Fassi (Tabl 5).

| Station | précipitations annuelles moyens (mm) | Longitude X | Latitude Y | Altitude |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------|------------|----------|
| Sefrou | 517.2 | 549.37 | 359.90 | 930 |
| Fès | 527.7 | 538.2 | 370.3 | 569 |
| Azzaba | 410.7 | 569.65 | 359.57 | 478 |
| Ain Timedrine | 414 | 578.70 | 350.35 | 650 |
| Allal Al Fassi Barrage | 344.6 | 566.65 | 370.54 | 430 |

Tableau 5: Caractéristiques des stations météorologiques utilisées dans cette étude

II-3-1. Acquisition des données :

Cette étude est réalisée grâce à une série de données pluviométriques issues de :

- L'Agence du Bassin Hydraulique-Fes ;
- La Direction Provinciale d'Equipement de Sefrou.

II-3-2. Reconstitution des données manquantes :

Dans le but de travailler sur des données complètes, nous avons utilisé des méthodes statistiques pour reconstituer les lacunes dans les séries des données pluviométriques.

Méthode 1 : Si la moyenne annuelle de la station en question diffère de moins de 10% des stations environnantes, alors une simple moyenne arithmétique donne une bonne estimation des précipitations manquantes :

$$P_x = \frac{1}{n} * \sum P_i$$

Méthode 2 : Si la moyenne annuelle de la station en question diffère de plus de 10% avec une des stations environnantes, l'interpolation doit alors être une pondération par le rapport des moyennes annuelles. C'est la méthode du rapport des moyennes rationnel :

$$P_x = \frac{1}{n} * \sum \frac{N_x}{N_i} * P_i$$

Avec :

P_x : donnée manquante de la station (x) ;

P_i : donnée de la station environnante (i) pour la même période ;

N_x : moyenne annuelle de la station (x) ;

N_i : moyenne annuelle de la station environnante (i) ;

n : nombre de station environnante.

Méthode 3 : la médiane :

La médiane est la valeur qui permet de partager une série numérique en deux parties de même nombre d'éléments. Dans le contexte climatique méditerranéen, où les précipitations se caractérisent par une extrême variabilité interannuelle, la valeur de la médiane a plus de signification climatique que la moyenne arithmétique. C'est dans ce sens que nous avons adopté pour son emploi dans le comblement des lacunes, là où les deux méthodes (méthode 1 et 2) sont inapplicables. Une donnée manque dans une station donnée et pour un mois donné de l'année est comblée par la valeur médiane de ce mois de la dite station. (Groupe Chadule 1947).

II-3-3. Test d'homogénéité des données

Le test d'homogénéité est un processus de détection et de correction des ruptures d'origine non climatique. Les principales modifications qui peuvent affecter l'homogénéité des séries sont :

- Le déplacement d'une station ;
- Le remplacement d'un instrument de mesure ;
- Les changements des heures d'observations ;
- Le changement d'observateur.

Plusieurs méthodes sont employées pour tester l'homogénéité des données climatiques. Parmi ces méthodes on cite : test de la régression linéaire et test des doubles cumulés.

Test de régression linéaire :

Cette méthode permet de chercher la corrélation entre deux séries de données pluviométriques. Elle est employée lorsque deux données pluviométriques de deux stations présentent une intersection assez longue dans la période d'enregistrement des données.

En testant la signification de cette relation à l'aide de la table de Bravais Pearson, avec :

- Un seuil $\alpha = 0,05$
- Un nombre de degré de liberté $ddl = n - p - 1$; où :
 - n : nombre de couples d'observation,
 - p = nombre de variables explicatives.

On peut conclure que les données pluviométriques des deux stations sont corrélées ou pas.

Et donc si **R (calculé)** est supérieur à **R (Lu)** dans la table, on conclut qu'il existe une corrélation linéaire significative, avec un risque $\alpha = 0.05$ (voir tableau de Bravais-Pearson).

Vu la quantité des données pluviométriques, nous allons effectuer une étude de corrélation entre 4 stations ayant un nombre suffisant des données : Stations de Sefrou, Ain Timedrine, Azzaba, Fès. Alors que la station d'Allal El Fassi ne présente que 19 ans de mesure.

Test de double cumule :

Le principe de la méthode consiste à vérifier la proportionnalité des valeurs mesurées à deux stations. L'une des stations (station Sefrou) est la station de base ou station de référence, supposée correcte. L'autre station est la station à contrôler. Un effet de lissage est obtenu en comparant, au pas de temps choisi, non pas les valeurs observées, mais leur cumul. La méthode est d'un concept extrêmement simple, puisqu'il suffit de tracer un graphe des quantités :

$$X(t) = \sum_{i=0}^t x(i) \quad \text{et} \quad Y(t) = \sum_{i=0}^t y(i)$$

A partir de ce test, on observe une corrélation entre les stations (Fig.19, 20 & 21) ce qui montre une homogénéité des données et donc nous pouvons les utiliser dans l'étude climatologique du bassin versant d'Oued Aggay.

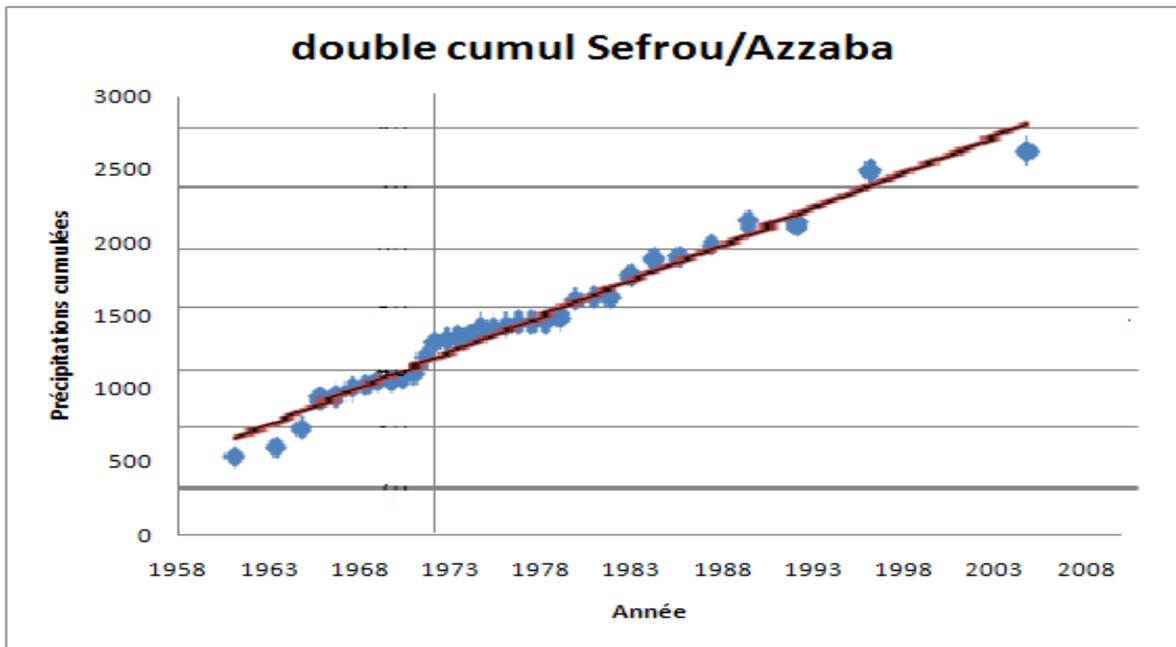


Figure 19: Double cumul Sefrou/Azzaba

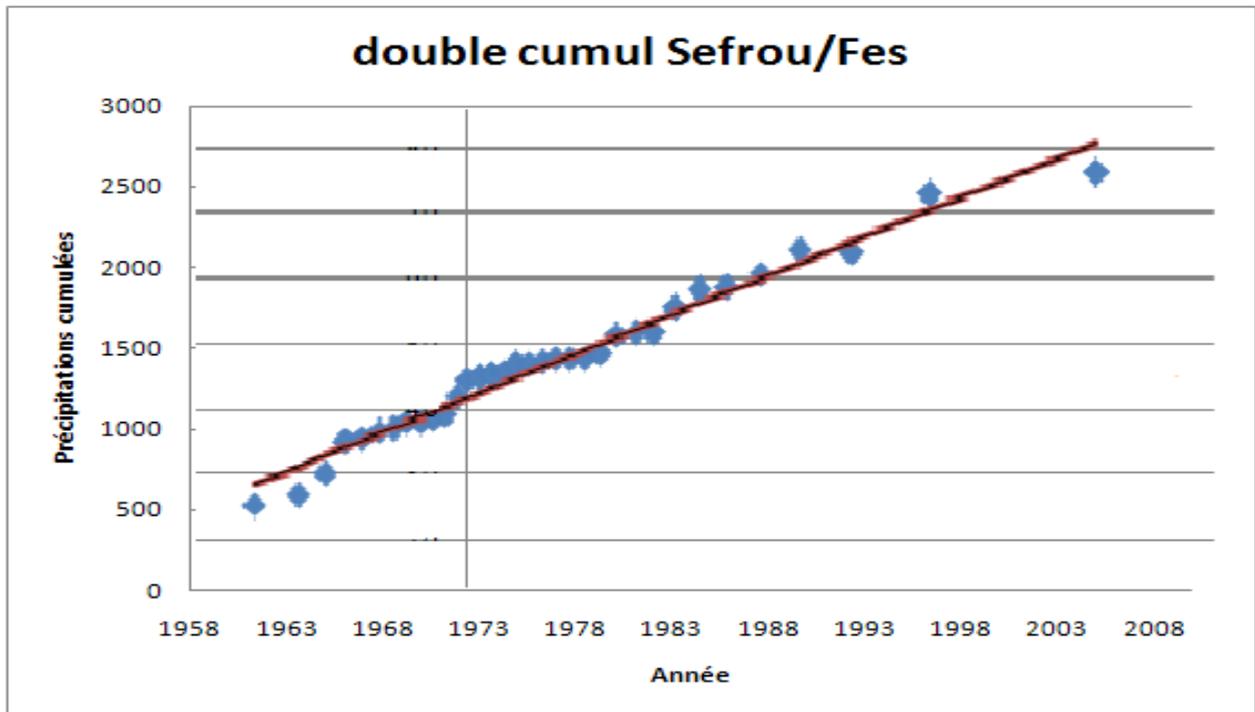


Figure 20: Double cumul Sefrou/Fès

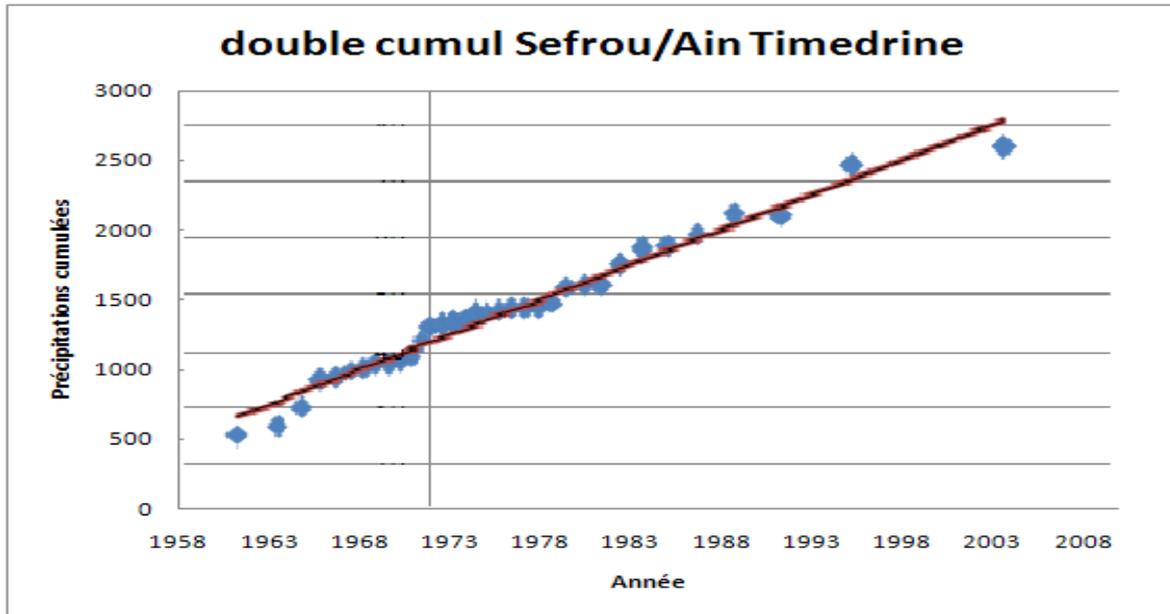


Figure 21: Double cumul Sefrou/Ain Timedrine

II-3-4. Variation spatio-temporelle des précipitations

II-3-4-1. Variations annuelles

L'analyse des mesures pluviométriques interannuelles révèle la succession de périodes déficitaires normales ou excédentaires. En effet, sur l'ensemble de la série (1968-69/2010-11), les quatre stations se caractérisent par une très grande irrégularité et variabilité interannuelle (Fig. 22). L'analyse des précipitations annuelles montre que les années les plus humides pour l'ensemble des stations sont 1968-69 et 2008-09 alors que 1994-95, 1998-99, 1999-2000, et 2005-2006 représentent les années les plus sèches.

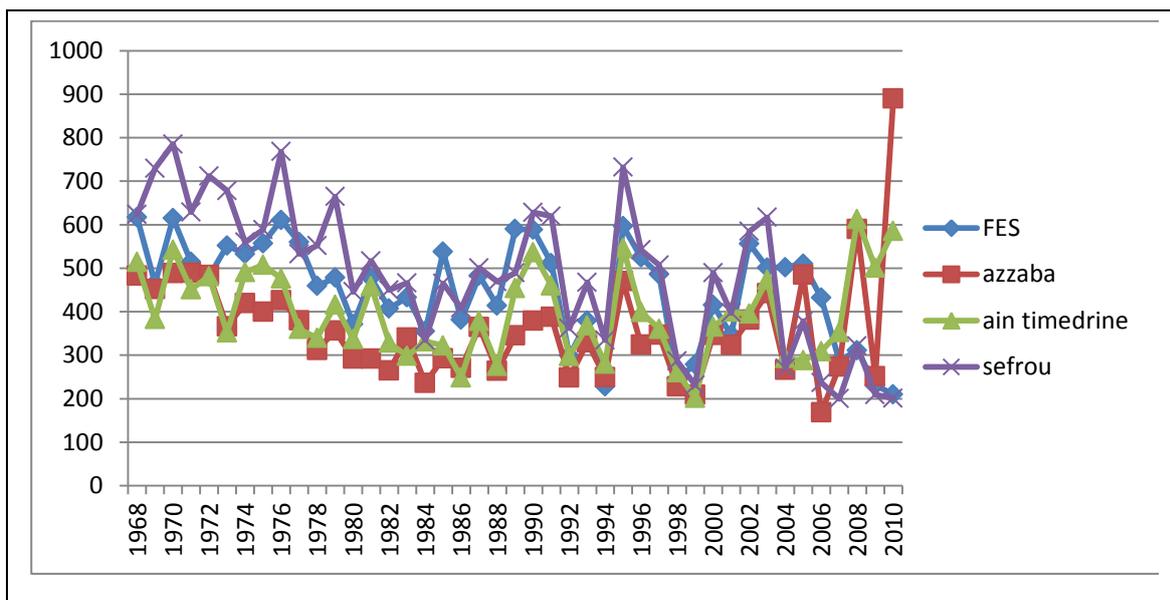


Figure 22: Evolution temporelle des précipitations annuelles des quatre stations (période 1968-69/2010-11)

Pour rendre l'interprétation des précipitations plus simple, on a réalisé la carte des isohyètes par la méthode de Thiessen qui considère qu'il existe un gradient de précipitations progressif entre les différentes stations (Fig. 23). D'après cette figure, on remarque que le gradient pluviométrique augmente du nord vers le sud en direction des hautes altitudes.

La précipitation diminue vers le SE où se localise la station de l'Anoceur qui a une moyenne de 504 mm, inférieur à celle de Sefrou 517.5 mm. Ceci peut s'expliquer par l'effet orographique des enchainements des hautes crêtes. La moyenne annuelle est de 410.7mm à Azzaba, de 471 mm à Fès, de 414 mm à Ain Timedrine. Ainsi, à partir des résultats obtenus pour les quatre stations, on peut déduire que la pluviométrie moyenne pour le secteur étudié est de 463 mm, pour la période comprise entre 1968/69 et 2009-10.

Ainsi, les précipitations deviennent importantes au niveau des stations situées à hautes altitudes. On remarque, que certains mois pendant l'été se caractérisent par la prédominance des pluies liées essentiellement à la fréquence des orages locaux. Ces derniers sont dus à la forte insolation au sol qui donne parfois naissance à des courants ascendants ce qui provoque la formation des précipitations orageuses (Isnard, 1958 ; in Nejari 2002).

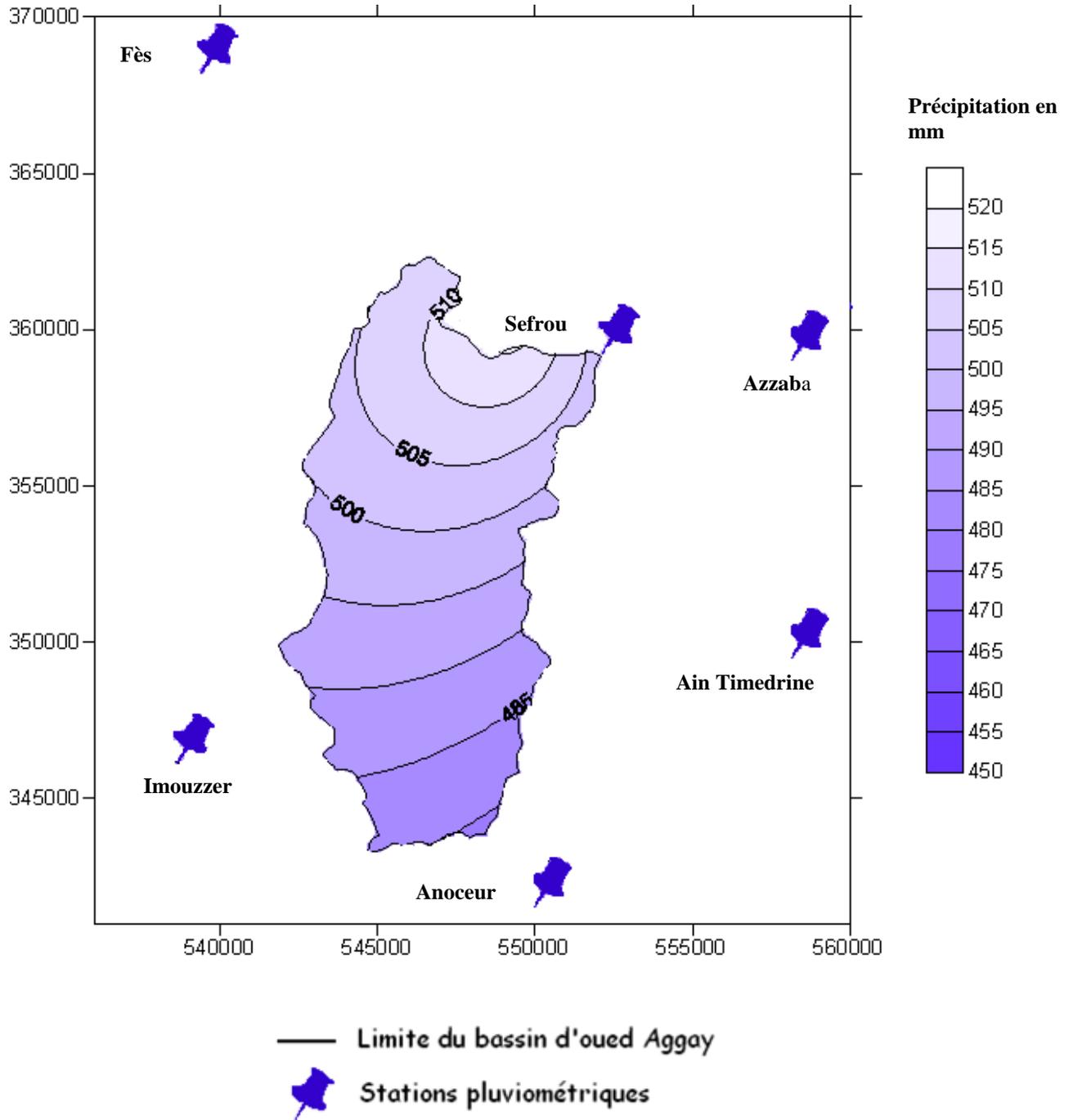


Figure 23: Carte des isohyètes du bassin versant d'oued Aggay

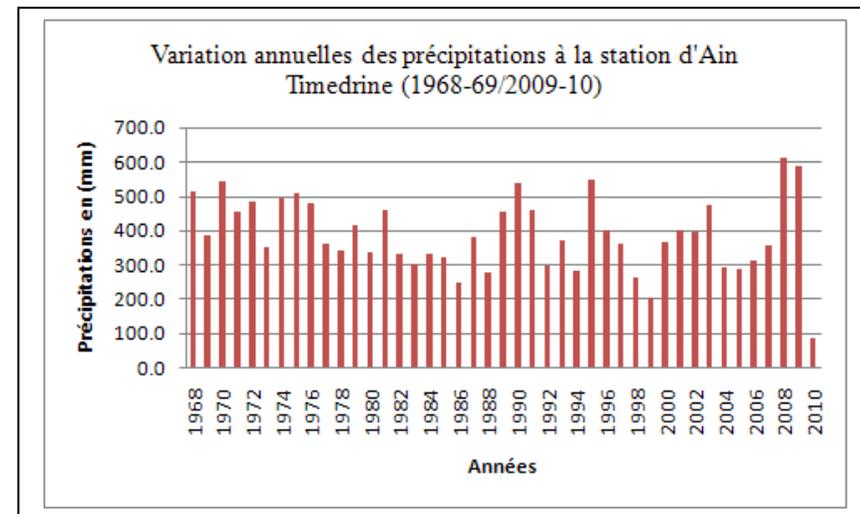
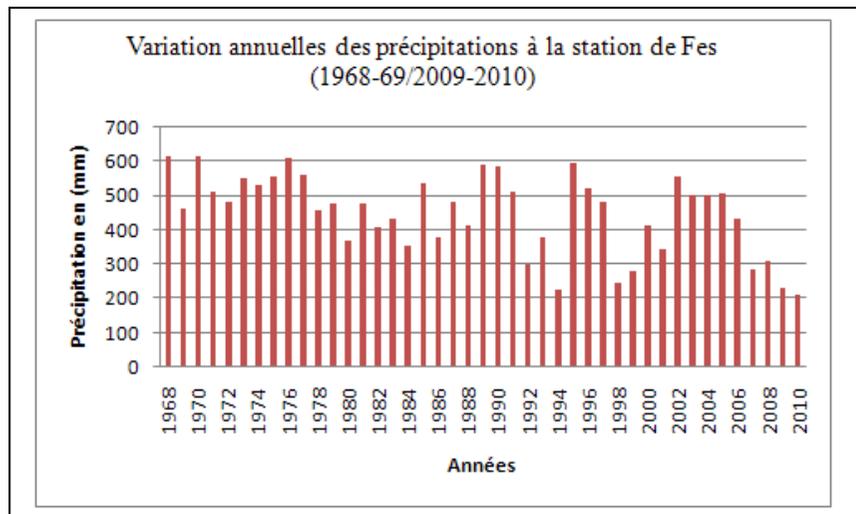
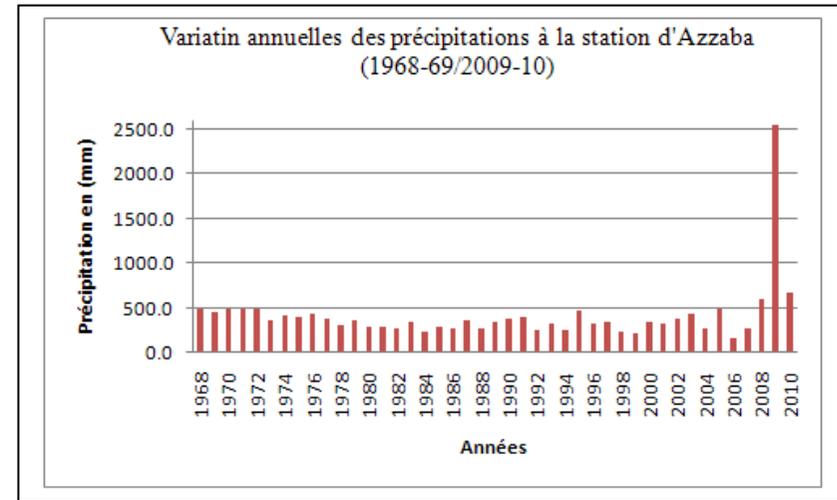
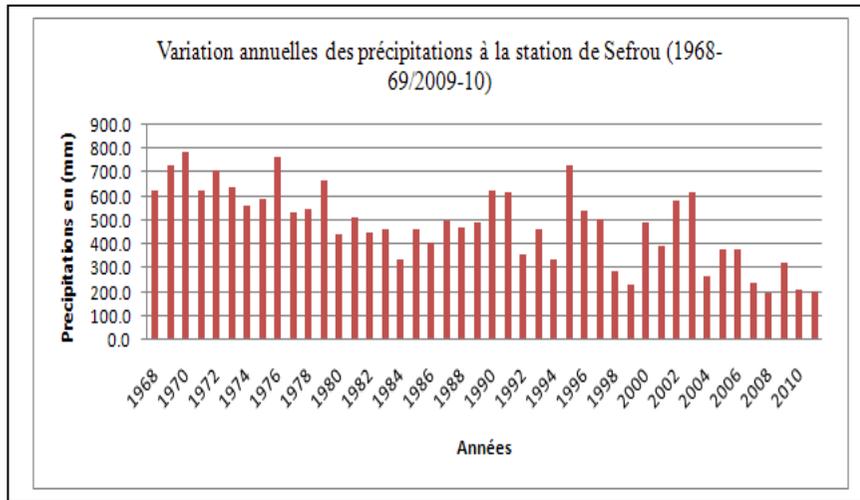


Figure 24: les variations des précipitations annuelles aux stations considérées.

