

Département Irrigation et Drainage

## MEMOIRE DE MASTER

*Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique*

**OPTION : Irrigation et Drainage agricole**

**THEME :**

Modélisation du transport solide à l'échelle de la crue en utilisant le logiciel (HECRAS-HECHMS) (cas d'oued Abiod)

**Présenté par :**

M<sup>r</sup> : DERGHAL ZAKARYA

### **DEVANT LES MEMBRES DU JURY**

Nom et Prénom	Grade	Qualité
M <sup>r</sup> MEDDI Mohamed	Professeur	Président
M <sup>me</sup> AZIEZ Wahiba	M.A.A	Examinatrice
M <sup>r</sup> YAHIAOUI Samir	M.A.A	Examineur
M <sup>r</sup> BOUZIANE Omar	M.A.A	Examineur
M <sup>r</sup> BENKACI Tarik	M.C. B	Promoteur
Mr BERGHOUT Ali	M.A. A	Invité

MAI 2016

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*Avant tout à mes chers parents, pour leur soutien immense qu'ils n'ont cessé de m'apporter ainsi que les conseils qu'ils m'ont prodigué sans les quels j'avoue je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui.*

*A mes frères : WASSIM le petit RAMEZI, et Ma  
sœur KHOULOUD*

*A toute la famille DERGHAL*

*Mon promoteur Mr BENKACI Tarik*

*ET CO-promoteur Mr BERGHOUT Ali*

*A tous mes amis sans exception.*

## REMERCIEMENTS

*Avant tout, je remercie le bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a donné la force, ainsi que la bonne volonté pour achever le cursus universitaire et ce modeste travail.*

*Au terme de cette étude qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui m'ont apporté leur aide.*

*Je tiens à remercier chaleureusement, Mon Co-promoteur Mer : BARGHOUI ALI qui 'a bien voulu m'encadrer durant ce mémoire, et qui a assuré la direction et l'orientation scientifique de ce travail.*

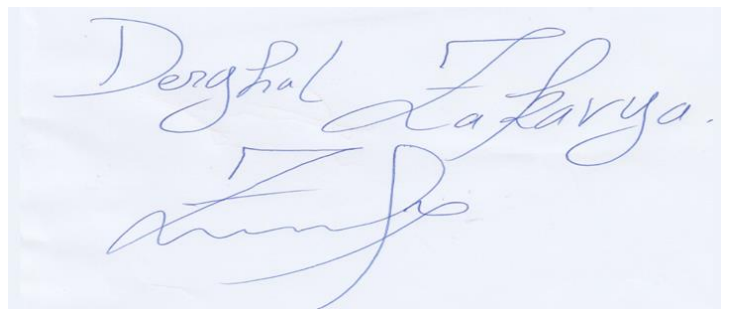
*Et grand merci Mon promoteur Mer : BENKACI TARIK,*

*Je lui exprime mes vifs remerciements Monsieur Madame W. AZIZ, Monsieur M. MEDDI, S. YAHIAOUI, O. BOUZIANE, A. AMARI pour leurs conseils ainsi que pour leurs disponibilités à chaque fois que je les sollicite.*

*Je profite de l'occasion pour remercier tous mes enseignants de l'ENSH de la première année jusqu'à maintenant.*

*Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon travail.*

*Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner mon travail.*



*Dergbal Zaryo.*

### ملخص

الدراسة الهيدرولوجية لانجراف التربة وتنقل الرواسب في حوض المياه لواد العبيد جاء لغرض تحسين فهم هذه الظاهرة وتقديرها

حوض المياه لواد العبيد يتربع على مساحة قدرها 1314 كم<sup>2</sup> بحيث ان معظمه يقع في بيئة شبه جافة

بعد تحديد جميع المواصفات الجيومورفولوجية، الجيولوجية، الهيدرولوجية والمناخية للأحواض الفرعية، قمنا بعمل محاكاة لكمية لتدفق الماء والرواسب في الأحواض الفرعية.

باستعمال معطيات الأمطار لمحطات التي تضمن معطيات الامطار اليومية العليا والمحطة الهيدرومترية التي تضمن التدفق الملاحظ، وإدخالها في النموذج الهيدرولوجي العالمي سمح لنا بحساب مختلف من الرواسب بعد ملاحظة والتحقق الكميات من صحة النموذج

### Résumé

L'étude hydrologique de l'érosion et du transport solide menée sur le bassin versant de l'oued Labiod dans le cadre de ce mémoire a pour le but de l'amélioration de la compréhension du phénomène et son estimation.

Le bassin versant d'Oued Laboid couvre une superficie de 1314 km<sup>2</sup> et presque sa totalité se situe dans un milieu semi-aride. Après la détermination de l'ensemble des paramètres géomorphologiques, géologiques, hydrologiques et climatiques des sous bassins versants formant le bassin, nous avons passé à la simulation quantitative des débits liquides et des débits solides au niveau de ces sous bassins.

En utilisant les données des stations pluviométriques les plus et celles de la station hydrométrique (Mechounche) nous avons pu calculer les différents hydrogrammes de crue correspondant à un événement spécifique, et leurs volumes des sédiments après avoir calé et validé le modèle.

### Abstract

The hydrological study of erosion and sediment transport carried on the watershed of OuedLabiod, for improving the understanding of the phenomenon and its estimate.

The watershed of OuedLaboid covers an area of 1,300 km<sup>2</sup> and almost its totality is located in a semi- arid environment. After determining all parameters geomorphological, geological, hydrological and climatic of sub watershed forming the basin, we passed to the quantitative simulation of liquid flow rates and sediment loads in these sub-basins.

Using the data of precipitation stations(Ichmoul ,Tkout et Tefefele,) whichguaranteed given the maximum daily rainfall and hydrometric station ( Mechounche )ensuring the observed flow, to insert in the universal hydrological model was used to calculate the various flood hydrograph for a specific event, and sediment after stalling and validated the model .

# Table des matières

---

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
------------------------------------	---

## **CHAPITRE I : Généralités Sur L'érosion, Le Transport Solide**

I.1. Introduction :.....	3
I.2. Erosion hydrique :.....	3
I. 2.1. Définition :.....	3
I. 2.2. Les principaux agents de l'érosion hydrique :.....	3
I. 2.2.1. Intensité et agressivité des précipitations :.....	3
I.2.2.2. Le ruissellement.....	4
I. 2.3 Facteurs Influençant L'érosion Hydrique.....	4
I. 2.3.1. La lithologie la texture du sol :.....	4
I. 2.3.2. Le couvert végétal :.....	4
I. 2.3.3. Les facteurs climatiques :.....	5
I. 2.3.4. Les facteurs topographiques (Pente) :.....	5
I. 2.4. Les formes d'érosion.....	5
I. 2.4.1. Erosion en nappe, érosion laminaire ou érosion aréolaire (Sheet erosion).....	5
I. 2.4.2. Erosion linéaire.....	6
I.2.5. Mécanismes provoquant l'érosion :.....	6
I. 2.6. Quantification de l'érosion spécifique :.....	7
I. 2.6.1. Formule de Tixeront (1960) :.....	7
I. 2.6.2. Formule Sogreah :.....	7
I. 2.6.3. Formule de Fournier (1960) :.....	8
I. 2.6.4. Formules de Touaibia :.....	8

## Table des matières

---

I.2.6.5. Équation universelle des pertes en sols de Wischmeier (1978) : .....	9
I.3. Le Transport solide .....	13
I.3.1. Généralités .....	13
I.3.2. Définition .....	13
I.3.3. Les différents aspects du transport solide .....	13
I.3.3.1. La charge en suspension .....	14
I.3.3.2. La charge de fond .....	14
I.3.4. Le transport solide de fond ou Charriage.....	14
I.3.4.1. Généralités .....	14
I.3.4.2. Le charriage (cours d'eau naturels) .....	15
I.3.5. Le transport solide en suspension .....	15
I.3.5.1. Généralités .....	15
I.3.5.2. Mesures du transport solide en suspension.....	16
I.3.5.3. Procédé de mesure des matériaux en suspension .....	16
I.4 Conclusion .....	17

## Chapitre II : Modélisation des transports solides

II.1. Introduction .....	18
II.2. Définition des modèles : .....	18
II.2. Classification des modèles : .....	18
II.2.1 Selon la loi mathématique .....	18
II.2.2 Selon la discrétisation spatiale :.....	19
II.2.3 Modélisation Hydrologique avec le logiciel HEC-HMS.....	19
II.2.3.1 Modélisation de l'infiltration .....	19