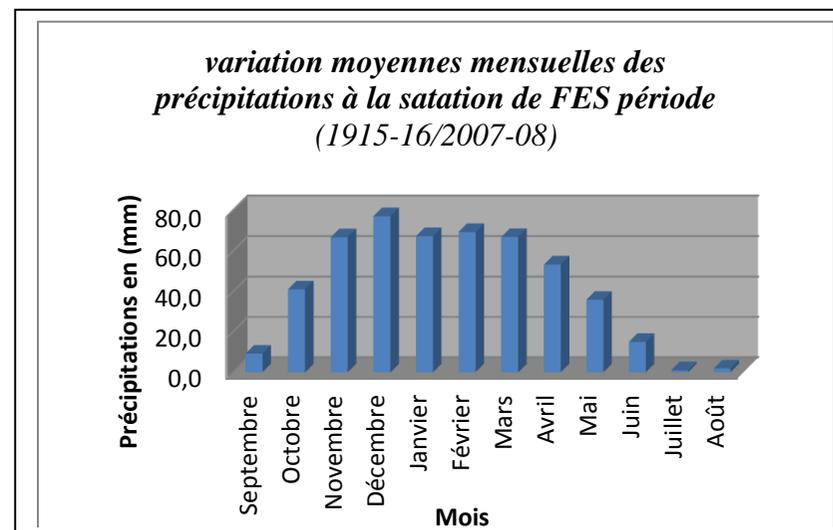
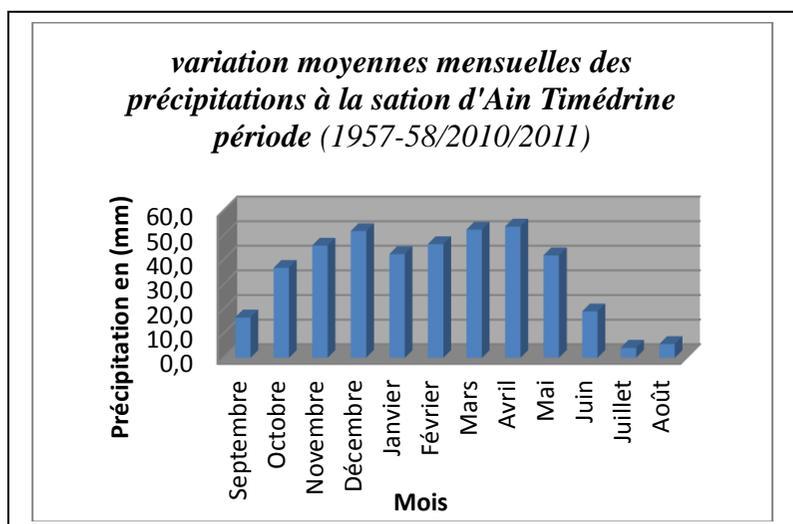
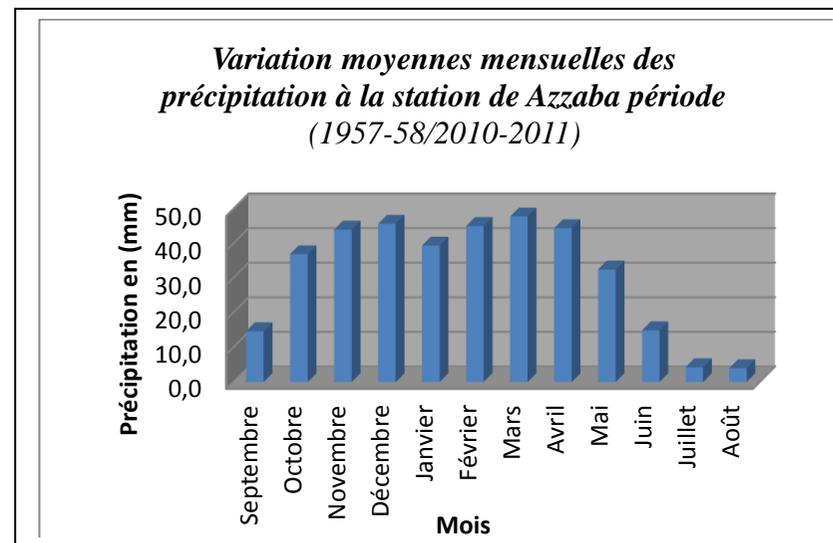
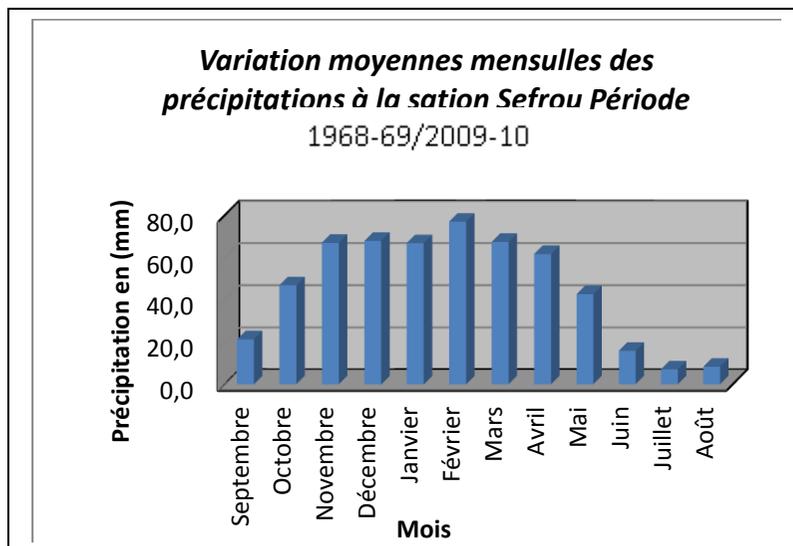


Figure 25: les variations des précipitations mensuelles aux stations considérées.

II-3-4-2. Variations mensuelles

L'examen des mesures pluviométriques mensuelles (Fig. 24, 25 & 26) fait ressortir que les précipitations mensuelles enregistrées sont très variables d'un mois à l'autre et d'une station à l'autre. La saison pluvieuse dans le secteur d'étude s'étale habituellement entre Novembre et Avril. Des maxima très marqués aux mois de Décembre et Février. Tandis que les mois les plus secs sont Juillet et Août. D'une façon générale, on note que les mois diffèrent les uns des autres au niveau des quatre stations en ce qui concerne la façon dont les pluies se répartissent. Par exemple, au mois Février, c'est la station de Sefrou qui est la plus arrosée par rapport aux autres stations. Ceci peut être dû à la prédominance, au mois de Février, des précipitations sous forme de neige.

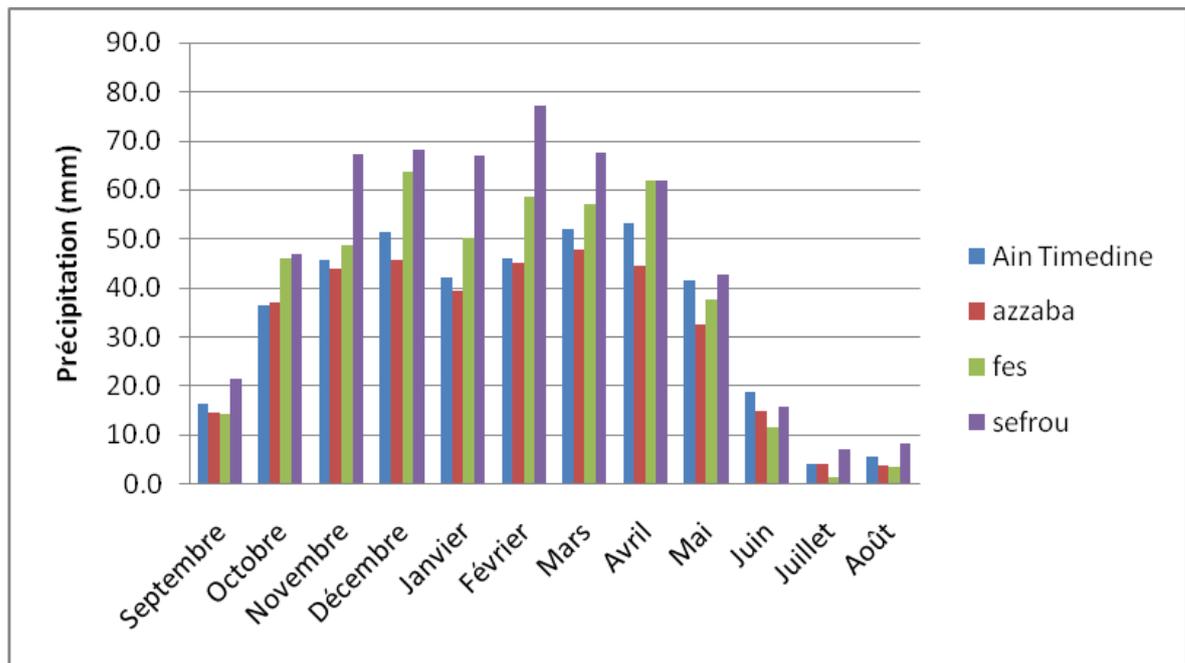


Figure 26: Evolution spatio-temporelle des précipitations mensuelles moyennes interannuelles (Période 1968 -2010)

II-3-4-3. Variation spatiale

Dans la zone d'étude, comme partout dans l'ensemble de la chaîne du Moyen Atlas, la répartition géographique de la pluviométrie dépend étroitement de l'altitude et de l'exposition des zones aux masses nuageuses provenant du NW. Les quatre stations enregistrent des hauteurs de précipitations différentes liées à l'orographie. Environ 100 mm d'écart sont enregistrées entre Azzaba et Sefrou (Fig. 27).

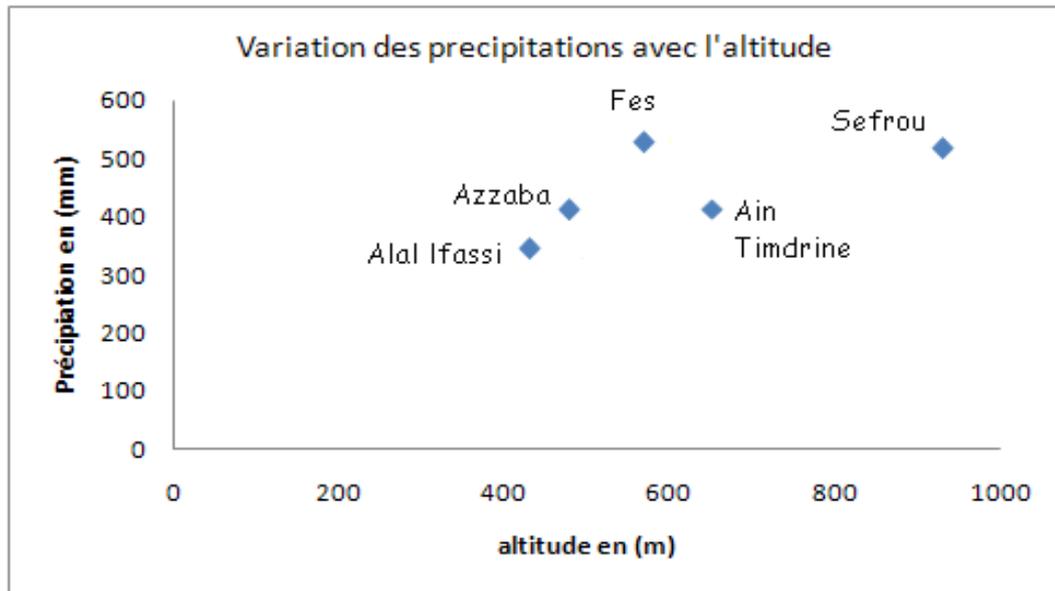


Figure 27: Localisation des stations

En effet, la moyenne pluviométrique annuelle croit généralement, du Nord vers le Sud en direction des hautes altitudes.

II-3-5. Variation saisonnière

Les précipitations moyennes saisonnières varient selon les mêmes facteurs, en fonction du temps (saisons) et de l'espace (altitudes). En effet, dans les quatre stations, il est certain que l'hiver reste la saison humide, suivie du printemps et ensuite l'automne (Fig. 28). On constate que la répartition des précipitations devient importante au niveau des stations situées à hautes altitudes. L'été qui marque bien sur la saison la plus sèche, se caractérise par la prédominance des pluies dans la station de Sefrou liée essentiellement à la fréquence des orages locaux.

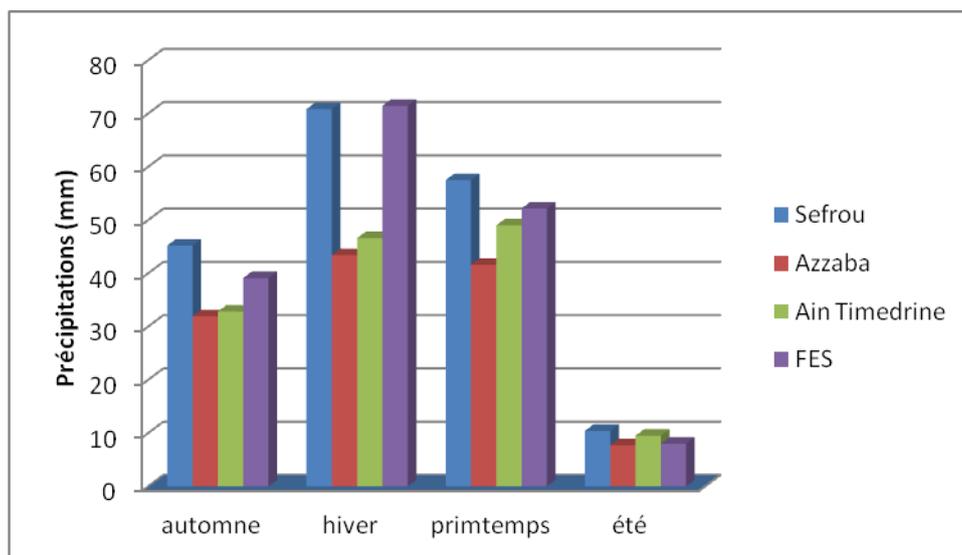


Figure 28: Précipitations moyennes saisonnières (1968-69/ 2009-10)

II-3-6. Variation de la température

La température est un paramètre très important, vu qu'elle intervient d'une part comme élément déterminant pour la spécification du climat et d'autre part comme facteur essentiel pour l'estimation des potentialités hydrologiques d'une région donnée.

| Station | X | Y | Z | Température moy |
|------------------------|--------|--------|-----|-----------------|
| Sefrou | 549.37 | 359.90 | 930 | 16 |
| Fès | 538.2 | 370.3 | 569 | 16.8 |
| Azzaba | 569.65 | 359.57 | 478 | 14.83 |
| Ain Timedrine | 578.70 | 350.35 | 650 | 14.72 |
| Ain louali | 567000 | 376000 | 288 | 16.45 |
| Allal Al Fassi Barrage | 566.65 | 370.54 | 430 | 14.99 |

Tableau 6 : Températures moyennes annuelles dans les stations voisines du bassin versant

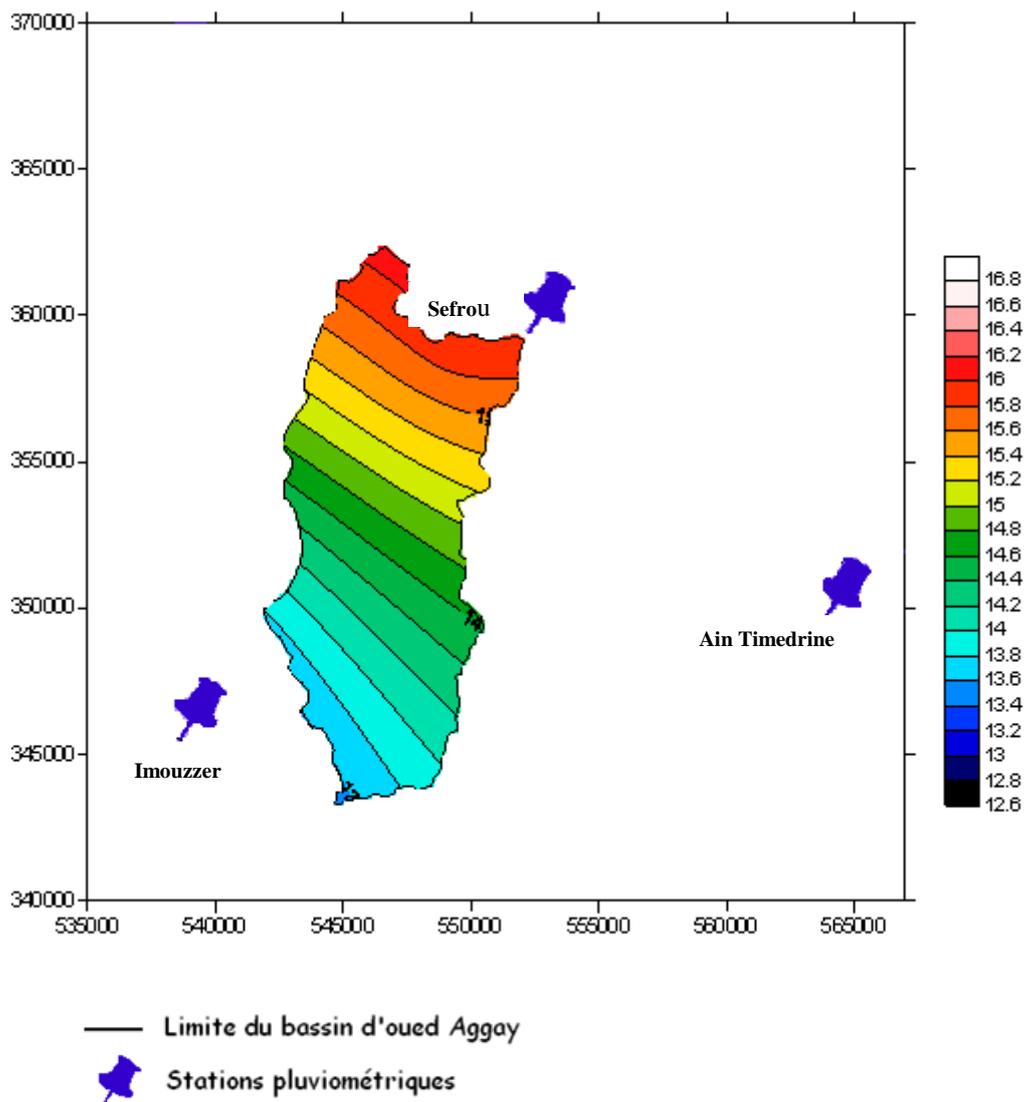


Figure 29: Distribution de la température dans le bassin d'oued Aggay

L'examen des températures mensuelles moyennes au niveau de six stations, révèle tout d'abord l'influence du gradient altitudinal sur l'évolution spatiale de celles-ci. Des basses altitudes vers les hautes altitudes, on assiste à la diminution de la température. Ainsi la température moyenne annuelle enregistrée à la station Fès (471 m) est de 16,8°C, tandis qu'à Ain Timedrine (650 m), elle est de 14.72°C. Le mois de Janvier est le mois le plus froid avec une température peuvent atteindre 9.5°C à Sefrou, alors que les mois de juillet et Août sont les plus chauds de l'année.

II-3-7. Régime hydrologique :

L'Oued Aggay (ou Oued Lihoudy) constitue le drain principal du bassin. Il est alimenté tout au long de son cours par de petites sources.

Alimentation de la nappe

Elle est constituée par l'infiltration des eaux de pluie, avec un volume moyen annuel d'environ 25 Mm³/an (environ 0.8 m³/s), basé sur une pluviométrie moyenne de 600 mm/an et un coefficient d'infiltration de 26 %.

Sorties de la nappe

Elles sont constituées par le drainage de l'Oued Lihoudy et par l'abouchement avec la nappe liasique du couloir de Fès-Taza, à travers sa limite sud-ouest.

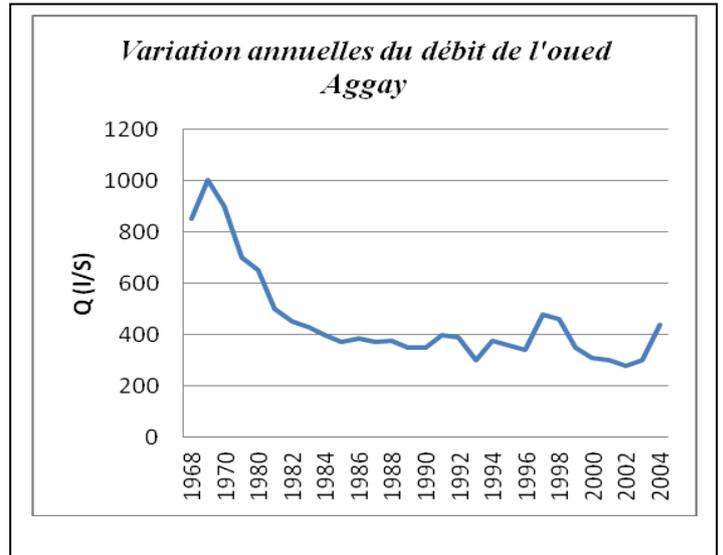
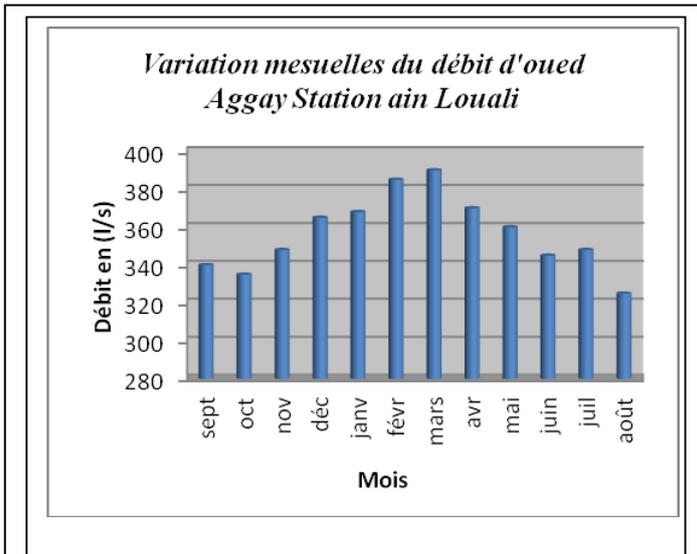
Sources

Les sources jaugées par l'ABHS en 2005 sont au nombre de 4. Leur débit total est de 20.5 l/s (environ 0.64 Mm³/an), réparti comme suit :

- Source Ghazi (N° 205/22- ABHS) : 15 l/s ;
- Source Abbes (N° 206/22- ABHS) : 3 l/s ;
- Source Abouda (N° 1907/22- ABHS) : 2 l/s.
- Source Bibi (N° 1467/22- ABHS): 0.5 l/s.

Drainage de l'Oued Lyhoudi

Il est mesuré au niveau de la station de Louali (N° IRE 2210/15) (Fig. 19) située à quelques km au nord du sous-bassin de Sefrou. Son débit a été évalué en mois d'avril 2005 par l'ABHS à 312 l/s (environ 10 Mm³/an).



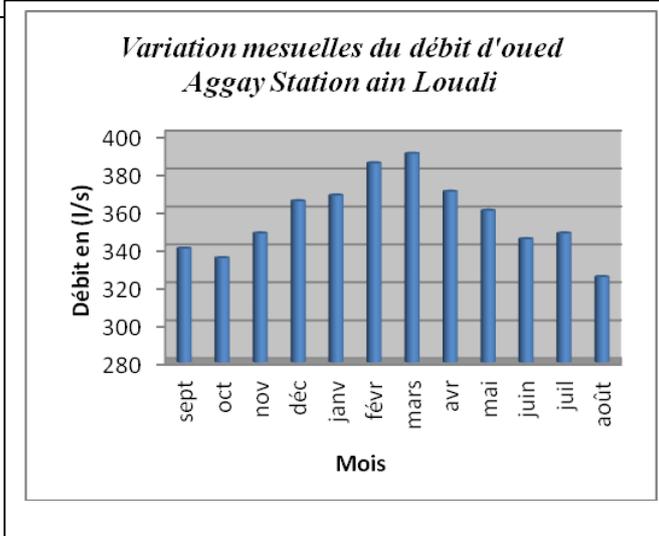
hydrologique dans le bassin d'oued Aggay

s, deux saisons distinctes marquent l'hydrologie du

avec des pointes en Février - Mars. Cette saison se
 r des pluies intenses et concentrées dans le temps.
 ctéristique de l'année hydrologique où alternent des
 crues et de petites décrues ;

lue où l'évapotranspiration domine. L'écoulement

.



11.5.6. Evapotranspiration :

L'étude de l'évapotranspiration nécessite dès le départ la connaissance de deux concepts essentiels : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration potentielle :

Elle représente l'évaporation plus la transpiration qui se produisait si l'approvisionnement en était suffisant pour compenser les pertes maximums et répondait aux pleins besoins de la végétation.

L'évapotranspiration réelle :

Elle désigne la quantité de vapeur soustraite réellement du sol par l'évaporation et par transpiration des végétaux.

Le calcul de l'ETR est basé sur la température et la hauteur des précipitations moyennes annuelles ou mensuelles. Sa détermination s'effectue par plusieurs méthodes, parmi ces méthodes la **Méthode de Turc**

$$ETR = P / \left(0.9 + \frac{P^2}{L^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Avec :

ETR : l'évapotranspiration réelle en mm ;

P : hauteur de précipitation moyenne annuelle en mm ;

$L = 300 + 25T + 0.05T^3$;

T : la température moyenne annuelle en °C.