## Table des matières

---

II.2.3.1.5. Modélisation du ruissellement direct .....	20
II.2.3.2. Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS .....	22
II. 2.3.3. Modèle de Muskingum : .....	23
II.3. Modèle choisi dans l'estimation de l'érosion : .....	23
II.3.1 L'équation Universelle des pertes en terre modifiée : MUSLE .....	23
II.3.1.2 Evolution des débits solides en fonction des débits liquides. ....	24
II.3.2. Le modèle HEC-HMS sous ARCGIS : .....	24
II.3.2.1. La description du logiciel ARCGIS .....	24
II.3.2.1.1. Fonctionnalités du logiciel ArcGIS .....	25
II.3.2.1.2. Les apports du logiciel ARCGIS dans notre étude.....	25
II.3.3. Description du modèle HEC-HMS .....	26
II.3.3.1. Mentionner que les points forts résumés comme suit : .....	26
II.3.3.2. Le module structural du bassin.....	27
II.3.3.3. Simulation hydrologique par le logiciel HEC-HMS .....	27
II.3.3.4. Etapes d'une simulation avec HEC-HMS .....	28
II.3.4. Le modèle HEC-RAS sous ARCGIS : .....	28
II.3.4.1. Présentation : .....	28
II.3.4.2. Description du modèle.....	29
II.3.4.3. Fonctionnement de HEC-RAS : .....	29
II.3.4.4. Géométrie du cours d'eau simulé : .....	29
II.3.4.5. Débits, conditions aux limites et de calcul .....	30
II.3.4.6. Visualisation des Résultats.....	30
II.3.4.7. Objectif du logiciel : .....	30

## **Chapitre III : Présentation du milieu d'étude : le bassin versant de l'oued Labiod**

III.1. Introduction : <sup>2</sup> .....	31
III.2. Situation géographique du B.V d'oued LABIOD.....	31
III.3. Couvert végétal .....	33
III.4- Cadre géologique .....	33
III.4.1- Stratigraphie : .....	34
III.5. Morphométrie du bassin versant : .....	35
III.5.1. Caractéristiques des altitudes (le relief) .....	35
III.5.2. Courbe hypsométrique .....	36
III.5.3. Les indices de pente : .....	38
III.5.3.1. Indice de pente de Roche (IP) : .....	38
III.5.3.2. L'indice de pente globale (Ig) : .....	38
III.5.3.3. L'indice de pente moyenne (Im) : .....	38
III.5.3.4. La dénivelée spécifique : .....	38
III.6. Etude des précipitations .....	41
III.6.1 Précipitations moyennes annuelles : .....	42
III .6. 2. Précipitations moyennes mensuelles : .....	42
III.6.3. Ajustement des précipitations moyennes annuelles à la loi Log-normale .....	42
III.7.4. Ajustement des précipitations maximales journalières à la loi de Gumbel.....	44
III.7. Etude des apports solides : .....	45
III.7.1 Estimation du transport solide de la zone d'étude .....	45
III.8. Conclusion : .....	47



# Table des matières

---

## Chapitre IV : application du modèle (hydrologique et hydraulique)

### PARTIE -A- La modélisation du bassin du Labiod avec HEC-HMS

IV. Les données d'entrée du modèle .....	48
IV.1. Le modèle numérique du terrain .....	48
IV.1 .2. Fonctionnalités.....	50
IV.1 .3. Modélisation du comportement hydrologique d'un bassin versant.....	51
IV .1.4. Banque de données nécessaire à l'application de simulation avec HEC-HMS .....	52
IV.1.4.1. Données de base .....	52
IV.1.4.2. Données des sous-bassins versants.....	54
IV.1.4.3. Données météorologiques .....	55
IV.2. Les données de spécifications de contrôle.....	55
IV.2.1. Calcul de l'infiltration.....	56
IV.2.2. Ruissellement.....	56
IV .3 . Résultats de la simulation.....	56
IV .3 .1. Résultats des sous bassins.....	56
IV .3.2. Choix de crue .....	57
IV .3.2.1. Résultat des simulations (trois crues) .....	57
IV .3.3. Les graphes du sédiment .....	61
IV .3 .4. Calibration et validation du modèle.....	62
V .3.5. CONCLUSION .....	62

### PARTIE -B- . APPLICATION DU MODELE HYDROLOGUE HEC-RAS

V.1. INTRODUCTION .....	63
IV.2. FONCTIONNEMENT DE HEC-RAS .....	63
IV.3. APPLICATION HEC-RAS SUR OUED .....	64
IV.3.1. Banque de données nécessaires à l'application du modèle HECRAS.....	64
IV.3.2. Les données géométriques .....	64
IV.3.3. Les données de l'écoulement et les conditions aux limites .....	65

## Table des matières

---

IV.3.4. Données d'écoulement (débits liquides).....	65
IV.3.5. Données d'écoulement (débits solides) .....	65
IV.4. Étalonage du model .....	66
IV.2.Les données de spécifications de contrôle.....	20
IV.4.2. Calibrage du modèle hydraulique.....	66
IV.4.3. Calibrage de modèle de sédiments.....	66
IV.5.1. Analyse de la simulation .....	66
IV.5.2. Résultats simulés pour l'Oued Labiod .....	71
IV.6. Conclusion .....	71
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>72</b>

## Liste des tableaux

---

Tableau I- 1: coefficient $\alpha$ en fonction de la perméabilité .....	8
Tableau I- 2: Valeurs usuelles du paramètre K .....	11
Tableau I- 4 : Quelques valeurs du paramètre C .....	12
Tableau III. 1: La classification de l'ORSTOM .....	38
Tableau III. 2: récapitulatif des caractéristiques du B.V d'Oued LABIOD .....	40
Tableau III. 3: Caractérisation des stations pluviométriques et hydrométrique.....	41
Tableau III. 4 :Estimation de la lame d'eau par la méthode des isohyètes. ....	41
Tableau III. 5: Répartition mensuelle des précipitations (Source : A.N.R.H) .....	42
Tableau III. 6: Les résultats de la loi de Galton. ....	44
Tableau III. 7: Variation du paramètre K en fonction de la perméabilité .....	45
Tableau III. 8: Calcul du transport solide (Tonnes/an) .....	46
Tableau IV.01: Les caractéristiques du MNT utilisé dans la modélisation.....	48
Tableau IV.2 : Caractéristiques des bassins.....	52
Tableau IV.3 : Données de base des douze sous -bassins.....	53
Tableau IV.4 : Les valeurs du CN.....	54
Tableau IV.5 : Données de base des douze sous-bassins versants.....	54
Tableau IV.6 : Volumes de sédiment de crue (13/11/1988).....	59
Tableau IV.7 : Volumes de sédiment de trois crues.....	61
Tableau IV.8 : Calibration et validation du modèle.....	62
Tableau IV.09: Caractéristiques topographiques et hydraulique des affluents de l'amont ver l'aval et de la droite vers la gauche .....	67
Tableau IV.10 : Caractéristiques hydrauliques(CREU_05_05_1985).....	69
Tableau IV.11 : Résultat de simulation.....	71

## Liste des figures

Figure I. 1: Exemple d'érosion en nappe et par rigoles .....	6
Figure I. 2.Mécanisme de transport dans le bassin versant (Mermoud A., 2007).....	7
Figure I. 3: Nomogramme de détermination de l'indice d'érodabilité du sol K.....	10
Figure I. 4.Facteur topographique d'après Wischmeier et Smith, 1977 .....	11
Figure I. 5: Schématisation des trois modes de transport solide en rivière (Duchemin, 2001)	14
Figure III. 1: Situation géographique du bassin versant d'oued labiod (établi par ArcGis)	32
Figure III. 2: Carte d'occupation du sol dans le bassin versant. (Haoues.C,2007).....	33
Figure III. 3: Carte géologique de la vallée d'Oued el Abiod (Haoues.C,2007).....	34
Figure III. 4: Carte lithologique du bassin versant Oued el Abiod. (Haoues.C,2007).....	35
Figure III. 5: Carte des reliefs du bassin versant oued labiod (établi par ArcGis).....	36
Figure III. 6 : Carte hypsométrique du Bassin d'oued El abiod (établi par ArcGis).....	37
Figure III. 7: Carte hypsométrique du Bassin d'oued El abiod (établi par ArcGis).....	39
Figure III. 8: Carte du réseau hydrographique du bassin de oued El abiod (établi par ArcGis)	39
Figure III. 9: Estimation de la pluviométrie par les isohyètes (établi par ArcGis) .....	42
Figure III. 10: Ajustement des pluies maximales journalières a la loi de log-normal .....	43
Figure III. 11Ajustement des pluies maximales journalières a la loi de Gumbel .....	44
Figure IV.1 : Decoupage Bassin Versant Oued Labiod (etabli par ARCGIS) .....	49
Figure IV.2: Affichage HEC-HMS Bassin Versant et Les Sous Bassins. (etabli par ARCGIS)	51
Figur IV.3 : fenêtre de donnée de curve number.....	53
Figure IV.4 : fenêtre de table de précipitation des bassins.....	55
Figure IV.5 : Fenêtre de résultat de sédiment (simulée).....	57
Figure IV.6: Fenêtre du graphe de l'hydrogramme de crue du bassin versant (simulée).....	58
Figure .IV.7. Conception schématique du système d'oued Labiod par HEC-RAS (établi par ARCGIS).....	65
Figure .VI.8 : Fin du Simulation(simulée).....	67
Figure .VI.9 : Profil en long tronçon mchounach barrage fem elghareza .....	68
Figure .VI.10 : Profil en travers tronçon mchounach barrage fem elghareza(simulée).....	68
Figure .VI.11 : débit solides mesures et calculer.....	70
Figure .VI.12 : Cumul des volumes mesurés et calculés .....	70

### INTRODUCTION GENERALE

Les pertes en sols des terres, leur transport et la sédimentation dans les infrastructures hydrauliques, hydro-agricoles, portuaires, routières ont poussé les chercheurs à examiner de plus près cette problématique, vu son ampleur et les conséquences qu'elle engendre face aux changements climatiques attendus. Des outils d'investigation ont été mis en œuvre pour tenter de maîtriser le phénomène. Malheureusement les sols continuent à se dégrader malgré une lutte antiérosive intensive entreprise à l'échelle des bassins-versants des barrages en exploitation, dans une première phase. Le phénomène a atteint un stade parfois irréversible.