L'adaptation de la formule de Turc aux conditions marocaines a nécessité de pondérer la température moyenne annuelle (T) par la pluie et d'utiliser (T'). Pour le bassin de Sebou dans lequel se trouve le bassin versant d'Aggay.

$$T' = 0.75 * T = 0.75 * 16^\circ\text{C} = 12^\circ\text{C}$$

C'est ainsi qu'on peut obtenir

$$ETR = 397 \text{ mm}$$

II-3-8. Bilan hydrique :

Pour la détermination du bilan hydrique du sol, nous avons utilisé la méthode du bilan de Thornthwaite. Cette méthode nous permet d'estimer la réserve en eau facilement utilisable exprimée en millimètre de hauteur d'eau. La quantité d'eau maximum emmagasinée par le sol dépend pour sa saturation, de la nature, de la composition lithologique, de l'épaisseur de la couche superficielle du terrain et du climat. Thornthwaite a admis que le sol est saturé quand il a absorbé une lame d'eau équivalente à une précipitation de 100 mm. Dans les zones arides et semi-arides, cette valeur maximum peut être ramenée à 50 mm du fait que le sol n'est pas toujours saturé (Archambault et al., 1975).

Le calcul de l'ETR par la méthode de Thornthwaite dépend de la valeur de cette quantité facilement utilisable (RFU). De ce fait, lorsque la teneur en eau du terrain (pluie+RFU) est suffisante, l'ETR est égale à l'ETP et on aura dans ce cas un excédent en eau. Dans le cas contraire, on aura un déficit et l'ETR ne pourra affecter que la quantité d'eau disponible (P+RFU). Lorsque la réserve facilement utilisable atteint son maximum et que l'ETR est égale à l'ETP, le surplus des précipitations alimentera l'infiltration et/ou le ruissellement.

Quand à l'évapotranspiration potentielle, elle est déterminée par la formule suivant :

$$ETP(\text{mm}) = 16 (10 * T / I)^a$$

Avec :

T : température moyenne mensuelle en C°

I : indice thermique annuel

$$I = \sum_i^{12} i \text{ et } i = (T/5)^{1.514}$$

$$a = 1.6(I/100) + 0.5$$

L'examen du tableau 7 montre que l'évapotranspiration réelle annuelle est de l'ordre 365 mm à Sefrou ce qui représente 56% de la pluviométrie totale. De plus, la période excédentaire est de décembre à Avril pour Sefrou ce qui permet d'alimenter les écoulements superficiels et souterrains.

| | Sept. | Oct. | Nov. | Déc. | Janv. | Févr. | Mars | Avr. | Mai | Juin | Juliet | Aout |
|---------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|--------|-------|
| P (mm) | 21.4 | 47.1 | 67.2 | 68.1 | 67.0 | 77.2 | 67.6 | 61.9 | 42.9 | 15.9 | 7.1 | 8.3 |
| ETP(mm) | 87.3 | 55.8 | 41.9 | 29.4 | 26.5 | 29.3 | 35.5 | 41.7 | 55.9 | 87.1 | 95.9 | 104.8 |
| RFU | 0 | 0 | 25.3 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 37 | 0 | 0 | 0 |
| ETR(mm) | 21.4 | 47.1 | 41.9 | 29.4 | 26.5 | 29.3 | 35.5 | 41.7 | 55.9 | 52.9 | 7.1 | 8.3 |
| Excès | 0 | 0 | - | 14 | 40.5 | 47.9 | 31.7 | 20.2 | - | - | - | - |
| Déficit | 65.9 | 8.7 | - | - | - | - | - | - | - | 34.2 | 88.8 | 96.5 |

Tableau 7 : Evaluation mensuelle de l'évapotranspiration et du bilan hydrique au niveau de Sefrou

Conclusion :

Les facteurs des inondations sont intimement liés et interdépendants des différentes caractéristiques morphologique, géologique et climatique d'un bassin versant. Ces caractéristiques peuvent expliquer le débordement des cours d'eau qui règne dans le bassin versant de l'Oued Aggay.

La détermination des divers paramètres physiographiques du bassin versant d'Aggay révèle que ce dernier est caractérisé par une forme allongée sur une superficie de 180 Km². L'altitude du bassin versant diminue du Sud vers le Nord. Il varie entre 1735 m et 880 m, témoignant d'un rassemblement rapide des eaux et par conséquent une crue torrentiel.

En ce qui concerne la pente hydrographique, le bassin versant d'oued Aggay est caractérisé par une forte pente qui peut favoriser la diminution du temps de concentration. Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Aggay est un cours pérenne et complexe parfois dendritique et parfois parallèle.

Sur le plan géologique, on note que tout le bassin versant d'oued Aggay est affecté par un champ de failles. L'érosion y est spectaculaire, comme il est à signaler que les phénomènes

de crues n'est pas récent car l'analyse sédimentaire menée au niveau des terrasses de l'Oued Aggay montre que le processus de stabilisation et déstabilisation des versants se faisait de manière séquentielle.

L'étude des paramètres climatiques a permis de donner des précisions sur les différents processus hydrologiques dans le bassin versant d'Oued Aggay. Elle sera d'une grande utilité pour connaître les différents paramètres entrants dans le bilan hydrique du secteur d'étude.

Cette situation se manifeste par des quantités d'eaux qui augmentent de l'amont vers l'aval. Cela va rendre la situation de plus en plus grave vu que là où la pente est forte les précipitations sont élevées.

L'interdépendance des facteurs des inondations est à l'origine d'un comportement complexe dans le bassin versant de l'Oued Aggay. C'est pour cette raison qu'on a choisi la méthode qui va d'une part nous renseigner sur les zones de grande vulnérabilité, ainsi que les facteurs déterminant qui ont donné naissance à cette vulnérabilité.

Partie II :

Modélisation hydraulique du bassin versant d'oued Aggay

Chapitre I. Méthodologie, Présentation de la modélisation hydraulique

I-1. Contexte et antécédent

Un modèle est une représentation numérique d'un phénomène physique, afin d'en avoir une meilleure compréhension ou/et d'analyser l'influence qu'il exerce. Cette représentation peut être physique, analogique ou mathématique. La modélisation en hydrologie est un outil essentiel pour la connaissance des phénomènes naturels. Elle permet d'établir un lien entre les variables d'entrée et de sortie par des relations mathématiques.

On peut distinguer trois finalités des modèles mathématiques en hydrologie :

- **La modélisation comme outil de recherche** : la modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.
- **La modélisation comme outil de prévention** : elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas, les modèles développés sont cependant basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.
- **La modélisation comme outil d'extrapolation** : à savoir la reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, tel le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un Plan de Prévention des risques. Il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié.

L'étude hydraulique consiste à faire le diagnostic de la zone d'étude pour tout événement hydraulique. Elle consiste à calculer les hauteurs d'eau et déterminer les zones de débordement. Pendant cette étude, nous avons utilisé deux logiciels : un logiciel de Système d'Information géographique (Arc-Gis) et un logiciel de modélisation de rivières (HEC-RAS) qui permettent de reproduire l'état de la zone naturelle à l'état numérique.

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est développé au Hydrologic Engineering Center du US Army Corps of Engineers. Dans sa version actuelle (1995, 1.0), ce logiciel permet d'effectuer des calculs d'écoulements filaires à surface libre en régime permanent. Il s'agit en fait du digne successeur du bien connu HEC-2, dont la puissance est incontestable mais dont la lourdeur d'utilisation reste légendaire. HEC-RAS fonctionne sous Windows et bénéficie donc des avantages de cet environnement.

Les calculs de lignes d'eau permettent tant l'analyse de la capacité de cours d'eaux (risques de débordement, inondations) que l'étude de l'impact de modifications des conditions de bords (ponts, endiguements).

Les calculs de lignes d'eau d'écoulements graduellement variés sont basés sur l'équation de Bernoulli. Les pertes de charge sont évaluées par l'équation de Manning-Strickler pour le terme de frottement et par des coefficients de contraction-expansion. En écoulement brusquement varié, HEC-RAS utilise l'équation de quantité de mouvement. Celle-ci est appliquée aux ressauts, et dans certains cas, aux passages de ponts et aux confluences.

La résolution de ces équations nécessite la connaissance de la géométrie du cours d'eau, de ses caractéristiques de rugosité et du débit d'écoulement.

I-2. Schéma méthodologique général

La modélisation hydraulique sert à identifier, décrire et mesurer les processus dynamiques incluant les situations extrêmes telles que la présence d'un cours d'eau susceptible à déborder (aléa) d'une part, et présence de biens vulnérables, d'autre part. Bien sur que l'aggravation du risque d'inondation est un indicateur majeur de la durabilité d'un schéma d'aménagement, donc la modélisation s'avère un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène. Ce schéma de modélisation et de mesure de l'ampleur d'inondation (Fig. 31) est fondé sur la base de trois études : le premier est hydrologique et a pour objectif l'estimation des débits de pointes correspondant aux différentes périodes de retour au niveau de la zone du projet. Les débits adoptés seront d'une importance capitale pour le dimensionnement des ouvrages projetés sur l'oued Aggay. Pour cette fin, l'étude passe par plusieurs étapes :

- ⌘ Enquête de crues : elle consiste à trouver des laisses de crues passées et à recueillir les témoignages des habitantes aux endroits les plus pertinents.
- ⌘ Ajustement par loi de Gumbel des pluies maximales journalières et déterminations des $P_j \max(T)$ pour une période T allant de 10 à 100 ans.
- ⌘ Estimation des débits de crue par la méthode de Gradex modifiée : cette méthode a été élaborée dans le cadre de l'étude du Plan Directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins Sebou.
- ⌘ Estimation des débits de crue par des formules empiriques : consiste à appliquer les formules régionales adaptées à la nature du bassin versant.
- ⌘ Estimation des temps de concentration en appliquant les formules empiriques.
- ⌘ Estimation de l'hydrogramme de crues.

La seconde phase est la phase de simulation d'un modèle d'oued Aggay. Elle consiste à apporter les éléments de bases nécessaires au fonctionnement du modèle hydraulique, et identifier des zones à risques d'inondations dans le bassin. Une simulation hydraulique d'un modèle est un calcul, dont les résultats sont caractéristiques du débit, de la géométrie du cours d'eau ainsi que des conditions aux limites du modèle. Les données topographiques et les conditions aux limites sont les données de bases pour concevoir le modèle dans HEC-RAS. Il existe différents types de données topographiques qui dépendent de son extension géographique du modèle, sa résolution et surtout la précision des valeurs. La procédure combinée d'observation de terrain et les calculs de lignes d'eau par HEC-RAS. L'identification des processus se fait en quatre étapes:

- Etape 1 : Identification de la géométrie d'un cours d'eau et les données relatives à chaque section (profils en travers et rugosité de chaque section, distance entre les sections et les caractéristiques de chaque ouvrage...).
- Etape 2 : Identification des débits et les conditions aux limites en utilisant l'équation de quantité de mouvement pour déterminer les changements de régime torrentiel-fluvial
- Etape 3 : Identification des conditions du calcul (hauteur d'eau, profondeur critique... ou hydrogramme, limnigramme...selon le régime d'écoulement).
- Etape 4 : Visualisation des résultats (profil en long, sections, courbes hauteur-débit, vue 3D) sous forme graphique ainsi que sous forme de tableaux.

La troisième phase c'est la définition des scénarios d'aménagement qui permettront la protection des zones inondables et la mise en œuvre d'un système de prévention et d'annonce de crue au bassin versant d'Oued Aggay.

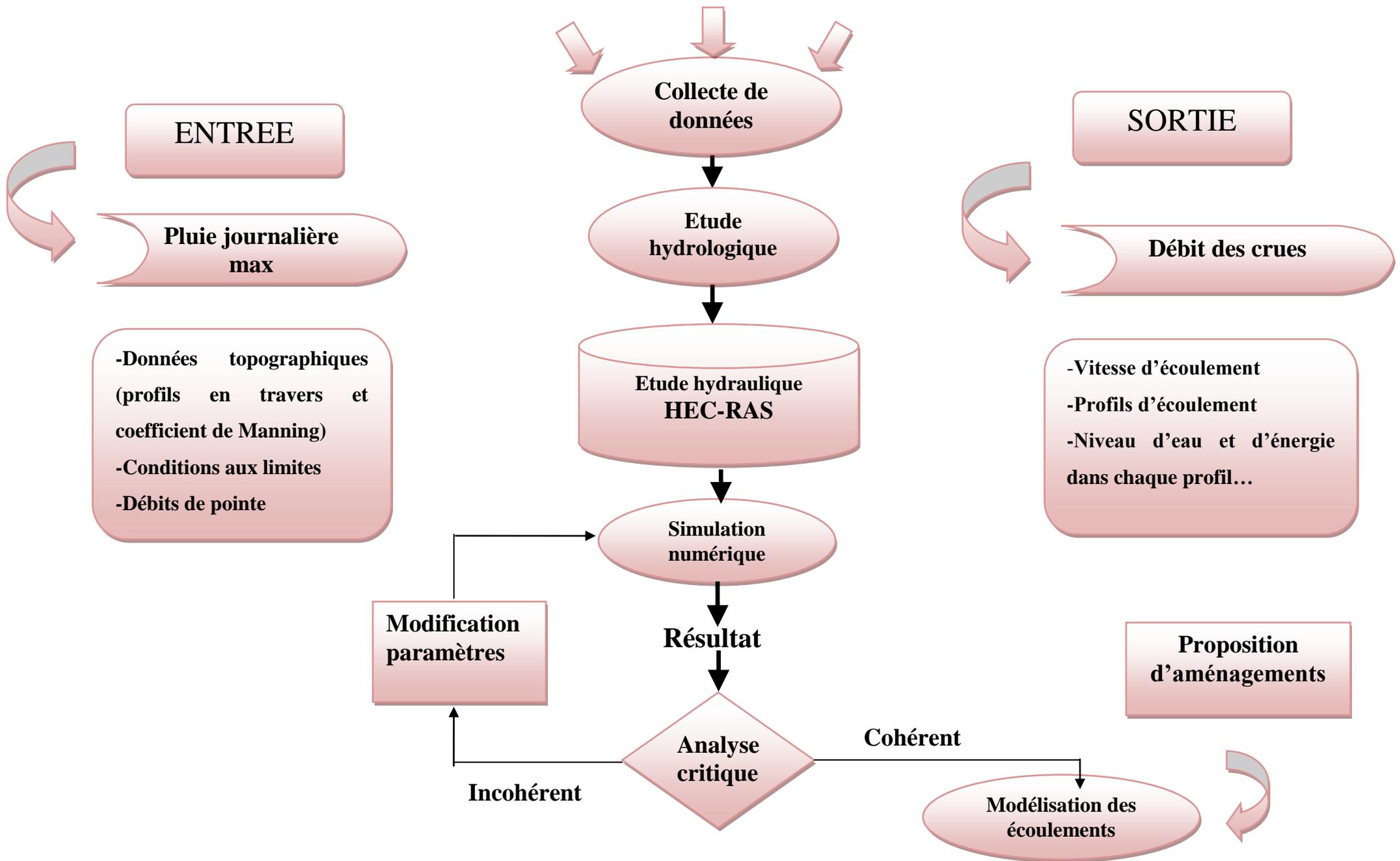


Figure 31 : Schéma Méthodologique

Chapitre II. Etude hydrologique

L'objectif de l'étude hydrologique est de reconnaître les crues de projet par les aspects du débit de pointe et de l'hydrogramme de crue.

II-1. Enquête de crues

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. Le déplacement des systèmes orageux, bloqués localement sur les flancs des sous-petits bassins, engendre des pluies à fortes intensités et qui génèrent des crues rapides de montagnes. Les eaux pluviales transitées par oued Aggay vers les artères principales de la ville menacent les populations et les infrastructures. De ce fait la ville de Sefrou est exposée aux inondations dans les plus importantes sont cette de 1950-1992-1994.

II-1-1-Inondations du 25/09/1950 :

Ces inondations ont été causées par la crue qui a transité par l'oued Aggay. Le niveau d'eau débordante, ayant atteint deux mètres de hauteur dans le quartier de « Chebbak » explique bien ampleur de cette catastrophe. Elles ont touchées plusieurs quartiers (Fig. 32). Les dégâts enregistrés au niveau de la ville de Sefrou sont l'inondation de plus de 100 habitants. Les dégâts des équipements d'infrastructures concernent :

- Réseaux électrique, d'APE et d'assainissement ;
- Le barrage de prise d'eau de l'usine hydroélectrique ;
- Pont de l'usine hydroélectrique ;
- La voirie des rues de la médina, etc....



Figure 32: Inondation de septembre 1950 au niveau du quartier El Mellah

II-1-2-Les inondations d'Août 1992 :

Ces inondations ont été causées par les crues du bassin versant, des Chaâbas Lalla Rquia, Doukarat, Chata, El Mekhzen et la route de Boulemane. Elles ont touchées la RR503, les habitations et les locaux administratifs situés le long de cette route (Fig. 33).



Chaâbat de Lalla Rquia - Route de Sefrou - Fès



Avenu Mohamed V



Chaâbas de la route de Boulemane



Chaâbat d'El Mekhzen et Doukarat

Figure 33: Inondation d'Août 1992

II-1-3-Les inondations de Septembre 1994 :

Ces inondations ont été causées par la crue transitée par Chaabats Chata et Chaabat Dar El Makhzane. Elles ont touchées le Boulevard Zerktouni et les quartiers de Habouna, Slaoui et Chaabat Zalagh. Ces inondations ont occasionnées des dégâts au niveau des réseaux de voirie, d'eau potable, d'assainissement et électrique, du canal de dérivation, de la délégation de la jeunesse et sports, du bâtiment de la protection civil, du centre des travaux agricoles, le parc municipal, de la Direction provinciale de l'équipement, de la Direction provinciale de l'agriculture et du Lycée Bir Anzarane.

II-2- La méthode du Gradex

La méthode du GRADEX est une approche hydro-pluviométrique probabiliste du calcul des débits de crues. La méthode se base sur l'information apportée par la loi de probabilité de

la pluie spatiale pour les valeurs fortes. En effet, on suppose que la loi de distribution de la rétention du bassin ne change pas pour les pluies intenses, d'où on déduit le comportement asymptotique des volumes des crues extrêmes à partir de la distribution de la pluie moyenne maximale annuelle (pour un pas de temps adéquat). La distribution des débits instantanés maxima est déduite des volumes, par un coefficient de forme moyenne des hydrogrammes de ruissellement direct, rapport moyen de la pointe d'une crue par le volume moyen sur le pas temps considéré. La méthode s'applique à des bassins de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés, qui sont homogènes pluviométriquement.

Cette méthode est choisit afin d'atteindre deux sous-objectifs :

- Estimer les débits de pointe Q_p à l'exutoire du bassin versant étudié, pour des périodes de retour allant de 10 à 100 ans
- Déterminer la forme de l'hydrogramme des crues et estimer les volumes de crues.

Ajustement des pluies journalières par loi de Gumbel :

Notre échantillon va être représenté sur la figure 34 : l'axe des X représente les valeurs de variables de Gumbel et l'axe des Y représente les pluies max journalières de la station de Sefrou.

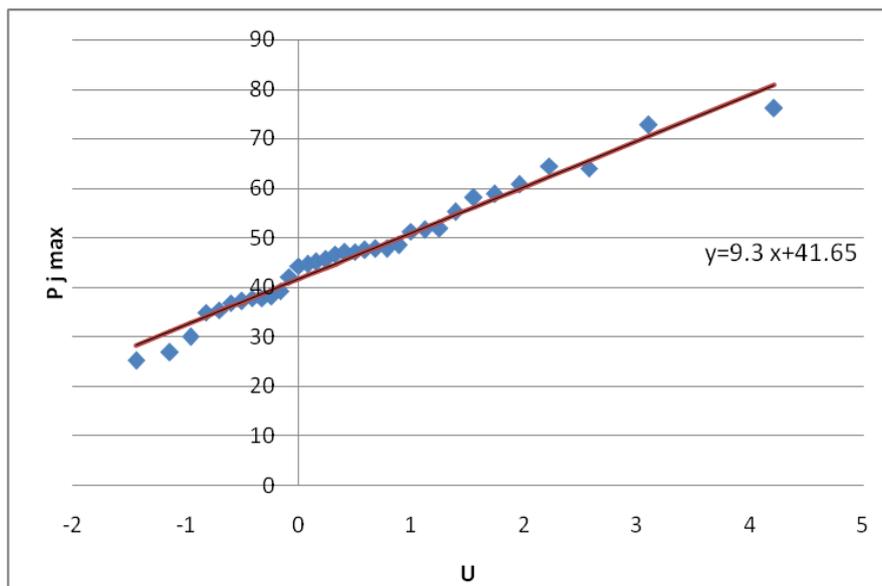


Figure 34: ajustement des pluies max journalières de la station de Sefrou par la loi de Gumbel

A partir de la figure 34, on a tiré le gradex et le maximale journaliere pour differentes periodes de retour.

| Station | Gradex | Pjmax 10 ans | Pjmax 20 ans | Pjmax 50 ans | Pjmax 100 ans |
|---------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Sefrou | 9.3 | 62.59 | 69.56 | 77.95 | 84.44 |

Tableau 8: Pj max de chaque période de retour avec le Gradex

Les valeurs représentées dans le tableau correspondent à des valeurs journalières. Le passage aux pluies en 24 h, se fera en multipliant les valeurs par un coefficient égal à 1.15 et ceci pour tenir compte de la coulissance de la pluie. La valeur de Gradex doit aussi être changée avec la multiplication de Gradex du pluies journalières par la même coefficient de 1.15.

| Station | Gradex | Pjmax 10 ans | Pjmax 20 ans | Pjmax 50 ans | Pjmax 100 ans |
|---------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Sefrou | 10.695 | 71.9785 | 79.994 | 89.6425 | 97.106 |

Tableau 9 : P₂₄ de chaque période de retour avec le Gradex

II-2-1. Méthode de Gradex modifié

- Le débit de pointe Q_p est donné par la relation suivante :

$$Q_p(T) = C_p * Q_j(T)$$

Avec :

Q_p :débit de pointe (m³/s) ;

Q_j :débitmoyen journalier (m³/s) ;

C_p :coefficient de pointe. C_p = 3.08

- ❖ Le débit journalier est donné par la relation :

$$Q_j = R(24,T) * A / 86,4$$

$$Q_j(10) = 32.41 m^3/s$$

Avec :

A : Surface du bassin versant en km² ;

Cr(24,T) :Ruissellement sur 24h pour la période de retour.

- ❖ Le ruissellement journalier est donné par la relation :

$$R(24,T) = k R_g(24,T)$$

$$R(10) = 2.5 \cdot 10^{-5} m/s$$

Avec :

- C_{rg}(24,T) : Ruissellement sur 24h pour la période de retour T obtenu par la méthode du Gradex ;
- K coefficient d'abattement, varie entre 0.55 et 0.95comme dans le tableau 9

| Aptitude au ruissellement | faible | Moyenne | Forte |
|----------------------------|--------|---------|-------|
| Surface en km ² | | | |
| < 500 | 0.70 | 0.85 | 0.95 |
| 500 < S < 2000 | 0.65 | 0.80 | 0.95 |
| 2000 < S < 5000 | 0.60 | 0.75 | 0.95 |
| > 5000 | 0.55 | 0.70 | 0.95 |

Tableau 10: Coefficient d'abattement pour différents surfaces

Pour le bassin d'Aggay $k = 0.95$

- ❖ Le ruissellement sur 24h pour la période de retour T obtenu par la méthode du Gradex :

$$\mathbf{Rg(24,T) = P(24,T) - B(T^*)}$$

Avec :

$B(T^*)$: Capacité limite d'infiltration en mm ;

B varie de 38 à 68 selon l'imperméabilité du bassin ;

$P(24,T)$: Pluie journalière maximale annuelle de période de retour T(mm).

La pluie de 24 h est liée à la pluie annuelle par la relation :

$$\mathbf{P(24,T) = a(T) Pa + b(T)}$$

Avec :

Pa : pluie annuelle (mm)

$a(T)$ et $b(T)$: paramètres qui dépendent de la période de retour T

les paramètres $a(T)$ et $b(T)$ sont obtenus par :

$$a(T) = 0.064 + 0.021 u(T)$$

$$b(T) = 9.9 + 3.2 u(T)$$

à partir de l'ajustement par la loi de Gumbel :

$$\mathbf{P(24,10) = 71,97 \text{ mm}}$$

L'évaluation du paramètre $B(T^*)$ en fonction de la période de retour est comme suit :

- ✓ Pour $T < T^*$: les débits de ruissellement observés à l'exutoire sont ajustés par la loi de Gumbel :

$$\mathbf{R(24,T^*) = r_0 + G(R) u(T)}$$

Avec :

$$G(R) = 1,15 G(P) - b \text{ et } r_0 = 1.5G(R)$$

$$G_p = 10,69 \text{ et } b = 10$$

on peut déduire :

$$\mathbf{B(T^*) = P(24,T^*) - (r_0 + G(R) u(T))}$$

- ✓ Pour $T > T^*$ on a :

$$\mathbf{R(24,T) = k (G(p)[1.15 * 1.5 + 0.15u(T^*) + u(T)] - b(1.5 + u(T^*)))}$$

| | T10 | T20 | T50 | T100 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Qp (m³/s) | 100 | 120 | 170 | 210 |

Tableau 11: débit estimés par la méthode de Gradex

II-2-2-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.

La formule de Mac Math (BV < 100 ha) :

$$Q(T^*) = k * I^{0.42} * P * A^{0.58}$$

- Q_t est le débit max. en l/s pour une période de retour donnée ;
- I est la pente moyenne du bassin versant (%);
- A est la superficie du bassin versant (en hectares);
- P Précipitation maximale en mm tombée en 24 h sur le bassin versant.
- k est un coefficient d'expression dépendant du couvert végétal et de la topographie du BV (les valeurs de K sont données dans le tableau 11)

| Nature de la surface | Valeur de K |
|---|-------------|
| BV de grandes dimensions et recouvert de végétation | 0.11 |
| Superficies cultivées et terrains vagues des zones suburbains | 0.22 |
| Terrains non aménagés ; non rocheux de pente moyenne, zones peu densément peuplées et faubourgs non pavés | 0.32 |
| Petites cités, terrains non aménagés, rocheux à forte pente | 0.43 |

Tableau 12: Valeurs de K en fonction de la nature de la surface

Donc K= 0.43

Les courbes d'intensité-Durée-Fréquence (IDf)

Les courbes IDF sont construites dans le but de synthétiser l'information pluviométrique au droit d'une station donnée.

Démarche :

L'analyse de la base des données des intensités maximales nous a permis de relever seize averses. Chacune est dépouillée à des intervalles de temps allant de 15 min, 30 min, ... à 120 min.

Pour calculer les courbes IDF, qui donnent l'intensité maximale en fonction de la durée « t » et pour une période de retour « T », il y a lieu de faire une analyse fréquentielle sur les variables aléatoires formées par les intensités maximales de durée « t ».

Cette analyse consistera à choisir la meilleure loi qui s'ajuste à ces variables. On peut accepter en générale la loi de Gumbel.

On calcule alors les paramètres de la loi ($1/a$, X_0) pour chaque variable aléatoire de durée « t » et on calcule les prévisions pour différentes période de retour « T ».

La droite de Gumbel pour chaque variable aléatoire s'exprime par :

$$Y = A * X(T) + B$$

Avec :

$$X(T) = -\ln(-\ln(F)) \quad \text{et} \quad F = 1 - 1/T$$

Le paramètre de la loi de Gumbel se calculent par :

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \hat{\sigma} \\ \hat{a} = \hat{\mu} - \hat{b}\gamma. \end{cases}$$

Avec :

$\hat{\sigma}$: Ecart type de l'échantillon X

$\hat{\mu}$: la moyenne de l'échantillon X

On doit représenter ces intensités maximales en fonction de la durée « t » et pour ces différentes périodes de retour « T » sur un graphe. On procédera par la suite à l'ajustement de ces courbes à la formule de Montana :

$$I = 60 * a t^{-b}$$

Avec :

a et b sont les paramètres régionaux de l'ajustement

On obtient ainsi, les paramètres de Montana à la période 1968/2002 pour la station de Sefrou:

$$\Rightarrow \begin{cases} T=5 \text{ ans} & a=4.1669 & b=0.5972 \\ T=10 \text{ ans} & a= 4.8497 & b=0.5897 \\ T=20 \text{ ans} & a =6.392 & b=0.5723 \end{cases}$$

Remarque :

Après avoir tracé ces courbes (Fig. 35) ; on remarque que les courbes IDF ne s'interceptent jamais, elles sont toutes parallèles car b est presque constante. La pente ne dépend pas donc de la période de retour.

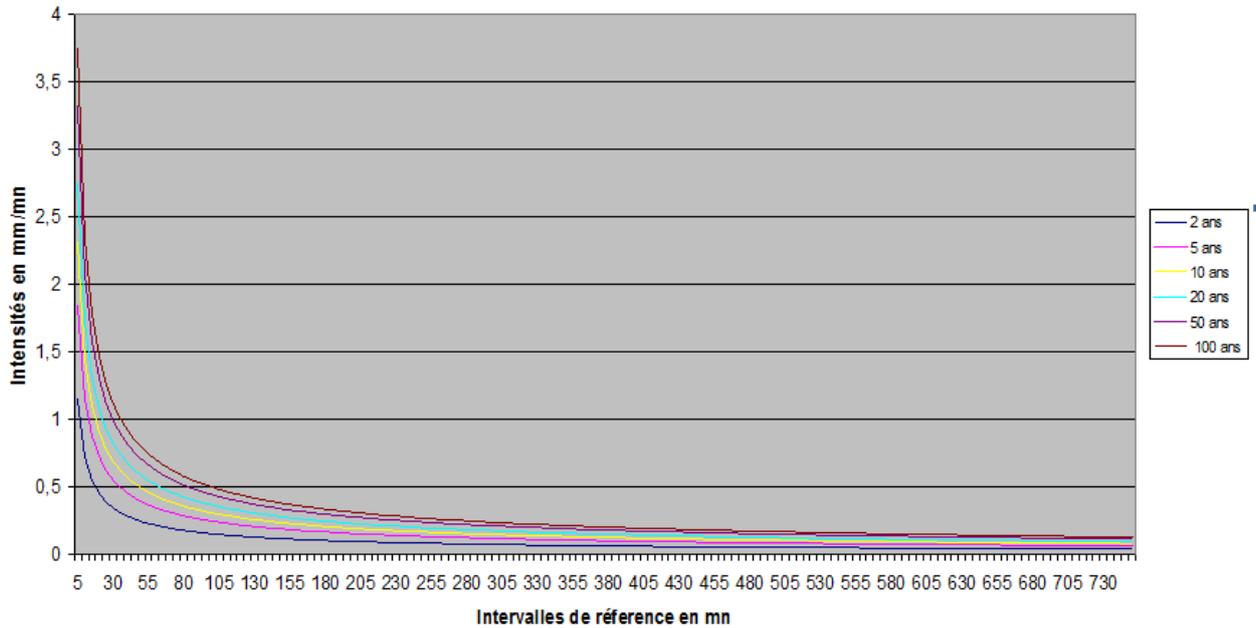


Figure 35: Représentation graphique des courbes IDF pour la station de Sefrou

Formule de Mallet Gauthier (BV > 100km²) :

$$Q(T) = 2 * K * \log(1 + a * P_{an}) * A / (L^{0.5}) * ([1 + 4 * \log(T) - \log(A)]^{0.5})$$

- Q(T) : Débit de pointe en m³/s pour la période de retour ;
- L : longueur du plus long talweg (km) ;
- A : superficie du bassin versant ;
- P_{an} : Pluie moyenne annuelle

Calcul :

Pour T = 10

A = 108 km² ; L = 26.11 Km ; P = 580 mm = 0.58 m ; K = 3 et a = 25

Q(T) = 173.24 m³/s

Formule de Fuller II (BV > 10km²):

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

- Q(T) : Débit pour la période de retour T (m³/s) ;
- A : Superficie du bassin versant (km²) ;
- T : Période de retour ;
- a : Coefficient qui varie entre 0.7 à 3 comme il montre le tableau suivant :

| | |
|---------------|-----------------------|
| 0.7 < a < 0.8 | Regions bien arrosées |
| 0.8 < a < 2 | Regions arides |
| 3 < a < 3.5 | Regions sahariens |

N: Coefficient regional

| | |
|---------|--------------------------|
| N = 80 | La plaine |
| N = 85 | Les regions accidentées |
| N = 100 | Les regions montagneuses |

Calcul :

Pour T = 10

Le bassin de l'oued Aggay est situé dans une zone bien arrosée et accidentée.

Donc N = 85 et a = 0.8.

$$\implies Q(10) = 142.90 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pour calculer le débit à différente période de retour on utilise la formule de **Fuller I** qui permet de passer de T1 à T2, elle s'écrit :

$$Q_{T2}/Q_{T1} = (1+a \log T2) / (1+a \log T1)$$

Calcul :

Pour T = 20

$$Q_{20}/Q_{10} = (1 + a \log 20) / (1 + a \log 10) \implies Q_{20} = 162.02 \text{ m}^3/\text{s}$$

Formule de Hazen-Lazarevich :

Elle permet d'évaluer le débit de pointe de la crue millénaire :

$$Q_{1000} = a * S^b$$

Avec :

S : Surface du BV en km² ;

Les valeurs des paramètres « a » et « b » dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie annuelle.

| | Province du Nord | | | Moyen Atlas | | | Haut Atlas |
|-------------------|------------------|----------------|--------------|-------------|---------|---------|------------|
| | Rif central | Rif occidental | Rif oriental | | | | |
| A | 15.55 | 9.78 | 7.58 | 14.94 | 13.51 | 13.47 | 9.38 |
| B | 0.776 | 0.793 | 0.808 | 0.636 | 0.613 | 0.587 | 0.742 |
| Pluviométrie (mm) | 1000-1300 | 800-1000 | 600-800 | 700-900 | 500-700 | 400-500 | 200 -400 |

Calcul :

- Pour T = 1000

Le bassin de l'oued Aggay est situé dans le Moyen Atlas où la pluviométrie est comprise entre 500-700.

Donc $a = 13.51$ et $b = 0.613 \implies Q(1000) = 238.31 \text{ m}^3/\text{s}$

- Pour T = 100

$Q(1000)/Q(100) = (1 + a \log 1000) / (1 + a \log 100)$

$\implies Q(100) = 182.23 \text{ m}^3/\text{s}$

Les résultats des différentes formules régionales décrits dans le tableau 13:

| | Débit (m ³ /s) | | | |
|-------------|---------------------------|-------------------------|------------------|------------------------|
| | Mac-Math | Hazen-Lazarevich | Fuller II | Mallet-Gauthier |
| T10 | 233.9 | 126.16 | 142.90 | 173.24 |
| T20 | 259 | 143.04 | 162.02 | 205.51 |
| T50 | 291 | 165.36 | 187.3 | 241.57 |
| T100 | 316 | 182.23 | 207.19 | 265.62 |

Tableau 13: débit estimés par différentes méthodes régionales

II-2-3. Calcul de la lame d'eau ruisselée et du volume pour la fréquence 10 ans :

- **Calcul de volume V (T*=10) :**

Le volume V (T*=10) correspondant au débit de référence (T*=10) peut être calculé par multiplication de débit de pointe de référence fois le temps de concentration :

$$V(T^*=10) = Q_p(T^*=10) * T_c$$

- **Calcul de la lame d'eau ruisselée Lr(T*=10) :**

Lr (T*=10) est la lame d'eau ruisselée de référence. Elle est déduite du volume de référence V(T*=10) en divisant ce dernier par la superficie du bassin versant.

$$L_r(T^*=10) = \frac{V}{S_{bv}}$$

II-2-4. Calcul de la lame d'eau ruisselée et Qp pour différentes fréquences :

On considère qu'une pluie d'une période de retour (T) engendre une crue de même période de retour. Le passage des pluies en 24 h aux pluies sur le temps de concentration pour chaque fréquence se fait en utilisant la formule suivante :

$$P(T_c) = P(24) * \left(\frac{T_c}{24}\right)^{(1-b)}$$

Par conséquent, les lames d'eau ruisselées $L_r(T, T_c)$ au bassin étudié, sur le temps de concentration et pour différentes périodes de retour, sont obtenues en utilisant l'équation ci-dessous :

$$L_r(T, T_c) = L_r(T^*, T_c) + G_p(T_c) * (U(T) - U(T^*))$$

$G_p(T_c)$ est le Gradex sur le temps de concentration calculé à partir du Gradex en 24h par la formule suivante :

$$G_p = G_p(24) * \left(\frac{T_c}{24}\right)^{(1-b)}$$

On obtient donc le résultats suivantes :

| | T 10 | T20 | T50 | T100 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| U(T) | 2.25 | 3.00 | 3.9 | 4.6 |
| V(Mm ³) | 2.52 | 2.79 | 3.14 | 3.41 |
| Lr (Tc)m | 2.3 | 2.58 | 2.9 | 3.16 |
| P (Tc)mm | 31.73 | 33.40 | 37.42 | 40.54 |

Tableau 14: Lame d'eau précipitée, volume et débit de pointe de chaque fréquence

II-3. Débits retenus :

Le débit décennal étant figé pour la méthode du Gradex. Les débits retenus sont les fruits d'une analyse et une comparaison des débits calculés par les différentes méthodes présentées précédemment (tabl 14).

| T (ans) | T 10 | T 20 | T 50 | T 100 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Q (m ³ /s) | 112.24 | 165.91 | 211.04 | 336.20 |

Tableau 15: Débit retenus des différentes méthodes

II-4. Calcul du temps de concentration :

Le temps de concentration t_c des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point du bassin et l'exutoire de ce dernier. Il est composé de trois termes différents :

- **t_h : Temps d'humectation** : Temps nécessaire à l'imbibition du sol par l'eau qui tombe avant qu'elle ne ruisselle.
- **t_r : Temps de ruissellement ou d'écoulement** : Temps qui correspond à la durée d'écoulement de l'eau à la surface ou dans les premiers horizons de sol jusqu'à un système de collecte (cours d'eau naturel, collecteur).
- **t_a : Temps d'acheminement** : Temps mis par l'eau pour se déplacer dans le système de collecte jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration t_c est donc égal au maximum de la somme de ces trois termes, soit :

$$T_c = \max(\sum(t_h + t_r + t_a))$$

Théoriquement, on estime que t_c est la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement. Pratiquement, le temps de concentration peut être déduit de mesures sur le terrain ou s'estimer à l'aide de formules le plus souvent empiriques. Nous utilisons celles les plus répandues au Maroc :

❖ **Formule du Turazza :**

$$T_c = \frac{0.108}{\sqrt{I}} \sqrt[3]{S.L} \quad T_c = 8,39 \text{ h}$$

Avec :

- T_c : temps de concentration ;
- S : air du bassin versant en Km² ;
- L : longueur du plus long parcours hydraulique en Km ;
- I : pente moyenne

❖ **Formule de Ventura :**

$$T_c = 76.3 * \left(\frac{A}{I}\right)^{0.5} \quad T_c = 7,27 \text{ h}$$

Avec :

- A : air du bassin en Km² ;
- I : pente moyenne en %

❖ **Formule de Kripich :**

$$T_c = 0.945 \frac{L^{1.155}}{(H_{max} - H_{min})^{0.385}} \quad T_c = 3,04 \text{ h}$$

Avec :

- L : longueur du Talweg principal ;
- H_{max} : altitude maximale (1735m)
- H_{min} : altitude minimale (880m)

❖ **Formule de D.Californienne :**

$$T_c = 60 * 0.019395 * (L/P^{1/2})^{0.77} \quad T_c = 3 \text{ h}$$

Avec :

- L : longueur du Talweg principal ;
- P : pente en m/m

❖ **Formule de H.Giandotti :**

$$T_c = 60 * \frac{(4 * A^{1/2}) + (1.5 * L)}{0.8 * (h - h_0)^{1/2}} \quad T_c = 4,88 \text{ h}$$

Avec :

A : air du bassin en Km² ;

L : longueur du Talweg principal ;

h-h₀ : Altitude moyenne du bassin en m.

Donc le temps de concentration du bassin versant d'oued Aggay est proche de :

$$T_c = 3 \text{ h}$$

Nous notons que ce temps de concentration est relativement court ce qui peut être expliqué par la forme allongée du bassin et les pentes importantes qui y règnent.

Le tableau suivant récapitule les résultats de calcul :

| Bassin versant d'oued Aggay | Ventura | Californéin | Kripich | Turrazza | Giandotti | Valeur retenue (h) |
|-----------------------------|---------|-------------|---------|----------|-----------|--------------------|
| | 7.27 h | 3 h | 3.04 h | 8.39 h | 4.88 h | 3 h |

Tableau 16: T_c par différents méthodes appliquées au bassin de l'oued Aggay

II-5. Le temps de Lag (lag Time) :

C'est l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue ou parfois de centre de gravité de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.

$$T_L = 0.6 * T_c \quad T_L = 1,8 \text{ h}$$

II-6. La forme de l'hydrogramme de crue :

Les hydrogrammes de crues (Fig. 36) présentent une forme générale de courbe en cloche dissymétrique comprenant :

- La partie correspondant à la concentration de la crue (courbe de concentration)
- La zone entourant le maximum (la pointe) ;
- Celle afferente à la diminution progressive du débit (décrué).

Pour définir un hydrogramme type des crues d'un oued, on « adimensionalise » les crues les plus représentatives inventoriées par leurs temps de pointe et débits de pointe et on les superpose aux hydrogrammes type.

On adopte L'hydrogramme de l'USSCS : il s'agit d'un hydrogramme type adimensionnel avec comme données en entrée le temps de base et le débit de pointe. Le temps de monté égale à 3h et le temps de base égale à 3 fois le temps de monté.

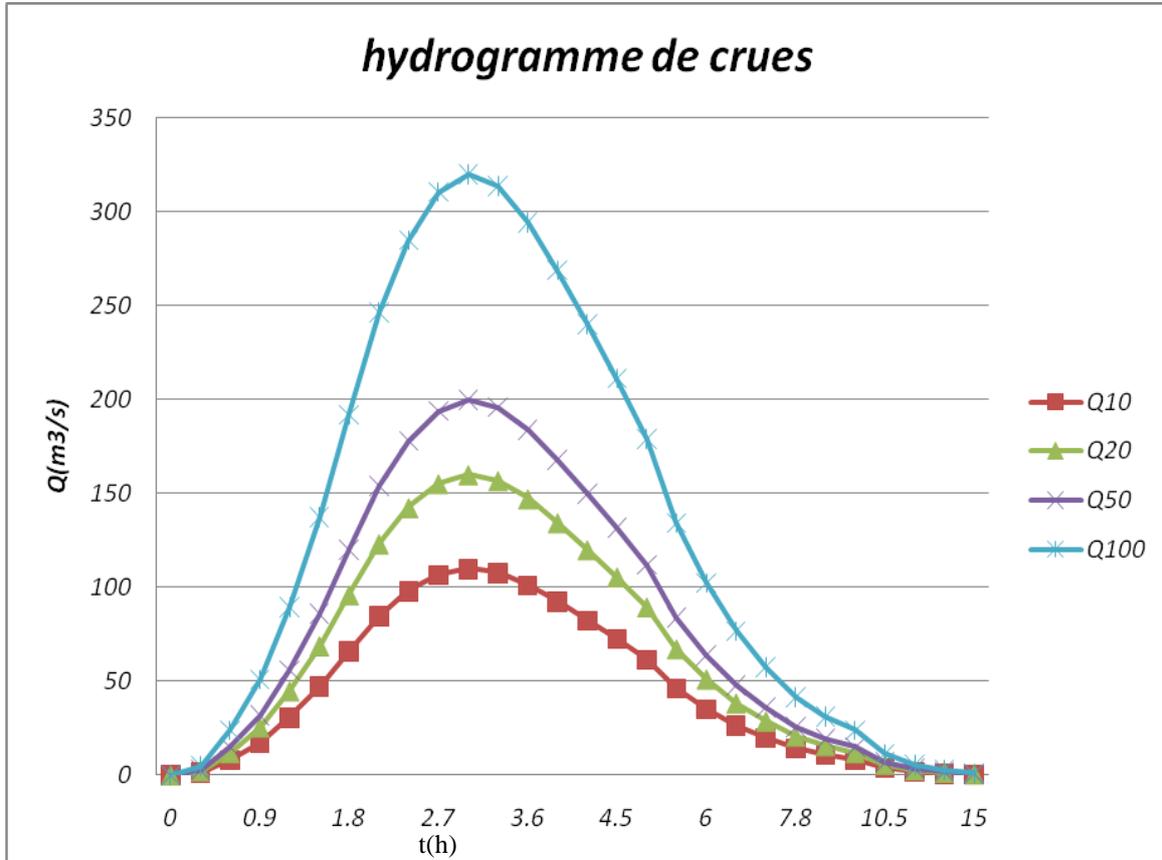


Figure 36: Hydrogramme des crues du bassin versant de l'oued Aggay

Chapitre III. Etude hydraulique

Introduction :

L'étude hydraulique consiste à évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels que la géométrie, le débit, et les conditions aux limites dans le but de réaliser un modèle hydraulique pour calculer la hauteur d'eau, d'une part, et d'autre part pour déterminer les zones de débordement.

La séquence d'opérations commence par la construction d'un modèle de l'oued Aggay au niveau de l'aval du barrage Aggay, et d'autre modèle à l'amont de la ville de Sefrou. Puis définir les différents scénarios d'aménagements au niveau d'oued Aggay, et enfin définir le système de prévention contre les crues.

III-1. Construction du modèle de l'oued Aggay au niveau de l'aval du barrage Aggay

III-1-1. Diagnostic de la situation actuelle de l'oued Aggay

La ville de Sefrou est exposée aux inondations provoquées par les torrents de pluies qui ruissellent à partir des reliefs surplombant la ville au Sud, et qui s'écoulent vers le nord en direction de l'Oued Aggay (El Yhoudi) collecteur général des eaux de toute la zone.

Pour résoudre la problématique des inondations créées par cet oued, un barrage a été réalisé en 1992 à l'amont de la ville de Sefrou. Ses coordonnées Lambert sont $X= 539,000$, $Y=374,400$ (Fig. 37). Sa vocation principale est la protection de la ville de Sefrou contre les crues d'oued Aggay, la recharge de la nappe et l'irrigation.

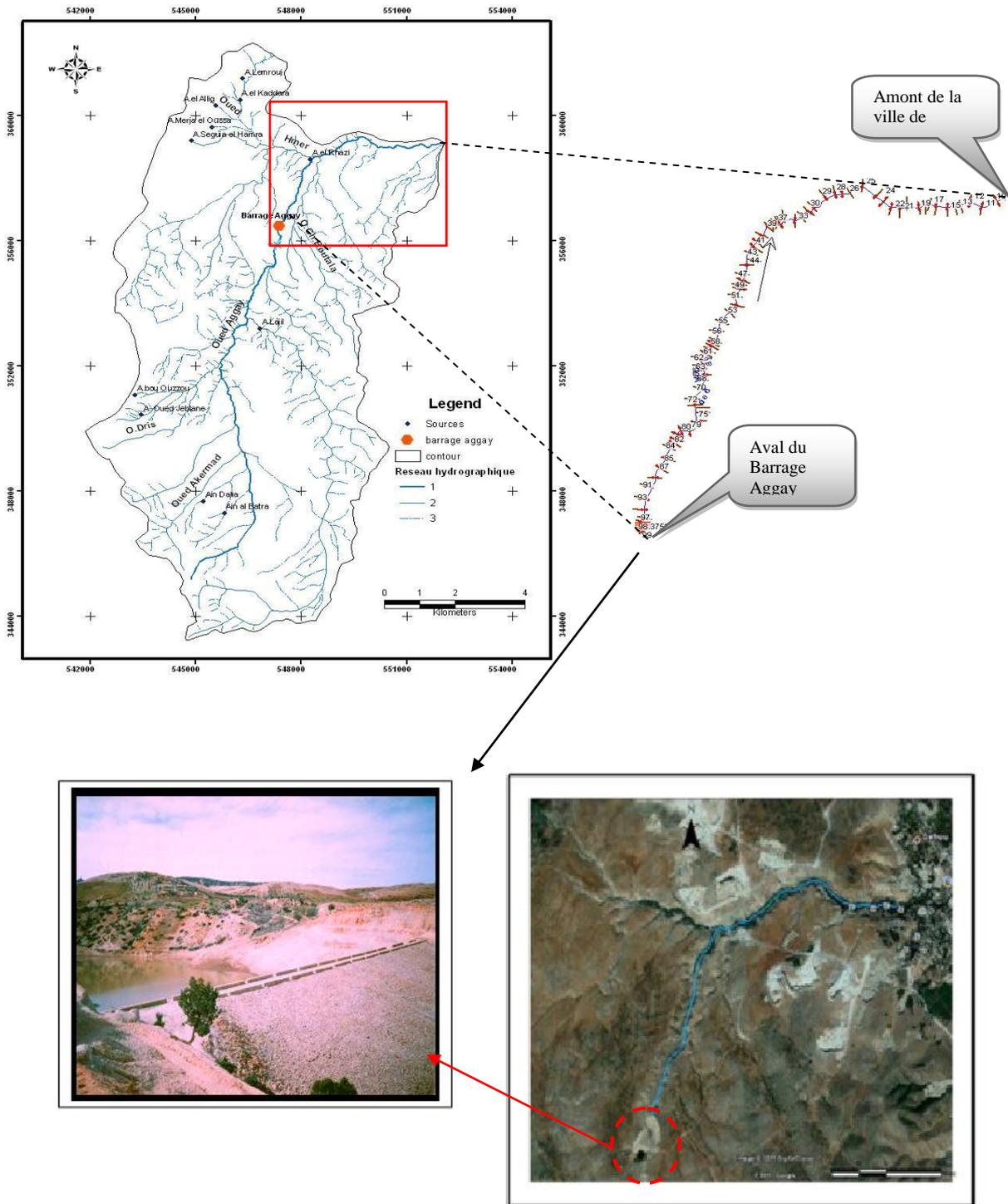


Figure 37: Situation du tronçon étudié et du barrage Aggay ou Hinajen

Caractéristiques du Barrage

Le barrage d'Aggay est en terre homogène de 37 m de hauteur par rapport au terrain naturel. La retenue normale du barrage est de 1.25 Mm³ ce qui correspond au stockage du volume de la crue de fréquence 1/1000. ($Q_{1000} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$). Il est constitué d'un seul matériau meuble à dominante argileuse suffisamment imperméable pour assurer à la fois l'étanchéité et la résistance. La terre est généralement mise en place par compactage.

Evacuateur de crue :

- ✓ Construction du seuil en bec de canard et assurer un bon contact avec la paroi étanche amont.

Vidange de fond :

- ✓ Mise en place deux conduites métalliques de diamètre 1000 mm chacune.
- ✓ Débit évacué par la vidange de fond est de 620 l/s.

Hauteur de crête et de revanche :

Les pentes minimales de la face amont doivent être de 3:1, et de 2 ½:1 dans le cas de la face aval. En raison de la stabilité de la plupart des matériaux terreux agglomérés en pente douce, il est nécessaire que la base de ce type de barrage soit de quatre à sept fois plus large que sa hauteur. La face amont doit être protégée par des enrochements s'il y a un risque de détérioration sous l'effet des vagues et le talus aval doit être protégé contre les effets de ruissellement des eaux de pluies. L'enherbement du talus aval est la solution adoptée de façon quasi systématique sur les petits barrages en terre.

- ❖ La largeur de crête (au sommet du barrage) est généralement établie par la formule suivante:

$$L_{cr} = (H^{0,5}) * 1,65$$

$$L_{cr} = 10.17 \text{ m}$$

H : la hauteur du remblai en m

III-1-2. Calcul en régime permanent

Le régime permanent reste le plus simple et le plus satisfaisant pour la réalisation du modèle hydraulique d'oued Aggay et pour savoir des résultats exploitables dans l'étude du bassin versant.