Le phénomène s'est accru et s'amplifie aussi bien dans l'espace que dans le temps, aggravé en maints endroits par le changement climatique. Des alternances d'inondations torrentielles et de sécheresses prolongées sont observées. Conjuguées à une action anthropique non contrôlée (incendies, défrichement, surpâturage...), elles rendent le bassin d'alimentation et le réseau d'écoulement très vulnérables au phénomène érosif.

Avec une érosion spécifique annuelle moyenne variant entre 2 000 et 4 000 t/km<sup>2</sup>, l'Algérie est classée parmi les pays aux sols les plus érodables du monde. On compte en moyenne annuellement entre 1 et 2 millions de m<sup>3</sup> le volume de sédiments arraché au bassin et déposé en mer pour les seuls bassins tributaires de la Méditerranée. Certaines régions productives en sédiments ont dépassé le seuil critique.

Face à de graves pénuries d'eau, à un envasement de plus de 50 % des barrages et à une dégradation croissante de la qualité des eaux, une nouvelle politique de l'eau s'est instaurée, ces dernières années, favorisant, techniquement et financièrement, les aménagements des bassins-versants, qui reste le seul moyen pour freiner le ruissellement et augmenter la capacité de stockage des sols réservoirs.

Vu la complexité du phénomène de l'érosion, la modélisation peut constituer un outil efficace dans le domaine des études hydrologique, et permet de déterminer et d'identifier le comportement hydrologique des bassins versants du point vu quantification du transport solide, d'érosion et de sédimentation.

C'est dans ce contexte que notre travail s'inscrit dans l'étude de la modélisation du transport solide à l'échelle de la crue en utilisant le logiciel HEC-HMS.

Pour cela nous commençons en premier lieu de donner un aperçu général sur l'érosion, le transport et la sédimentation ainsi les méthodes de quantification, suivi dans le second chapitre d'une étude bibliographique sur les modèles hydrologiques et plus précisément les modèles utilisés dans le logiciel HEC-HMS.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté le milieu d'étude du bassin versant de l'oued Labiod à savoir ses caractéristiques topographiques, géomorphologie, hydrologiques, géologiques, occupation de sol, couverture végétale.

Le dernier chapitre est consacré à l'application du modèle USEL modifié par HEC-HMS, et une conclusion concernant cette recherche.

# Chapitre I :

## Généralités Sur L'érosion, Le Transport Solide.

## CHAPITRE I : Généralités Sur L'érosion, Le Transport Solide

### I.1. Introduction :

Dans le domaine de la pédologie et de l'écologie, la régression et la dégradation sont des processus d'évolution associés à une perte d'équilibre d'un sol antérieurement stable. Ce type d'érosion commence généralement avec la destruction du couvert végétal.

La matière première du débit solide est l'érosion continentale, c'est-à-dire la désagrégation, sous toutes ses formes, du sol par les agents atmosphériques : le gel qui fait éclater les roches par congélation de l'eau absorbée soit en petit dans la structure de la roche, soit en grand dans les fissures, l'impact des gouttes de pluie, érosion Fluviale surtout active sur les sols meubles, le vent, les variations brutales de température, les actions chimiques de l'eau et le ruissellement (Roche, 1990).

### I.2. Erosion hydrique :

#### I. 2.1. Définition :

D'une manière générale, l'érosion des sols correspond au "détachement" et au "transport" des particules de sol, par différents agents (gravité, eau, vent, glace), de leur emplacement d'origine à un endroit de "dépôt" à l'aval. Dans tous les cas, ces mouvements de sol sont des processus discontinus à fortes variations spatio-temporelles, difficiles à décrire sous forme d'équations mathématiques. (Le Bissonais, 2002)

#### I. 2.2. Les principaux agents de l'érosion hydrique :

##### I. 2.2.1. Intensité et agressivité des précipitations :

L'évaluation de l'énergie cinétique des gouttes reste un bon critère d'évaluation de l'agressivité des pluies. Il existe d'ailleurs une relation empirique reliant l'intensité d'une pluie et son énergie cinétique (Remy *et al.*, 1998).

$$E_c = 11.9 + 8.73 \log * I_p \dots\dots\dots [I-1]$$

Avec,  $E_c$  : Energie cinétique en  $j/m^2/mm$  et  $I_p$  : intensité de pluie en  $mm/h$ .

Les pluies, lors de l'impact des gouttes, provoquent un détachement des matières et une destruction des agrégats lors de la conversion de l'énergie cinétique en efforts de cisaillement.



L'impact direct des gouttes de pluie provoque non seulement le délitage et la fragmentation des agrégats du sol, mais également l'entraînement et la projection des particules dans toutes les directions, ce rejaillissement peut être important.

Plusieurs chercheurs ont essayé de quantifier cette masse de sol détachée ( $D_p$ ) expérimentalement. Les relations obtenues sont en général de la forme (Poessen, 1984) :

$$D_p = a \cdot E_c^b \dots\dots\dots [I-2]$$

Où :  $D_p$  est la masse détachée et  $E_c$  l'énergie cinétique de la pluie. Les coefficients  $a$  et  $b$  dépendent essentiellement de la texture et de la structure du sol.

### I.2.2.2. Le ruissellement

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol, il dépend de plusieurs facteurs en particulier de la pente du terrain.

D'une manière générale, il est admis que la vitesse du ruissellement est le paramètre prépondérant de l'action érosive du ruissellement. Meyer (1965) a proposé la relation suivante pour évaluer cette vitesse (Bouanani, 2004) :

$$V_R = (I^{0,33} \cdot Q^{0,33}) / n^{0,66} \dots\dots\dots [I-3]$$

Où  $V_R$  : vitesse de ruissellement  $I$  : pente du terrain  $Q$  : Débit du ruissellement  $n$  : rugosité du sol.

## I.2.3 Facteurs Influençant L'érosion Hydrique

### I.2.3.1. La lithologie la texture du sol :

Le facteur sol le plus important est la résistance (stabilité) des agrégats à l'impact des gouttes de pluie. Elle correspond à la capacité de stockage temporaire de la surface du sol vis-à-vis de l'eau. La détention superficielle se fait sous forme de flaques dans les micro-dépressions, dont la capacité de stockage est liée à la rugosité (Duchemin, 2001).

### I.2.3.2. Le couvert végétal :

Le couvert végétal intervient d'abord lors de l'impact des gouttes de pluies, de plus il est efficace pour réduire le ruissellement. La couverture du sol, constitue la protection la plus efficace contre l'érosion du sol.

### **I.2.3.3. Les facteurs climatiques :**

Le volume de précipitation particulièrement l'intensité des pluies joue un rôle dans l'apparition de l'érosion. En général, un plus grand volume de précipitation provoque un plus grand volume de ruissellement et nécessairement une plus grande érosion.

En climat sec ou chaud, où l'évapotranspiration est plus grande que les précipitations, le sol possède un plus grand déficit, ce qui augmente sa capacité d'absorber une précipitation et diminue le ruissellement et l'érosion. Tous les facteurs qui influencent positivement l'évapotranspiration contribuent à diminuer le potentiel d'érosion. Une mauvaise répartition des précipitations provoque une concentration de celles-ci qui augmentent le volume de ruissellement et le potentiel d'érosion. (**Duchemin, 2001**). De plus, l'érosion augmente considérablement avec l'intensité des pluies, en particulier en zones arides.

### **I.2.3.4. Les facteurs topographiques (Pente) :**

L'influence de la pente est complexe. Le plus souvent, l'érosion augmente avec la pente. Il se développe une érosion en rigoles dix fois plus agressive que l'érosion en nappe. Quant à la longueur des pentes, il semble que son influence sur la naissance de rigoles dépend de diverses interactions avec la rugosité et la perméabilité du sol, le type et l'abondance du couvert végétal.

## **I.2.4. Les formes d'érosion**

Plusieurs approches sont utilisées depuis de nombreuses années pour étudier la complexité de l'érosion et mieux cerner les mécanismes de ce phénomène. Ces formes ont été décrites par plusieurs chercheurs et dans diverses latitudes, sur versants volcaniques cultivés, où ils mettent en corrélation les dynamiques et les formes d'érosion, sur le processus de ravinement à l'échelle de bassin versant., ont étudié les formes d'érosion, tout en mettant un accent particulier sur le ravinement et sa typologie en Algérie. (**Daoudi et al.2009**),

### **I.2.4.1. Erosion en nappe, érosion laminaire ou érosion aréolaire (Sheet erosion)**

C'est le stade initial de la dégradation du sol par érosion, du fait de l'impact des gouttes de Pluie sur le sol et le transport des éléments détachés par le ruissellement en nappe. Cette forme d'érosion, sous l'influence du travail du sol par les outils aratoires, engendre la remontée des cailloux à la surface du sol.

En Afrique, l'érosion en nappe dépend de la hauteur, de l'intensité, de l'énergie cinétique et de la répartition des pluies (Roose, 2004).

### I.2.4.2. Erosion linéaire

#### I.2.4.2.1. Griffes (rill erosion)

L'érosion linéaire décape et transporte généralement toutes les particules rencontrées : elle n'est donc pas sélective mais les dépôts sont souvent triés. Elle manifeste souvent un degré de dégradation bien plus élevé du milieu (Roose, 1985).

#### I.2.4.2.2. Rigoles (rill or ephemeral erosion)

On parle d'érosion en rigoles lorsque les petits canaux présentent des profondeurs supérieures à 10 cm (Al-kaisi, et al., 2009).

#### I.2.4.2.3. Erosion par ravinement (gully erosion)

La ravine est une rigole approfondie où se concentrent les filets d'eau. La rigole se transforme en ravine lorsque sa profondeur interdit son nivellement par des simples instruments aratoires. Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion. Les ravines peuvent atteindre des dimensions considérables.



Figure I.1: Exemple d'érosion en nappe et par rigoles

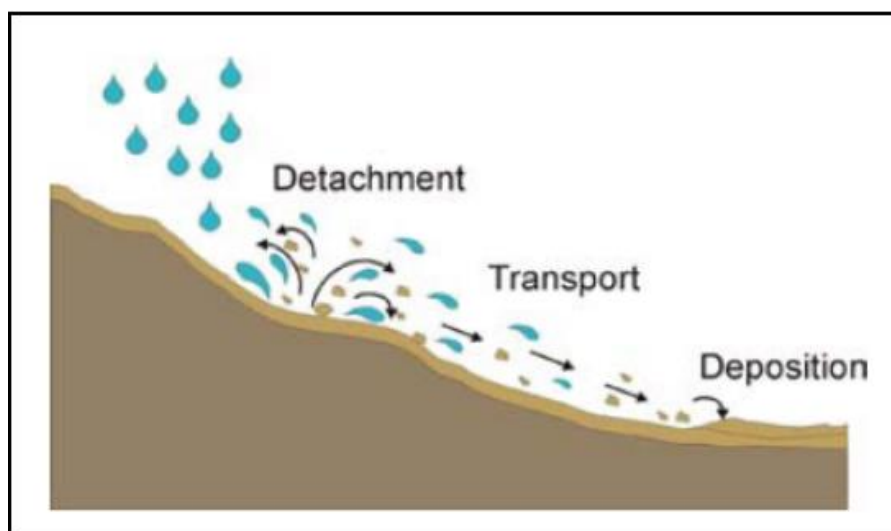
L'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en (badlands) et explique également la sape d'ouvrages (ponts, radiers, digues ...). Lorsque l'aménagement des ravines n'est pas prolongé suffisamment en aval.

### I.2.5. Mécanismes provoquant l'érosion :

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants

Qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol. Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt (rivière, oued).

**Origine et mécanisme** La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine de l'arrachage du transport et du dépôt de la terre enlevée. L'arrachage est dû à la fois aux gouttes d'eau (par rejaillissement) et aux eaux de ruissellement et le transport est assuré par ces eaux. Figure (I.3)



**Figure I-2 :** Mécanisme de transport dans le bassin versant (Mermoud A., 2007)

### I.2.6. Quantification de l'érosion spécifique :

Pour quantifier l'érosion plusieurs formules ont été élaborées sous divers climats. La littérature hydrologique englobe plusieurs méthodes et formules. On peut citer les plus utilisées :

#### I.2.6.1. Formule de Tixeront (1960) :

Cette formule est basée sur les données recueillies dans 32 bassins algériens et 9 bassins tunisiens Sur une durée comprise entre 2 et 22 ans :

- $A_{ss} = 354 * E^{0,15}$  pour les bassins tunisiens
- $A_{ss} = 92 * E^{0,21}$  pour l'Est algérien
- $A_{ss} = 200 * E$  pour la région centre algérien

**Avec :**

$A_{ss}$  : apport solide spécifique en t/km<sup>2</sup>/an

E : Ecoulement en mm

#### I.2.6.2. Formule Sogreah :

Basée sur les données de 30 bassins algériens, de superficie comprise entre 100 Et 300km<sup>2</sup>, soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm

$$Ass = \alpha * E^{0.15} \dots\dots\dots[I-4]$$

Avec :

Ass : apport solide spécifique (t/km2/an)

$\alpha$  : coefficient dépendant de la perméabilité du sol, donné au tableau ci-dessous

E : écoulement annuel (mm).

**Tableau I-1** : coefficient  $\alpha$  en fonction de la perméabilité

Perméabilité	$\alpha$
Forte	8.5
Moyenne	75
Moyenne à faible	350
Perméabilité faible	1400
Imperméable	3200

**I.2.6.3. Formule de Fournier (1960) :**

$$A_p = (1/36) (P_m/P_{am})^2 (2.65) (h/S)^2 (0.46) \dots\dots\dots[I-5]$$

Avec

$A_p$  : apport solide spécifique (t/km2/an)

$P_m$  : précipitations moyennes mensuelles du mois le plus pluvieux (mm)

$P_{am}$  : précipitations annuelles (mm)

h : dénivelée moyenne (m)

**I.2.6.4. Formules de Touaibia :**

L'auteur a testé ses calculs en climat semi-aride, les calculs sont résumés sous la formule suivante :

$$Es = 34,12. S^{-0,164}. Dd^{-0,284}. Ce^{0,573}. Cv^{-0,329} \dots\dots\dots[I-6]$$

$$Es = 38,63. S^{-0,175}. Dd^{-0,286}. Cv^{-0,343} \dots\dots\dots[I-7]$$

$$Es = 19,36. S^{-0,134}. Cv^{-0,308} \dots\dots\dots[I-8]$$

Avec

Es : Erosion spécifique (t/ha/an)

S : Surface du Bassin versant (Km<sup>2</sup>)

Dd : Densité de drainage (Km/Km<sup>2</sup>)

Cv : Couverture végétale (%)

### I.2.6.5. Équation universelle des pertes en sols de Wischmeier (1978) :

Cette équation se présente sous la forme d'un produit de six facteurs indépendants, chacun représente une équation paramétrique à plusieurs variables sous sa forme simplifiée, ce modèle s'écrit :

$$A = R. K. LS. C. P. \dots\dots\dots[I-9]$$

Où

#### ❖ Le facteur d'agressivité climatique (r) :

Il est défini comme le produit de l'énergie cinétique (E c) et l'intensité maximale en 30 minutes (I 30).

$$R = Ec \times I30 \dots\dots\dots[I-10]$$

Avec  $Ec = 11,9 + 8,73 \log(I) \dots\dots\dots[I-11]$

Ec en J/m<sup>2</sup>/mm de pluie

I = l'intensité moyenne de la pluie (mm/h).

R peut être déterminé pour des périodes variables (1 averse à 1 année).

Lorsqu'il est utilisé comme paramètre du modèle de Wischmeier, l'indice R est généralement calculé comme la moyenne de plusieurs années.

#### ❖ Le facteur sol (K) :

Le facteur sol caractérise l'érodabilité du sol, c'est-à-dire sa sensibilité à l'érosion.

Ce facteur sans dimension mesure la plus ou moins grande résistance relative d'un sol à l'érosion.

WISCHMEIER propose un mode de calcul de K, à partir des paramètres suivants :

Pour une première approximation :

- ✓ La somme des pourcentages de limon et sable fins
- ✓ Le pourcentage de sable
- ✓ La teneur en M.O

Et pour une approche plus précise

- ✓ La structure
- ✓ La perméabilité.