Cependant, il est important de signaler que les hypothèses suivantes sont implicites dans les expressions analytiques utilisées dans le logiciel HEC-RAS :

- ✓ L'écoulement est permanent
- ✓ L'écoulement est graduellement variable
- ✓ L'écoulement est unidimensionnel ;
- ✓ La rivière a une pente inférieure à 1/10

HEC-RAS est capable de résoudre des problèmes 1D. La ligne d'eau est calculée d'une section à une autre en résolvant l'équation de l'énergie par une méthode itérative (standard step method). Elle est obtenue à partir de l'équation de quantité de mouvement, et représente la conservation de la charge hydraulique. L'équation résolue est la suivante :

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

Avec :

Y : hauteur d'eau

Z : côte du fond

V : vitesse moyenne sur une section

G : gravité

α : coefficient de pondération

h_e : pertes de charge

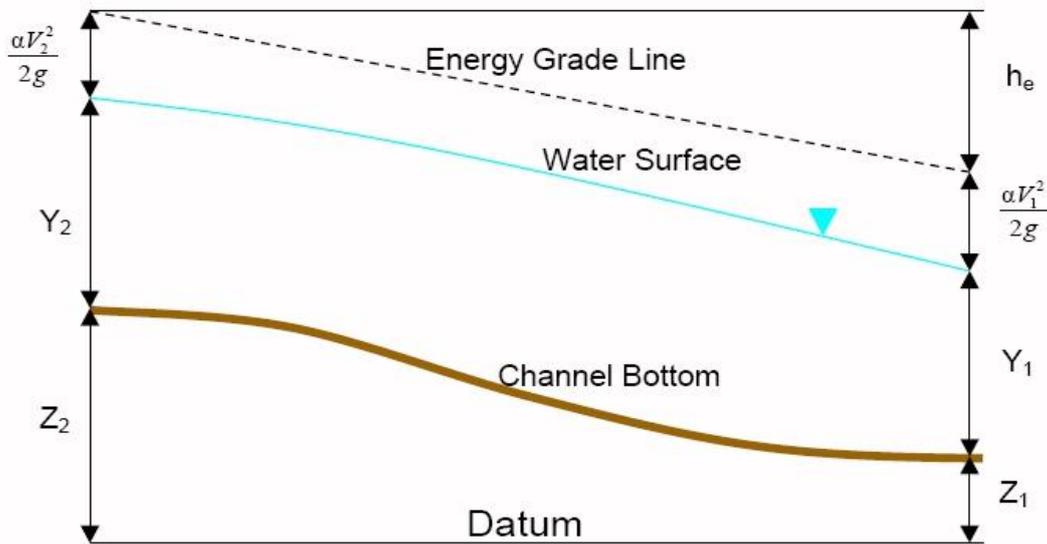


Figure 38: représentation des différents termes de l'équation d'énergie

La perte de charge entre deux positions 1 et 2 est composée par les pertes dues à la friction et à la contraction. L'équation de la perte de charge (h_e) est comme suit :

$$h_e = L \times S_f + C \times \left(\frac{\alpha_2 \times V_2^2}{2 \times g} - \frac{\alpha_1 \times V_1^2}{2 \times g} \right) \quad (2)$$

Avec :

L : la distance entre deux sections,

S_f : la pente de frottement entre deux sections,

C : le coefficient de contraction ou d'expansion.

A partir des équations (1) et (2), la hauteur d'eau est déterminée en utilisant une hauteur d'eau connue à l'aval lorsque l'écoulement est fluvial ou à l'amont pour un écoulement torrentiel.

Lorsque la hauteur d'eau passe en dessous de la hauteur critique, par exemple au niveau des ponts, des seuils..., l'équation d'énergie n'est plus valable. Les calculs se basent alors sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement afin qu'il y ait convergence des calculs :

$$F = m \times a _ x f x P - P + W - F = Q \times r \times DV 2 1$$

Avec :

P_1 et P_2 : Résultantes des forces de pression hydrostatiques sur les sections 1 & 2

W_x : la composante du poids de l'eau selon l'axe x,

F_f : la force due aux frottements,

Q : le débit,

P : la densité de l'eau,

Vx : la composante de la variation des vitesses selon l'axe x.

III-1-3. Géométrie de profils en travers

III-1-3-1. Profils en travers :

Les données topographiques constituent le socle sur lequel se construisent toutes les modélisations hydrauliques de rivières. Ainsi, les principaux éléments topographiques sont les profils en travers perpendiculaires au sens d'écoulement, ligne, berges, digues, levées... Le profil en travers est l'élément géométrique primordial. Il est extrait de la carte topographique de Sefrou et aussi d'un MNT représentant le tronçon d'oued Aggay. Le profil a été choisi de sorte à montrer le maximum d'informations morphologiques de bassin versant d'oued Aggay.

Environ 100 profils topographiques répartis sur 5 kilomètres de cours d'eau ont été levés. Au niveau des singularités (ponts, galeries couvertes...), des profils ont été rajoutés afin de correspondre au plus près à la topographie.

D'après Kreis (2005), le profil en travers doit respecter cinq règles principales pour qu'il soit représentatif :

- Les profils doivent être perpendiculaire à la direction d'écoulement des eaux ;
- Ils ne doivent pas se croiser ;
- Ils doivent recouper toute la plaine d'inondation ;
- Ils doivent décrire le profil en long du cours d'eau. Cela n'est pas toujours facile à réaliser dans le cas d'un cours méandrique avec une large plaine d'inondation ;
- Ils doivent prendre en compte les modifications géomorphologiques des lits mineurs et majeurs (élargissement, méandres, contraction, diffluence...) des problèmes peuvent apparaître lorsque les méandres sont très resserrés ou que les angles de diffluence sont fermés. Il devient alors compliqué de tracer des profils sans que les tracés se recoupent.

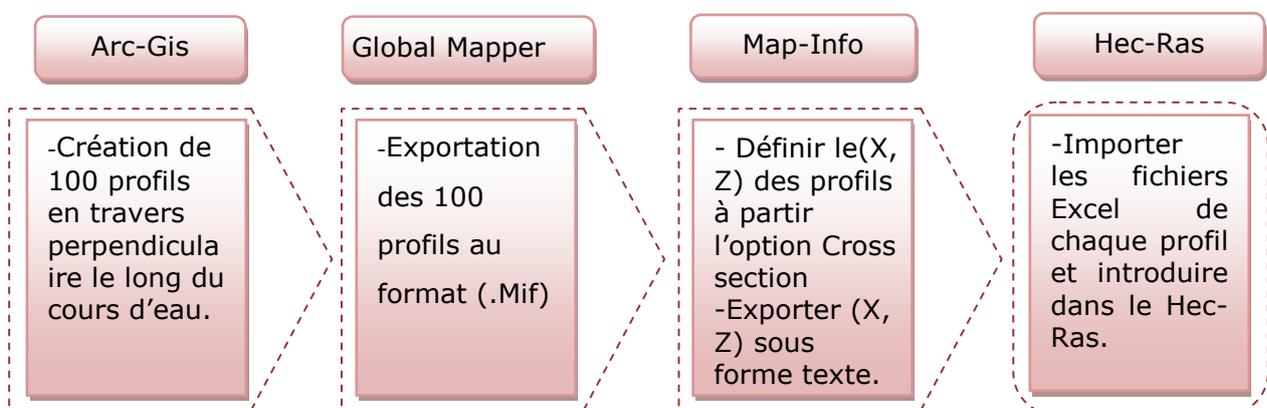


Figure 39: Schéma méthodologique de la géométrie des profils en travers

III-1-3-2. Coefficient de Manning

La nature du lit intervient dans le processus d'écoulement par la rugosité du lit et par la mobilité des matériaux. La rugosité caractérise la résistance du lit au déplacement de l'eau. Elle varie d'un secteur à l'autre du lit avec la nature physique du matériau et la granulométrie, la présence d'ondulations dans les fonds sableux.

Les valeurs des coefficients de rugosité ont été déterminées sur la base des observations de terrain. Les coefficients ainsi choisis sont présentés dans le tableau 16.

| | |
|------------------------------------|------------|
| Les rives | 0.033 |
| Lits bétonnés | 0.015 |
| Lits naturels propres à fond lisse | 0.02 |
| Lits propres à fond rugueux | 0.03 |
| Lits naturels avec végétation | 0.05 à 0.1 |

Tableau 17: les valeurs indicatives du coefficient de rugosité

III-1-3-3. Pertes de charges

Les rétrécissements et les élargissements occasionnés par les ouvrages de franchissement provoquent certaines pertes de charges.

En se référant au « memento des pertes de charges Idel'clik », on a pour les tronçons d'entrées avec rétrécissement brusque la forme suivante :

$$\mathcal{E}_{\text{entrée}} = 0.5 \cdot (1 - F_0/F_e)$$

Avec :

$\mathcal{E}_{\text{entrée}}$: coefficient de perte en charge à l'amont

F_0 : aire de la section de l'ouvrage hydraulique (m²)

F_e : air de la section à l'amont de l'ouvrage hydraulique (m²)

Pour un élargissement brusque à l'aval d'un tronçon long et rectiligne, et utilisant la même référence, on a la formule suivante :

$$\mathcal{E}_{\text{sortie}} = 1 \cdot (1 - F_0/F_s)^2$$

Avec :

$\mathcal{E}_{\text{sortie}}$: coefficient de perte en charge à l'aval

F_s : air de la section à l'aval de l'ouvrage hydraulique (m²)

III-1-3-4. Définition des " levées "

Par défaut, HEC-RAS utilise toute la largeur du profil pour faire passer le débit. Nous avons ainsi la possibilité de définir des " points hauts " qui confinent l'écoulement, mais qui peuvent être submergés (comme des berges).

III-1-3-5. L'interpolation entre les profils transversaux

Pour augmenter la stabilité des calculs de niveau par le modèle, il est recommandé d'avoir une distance raisonnable entre deux sections transversales. En assumant que la pente et les propriétés des sections varient de façon linéaire entre deux sections consécutives, la fonction **XS Interpolation** dans le menu **Tools** permet d'ajouter par interpolation de nouvelles sections entre deux sections existantes.

Les profils de la figure 40 ont été interpolés séparément avec un pas de 10 m.

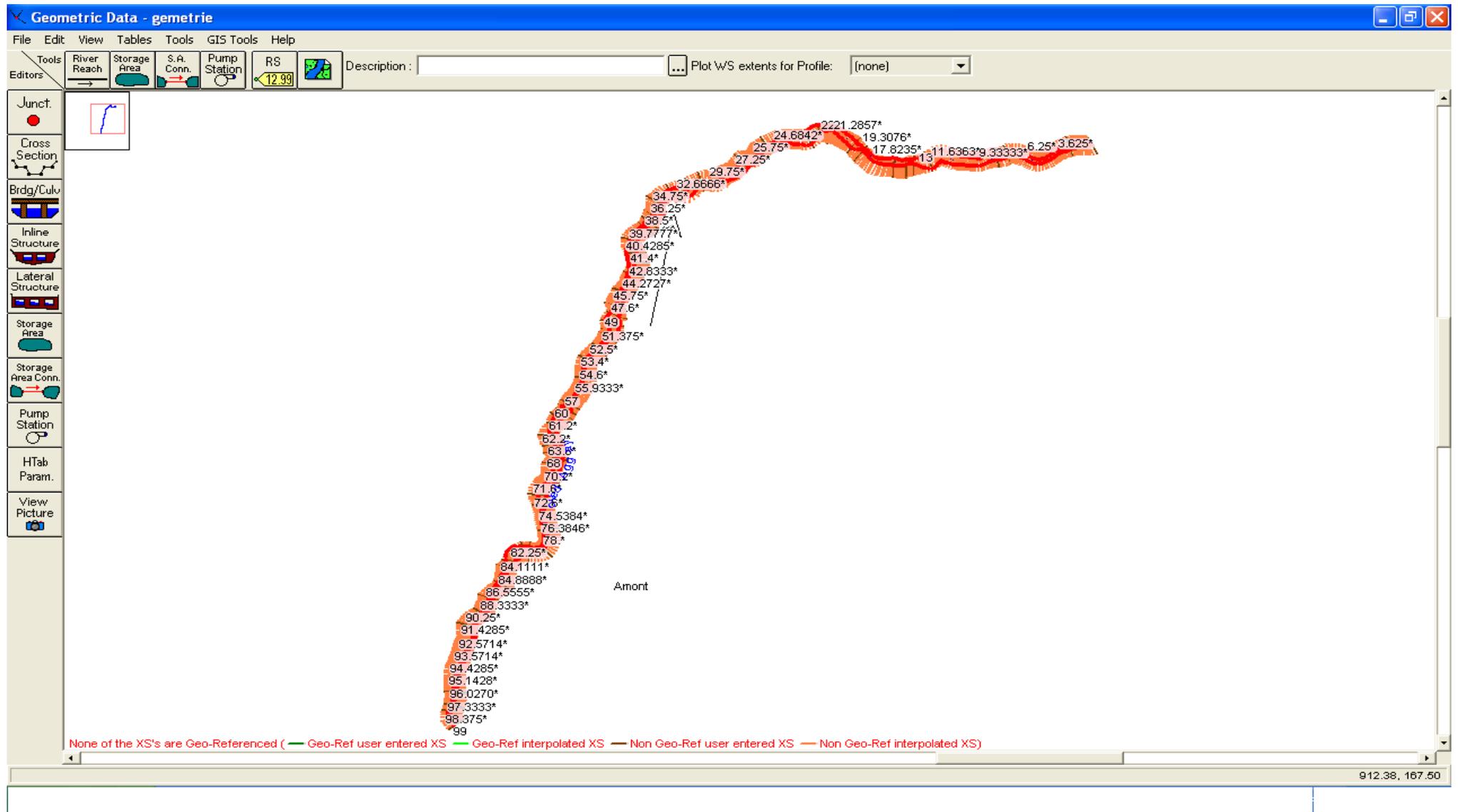


Figure 40 : Résultat d'interpolation entre les profils

III-1-4. Débits et conditions limites :

L'étape suivante de la modélisation hydraulique est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulements. Les résultats d'une analyse de fréquence des débits maximums sont utilisés pour calculer les profils d'écoulements correspondants. Les débits utilisés ont été obtenus à partir de l'étude hydrologique précédemment réalisée et réaffichée dans le tableau suivant :

| T(ans) | T 10 | T 20 | T 50 | T 100 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Q (m ³ /s) | 112.24 | 165.91 | 211.04 | 336.20 |

Tableau 18: Débits des périodes de retour nécessaires à la modélisation

Les données hydrologiques sont les conditions aux limites d'un modèle dans HEC- RAS avant la simulation, ce sont des débits :

- Pour la simulation en régime permanent, le débit est constant, la simulation HEC-RAS ne considère qu'un seul débit dans la rivière.
- La condition avale imposée au modèle est une cote connue du niveau d'eau égale à 2 m.

III-1-5. Calage et validation

Le calage est l'ajustement d'un modèle. Il consiste à comparer les résultats obtenus avec les archives des résultats et des événements historiques de la zone. Le calage a pour but d'optimiser le modèle construit afin de pouvoir le simuler avec la crue de projet ou la crue centennale.

Le modèle a été calé à partir de la crue du 1994, dernière crue significative d'oued Aggay. Le calage d'un modèle se fait après plusieurs simulations en faisant varier le coefficient du Manning-Strickler.

III-1-6. Visualisation et discussion des résultats

La saisie des données géométriques concernant les profils des sections transversales et les débits de pointe de différentes période de retour, ainsi que les conditions limites dans le logiciel HEC-RAS ont permis d'effectuer les calculs et d'extraire des résultats comme :

- la vue en profil du tronçon simulée,
- le niveau d'eau de chaque période de retour sur les profils,
- une vue de trois dimensions du niveau d'eau dans le tronçon d'étude des tables descriptives et
- la courbe de tarage.

III-1-6-1. Linge d'eau :

La ligne d'eau représente une vue en profile du tronçon d'étude avec le niveau et la surface d'eau de l'oued et le niveau d'eau de chaque période de retour. Dans le cas de cette

Modélisation hydraulique du bassin versant d'oued Aggay
étude, la différence entre les niveaux des périodes de retour est bien visible. Le comportement des crues est sensible aux irrégularités de la topographie.

La figure 41 présente la ligne d'eau pour Q100. Conformément aux hypothèses, la ligne d'eau ne croise pas la hauteur critique.

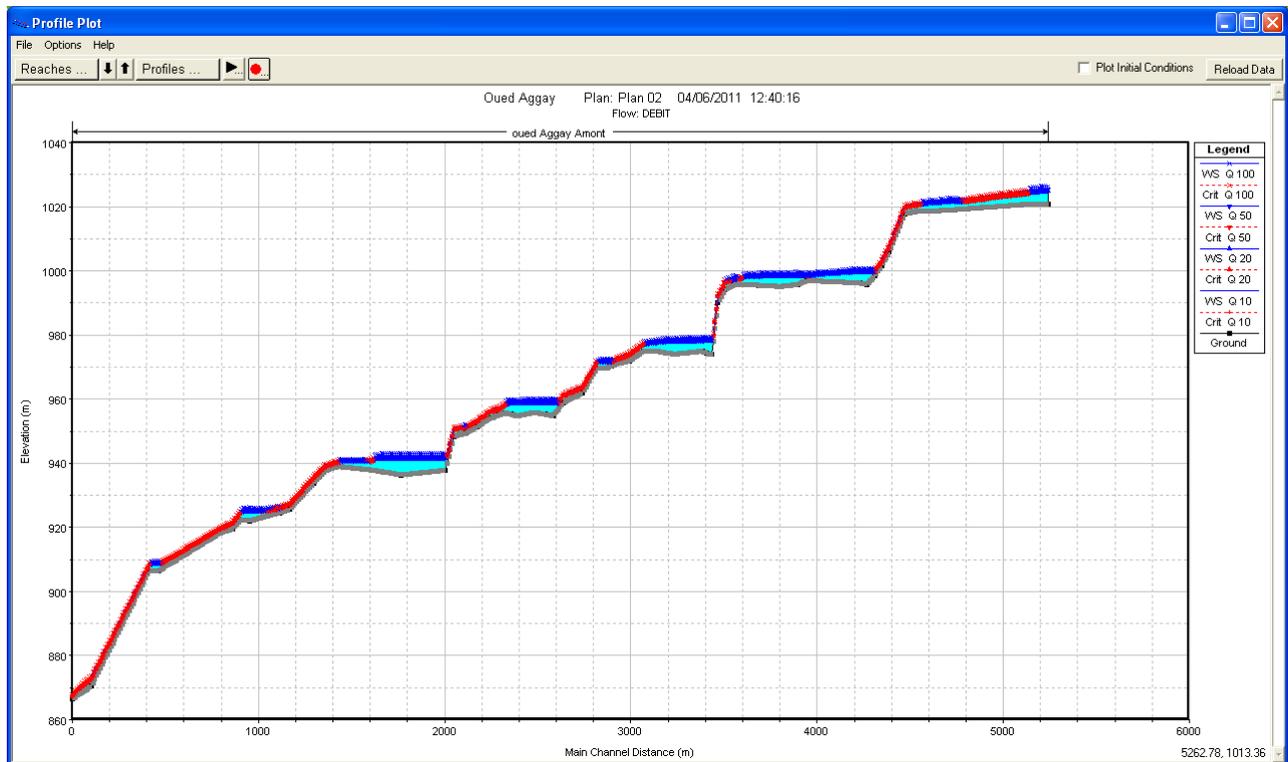


Figure 41: Ligne d'eau du tronçon modélisé de l'Oued Aggay

III-1-6-2. Visualisation en trois Dimension du tronçon modélisé :

HEC-RAS fournit une vue en trois dimensions qui facilite le suivi du comportement des eaux de crue de période de retour (Fig. 42& 43). Cette figure montre que dans la partie amont située au sud du bassin, il n'y a pas un fort débordement de crue. A cause de la construction du barrage Aggay, la concentration des eaux s'est effectuée au centre de la vallée. Dans la partie avale, s'observe un énorme débordement et surtout dans la partie gauche. Ce débordement touche l'amont de la ville de Sefrou.

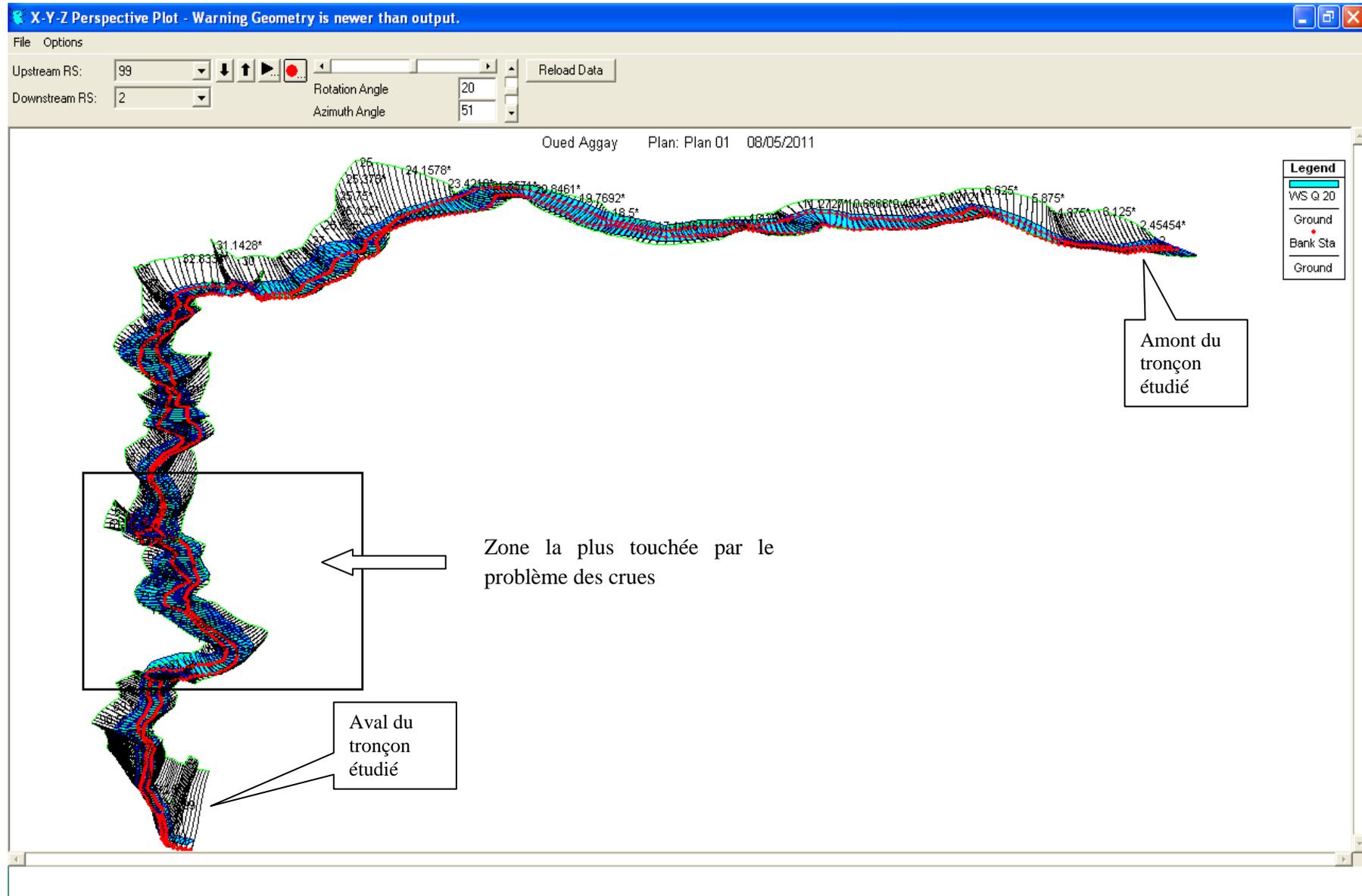


Figure 42 : vue du tronçon modélisé en 3D

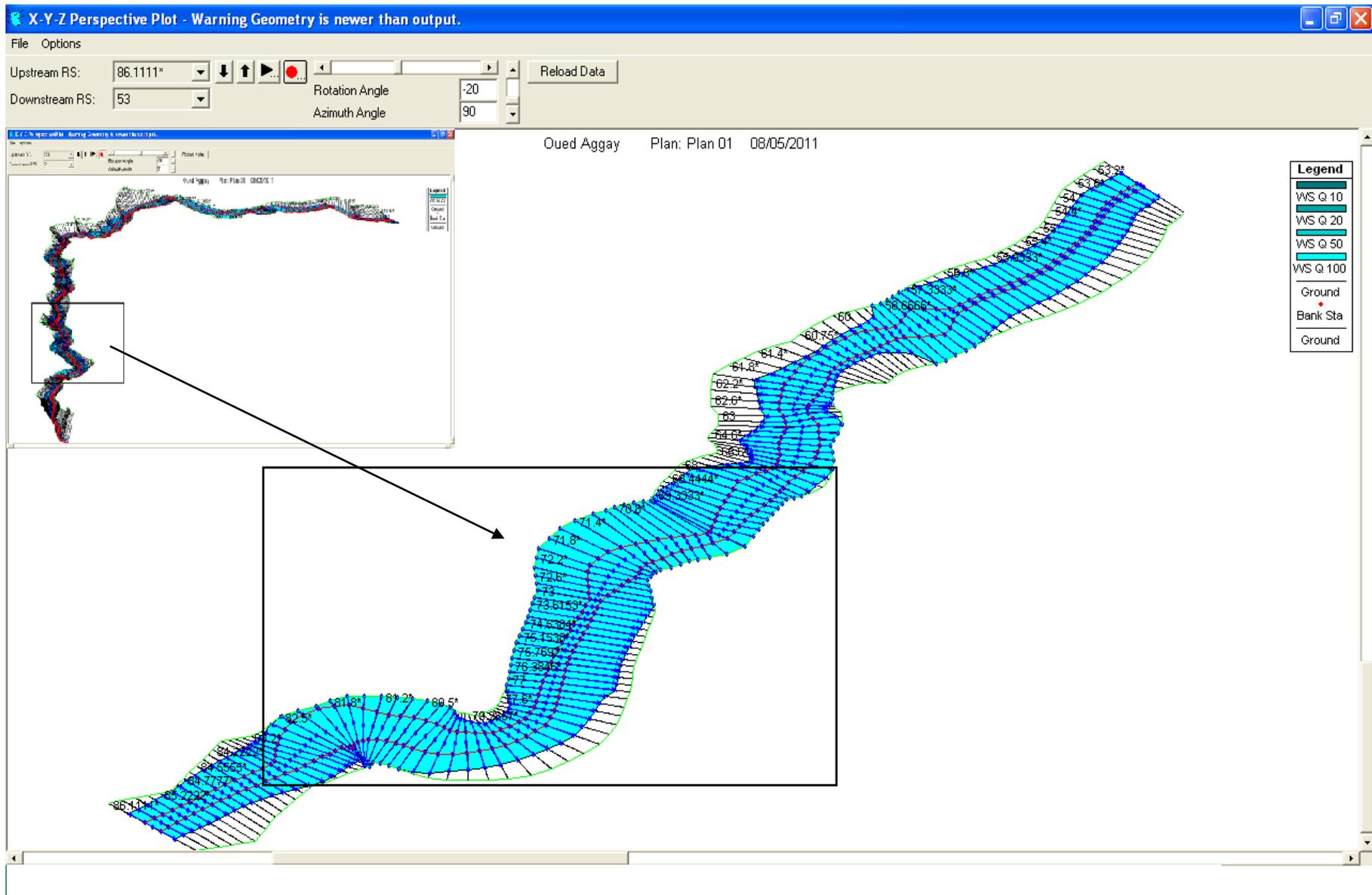


Figure 43 : la zone la plus touchée par les crues

III-1-6-3. Vitesse d'écoulement :

La figure 44 représente la variation de vitesse d'écoulement des eaux pour chaque période de retour.