- Le nomogramme en figure ci-dessous donne ainsi la méthode de détermination de K.

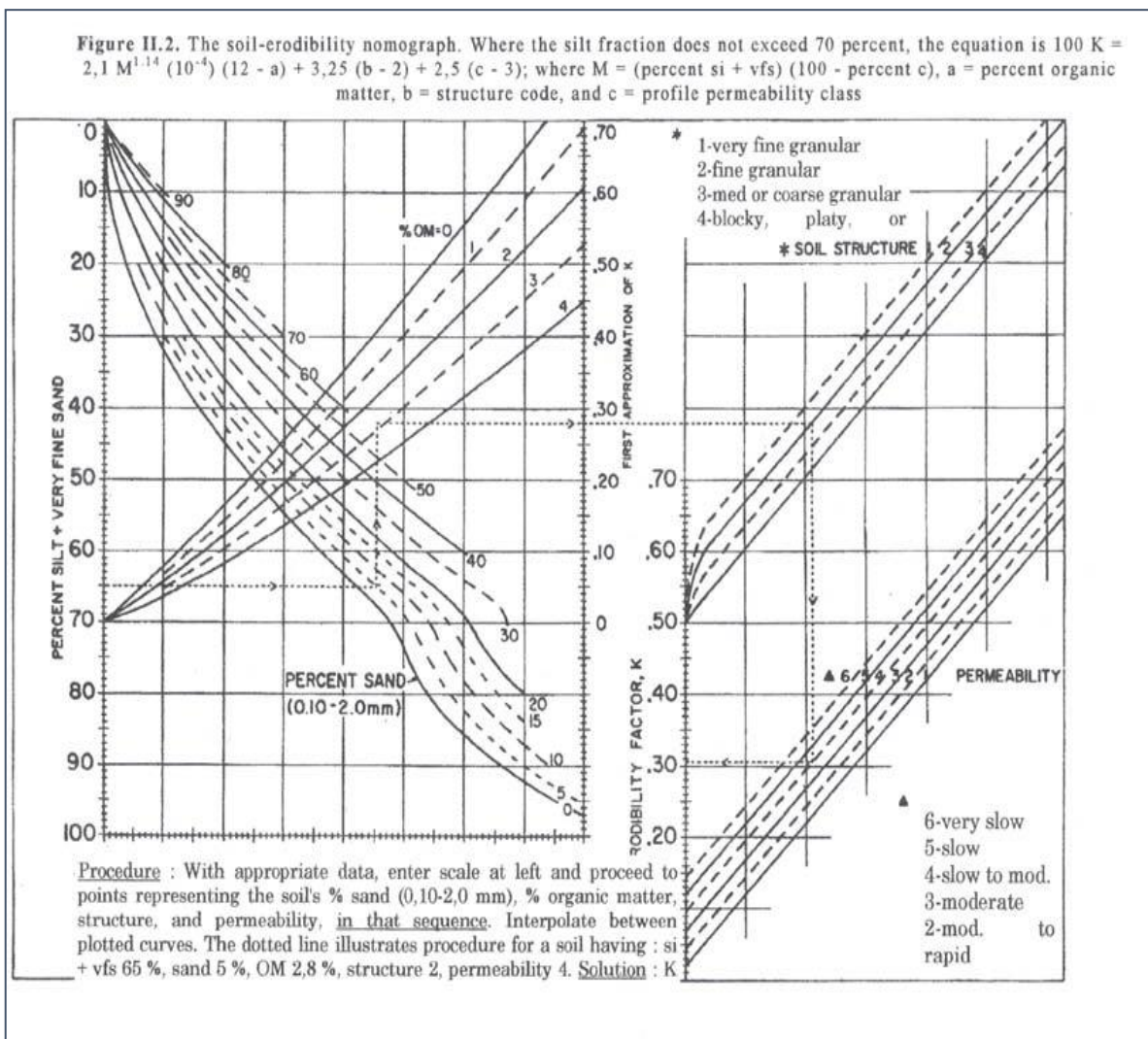


Figure I.3 : Nomogramme de détermination de l'indice d'érodabilité du sol K

On peut également déterminer K par la formule suivante :

$$100K = 2,1.M^{1,14}.10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3) \dots\dots\dots[I-12]$$

M est déterminé à partir de :

$$M = (\% \text{ sable fin + limon}). (100 - \% \text{ argile}),$$

a : est le pourcentage de matière organique,

b : est le code de la perméabilité, c : est le code de la structure

Tous les droits réservés à la Bibliothèque ENSH

**Tableau I-2 : Valeurs usuelles du paramètre K**

type du sol	K métrique t/ha
sol peu évolue lithique	0.32
sol peu évolue régosolique	0.44
sol peu évolue d'apport alluvial	0.39
sol peu évolue d'apport colluvial	0.27
vert sol	0.36
sol calcimagnisique rendzine	0.27
sol ferralitique	0.46

❖ **Le facteur topographique (L.S) :**

Il tient compte à la fois de la longueur de la parcelle *L* et de l'inclinaison de la pente. Les deux facteurs *L* et *S* sont combinés en un seul facteur topographique qui permet d'évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion. Des formules, tables et abaques (figure I.5) permettent de quantifier les valeurs du facteur topographique ; les relations établies par WISCHMEIER permettent également de déterminer *L* et *S* :

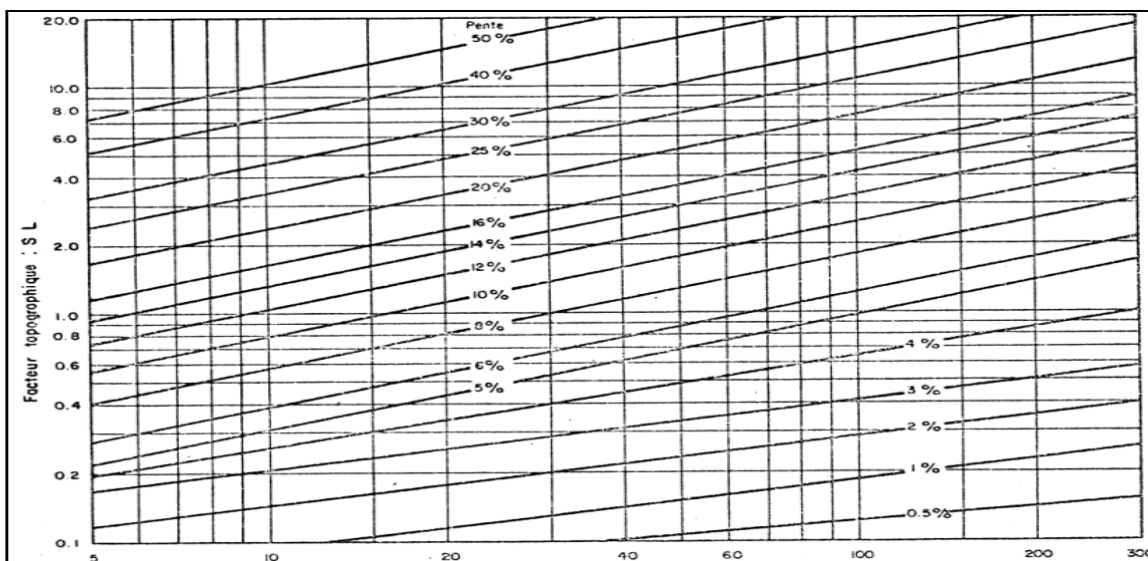
$$LS = (1/22.15)^m \cdot (0.06543 + 0.045 s + 0.065 s^2) \dots\dots\dots [I-13]$$

*Ls* : facteur de longueur de pente (-)

*l* : la longueur de la pente (m) : longueur de la parcelle standard (m)

*m* : exposant dépendant de plusieurs paramètres dont la pente

*S* : le facteur de pente (-)    *s* : la pente (%)



**Figure I .4 : Facteur topographique d’après Wischmeier et Smith, 1977**



✓ **Le facteur C ou indice de culture :**

Il est défini dans l'équation de Wischmeier comme le rapport entre l'érosion mesurée sur une parcelle de référence (jachère nue) et une parcelle test sous une culture bien précise. Il existe des tableaux pour déterminer C en fonction de la couverture végétale, des effets du Much (couche de protection sur le sol) et des techniques culturales.

La valeur du facteur C dépend de plusieurs variables :

- La couverture des feuilles et des branches qui interceptent les gouttes de pluie et dissipent une partie de leur force érosive ;
- La couverture végétale au sol composée de résidus de culture et de végétation vivante à la surface du sol ;
- La biomasse du sol qui améliore l'écoulement de l'eau dans le sol ainsi que la capacité de rétention et le type et la fréquence de travail du sol qui influent la porosité,
- La rugosité de surface et la compaction du sol.