On observe presque la même allure pour tous les niveaux d'eau. La vitesse augmente avec le niveau d'eau. La variation de vitesse est fonction de la topographie de terrain : en aval (à 5240 m à partir de l'exutoire), la vitesse moyennement variable et de faible valeur, devient importante (6.61 m/s) surtout le long des tronçons situés à des distances entre 4800 m, et 5200 m de l'exutoire. Ces endroits sont caractérisés par une pente assez importante. Finalement, on distingue presque une même vitesse à gauche et à droite de la rivière et qui est plus faible que la vitesse au centre.

La vitesse d'écoulement influence directement sur l'importance de l'érosion et la quantité de volume transporté par les eaux de crue ainsi que la force de pénétration des eaux dans les domaines urbains et leur destruction.

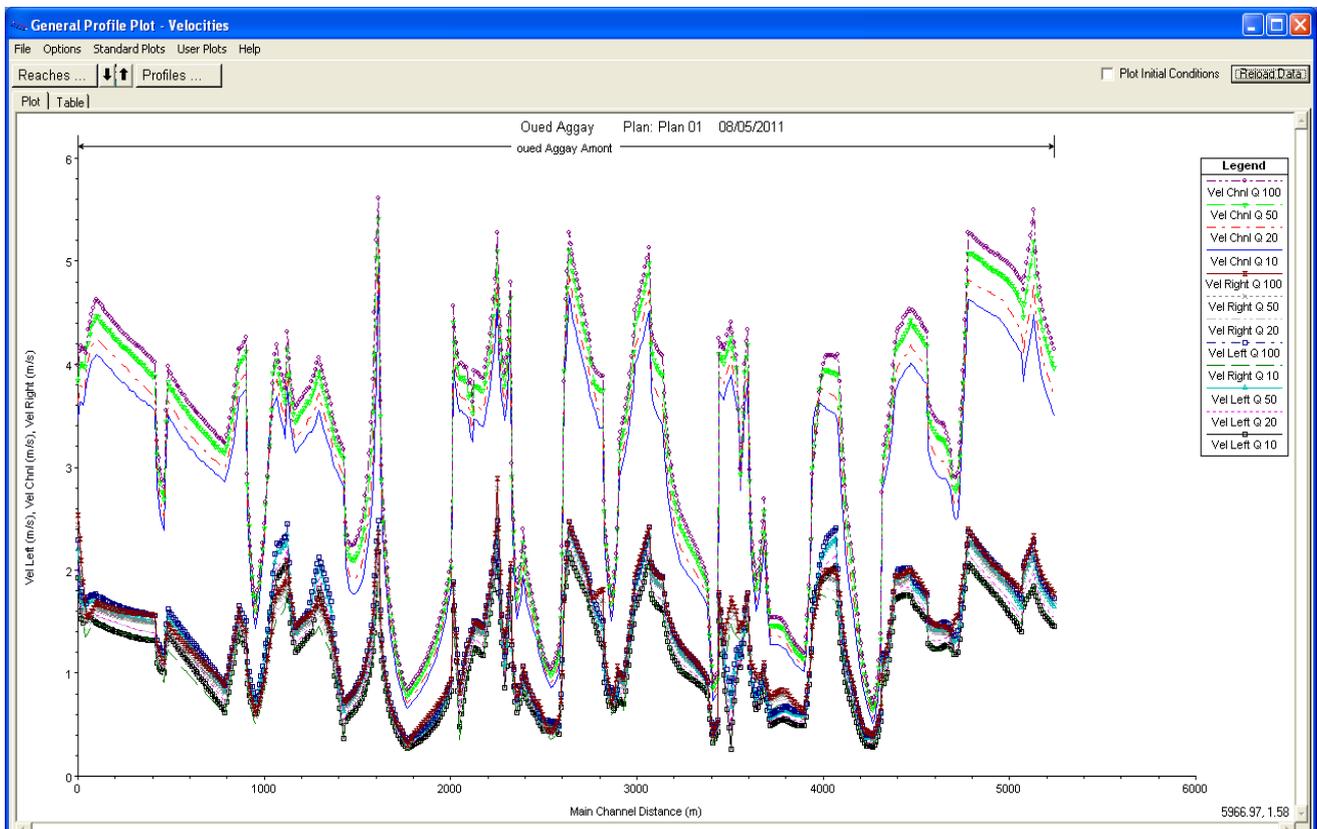


Figure 44: Variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la distance à partir de l'exutoire

III-1-6-4. Restitution de la courbe de tarage :

Le logiciel HEC-RAS a permis de fournir une représentation de la variation de la hauteur d'eau en (m) en fonction de débit m/s (fig. 45).

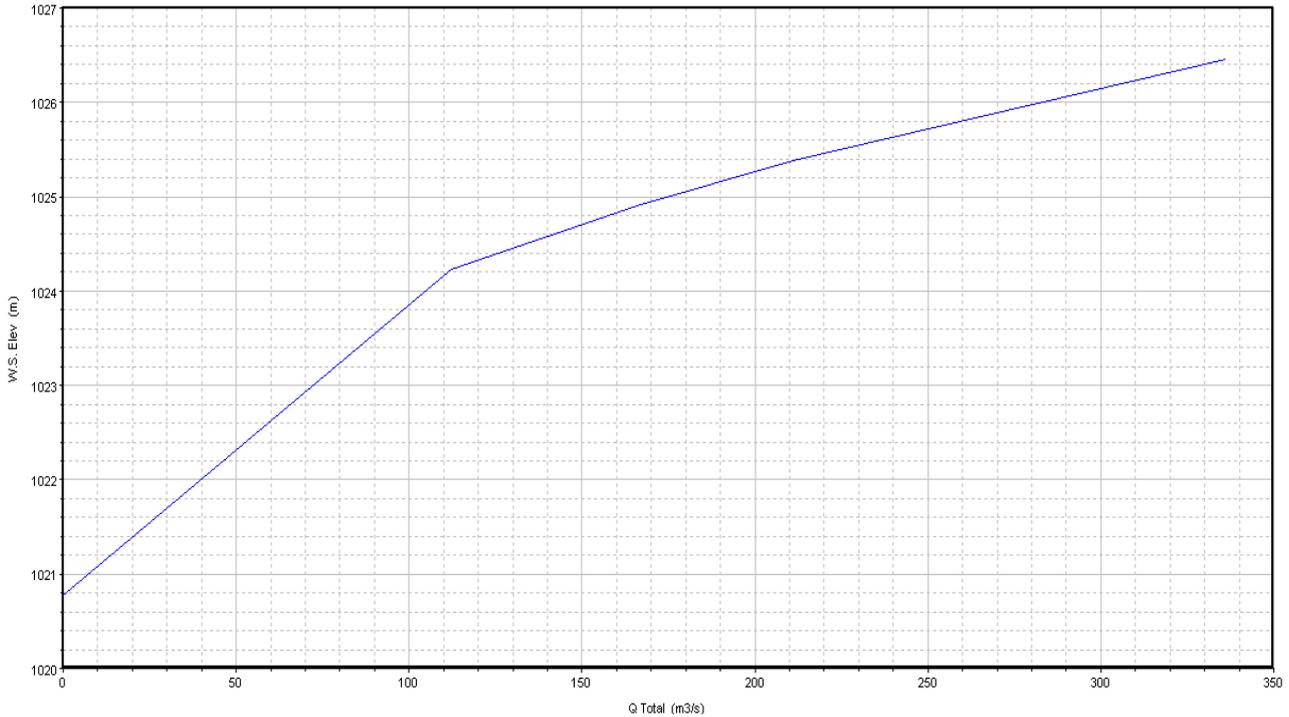


Figure 45: Courbes de tarage obtenu à partir de HEC-RAS

Le graphique (Fig. 45) représente la courbe de tarage décrivant la relation expérimentale entre les hauteurs d'eau et les débits correspondants d'un cours d'eau. La courbe reliant les points expérimentaux apparaît généralement linéaire pour les hauteurs fortes et moyennes ; en absence d'équation mathématique la représentant fidèlement, la relation est utilisée sous sa forme graphique.

Les causes d'instabilité de la relation hauteur-débit sont multiples : évolution du fond meuble, développement de la végétation aquatique, couche de glace en amont ou en aval de la section de mesure, accumulation de débris...c'est pourquoi on préfère souvent une section de contrôle artificiel (seuil en béton) à une section naturelle pour établir cette relation.

III-2. Construction du modèle de l'oued Aggay au niveau de la ville de Sefrou

III-2-1. Diagnostic de la situation actuelle de l'oued Aggay

Le diagnostic de la situation existante a permis de comprendre la problématique posée par les crues de l'oued Aggay et d'y relever un certain nombre de contraintes le long de la partie étudiée.

La partie d'oued Aggay située au niveau du périmètre urbain concerné par la présente étude s'étale sur une longueur 3.5 km (figure 46). Tenant compte de la forme de l'oued dans cette partie et de sa structure, il a été subdivisé en 3 tronçons essentiels (Fig. 46) :

Tronçons 1 : Cascades-Seuil El Ghar

Ce tronçon est d'une longueur de 880 m. Il commence au niveau de la cascade en amont de la ville de Sefrou et se termine au niveau de la prise de l'eau El Gar. La pente moyenne est de 3.5%.

D'après les visites de terrain effectuées, on remarque que :

- Les deux seuils vannés, d'une hauteur d'environ 2 m situés juste en aval des chutes sont totalement envasés ; signe d'un transport solide important.
- Les berges droites d'oued Aggay, du côté de la route menant aux cascades, sont couvertes par des murs en maçonnerie visant vraisemblablement à protéger la route contre l'effondrement des talus instables de l'oued.
- Au niveau de l'usine électrique, l'oued est canalisé, sur une longueur de 35m, par un mur de soutènement en béton, un pont portant sur une travée de 8.5.
- Deux seuils sont situés sur oued Aggay en amont du pont de la RR503.

Tronçon 2 : Seuil-El Ghar-Ouvrage AEP

Le tronçon canalisé est d'une longueur de 950m et subdivisé en 3 parties.

➤ Tronçon 2-1 : Seuil El Ghar-Ouvrage AEP

Ce premier tronçon est de longueur 350 m, l'envasement couvre les 2/3 de la largeur du canal. Il comporte deux ouvrages de franchissement (1) celui de la RR503 et (2) celui de la conduite d'eau.

➤ Tronçon 2-2 : ouvrage AEP-Pont Ghedioua

Ce deuxième tronçon se termine au niveau du Pont Ghedioua qui correspond au premier pont de l'ancien médina de Sefrou. Ce tronçon fait 160 m de long. Sa largeur diminue graduellement de l'amont vers l'aval. Cette diminution dans la largeur est compensée par une augmentation de la profondeur canalisée de l'oued. L'envasement couvre la majeure partie avec une épaisseur allant jusqu'à 0.5 m.

➤ Tronçon 2-3 : Pont Ghedioua-la sortie de l'ancienne Médina

Ce tronçon se termine à 110 m à l'aval du pont Beni Medrek qui est le dernier de l'ancienne médina de Sefrou. Ce tronçon est la partie de l'oued Aggay qui a été aménagé après la crue de 1950. Ce tronçon fait 420 m de long, sa largeur canalisée varie de 4.2 m à l'endroit le plus rétrécie, et 12 m en aval. Cette variation s'explique par la proximité du canal des habitats de l'ancienne Médina qui se trouve parfois collé aux berges du canal. Ceci empêchée de donner une section uniforme lors de la réalisation.

Tronçon 3 : Aval du pont de Beni Medrek-Fin de la partie étudiée d'Oued Aggay

Ce tronçon s'étale sur une longueur de 1730 m. Sur cette partie d'oued, la pente moyenne est de l'ordre de 2.9%. Du point de vue structurel, il peut être subdivisé en deux parties essentielles :

➤ Tronçon 3-1 : Fin du tronçon 2-3-Pont RR 504

Ce tronçon a une longueur de 330 m et une pente moyenne de 2%. La largeur du canal est variée entre 8.3 m et 20 m. La diminution en largeur est compensée par une augmentation en profondeur.

➤ Tronçon 3-2 : Pont RR504-fin de la partie étudiée d'Oued Aggay

Ce tronçon a une longueur de 1400 m et une pente moyenne de 2.9%. Le tronçon se caractérise à son début par l'existence d'une végétation dense. Au niveau de cette partie, on remarque l'affleurement de roches calcaires.

III-2-2. Calcul en régime transitoire

Pour simuler les écoulements de l'oued Aggay à l'état existant ainsi qu'à l'état projeté, on utilise le modèle HEC-RAS en régime transitoire.

Dans notre cas les études que nous avons faites étaient pour la quasi-totalité des études in stationnaires puisque l'on modélisait des crues. La résolution sous HEC se fait alors différemment. Les équations utilisées cette fois-ci sont la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement. Ces équations correspondent en fait aux équations de Saint-Venant 1D. Pour obtenir ces équations, on fait un bilan sur un petit volume de contrôle, comme sur la figure 47.

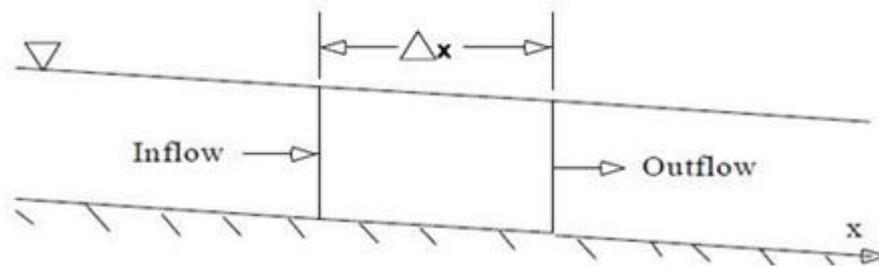


Figure 46: Volume de contrôle élémentaire pour la dérivation des équations de continuité

On obtient l'équation de conservation de la masse:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

Avec :

A_T la section, Q le débit et q_l le débit entrant latéral par unité de longueur.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement s'écrit:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + Sf\right) = 0$$

Avec :

$z, \frac{\partial z}{\partial x}$ la pente de la hauteur d'eau, Sf la pente de la ligne d'énergie (pente de frottement), A la section et V la vitesse moyenne.

Pour résoudre ces équations, le logiciel utilise la théorie des différences finies qui est à la fois pratique et simple pour ce cas 1D. Il utilise un schéma implicite qui permet d'utiliser un pas de temps beaucoup plus important que dans le cas du schéma explicite.

III-2-3. Topographie

La topographie constitue un support indispensable à la réalisation de la présente étude. C'est grâce à la topographie qu'il est possible de représenter l'architecture du cours d'eau dans le modèle.

A ce propos, des travaux topographiques ont été réalisés dans la zone de l'étude, il s'agit :

- ☒ Du profil en long du tronçon étudié de l'Oued Aggay
- ☒ Des profils en travers du tronçon étudié de l'Oued Aggay
- ☒ Des profils en travers au droit des ouvrages hydraulique situés au niveau du tronçon étudié l'oued Aggay.

Les ouvrages de franchissement ont également fait l'objet d'un levé de profils à leur amont et leur aval immédiat ainsi que d'un levé détaillé de leur structure.

En faisant le départ de la cascade vers l'aval du tronçon étudié de l'oued Aggay, on rencontre plusieurs ouvrages de franchissement.

Les ouvrages de franchissement de l'amont vers l'aval sont comme suit :

- Pont de l'usine électrique ;
- Pont de la conduite d'AEP ;
- Pont Ghdioua ;
- Pont de Mellah ;
- Pont Kobet Souk ;
- Pont Bni Medrek ;
- Pont de la RR 504 ;

III-2-2-1. Paramètres du modèle

Coefficient de frottement K (Strickler)

La modélisation du frottement des oueds s'effectue de façon classique à l'aide du coefficient de frottement K (Strickler).

On appliquera la méthode du Van te Chow pour calculer les coefficients du Strickler K biefs étudiés de l'oued Aggay.

Le coefficient de rugosité n dépend de plusieurs facteurs, il est calculé par la formule :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Avec :

n_0 : de 0.02 pour l'argile nue, à 0.028 pour les gros graviers

n_1 : de 0 pour une surface lisse, à 0.02 pour canal très érodé

n_2 : de 0 quand les variations de la dimension et de la forme de la section du canal se produisent graduellement, à 0.015 quand ces variations se produisent brusquement.

n_3 : de 0 quand l'obstruction à l'écoulement (dû au dépôt de débris et de roches) est négligeable, à 0.06 quand elle occupe un espace relativement important par rapport à la surface de la section.

n_4 : présence de végétation. De 0.005 pour des herbes souples dont la hauteur ne dépasse pas le tiers de la hauteur d'écoulement, à 0.01 pour une hauteur moyenne de l'écoulement moins que la hauteur de la végétation et une densité importante d'arbustes.

m_5 : coefficient qui dépend du ratio entre les longueurs curviligne et droite du lit de l'oued. De 1 si ce ratio est entre 1 et 1.2, à 1.3 si ce ratio dépasse 1.5.

Suite à la visite du terrain et après application de la méthode Ven Te Chow, les coefficients Strickler K adoptés dans la présente étude de l'Oued Aggay sont comme suit :

| | PK 0 au PK 930 | PK 930 au PK 1570 | PK 1570 au PK 1680 | PK 1680 au PK 2156 | PK 2156 au PK 3555 |
|-------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| n_0 | 0.02 | 0.024 | 0.025 | 0.024 | 0.02 |
| n_1 | 0.005 | 0.001 | 0.003 | 0.001 | 0.005 |
| n_2 | 0.005 | 0 | 0 | 0 | 0.005 |
| n_3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| n_4 | 0.01 | 0 | 0.005 | 0 | 0.01 |
| m_5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| n | 0.04 | 0.025 | 0.033 | 0.025 | 0.04 |
| k | 25 | 40 | 30 | 40 | 25 |

III-2-2-2. Pertes de charges :

Pour un écoulement torrentiel, les coefficients de perte de charges sont calculés par les formules suivantes :

$$\mathcal{E}_{\text{entrée}} \begin{cases} = \mathcal{E}_{\text{in}} * (1 - V_1/V_s) ; V_1 < V_s \\ = \mathcal{E}_{\text{in}} * (1 - F_0/F_s)^2 ; V_1 > V_s \end{cases}$$

$$\mathcal{E}_{\text{sortie}} \begin{cases} = \mathcal{E}_{\text{out}} * (1 - F_s/F_2)^2 ; V_s > V_2 \\ = \mathcal{E}_{\text{out}} * (1 - V_s/V_2)^2 ; V_s < V_2 \end{cases}$$

Avec :

$\mathcal{E}_{\text{entrée}}$: coefficient de perte de charge à l'amont

$\mathcal{E}_{\text{sortie}}$: coefficient de perte en charge à l'aval

F_s : air de la section à l'aval de l'ouvrage hydraulique (m^2)

V_1 : la vitesse d'écoulement à l'amont de l'ouvrage

V_2 : la vitesse d'écoulement à l'aval de l'ouvrage

V_s : la vitesse d'écoulement sous l'ouvrage

\mathcal{E}_{in} et \mathcal{E}_{out} dépendent des transitions entre la section amont de l'ouvrage hydraulique et celle de l'ouvrage hydraulique, et entre cette section et la section à son aval.

Les coefficients adoptés sont :

| | Coefficient correcteur de perte de charge à l'amont | Coefficient correcteur de perte de charge à l'aval |
|-----------------------|---|--|
| Ouvrages hydrauliques | 0.5 | 1 |

Tableau 19: Coefficient des pertes en charge adoptés pour les différents ouvrages

III-2-3. Débit de dimensionnement :

Pour la modélisation hydraulique des ouvrages existant et des ouvrages projetés au niveau de la ville de Sefrou, les débits de pointe des hydrogrammes de crue à tenir en compte sont rappelés dans le tableau suivant :

| T(ans) | T 10 | T 20 | T 50 | T 100 |
|-----------------------|------|------|------|-------|
| Q (m ³ /s) | 120 | 170 | 215 | 340 |

Tableau 20 : Débit de crue de l'oued Aggay au niveau de la ville de Sefrou

L'étude hydraulique de l'oued Aggay concerne un tronçon de 3555 m. Son amont se situe en aval immédiat de la cascade et son aval se trouve à 1400 m à l'aval du pont de la RR504.

La modélisation de l'oued Aggay a permis de prendre en considération les variations en structure et en dimension de l'oued le long de son cheminement. La modélisation a tenu compte aussi des différents ouvrages de franchissement.

III-2-4. Conditions aux limites du modèle

- ❖ Condition à l'amont du modèle

La condition amont du modèle est le tirant d'eau normal

- ❖ Condition à l'aval du modèle

La condition aval du modèle est l'écoulement critique

Les niveaux d'eau normaux sont définis en fonction de la pente de l'oued qui conditionne la nature de l'écoulement : fluviale ou torrentielle.

La pente prise dans le calcul est la pente moyenne du lit de l'oued du tronçon aval du modèle. Elle est de 15 %.

- ❖ Vérification et dimensionnement des ouvrages hydrauliques

- Ouvrages de franchissement :

Le calcul de la capacité des ouvrages peut être effectué selon les formules de Delorme lesquelles s'écrivent comme suit :

$$Q_{CR} = 1.5 * L * H^{(3/2)} \quad \text{pour les dalots}$$

$$Q_{CR} = 2.8 * R * H^{(3/2)} * 0.88 \quad \text{pour les buses}$$

Avec :

L : Ouverture du Dalot en (m)

R : Rayon de la buse en (m)

H : Hauteur sous dalles pour les Dalots ou le diamètre intérieur pour les buses en (m)

- Canaux :

La formule de Manning Strickler suivante a été utilisée pour le dimensionnement des canaux :

$$Q = K * R^{2/3} * \sqrt{I} * S$$

Avec :

Q : débit de dimensionnement en m³/s

K : Coefficient de rugosité du lit de chenal

R : Rayon hydraulique du canal en m

I : pente du tronçon du chenal en m/m

S : section mouillée

V=Q/S : vitesse moyenne

Le tableau 19 et la figure 47 présentent les résultats de calcul :

| Cote (NGM) | Q (m ³ /s) |
|------------|-----------------------|
| 753.24 | 0 |
| 753.5 | 0.36 |
| 754 | 4.16 |
| 754.5 | 13.4 |
| 755 | 28.75 |
| 755.5 | 52.56 |
| 756 | 89.14 |
| 756.5 | 140.74 |
| 757 | 209.47 |
| 757.5 | 297.37 |
| 758 | 406.05 |
| 758.5 | 537.37 |
| 759 | 693.67 |
| 759.5 | 876.72 |
| 760 | 1088.24 |
| 760.5 | 1329.88 |
| 761 | 1612.34 |
| 761.5 | 1936.49 |
| 762 | 2291.63 |
| 762.5 | 2678.47 |
| 763 | 3009.98 |
| 763.5 | 3331.51 |
| 764 | 3708.98 |

Tableau 21 : la relation hauteur -débit

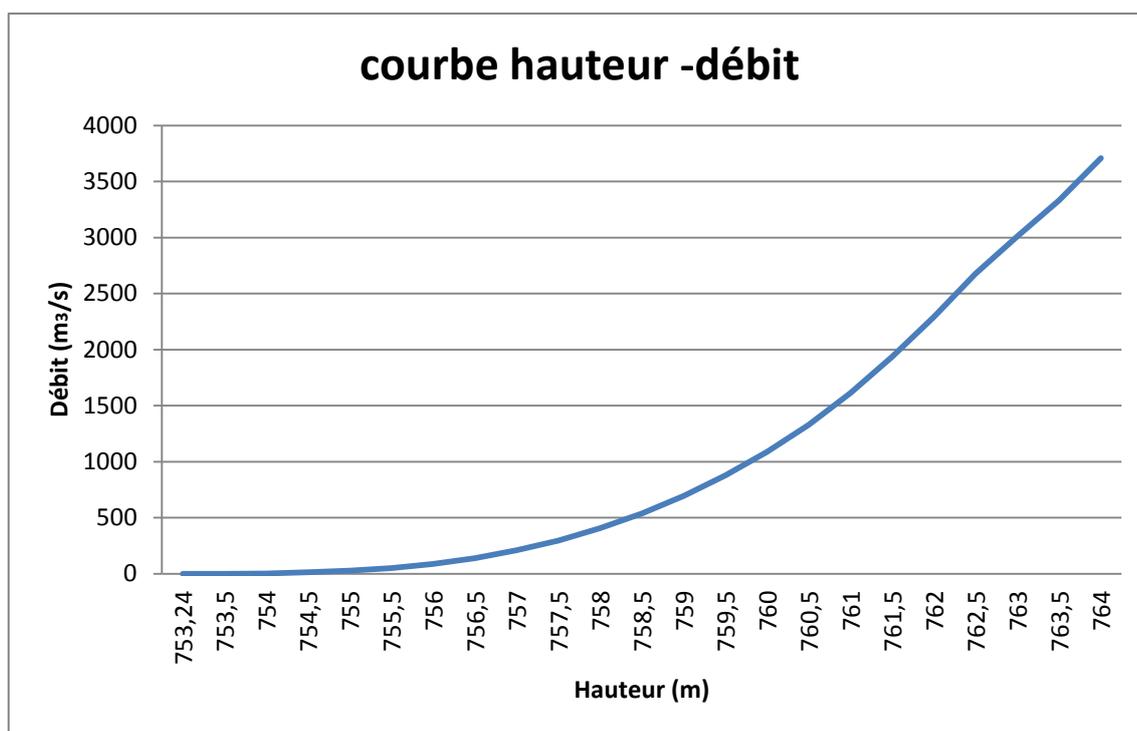


Figure 47 : courbe hauteur -débit

III-2-5. Simulation des crues de différentes périodes de retour

La simulation hydraulique du passage des crues décennales, vingtennales, cinquantennales et centennales à l'état actuel de l'oued nécessite une analyse approfondie de la topographie du terrain naturel et la nature des écoulements de l'oued Aggay dans la zone d'étude.