Chacune de ces variables est traitée comme un sous facteur et C'est le produit de ceux-ci.

**Tableau I-3 :** Quelques valeurs du paramètre C

Type d'occupation de sol	le facteur C
<b>Badlands/ terrains incultes</b>	0.75
<b>Cultures annuelles</b>	0.26
<b>Cultures extensives</b>	0.28
<b>Agricultures</b>	0.25
<b>Oliviers</b>	0.28
<b>Reboisement</b>	0.15
<b>Foret claire</b>	<b>0.1</b>
<b>Foret normale</b>	<b>0.08</b>

❖ **Le facteur P ou indice des aménagements antiérosifs :**

Il permet d'évaluer l'action des pratiques visant à modifier la vitesse, le profil, la pente ou la direction de l'écoulement en surface et à réduire ainsi l'érosion. Par exemple, la culture en pente transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternées, l'aménagement de terrasses, la présence de bandes enherbées ou encore l'enherbement des rangs dans le sens de la

penne sont des types d'actions antiérosives. Le facteur P est le rapport de la perte de sol observée sur le terrain étudié travaillé mécaniquement d'une certaine façon et protégé contre l'érosion d'une certaine façon avec celle qui a lieu sur la parcelle de référence où le terrain est labouré fréquemment dans le sens de la plus grande pente

### **I.3. Le Transport solide**

#### **I.3.1. Généralités**

La dynamique des matériaux arrachés au sol et transportés dans le réseau d'écoulement dépend essentiellement de la vitesse d'écoulement et de la granulométrie. Le champ d'exploration des vitesses varie tout au long du profil de l'oued d'amont en aval. La capacité de transport est liée à la nature granulométrique des matériaux et varie dans le temps et dans l'espace avec le débit liquide.

#### **I.3.2. Définition**

Le transport solide est par définition la quantité de sédiments (ou, flux solide, charge solide, débit solide) transportée par un cours d'eau à une section donnée pendant un temps  $dt$  ( $t=1$  jour, 1 Mois, 1 année). Il est composé de la charge en suspension et du transport de fond (glissement ou Roulement sur le fond et saltation). Le transport des sédiments dans les cours d'eau est déterminé par les caractéristiques des particules (taille, forme, concentration, vitesse de chutes et densité des particules) (Bouanani, 2004).

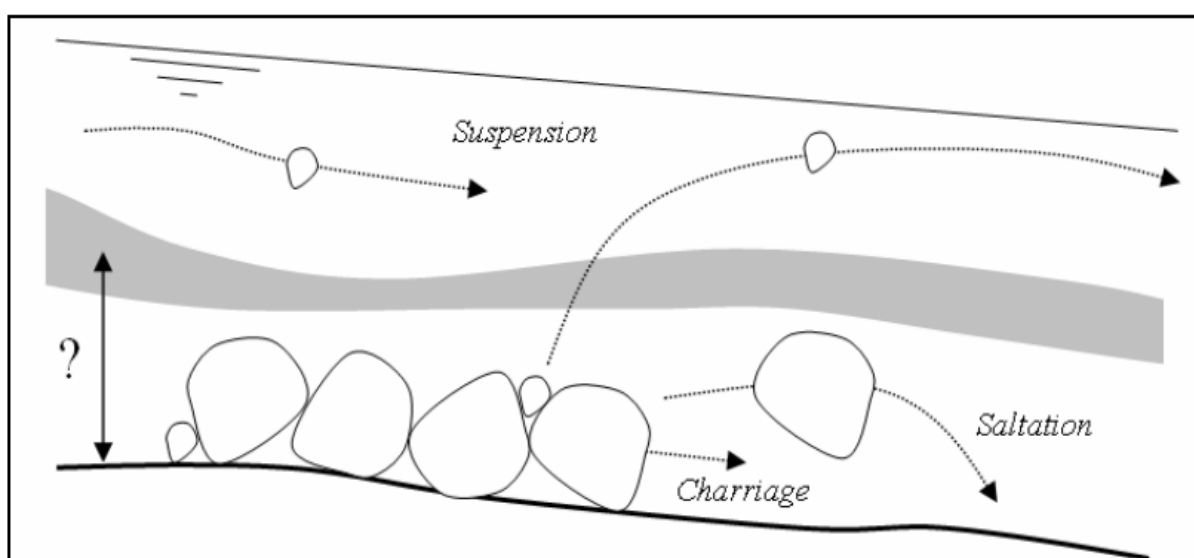
#### **I.3.3. Les différents aspects du transport solide**

Le mode de transport dépend essentiellement d'un paramètre fondamental : la taille du sédiment transporté. Généralement deux modes de transport solide sont considérées (figure III.4) : Le transport solide par charriage et le transport solide en suspension. Les deux modes diffèrent par deux aspects essentiels : dans le premier cas, les particules se déplacent par roulement et glissent sur le fond et leurs vitesses est inférieure à celle de l'écoulement. Dans le deuxième cas, les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide. Il n'existe pas de délimitation nette entre ces deux modes de transport. Certains matériaux progressent par bonds successifs, se trouvant tantôt sur le fond, tantôt au sein du liquide représente la saltation. Cette dernière notion est considérée en général avec le charriage car il n'existe pas de théorie particulière (Corne, 2009)

### I.3.3.1. La charge en suspension

Constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Le transport en suspension est en général constitué de matériaux fins, argiles et colloïdes et quelquefois de silts. C'est souvent la seule fraction du débit solide qui puisse être aisément mesurée : par rapport à la capacité de mesures, on distingue la charge échantillonnée de la charge non échantillonnée (Figure III-6).

Dans la majorité des cas, la charge en suspension représente quantitativement un pourcentage très important du transport global (**Picouet, 1999**)



**Figure (I-5) :** Schématisation des trois modes de transport solide en rivière (Duchemin, 2001)

### III.3.3.2. La charge de fond

Formée de matériaux trop gros pour être mis en suspension compte tenu de leur densité et de la vitesse du courant, ces particules roulent sur le fond ou se déplacent par saltation

## I.3.4. Le transport solide de fond ou Charriage

### III.3.4.1. Généralités

Le transport solide par charriage, représente la progression de sédiments grossiers (sables, gravier, galets et blocs), de diamètre supérieur à 1 mm, qui se déplacent par roulement ou glissement, au voisinage immédiat du fond du cours d'eau, Et parcourent des distances relativement petites et discontinues dans le temps et dans l'espace (**Bouanani, 2004**).

### III.3.4.2. Le charriage (cours d'eau naturels)

L'étude du charriage nécessite la connaissance du débit à partir duquel commence. La mise en mouvement des matériaux du fond. La mesure du débit peut être réalisée Par diverses méthodes :

- Détecteurs hydroponiques
- Nasses de prise en rivière
- Traceurs radioactifs
- Procédés topographiques
- Fosses à sédiments
- Modèles réduits

### III.3.5. Le transport solide en suspension

#### III.3.5.1. Généralités

Le transport solide en suspension représente le transport de sédiments fins (argiles, Limons, sables fins), de taille micritique, maintenues en suspension sur toute la hauteur de la masse liquide du cours d'eau, sous l'action des fluctuations turbulentes de l'écoulement. Les sédiments se déplacent sur des grandes distances et le débit solide croît de l'amont vers l'aval.

Quelques valeurs indicatives, permettent de délimiter les deux modes de transport. Ces valeurs utilisent le rapport entre vitesse de l'écoulement  $V$  sur le lit du cours d'eau, et la vitesse  $W$  de chute des particules, (**Graf, 1971**)

- $V/W > 0.10$  début de transport par charriage.
- $V/W > 0.40$  début de transport en suspension.

Lorsque les matériaux arrachés au bassin atteignent le réseau hydrographique, ils seront transportés par le courant si celui-ci en est capable, sinon ils se déposent pour former la partie affouillable du lit des rivières. La majeure partie du transport solide est constituée d'éléments fins restant en suspension dans les eaux de rivières. (**Bouanani, 2004**), (**Corne, 2009**).

La quantité de matériaux véhiculés par les cours d'eau peut atteindre des valeurs Considérables et avoir des conséquences très graves sur les infrastructures hydro-agricoles et routières : comblements de barrage, dépôt dans les canaux d'irrigation, avaloirs, routes et autoroutes, blocage des stations de pompage, impact sur l'aquaculture et la qualité de l'eau dans les lacs naturels et artificiels, eutrophisation...).

En Algérie, la majorité des barrages ont vu leur capacité diminuer de moitié après une trentaine d'année d'exploitation. Le tableau 7.3 montre l'ampleur de l'érosion à travers l'érosion spécifique, au droit de 15 grands barrages en exploitation, calculée sur la base de l'observation en 2001. (Remini., 2004).

### III.3.5.2. Mesures du transport solide en suspension

A la différence du charriage, la mesure du transport solide se fait sur toute la largeur de la section de mesure. La méthode utilisée, consiste à explorer le champ des vitesses et des concentrations sur une section donnée du cours d'eau. Des prélèvements d'échantillons par des équipements spécifiques, au droit de la section de mesure, se font parallèlement au jaugeage de débit au moulinet pour différentes largeurs et différentes profondeurs de la section de mesure.

Le prélèvement d'échantillons doit se faire avec des appareils à action très rapide. Il existe plusieurs appareils de prélèvements d'échantillons actuellement utilisés, à savoir :

- Turbidisonde NEYRPIC
- Turbidisonde DELFT
- Prélèvement au moyen d'une pompe
- Prélèvement au moyen de bouteilles

Pour les faibles courants d'eau, les prélèvements peuvent être faits à l'aide de bouteilles que l'on envoie à la profondeur voulue grâce à un câble.

### I.3.5.3. Procédé de mesure des matériaux en suspension

Les échantillons prélevés sont pris au laboratoire. Les eaux sont filtrées. Les matériaux en suspension sont récupérés sur des filtres en papier ou des membranes cellulosiques préalablement pesées. Papiers ou membranes chargées sont séchées à l'étuve à environ 100 °c. Le filtre séché est pesé avec une balance de précision et le poids de la charge solide est ramené à l'unité de volume [M/L<sup>3</sup>]. La turbidité ou la concentration en éléments en suspension s'exprime en mg/l ou en g/m<sup>3</sup> ou autres.

#### I.3.5.3.1. Procédé de quantification du débit solide

Le procédé est similaire à celui de la mesure du débit liquide au moulinet. Sur un certain nombre de points répartis sur plusieurs verticales A, B, C, D.... d'une section, des prélèvements sont effectués et on détermine ainsi aussi bien le débit liquide spécifique instantané que la concentration C des matériaux en suspension. (Picouet, 1999)

**I.4 Conclusion**

L'érosion des versants est un processus complexe et continu qui a cause d'énormes dans les pays semi-arides tels que l'Algérie, et a cause un envasement important des retenues et des barrages.

Dans ce chapitre nous avons détaillé les principaux processus et causes de l'érosion des sols.

Notre recherche sera consacrée à l'étude du transport solide en période de crue de l'oued Labiod dans la wilaya de Biskra, et ceci pour une meilleure prévention et lutte contre ce phénomène.

# Chapitre II :

## Modélisation des transports solides

---

## Chapitre II : Modélisation des transports solides

### II.1. Introduction

La recherche de modèles reliant les paramètres hydroclimatiques (précipitations, écoulements et/ou transport de matériaux solides) a fait l'objet de nombreuses études, Probst J.L. et al. (1992), Terfous A. et al. (1999, 2001, 2003), Ghenim A., (2001), Achit M. (2002), Benkaled A. et al. (2003). L'objectif de ces auteurs est d'expliquer les phénomènes de l'écoulement et du transport solide et de mettre en évidence des relations susceptibles d'être appliquées à des régions ou des bassins versants où les mesures sont rares ou inexistantes.

Les caractéristiques climatiques, morphométriques et morphologiques diffèrent d'une région à une autre ou d'un bassin à un autre. Aussi, il est admis aujourd'hui que les fluctuations climatiques sont des phénomènes quasi-cycliques (**Kayzer N. et al., 1990 ; Tardy Y., 1994**).

En effet, durant le siècle écoulé, le climat du monde a changé. La pluviosité sur les continents, le débit des cours d'eau, la température ont augmenté dans plusieurs régions du monde et diminuer dans d'autre (**Tardy Y., et al., 1995**).

### II.2. Définition des modèles :

Un modèle est, par définition, une conceptualisation de la réalité, une certaine image de la réalité que nous nous créons, une image incomplète et partielle, comprenant des caractéristiques, des attributs de la réalité qui nous intéressent en particulier ou que nous avons la chance (ou la possibilité) de connaître.

Un modèle mathématique est un ensemble de concepts d'intérêt formalisés sous la d'expressions mathématiques (**Benkaled et al., 2003**).

### II.2. Classification des modèles :

On peut classer les modèles

**II.2.1 Selon la loi mathématique** La nature des relations mathématiques entre les entrées du système et les sorties, entretient souvent une confusion, des lors que la définition de chaque classe de modèle, n'est toujours pas assez bien définie, et la frontière entre chaque modèle est loin d'être nette (**Benkaci, 2006**).

- ✓ Les modèles empiriques



- ✓ Les modèles boîte Noire
- ✓ Les modèles conceptuels
- ✓ Les modèles physiquement fondés

**II.2.2 Selon la discrétisation spatiale :** Cette différence est importante sur le plan pratique, car certains modèles abordent la représentation de certains mécanismes dans leur diversité spatiale (**Benkaci, 2006**)

- ✓ Modelé global
- ✓ Modelé spatialisé

### II.2.3 Modélisation Hydrologique avec le logiciel HEC-HMS

#### II.2.3.1 Modélisation de l'infiltration

HEC-HMS calcule les volumes d'écoulements en soustrayant aux précipitations les quantités d'eau qui sont stockées, infiltrées ou évaporées sur le bassin versant, L'interception, l'infiltration, le stockage et l'évaporation sont représentés par HEC comme étant des « Pertes ». (**Hydrologic Engineering Center.2008**)

##### a. concepts de base :

Les surfaces d'un bassin versant sont classées en deux catégories :

- . Surfaces directement connectées et imperméables, où l'écoulement est direct et se fait sans pertes. Dans ce cas on utilise le modèle « sans pertes » ;
- . Surfaces perméables soumises à des pertes décrites par les différents modèles suivants :

##### II.2.3.1.1. Modèle de perte initiale et à taux constant :

Ce modèle considère que le potentiel du taux de pertes maximum, noté  $f_c$ , est constant, et inclut le taux de pertes initiales  $I_a$  qui représente l'interception et le stockage dans les dépressions de surfaces ; (**Cunderlik J. M. et Simonovic S. P.2004**)

Modèle à déficit et à taux de perte constant ;

##### II.2.3.1.2. Modèle basé sur le Curve Number (CN) :

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

$$P_e = \frac{(p - I_a)^2}{p - I_a + S} \dots\dots\dots [1]$$

Où,  $P_e$  : L'excès de précipitation ;

- $P$  : est le total des précipitations accumulées au temps  $t$  ;
- $I_a$  : Les pertes initiales ;

- S : est le potentiel maximum de rétention.
- On a par ailleurs la relation empirique ci-dessous, qui a été développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins versants expérimentaux

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

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

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \dots\dots\dots[3]$$

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

#### II.2.3.1.3. Modèle de Green et Ampt.

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

#### II.2.3.1.4. Le modèle continu SMA (Sol-Moisture Accounting)

Le modèle SMA représente le bassin versant avec une série de couches de stockage interconnectées entre elles. La figure IV.7 représente la façon dont les couches de stockages sont connectées. Chacune est représentée par le taux d'apport, de sortie et de sa capacité de stockage qui commande la quantité d'eau perdue ou supplémentaire.

#### II.2.3.1.5. Modélisation du ruissellement direct

Dans cette partie, on présente les modèles qui simulent le processus du ruissellement direct des précipitations excédentaires sur un bassin versant. HEC-HMS se rapporte à ce processus comme transformation de l'excès de précipitation pour chacun des sous bassins en un écoulement à son exutoire.

#### II.2.3.1.6. Les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)

Ces modèles donnent une relation empirique entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct. La méthode de l'hydrogramme unitaire vise à déterminer l'hydrogramme de ruissellement direct à l'exutoire d'un bassin versant à partir des hyétogrammes de l'averse correspondante reçue par ce même bassin.

L'hydrogramme unitaire donne le débit de ruissellement par unité de hauteur d'eau tombée sur le bassin versant. Cette méthode repose donc principalement sur l'hypothèse de linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement. On a donc l'équation de convolution

suivante :

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq m} P_m U_{n-m+1} \dots\dots\dots[4]$$

Où,  $Q_n$  est le débit de ruissellement au temps  $n \cdot \Delta t$ ,  
 $P_m$  est l'excès de précipitation entre  $m \Delta t$  et  $(m+1) \Delta t$  (en hauteur d'eau),  
 $U_{n-m+1}$  est la valeur de l'hydrogramme unité au temps  $(n-m+1) \Delta t$ .

**II.2.1.3.7. Modèles d'hydrogrammes unitaires synthétiques :**

➤ **Le modèle de SNYDER**

Ce modèle permet d'estimer l'hydrogramme unitaire à partir des caractéristiques du bassin versant. Il est basé sur trois paramètres : l'amplitude du pic, la base du temps total et le décalage entre le maximum de l'hyétogramme de la pluie excédentaire et le pic de l'hydrogramme. Ce modèle est fondé par ailleurs sur un événement standard tel que le décalage temporel ( $t_p$ ) qui est déterminé par la relation suivante :

$$t_p = 5.5 t_r$$

Où :  $t_r$  est la durée de l'évènement.