Les observations relevées lors des enquêtes de crues effectuées montrent que par endroit, la partie canalisée traversant la ville connaît une diminution graduelle en largeur, qui est compensée par une augmentation en profondeur.

Les figures 49 & 50 reprennent l'architecture choisie pour la modélisation de l'oued Aggay :

III-2-5-1. Résultats de la simulation de la crue décennale

Pour la crue décennale, on remarque qu'il n'y a aucun débordement de l'oued Aggay au niveau du canal traversant Sefrou. Les vitesses maximales varient entre 2.8 m/s et 15 m/s. Elle atteint ponctuellement les 25 m/s. La lame d'eau maximale a une valeur oscillant entre 0.8 m et 3.1 m. L'écoulement est partout torrentiel avec un Froude de 8.7. La revanche minimale de la partie canalisée est de 10 cm en amont du pont de l'usine électrique.

III-2-5-2. Résultats de la simulation de la crue vingtennale

La crue vingtennale (Fig. 51& 52) ne provoque pas d'inondations. Seuls quelques débordements s'observent en amont du pont de la conduite d'AEP (PK 1200). La hauteur maximale de débordement par rapport au bord supérieur de la rive droite est de 0.4m. Pour la rive gauche, il n'y a aucun débordement. Les vitesses maximales varient entre 3 m/s et 18 m/s. Elle atteint ponctuellement les 27 m/s. La lame d'eau maximale a une valeur oscillant entre 1 m et 3.7 m. L'écoulement est partout torrentiel avec un Froude maximale de 9.

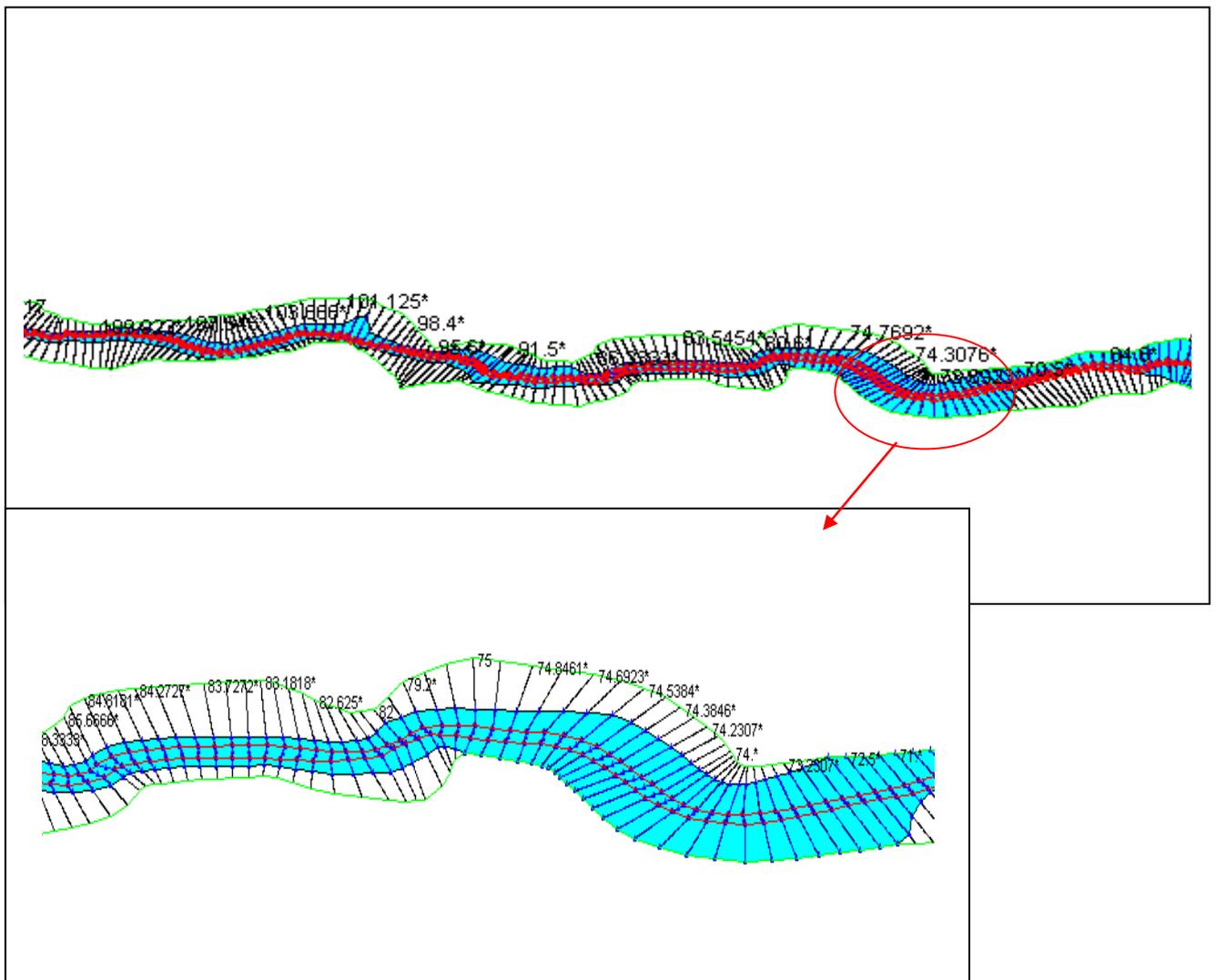


Figure 48: Vue en trois D de la crue vingtennale de la rive touchée par les inondations

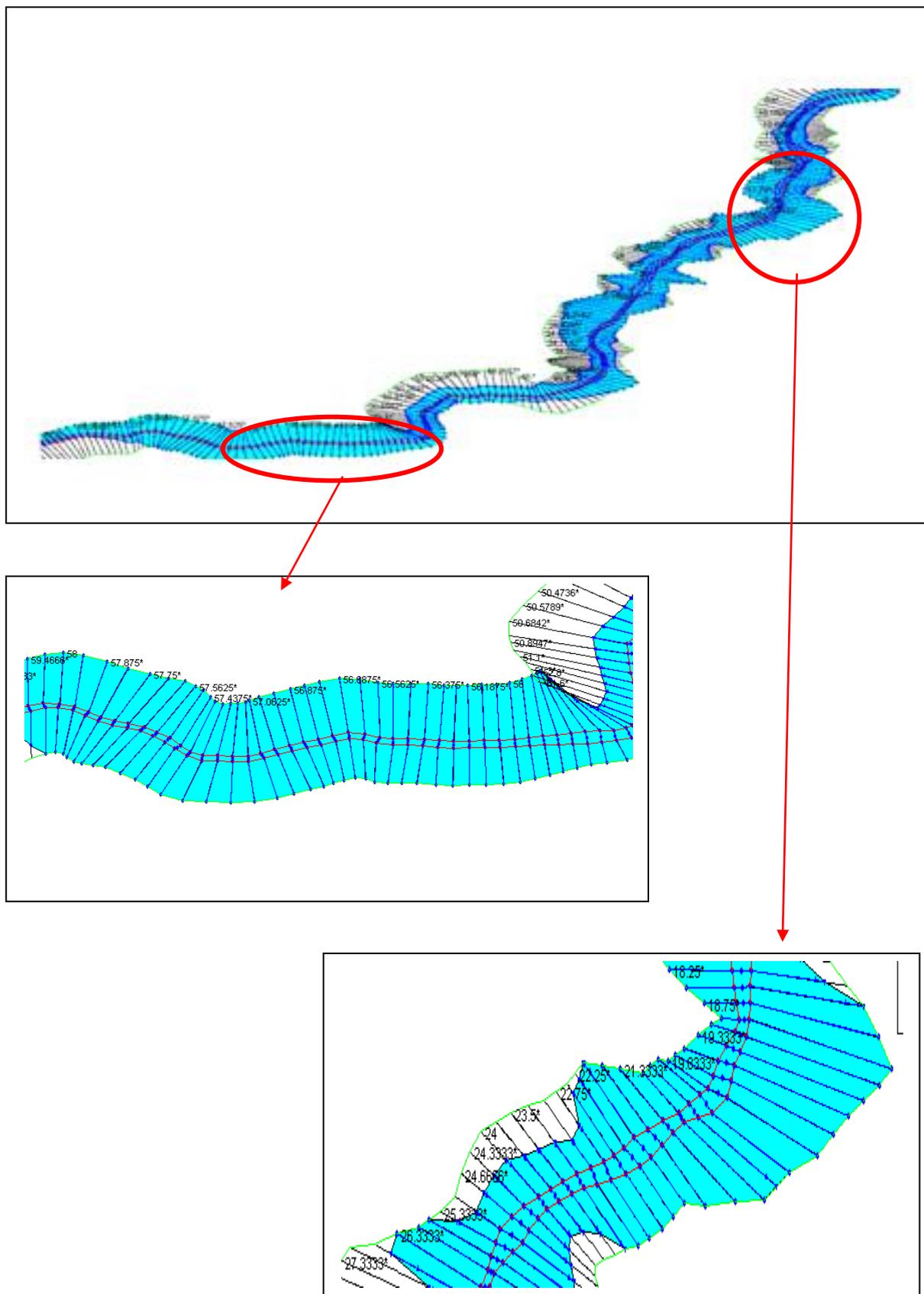


Figure 49 : Vue en trois D de la crue vingtennale de la rive touchée par les inondations

III-2-5-3. Résultats de la simulation de la crue cinquantennale :

Le passage de la crue cinquantennale (Fig. 53) engendre le débordement du canal entre le PK 940 et le PK 1000 juste en amont du pont de la RR 503. La hauteur de débordement sur ce tronçon est de 0.3 m.

Les débordements sont remarqués également entre le PK 1130 et le PK 1200. La hauteur maximale de débordement de la rive droite est de 1 m. Pour la rive gauche, il n'y a aucun débordement.

Les vitesses maximales varient entre 3.1 m/s et 19 m/s. Elle atteint ponctuellement 29 m/s. La lame d'eau maximale a une valeur oscillant entre 1.1 m et 4.4 m. L'écoulement est partout torrentiel avec un Froude maximale de 9.

Au niveau des autres tronçons, le canal transite le débit de la crue cinquantennale sans aucun débordement.

III-2-5-4. Résultats de la simulation de la crue centennale :

Le passage de la crue centennale engendre les débordements du tronçon canalisé juste en amont du pont de la RR 503. La hauteur de débordement sur ce tronçon est de 0.7 m par rapport au bord supérieur du canal.

Les débordements sont remarqués également le long de 125 m en amont du pont de la conduite AEP. La hauteur maximale de débordement par rapport au bord supérieur de la rive droite est de 2.4 m, et de 1.2 m par rapport au bord supérieur de la rive gauche.

Les vitesses maximales varient entre 3.4 m/s et 20 m/s et atteint ponctuellement 34 m/s. La lame d'eau maximale a une valeur oscillant entre 1.5 m et 6.1 m. L'écoulement est partout torrentiel avec un Froude maximale de 9.

Au niveau des autres tronçons de la partie canalisée, le canal transite le débit de la crue centennale sans aucun débordement.

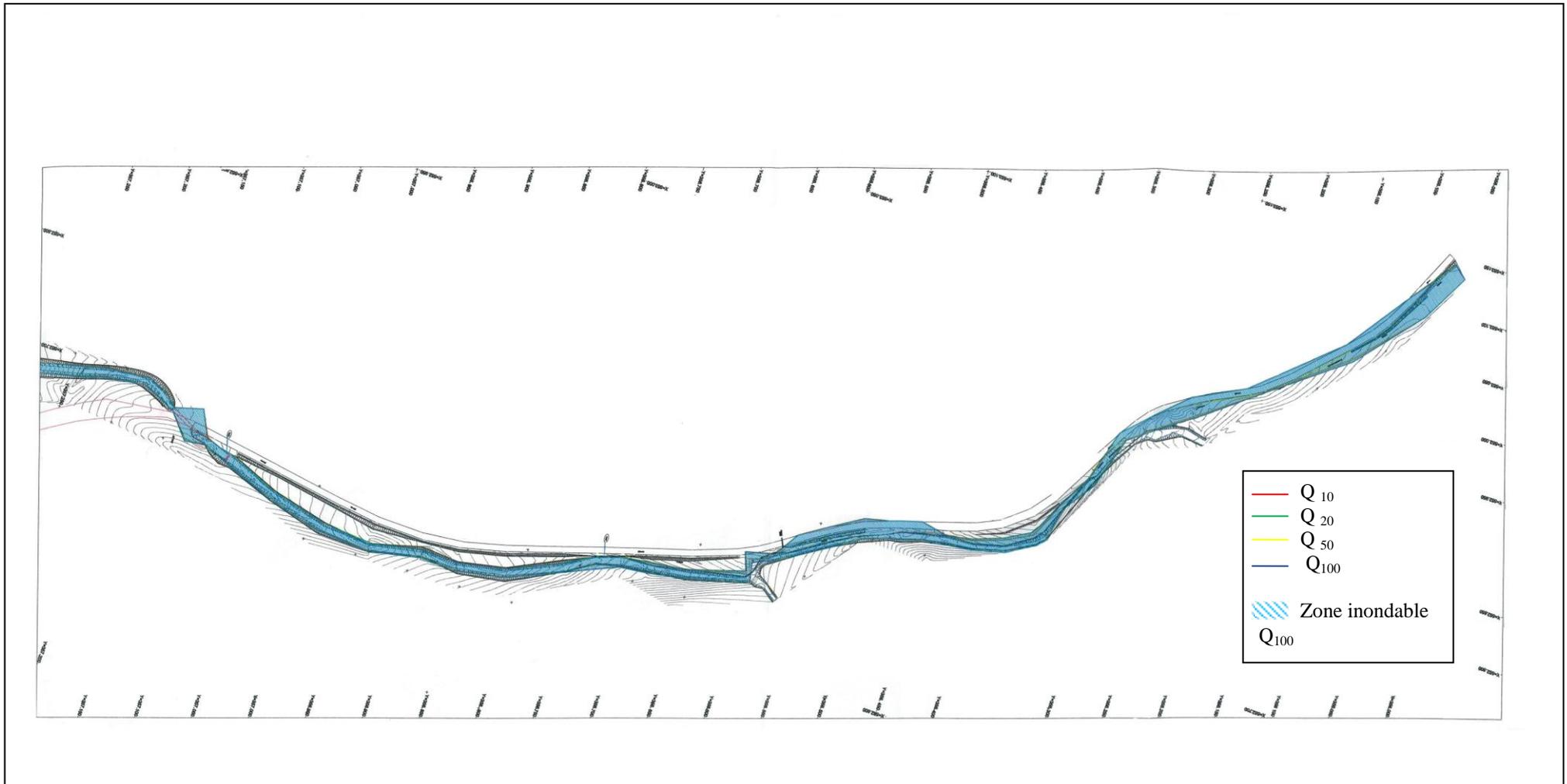


Figure 50 : les zones inondables de la crue centennale

III-1-6. Limites du logiciel HEC-RAS

L'utilisation de HEC-RAS présente des avantages et des inconvénients. En effet, lors de débordement, les volumes d'eau présents dans le lit majeur ne sont pas reportés à l'aval. Pour qu'ils le soient, il faudrait construire un chenal parallèle. Hors, dans le cas de ce bassin, l'urbanisation importante à l'aval du bassin et les conditions de débordement ne permettent pas de définir un chenal secondaire d'écoulement. Une partie du volume sera donc négligée.

En revanche, il est simple d'utilisation pour modéliser le cours d'eau à partir de profils en travers. Un autre problème se pose lors de la modélisation de la rivière. En effet, il arrive que le lit majeur soit plus bas que le haut des berges. Dans ce cas, il y a débordement quand la ligne d'eau dépasse la hauteur des berges et à ce moment, le lit majeur se remplit. Or avec HEC-RAS, la hauteur d'eau calculée prend en compte toute la section des profils même si les berges sont plus hautes que le point bas du lit majeur. La ligne d'eau coupe alors les berges. Pour régler ce problème, il existe deux solutions :

- Utilisation des levées lorsque la zone du lit majeur est plus basse que le haut des berges n'est pas importante : les levées sont recommandées et doivent être placées au point haut (Fig. 53).

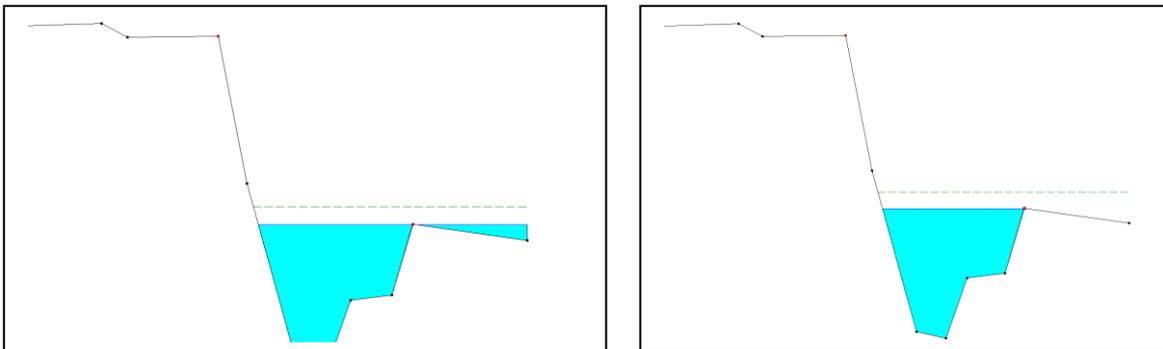


Figure 51: remplacement des levées au point haut des berges

- Création d'un chenal parallèle avec un déversoir latéral pour permettre l'écoulement entre les deux lorsque la zone située dans le lit majeur qui est plus basse que les berges, est importante. Cette solution n'a pas été appliquée dans le cas de ce bassin vu la géométrie du cours d'eau.

Chapitre IV. Définition des schémas d'aménagement et le Système de Prévision des crues

IV-1. Schéma d'aménagement

Les schémas d'aménagements projetés au niveau de l'oued Aggay ont un objectif principal : assurer une protection contre les inondations des zones de débordement.

Les ouvrages réalisés pour la protection de la ville de Sefrou contre les inondations permettent d'arrêter les crues de 70 % de la superficie globale des bassins versants qui se trouvent à l'amont de la ville de Sefrou.

IV-1-1. Situation actuelle

La simulation des crues pour les différentes périodes de retour montre le débordement de la partie canalisée de l'Oued Aggay dans le cas le plus défavorable (Crue centennale) concerne deux tronçons :

- Le premier se situe en amont du pont de la RR503 ; dont le débordement est dû à l'insuffisance de la hauteur des berges ;
- Le deuxième se situe en amont du pont de la conduite d'AEP, dont le débordement est provoqué par l'insuffisance de la hauteur des berges et en même temps par les pertes de charge au niveau dudit pont.

Au niveau de l'aval du pont de la conduite d'AEP, la canal existant permet de transiter le débit centennal sans aucun débordement, avec une revanche minimale de 0.3 m et au PK 1345 (au niveau de la piscine).

Au niveau du tronçon étudié, les vitesses de l'écoulement sont très importantes avec une valeur maximale de 34 m/s et la lame d'eau maximale a une valeur oscillant entre 1.5 m et 6.1 m (le cas de la crue centennale). L'écoulement est partout torrentiel avec un Froude maximale de 9.

IV-1-2. Situation projetée

Les ouvrages de protection contre les inondations envisagés concernent les deux tronçons :

IV-1-2-1. Tronçons 1 :

Le débordement de la rive droite ne provoque aucun danger grâce à l'existence d'un talus naturel. Ainsi, le schéma d'aménagement de ce tronçon concerne juste la rive gauche et intéresse une longueur de 145 m en amont du pont de la RR503.

Pour lutter contre le débordement du premier tronçon, une surélévation de 2 m de la rive gauche doit être réalisée, soit à l'aide des gabions, ou d'un mur en béton armé.

IV-1-2-2. Tronçon 2 :

Le débordement de la rive droite du canal est remédié par l'existence de plusieurs murs en moellons au niveau du jardin public ce qui permet d'acheminer les eaux une autre fois vers le canal. Ainsi, la fermeture du jardin pendant les moments des crues est recommandée. Le schéma d'aménagement de ce tronçon concernera juste la rive gauche et intéresse une longueur de 130 m en amont du pont de la conduite d'AEP.

Pour lutter contre le débordement du deuxième tronçon, une surélévation de la rive gauche doit être réalisée (Fig. 54). Deux variantes peuvent être envisagées de sorte à empêcher les eaux de l'oued à déborder sur la rive gauche :

- ✓ La première solution consiste à surélever la rive gauche à l'aide d'un mur en béton armé
- ✓ La deuxième solution consiste à démolir la partie instable du mur de la rive gauche et la reconstruire avec l'ajout d'une hauteur de surélévation.

IV-2. Stratégie et plan d'action

IV-2-1. Mesures de prévision et d'alerte

Sachant que les inondations vécues au niveau de la ville de Sefrou sont dues aux orages localisés au niveau du bassin versant d'oued Aggay, et l'absence d'un réseau de mesure au niveau de cette zone, la réalisation d'un modèle de prévision (modèles météorologique, hydrologique et hydraulique basés sur une transformation pluie-débit et débit-débit), présente des difficultés techniques de calage et par conséquent ce modèle peut induire des résultats biaisés. Par contre, les inondations historiques peuvent constituer une base fiable, en identifiant les intensités de pluie correspondantes à ces événements, pour définir un système

de prévision par pluie. En effet, il s'agit de caractériser les pluies enregistrées par les services de la DMN durant les périodes suivantes :

| Date de l'événement | Intensité de pluie enregistrée dans le poste le plus proche |
|---------------------|---|
| Septembre 1950 | A compléter |
| Août 1992 | A compléter |
| Septembre 1994 | A compléter |

La chaîne d'anticipation et prévision (Fig. 55) se base, essentiellement, sur la mesure de l'intensité de pluies par des capteurs, installés au niveau de ce bassin versant, et reliés à un PC au niveau de la province.

L'identification des zones inondées dans le passé au niveau de la province est reportée sur le plan d'aménagement par la municipalité.

Les interventions dépendent des enjeux qui sont situés dans les zones inondables. C'est pourquoi la priorité de l'organisation du système de prévision des inondations doit porter sur les zones sur lesquelles une inondation peut avoir une conséquence majeure pour la ville de Sefrou.

Gestion des crises :

Une fois que les acteurs opérationnels de crise entrent en action, l'objectif est tout d'abord, de leur fournir les informations pertinentes sur l'évolution de la situation. Cela concerne, la fourniture de cartes des extensions de crues (réelles et prévues) en fonction de l'évolution de celles-ci, ainsi que les prévisions météorologiques (risque météorologique, avis des prévisionnistes, observations,...).

Ces informations de première importance permettront avec d'autres informations d'ordre réglementaires ou locales (fiches réflexes, historique des crues,...) d'évaluer les actions et décisions à entreprendre : engagement et déploiement de moyens de secours, possibilités de circulation, évacuations, moyens d'hébergement et de transports...

La post-crise:

La phase de post-crise porte sur deux niveaux :

- ⌘ En phase de temps accéléré de la post-crise : aide à l'inventaire et à l'évaluation des dégâts et réparations à mener d'urgence. Cela se fait sur la base du croisement de la carte de vulnérabilité avec la carte du champ maximum atteint par la crue.
- ⌘ En post-crise après le retour au calme: capitalisation des interventions, avec développement de fonctions d'archivage pour une analyse « à froid » des événements et une formalisation du retour d'expérience vers les équipes et services impliqués dans l'action amont ou aval : déclarations de sinistre ou vérifications de conformité...

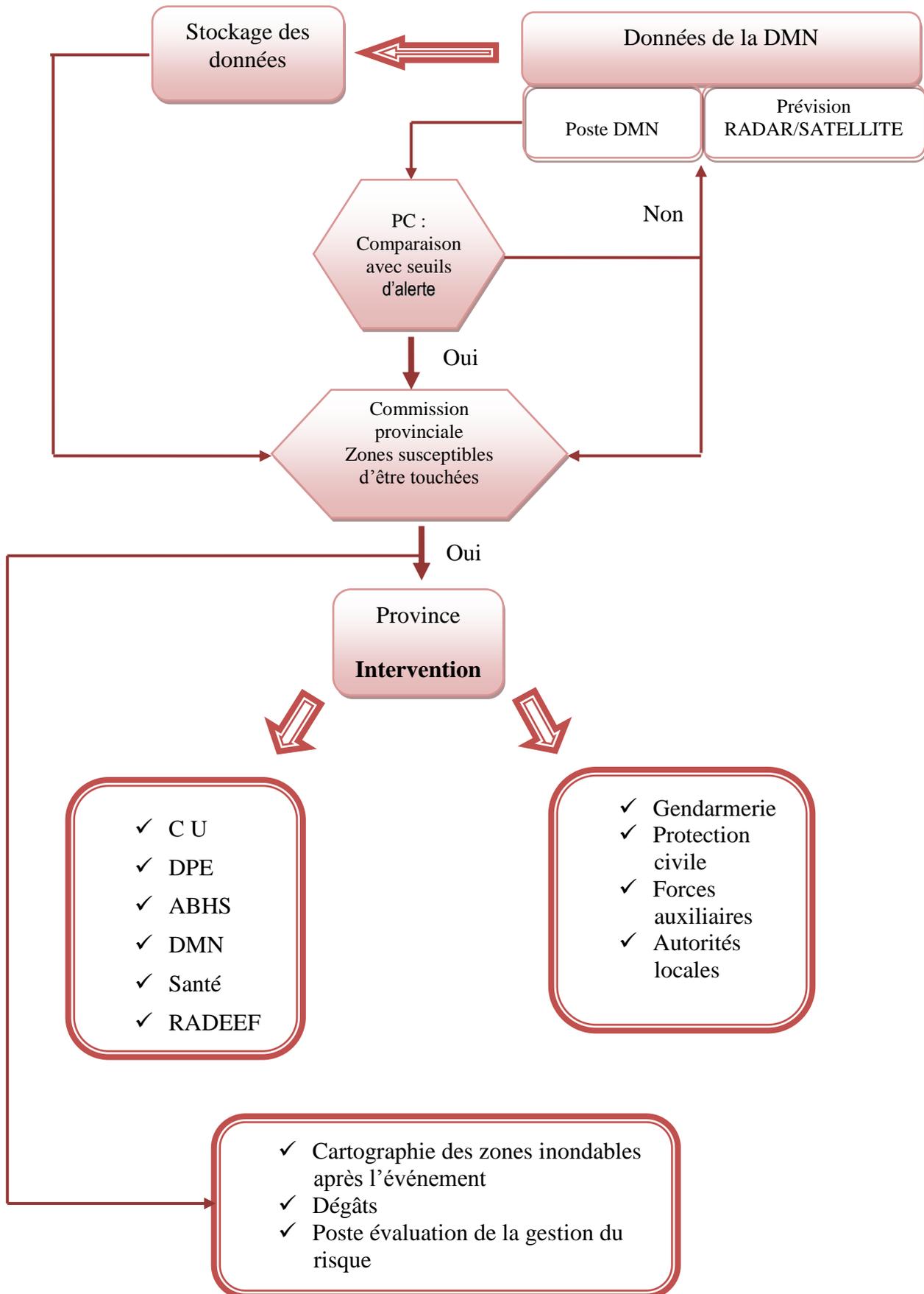


Figure 52: L'organigramme illustre l'organisation de l'activité relative au système de prévision et de l'émission des avis d'alerte.

Conclusion générale

Les inondations dans la province de Sefrou prennent un caractère beaucoup plus violent et localisé, par rapport aux grandes crues des plaines. Il est certain que la progression de l'habitat construit dans les zones inondables contribue beaucoup à l'aggravation des risques et des dommages constatés lorsque survient une crue. Cependant, malgré les drames vécus, les inondations sont rapidement oubliées par les riverains eux-mêmes que par les aménageurs au profit de la sécheresse qui frappe le pays avec des récurrences beaucoup plus rapprochées et des conséquences économiques et sociales beaucoup plus fortes.

Le diagnostic de la situation existante a permis de comprendre la problématique posée par les crues de l'oued Aggay.

Le relief relativement accidenté dans la partie amont du bassin, le drainage de nombreux affluents d'écoulements saisonniers par oued Aggay et la nature violente des averses dans cette zone engendrent des ruissellements forts en se jetant sur l'aval qui se caractérise par une population dense. Ceci impose la nécessité de sa sauvegarde et la mise en œuvre des mesures concertées et efficaces pour la protection de cette zone contre les crues.

Notre projet de fin d'étude s'articulait autour d'une étude hydraulique qui consiste à évaluer et intégrer tous les paramètres fondamentaux, tels que la géométrie, le débit, et les conditions aux limites dans le but de réaliser un modèle hydraulique pour calculer la hauteur d'eau, d'une part, et d'autre part pour déterminer les zones de débordement.

Les trois principales crues qu'a connues la ville de Sefrou (1950-1976-1994) reflètent le danger potentiel que constituent oued Aggay. Ceci incite à la prudence en ce qui concerne l'aménagement dudit oued.

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.

Références bibliographiques

ANGE MARINA ANDRIAMBANONA, *Mémoire de Fin d'Etude présente en vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur de l'école nationale de Génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg- Juillet 2009.*

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.*

AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU SEBOU, Janvier 2010 (*Etude de mise en place d'un dispositif de prévention et d'alerte aux crux pour la ville de FES*), étude hydrologique, N° 32/ 2009, Maroc

AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU SEBOU, Rapport préliminaire du projet Ec'Eau Sebou Avril 2008.

AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU SEBOU, 2004, *Etude de crues au niveau du bassin de Sebou .*

Application Guide HES, (2001): *contains a series of examples that demonstate various aspects of the HEC-RAS.*

BENABEDSSALAM T. & HAMMAR Y. (2009)-*Estimation de la réponse hydrologique d'un bassin versant urbanisé. 15p.*

BENTAYEB A. & LECLERC C. (1977). – *Ressources en eau du Maroc. Domaines atlasiques et sub-atlasique. Notes et Mémoires du Service Géologique, Maroc, Tom 3, n° 231. Pp : 66-89.*

CHAPONNIERE A. (2005) – *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versat montagneux semi aride. cas d'un bassin versant de Rehraya (Haut Atlas Marocain). These de doctorat. Institut National Agronomieque, Paris-Grignon.*

Ressources en Eau du Maroc, tome 2, chapitre •. Plaine de Meknès-Fès et couloir de Fès-Taza.

Carte géologique 1/50000, Ministère des énergies ; des Mines , de l'Eau et de l'Environnement

CHARRIERE A. (1984) : *Evolution néogène de bassins continentaux et marins dans le moyen-Atlas central(Maroc).Bull.soc.géol.fr (7) t. XXVI, n 6, p. 1127-1136.*

CHARRIERE A. (1990).-*Héritage hercynien et evolution géodynamique alpine d'une chaine intercontinental : le Moyen Atlas au SE de FES (Maroc), Thèse de Doctorat d'Etat, Toulouse, 589p.*

Choubert et Faure Muret (1960-62).- *Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoiques. In livre Mém.P.Fallot Mém.h. Sér.Soc.Géol.Fr.tl , p. 447-527.*

COLO G. (1961-1964)- *Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas Septentrional. Notes et Mémoire du Service Géologique. Maroc, n° 139, 226 p. 2 vol.*

DAH (1988) - *Barrages collinaires dans la province de Fès, barrage Aggay, Etude préliminaire.*

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

EL HALLAOUI F-Z (2010)- *Mémoire de fin d'étude : Prévion des débits max au niveau du bassin versant de l'Adour (Approche statistique et Modélisation) juin 2010.*

GOURARI L. (2001).-*Etude hydro-chimique, morphologique, litho-stratigraphique, sédimentologique et pétrographique des dépôts trévertiino-détritique actuels et Plio-quadernaires du bassin karstique de l'oued Aggay (cause de Sefrou, Maroc). Comm. Inst. Geol. e Mineiro, t, 87, pp: 115-133.*

GENTIL L. (1916),-*Sur la structure du Moyen-Atlas (Maroc central) . C. R. Acad. Sci., Paris , t. 162, pp: 659-661.*

La rivière et la ville dans le contexte Méditerranéen-Sefrou et oued Aggay-XII colloque de Sefrou 4-5 Mai 2001.

MOURJANE M. (2010)- *Modélisation hydraulique du troncon urbain de la vallée de Oued jeouna(Taza, Maroc), Mémoire de fin d'étude de Master.*

MICHARD A. (1976). *Éléments de géologie marocaine. Notes et mémoires du service géologique du Maroc N° 252, 408 p.*

Martin J (1977-81). –*Le Moyen Atlas central, étude géomorphologique. Note et Mémoire du Service Géologique. Maroc, n°258,445p.*

NAHID A. (2001) *Le quaternaire continental marocain (Tome 1) 176 p.*

Ressources en eau du Maroc-Domaine Atlasique et Sud-Atlasique (1977)- *Tome 3 (Service géologique du Maroc-Rabat, 1977).*

SAAIDI E. (1988)- *Géologie du quaternaire marocain 439 p.*

SABIR M. (2007). *Utilisations des terres et risques de ruissellement et d'érosion dans les montagnes au Maroc*

TERMIER H. (1936) – *Etude geologique sur le Maroc central et le Moyen Atlas septentrional. Notes et Mém. Serv. Géo. Maroc, N° 33, 1566p.*

USER'S Manuel HEC, (2002) : *guide de HEC RAS (detailed description of each of major modeling compents, and how to view graphical and tabular output*

Us Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center HEC GeoRAS, GIS Tools for support of HEC RAS using Arc Gis. User's manual. [PDF téléchargeable]. USACE, Version 4, Septembre 2005.

Us Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-HMS Hydrologic modeling system. Useras manuel. [PDF téléchargeable]. USACE, Version 3.0.0, Décembre

2005.http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/CPD-74A_2005Dec.pdf.

Annexe 1 : Table de Bravais Pearson

| v / α | 0.10 | 0.05 | 0.02 | v / α | 0.10 | 0.05 | 0.02 |
|--------------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.9877 | 0.9969 | 0.9995 | 16 | 0.4000 | 0.4683 | 0.5425 |
| 2 | 0.9000 | 0.9500 | 0.980 | 17 | 0.3887 | 0.4555 | 0.5285 |
| 3 | 0.8054 | 0.8783 | 0.9343 | 18 | 0.3783 | 0.4438 | 0.5155 |
| 4 | 0.7293 | 0.8114 | 0.8822 | 19 | 0.3687 | 0.4329 | 0.5034 |
| 5 | 0.6694 | 0.7545 | 0.8329 | 20 | 0.3598 | 0.4227 | 0.4921 |
| 6 | 0.6215 | 0.7067 | 0.7887 | 25 | 0.3233 | 0.3809 | 0.4451 |
| 7 | 0.5822 | 0.6664 | 0.7498 | 30 | 0.2960 | 0.3494 | 0.4093 |
| 8 | 0.5494 | 0.6319 | 0.7155 | 35 | 0.2746 | 0.3246 | 0.3810 |
| 9 | 0.5214 | 0.6021 | 0.6851 | 40 | 0.2573 | 0.3044 | 0.3578 |
| 10 | 0.4973 | 0.5750 | 0.6581 | 45 | 0.2428 | 0.2875 | 0.3384 |
| 11 | 0.4762 | 0.5529 | 0.6339 | 50 | 0.2306 | 0.2732 | 0.3218 |
| 12 | 0.4575 | 0.5324 | 0.6120 | 60 | 0.2108 | 0.2500 | 0.2948 |
| 13 | 0.4409 | 0.5139 | 0.5923 | 70 | 0.1954 | 0.2319 | 0.2737 |
| 14 | 0.4259 | 0.4973 | 0.5742 | 80 | 0.1829 | 0.2172 | 0.2565 |
| 15 | 0.4124 | 0.4821 | 0.5577 | 90 | 0.1726 | 0.2050 | 0.2422 |
| | | | | 100 | 0.1638 | 0.1946 | 0.2301 |

v: le degré de liberté. $v = n - p - 1$ avec n: le nombre d'observations,
p: le nombre de variables explicatives. α : le risque d'erreur.

Annexe 2 : Hydrogramme des crues du bassin de l'Oued Aggay

| t(h) | Q10 | Q20 | Q50 | Q100 |
|------|-------|-------|------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.3 | 1.65 | 2.4 | 3 | 4.8 |
| 0.6 | 8.25 | 12 | 15 | 24 |
| 0.9 | 17.6 | 25.6 | 32 | 51.2 |
| 1.2 | 30.8 | 44.8 | 56 | 89.6 |
| 1.5 | 47.3 | 68.8 | 86 | 137.6 |
| 1.8 | 66 | 96 | 120 | 192 |
| 2.1 | 84.7 | 123.2 | 154 | 246.4 |
| 2.4 | 97.9 | 142.4 | 178 | 284.8 |
| 2.7 | 106.7 | 155.2 | 194 | 310.4 |
| 3 | 110 | 160 | 200 | 320 |
| 3.3 | 107.8 | 156.8 | 196 | 313.6 |
| 3.6 | 101.2 | 147.2 | 184 | 294.4 |
| 3.9 | 92.4 | 134.4 | 168 | 268.8 |
| 4.2 | 82.5 | 120 | 150 | 240 |
| 4.5 | 72.6 | 105.6 | 132 | 211.2 |
| 4.8 | 61.6 | 89.6 | 112 | 179.2 |
| 5.4 | 46.2 | 67.2 | 84 | 134.4 |
| 6 | 35.2 | 51.2 | 64 | 102.4 |
| 6.6 | 26.4 | 38.4 | 48 | 76.8 |
| 7.2 | 19.8 | 28.8 | 36 | 57.6 |
| 7.8 | 14.3 | 20.8 | 26 | 41.6 |
| 8.4 | 10.78 | 15.68 | 19.6 | 31.36 |
| 9 | 8.25 | 12 | 15 | 24 |
| 10.5 | 3.96 | 5.76 | 7.2 | 11.52 |
| 12 | 1.98 | 2.88 | 3.6 | 5.76 |
| 13.5 | 0.99 | 1.44 | 1.8 | 2.88 |
| 15 | 0.44 | 0.64 | 0.8 | 1.28 |

Annexe 3 :Variable de Gumbel de chaque année et sa probabilité correspondante

| Année | P max j | rang r | n | P max j | fréquence empirique F | variable réduite u | P max estimés |
|-------|---------|--------|----|---------|-----------------------|--------------------|---------------|
| 1968 | 58.1 | 1 | 34 | 25.2 | 0.015 | -1.440 | 28.27 |
| 1969 | 45.6 | 2 | 34 | 26.9 | 0.044 | -1.138 | 31.07 |
| 1970 | 51.9 | 3 | 34 | 30 | 0.074 | -0.959 | 32.74 |
| 1971 | 64.5 | 4 | 34 | 34.9 | 0.103 | -0.821 | 34.02 |
| 1972 | 47.8 | 5 | 34 | 35.4 | 0.132 | -0.704 | 35.11 |
| 1974 | 46.7 | 6 | 34 | 36.8 | 0.162 | -0.600 | 36.08 |
| 1975 | 55.3 | 7 | 34 | 37.2 | 0.191 | -0.504 | 36.98 |
| 1976 | 51.3 | 8 | 34 | 37.8 | 0.221 | -0.413 | 37.82 |
| 1977 | 39.2 | 9 | 34 | 37.8 | 0.250 | -0.327 | 38.62 |
| 1978 | 42.1 | 10 | 34 | 38.2 | 0.279 | -0.243 | 39.40 |
| 1979 | 44.3 | 11 | 34 | 39.2 | 0.309 | -0.161 | 40.16 |
| 1980 | 44.6 | 12 | 34 | 42.1 | 0.338 | -0.081 | 40.91 |
| 1981 | 36.8 | 13 | 34 | 44.3 | 0.368 | -0.001 | 41.65 |
| 1982 | 72.8 | 14 | 34 | 44.6 | 0.397 | 0.079 | 42.40 |
| 1983 | 26.9 | 15 | 34 | 45.1 | 0.426 | 0.160 | 43.15 |
| 1984 | 30 | 16 | 34 | 45.6 | 0.456 | 0.241 | 43.90 |
| 1985 | 58.8 | 17 | 34 | 46.7 | 0.485 | 0.324 | 44.67 |
| 1986 | 51.7 | 18 | 34 | 47 | 0.515 | 0.409 | 45.46 |
| 1987 | 47.8 | 19 | 34 | 47.2 | 0.544 | 0.497 | 46.28 |
| 1988 | 47.2 | 20 | 34 | 47.6 | 0.574 | 0.587 | 47.12 |
| 1989 | 45.1 | 21 | 34 | 47.8 | 0.603 | 0.681 | 48.00 |
| 1990 | 35.4 | 22 | 34 | 47.8 | 0.632 | 0.780 | 48.91 |
| 1991 | 60.7 | 23 | 34 | 48.5 | 0.662 | 0.885 | 49.89 |
| 1992 | 34.9 | 24 | 34 | 51.3 | 0.691 | 0.996 | 50.92 |
| 1993 | 38.2 | 25 | 34 | 51.7 | 0.721 | 1.116 | 52.03 |
| 1994 | 37.2 | 26 | 34 | 51.9 | 0.750 | 1.246 | 53.25 |
| 1995 | 48.5 | 27 | 34 | 55.3 | 0.779 | 1.389 | 54.58 |
| 1996 | 47 | 28 | 34 | 58.1 | 0.809 | 1.550 | 56.08 |
| 1997 | 47.6 | 29 | 34 | 58.8 | 0.838 | 1.735 | 57.79 |
| 1998 | 37.8 | 30 | 34 | 60.7 | 0.868 | 1.952 | 59.81 |
| 1999 | 25.2 | 31 | 34 | 64.5 | 0.897 | 2.220 | 62.30 |
| 2000 | 37.8 | 32 | 34 | 64 | 0.926 | 2.572 | 65.58 |
| 2001 | 76.1 | 33 | 34 | 72.8 | 0.956 | 3.098 | 70.47 |

| | | | | | | | |
|------|----|----|----|------|-------|-------|-------|
| 2002 | 64 | 34 | 34 | 76.1 | 0.985 | 4.212 | 80.83 |
|------|----|----|----|------|-------|-------|-------|

Annexe 4: Caractéristiques générales liées à chaque période de retour (10, 20, 50,100)

| Plan: Plan 02 | | oued Aggay Amont RS: 99 Profile: Q 10 | | | |
|--------------------|----------|---------------------------------------|---------|---------|----------|
| E.G. Elev (m) | 1024.59 | Element | Left OB | Channel | Right OB |
| Vel Head (m) | 0.35 | Wt. n-Val. | 0.050 | 0.033 | 0.050 |
| W.S. Elev (m) | 1024.23 | Reach Len. (m) | 9.16 | 9.97 | 11.78 |
| Crit W.S. (m) | | Flow Area (m2) | 12.40 | 23.37 | 17.62 |
| E.G. Slope (m/m) | 0.002151 | Area (m2) | 12.40 | 23.37 | 17.62 |
| Q Total (m3/s) | 112.24 | Flow (m3/s) | 15.94 | 73.07 | 23.23 |
| Top Width (m) | 23.78 | Top Width (m) | 6.91 | 7.00 | 9.87 |
| Vel Total (m/s) | 2.10 | Avg. Vel. (m/s) | 1.29 | 3.13 | 1.32 |
| Max Chl Dpth (m) | 3.45 | Hydr. Depth (m) | 1.80 | 3.34 | 1.78 |
| Conv. Total (m3/s) | 2420.3 | Conv. (m3/s) | 343.7 | 1575.5 | 501.0 |
| Length Wtd. (m) | 10.23 | Wetted Per. (m) | 7.60 | 7.04 | 10.39 |
| Min Ch El (m) | 1020.78 | Shear (N/m2) | 34.40 | 69.98 | 35.76 |
| Alpha | 1.57 | Stream Power (N/m s) | 44.21 | 218.78 | 47.17 |
| Frctn Loss (m) | 0.02 | Cum Volume (1000 m3) | 95.25 | 218.23 | 76.49 |
| C & E Loss (m) | 0.00 | Cum SA (1000 m2) | 80.65 | 127.88 | 69.44 |

| Plan: Plan 02 | | oued Aggay Amont RS: 99 Profile: Q 20 | | | |
|--------------------|----------|---------------------------------------|---------|---------|----------|
| E.G. Elev (m) | 1025.36 | Element | Left OB | Channel | Right OB |
| Vel Head (m) | 0.46 | Wt. n-Val. | 0.050 | 0.033 | 0.050 |
| W.S. Elev (m) | 1024.90 | Reach Len. (m) | 9.16 | 9.97 | 11.78 |
| Crit W.S. (m) | | Flow Area (m2) | 17.32 | 28.04 | 24.70 |
| E.G. Slope (m/m) | 0.002272 | Area (m2) | 17.32 | 28.04 | 24.70 |
| Q Total (m3/s) | 165.91 | Flow (m3/s) | 26.05 | 101.75 | 38.11 |
| Top Width (m) | 26.17 | Top Width (m) | 7.83 | 7.00 | 11.34 |
| Vel Total (m/s) | 2.37 | Avg. Vel. (m/s) | 1.50 | 3.63 | 1.54 |
| Max Chl Dpth (m) | 4.12 | Hydr. Depth (m) | 2.21 | 4.01 | 2.18 |
| Conv. Total (m3/s) | 3480.4 | Conv. (m3/s) | 546.4 | 2134.5 | 799.4 |
| Length Wtd. (m) | 10.26 | Wetted Per. (m) | 8.75 | 7.04 | 12.00 |
| Min Ch El (m) | 1020.78 | Shear (N/m2) | 44.14 | 88.72 | 45.87 |
| Alpha | 1.60 | Stream Power (N/m s) | 66.37 | 321.93 | 70.78 |
| Frctn Loss (m) | 0.02 | Cum Volume (1000 m3) | 131.25 | 264.80 | 105.99 |
| C & E Loss (m) | 0.00 | Cum SA (1000 m2) | 92.49 | 127.90 | 80.77 |

| Plan: Plan 02 oued Aggay Amont RS: 99 Profile: Q 50 | | | | | |
|---|----------|---------|----------|--|--|
| Element | Left OB | Channel | Right OB | | |
| E.G. Elev (m) | 1025.91 | | | | |
| Vel Head (m) | 0.53 | | | | |
| W.S. Elev (m) | 1025.38 | | | | |
| Crit W.S. (m) | | | | | |
| E.G. Slope (m/m) | 0.002338 | | | | |
| Q Total (m3/s) | 211.04 | | | | |
| Top Width (m) | 27.77 | | | | |
| Vel Total (m/s) | 2.54 | | | | |
| Max Chl Dpth (m) | 4.60 | | | | |
| Conv. Total (m3/s) | 4364.6 | | | | |
| Length Wtd. (m) | 10.28 | | | | |
| Min Ch EI (m) | 1020.78 | | | | |
| Alpha | 1.62 | | | | |
| Frctn Loss (m) | 0.02 | | | | |
| C & E Loss (m) | 0.00 | | | | |
| Element | | | | | |
| Wt. n-Val. | 0.050 | 0.033 | 0.050 | | |
| Reach Len. (m) | 9.16 | 9.97 | 11.78 | | |
| Flow Area (m2) | 21.23 | 31.39 | 30.36 | | |
| Area (m2) | 21.23 | 31.39 | 30.36 | | |
| Flow (m3/s) | 35.00 | 124.58 | 51.47 | | |
| Top Width (m) | 8.46 | 7.00 | 12.31 | | |
| Avg. Vel. (m/s) | 1.65 | 3.97 | 1.69 | | |
| Hydr. Depth (m) | 2.51 | 4.48 | 2.47 | | |
| Conv. (m3/s) | 723.8 | 2576.4 | 1064.4 | | |
| Wetted Per. (m) | 9.53 | 7.04 | 13.09 | | |
| Shear (N/m2) | 51.04 | 102.19 | 53.20 | | |
| Stream Power (N/m s) | 84.16 | 405.50 | 90.18 | | |
| Cum Volume (1000 m3) | 160.33 | 298.93 | 129.99 | | |
| Cum SA (1000 m2) | 100.29 | 127.90 | 88.24 | | |

| Plan: Plan 02 oued Aggay Amont RS: 99 Profile: Q 100 | | | | | |
|--|----------|---------|----------|--|--|
| Element | Left OB | Channel | Right OB | | |
| E.G. Elev (m) | 1027.18 | | | | |
| Vel Head (m) | 0.71 | | | | |
| W.S. Elev (m) | 1026.46 | | | | |
| Crit W.S. (m) | | | | | |
| E.G. Slope (m/m) | 0.002483 | | | | |
| Q Total (m3/s) | 336.20 | | | | |
| Top Width (m) | 31.07 | | | | |
| Vel Total (m/s) | 2.93 | | | | |
| Max Chl Dpth (m) | 5.68 | | | | |
| Conv. Total (m3/s) | 6747.3 | | | | |
| Length Wtd. (m) | 10.31 | | | | |
| Min Ch EI (m) | 1020.78 | | | | |
| Alpha | 1.64 | | | | |
| Frctn Loss (m) | 0.03 | | | | |
| C & E Loss (m) | 0.00 | | | | |
| Element | | | | | |
| Wt. n-Val. | 0.050 | 0.033 | 0.050 | | |
| Reach Len. (m) | 9.16 | 9.97 | 11.78 | | |
| Flow Area (m2) | 31.11 | 38.96 | 44.77 | | |
| Area (m2) | 31.11 | 38.96 | 44.77 | | |
| Flow (m3/s) | 61.04 | 183.99 | 91.17 | | |
| Top Width (m) | 9.80 | 7.00 | 14.27 | | |
| Avg. Vel. (m/s) | 1.96 | 4.72 | 2.04 | | |
| Hydr. Depth (m) | 3.17 | 5.57 | 3.14 | | |
| Conv. (m3/s) | 1225.1 | 3692.5 | 1829.7 | | |
| Wetted Per. (m) | 11.26 | 7.04 | 15.33 | | |
| Shear (N/m2) | 67.28 | 134.67 | 71.12 | | |
| Stream Power (N/m s) | 132.03 | 635.99 | 144.84 | | |
| Cum Volume (1000 m3) | 236.08 | 378.65 | 193.13 | | |
| Cum SA (1000 m2) | 116.27 | 127.90 | 103.24 | | |

Annexe 5 : Album photos