Si le décalage temporel est remarquablement différent du temps calculé par la relation précédente, on utilise la relation suivante :

$$t_{pR} = t_p - \frac{t_r - t_R}{4} \dots\dots\dots[5]$$

Où,  $t_R$  : Le décalage temporel de l'hydrographe désiré (introduit par l'utilisateur) ;  
 $t_{pR}$  : Le décalage temporel de l'hydrogramme unitaire (introduit par l'utilisateur).

Pour ce type d'évènement, Snyder a établi une relation entre le décalage temporel et le pic de l'hydrogramme unitaire.

$$\frac{U_p}{A_d} = C \frac{C_p}{t} \dots\dots\dots[6]$$

Où,  $U_p$  : Le pic de l'hydrogramme unitaire,  
 $A_d$  : La surface drainée,  
 $C_p$  : Coefficient du pic de l'hydrogramme unitaire,  
 $C$  : Constante de conversion = 2.08 pour le Système international d'unités (SI),  
 $t$  : Le temps de décalage. Il est égal à  $t_p$  pour des événements standard et à  $t_{pR}$  pour d'autres durées.

➤ **Le modèle du SCS (Soil Conservation Service)**

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

$$U_p = 2.08 \frac{A_d}{T_p} \dots\dots\dots[7]$$

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6T_c \dots\dots\dots[8]$$

où,  $\Delta t$  : La durée de l'excès de précipitation ;  $T_c$  : le temps de concentration du bassin. Ainsi, il suffit de connaître le temps de concentration pour remonter à  $T_p$  et  $U_p$  et d'obtenir ainsi l'hydrogramme unitaire désiré par simple multiplication de l'hydrographe unitaire normalisé.

### II.2.3.2. Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS

Les modèles d'écoulements fluviaux inclus dans le HEC-HMS permettent de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces modèles utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement. **(Cunderlik J. M. et Simonovic S. P.2004)**

❖ **Équation de continuité**

Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$A = \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q \dots\dots\dots[9]$$

où,  $B$  : Largeur de la surface libre ;

$q$  : Le débit unitaire, calculé par unité de longueur du canal ;

$A$  : L'aire de la section du cours d'eau ;

Équation de quantité de mouvement.

L'équation du mouvement s'écrit comme suit :

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \dots\dots\dots[10]$$

où,  $S_f$  : est le gradient hydraulique ;

$S_0$  : est le gradient au fond du canal ;

V : vitesse d'écoulement ;

y : hauteur hydraulique ;

x : la longueur du chemin de l'écoulement ;

Les principales hypothèses retenues lors de l'élaboration des ces équations sont :

- La vitesse est constante sur la surface et elle reste horizontale sur chaque section du cours d'eau ;
- La pression reste hydrostatique en chaque point du cours d'eau ;
- Aucune circulation latérale et secondaire ne se produit ;
- Le lit du canal est fixe ; l'érosion et le dépôt ne changent pas la forme de la section du canal ;
- La résistance à l'écoulement peut être décrite par des formules empiriques, telles que l'équation de Manning ou de Chézy.

### II. 2.3.3. Modèle de Muskingum :

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

$$\left( \frac{I_{t-1} + I_t}{2} \right) - \left( \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \right) = \left( \frac{S_t + S_{t-1}}{\Delta t} \right) \dots \dots \dots [11]$$

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

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

Avec, T p : Temps de parcours et X paramètre permettant une pondération (0 < X < 0.5). Ainsi, si le stockage d'eau dans la rivière est contrôlé par les conditions aval, on met X = 0 (On retrouve alors le modèle de réservoir linéaire présenté plus haut). Au contraire, on prendra X = 0.5, pour donner un poids similaire aux débits entrants et sortants.

## II.3. Modèle choisi dans l'estimation de l'érosion :

### II.3.1 L'équation Universelle des pertes en terre modifiée : MUSLE

L'érosion provoquée par les précipitations et l'écoulement est calculée avec l'Équation Universelle de Perte de Sol modifiée, MUSLE, (Williams, 1975). MUSLE modifié est une version de l'équation universelle des pertes de sol (USLE) développée par Wischmeier Et Smith (1965, 1978). L'USLE prévoit l'érosion brute annuelle moyenne (érosion en nappe) en fonction des précipitations. Dans le modèle MUSLE, le facteur d'énergie de précipitations est remplacé par un facteur d'écoulement. Ceci améliore la prévision du rendement des dépôts et

permet à l'équation d'être appliqué à différents événements d'orage. La prévision est améliorée parce que l'écoulement est une fonction de l'humidité antécédente. (AFRA, 2008), (ELIAS, 2009), (BARON, 2008)

**II.3.1.1 Le modèle MUSLE :** L'équation universelle modifiée des pertes de sol (Williams, 1995) s'écrit sous la forme suivante :

$$\text{Sed} = 11.8(Q_{\text{surf}} \cdot q_{\text{peak}} \cdot \text{area}_{\text{ahru}})^{0.56} \cdot C_{\text{USLE}} \cdot P_{\text{USLE}} \cdot L_{\text{USLE}} \cdot \text{CFRG} \dots \dots \dots [12]$$

**Avec :**

**Sed** : est le rendement de dépôt un jour donné (tonnes) ;

**Q<sub>surf</sub>** : volume du ruissellement en (mmH<sub>2</sub>O /ha) ;

**q<sub>peak</sub>** : le débit de maximal d'écoulement (m<sup>3</sup>/ s) ;

**are<sub>ahru</sub>** : la surface du HRU (ha) ;

**K<sub>USLE</sub>** : le facteur d'érodabilité de sol dans USLE en (0.013 métrique ton m<sup>2</sup> hr/ (m<sup>3</sup>-métrique tonne cm)) ;

**C<sub>USLE</sub>** : est le facteur de couverture et de gestion d'USLE ;

**P<sub>USLE</sub>** : est le facteur de pratique en matière de soutien d'USLE ;

**L<sub>SUSLE</sub>** : est le facteur topographique d'USLE et CFRG est le facteur brut de fragment des eaux de surface et la crête évaluent des calculs ; (ARNOLD, 2005)

### II.3.1.2 Evolution des débits solides en fonction des débits liquides

La mobilisation des matériaux solides sur les versants et leur transport éventuel par les cours d'eau, représentent deux phénomènes distincts, mais liés entre eux. Le débit solide moyen des sédiments en suspension qui transitent sur une section d'écoulement moyen est calculé par le produit de la concentration moyenne des sédiments en suspension  $C_s$  par le débit liquide moyen  $Q_1$  durant une période de temps donné.

$$Q_s = Q_1 C_s \dots \dots \dots [13]$$

## II.3.2. Le modèle HEC-HMS sous ARCGIS :

### II.3.2.1. La description du logiciel ARCGIS

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. En tant que principale plateforme de développement et d'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG) au monde, ArcGIS est utilisé par des personnes du monde entier pour mettre les connaissances géographiques au service du gouvernement, des entreprises, de la science, de l'éducation et des médias.

ArcGIS permet la publication des informations géographiques afin qu'elles puissent être accessibles et utilisables par quiconque. Le système est disponible partout au moyen de navigateurs Web, d'appareils mobiles tels que des smartphones et d'ordinateurs de bureau. (AHBARI A. 2005).

#### **II.3.2.1.1. Fonctionnalités du logiciel ArcGIS**

- ✓ Automatiser le processus de caractérisation physique des bassins (délimitation, Morphométrie,);
- ✓ Calcul et extraction des données d'entrée pour les modèles hydrologiques et Hydrauliques à partir des cartes et donnée SIG (MNT, occupation du sol, Sols, Images,)
- ✓ Interface graphique simple à manipuler pour une gamme de modèles hydrologiques et hydrauliques diversifiée, afin de préparer leurs fichiers de simulations ;
- ✓ Exporter les couches de données exigées par le modèle utilisé
- ✓ Exécution des simulations de la majorité des modèles hydrologiques et hydrauliques qu'il contient.
- ✓ Rassembler les informations géographiques
- ✓ Créer et gérer des bases de données géographiques
- ✓ Résoudre des problèmes avec l'analyse spatiale
- ✓ Créer des applications basées sur la carte

#### **II.3.2.1.2. Les apports du logiciel ARCGIS dans notre étude :**

- ✓ A partir du fichier MNT brute, nous allons procéder à un traitement pour le rendre exploitable, puis nous établissons le réseau hydrographique et la délimitation du bassin versant, et finalement nous calculons les paramètres climatique et hydrologique de forme physiques (surface, pente,  $T_c$ ,  $S_t$ , Lag, CN, R, K, LS, C, P, ...) Indispensables pour la fonction de transfert du modèle ;
- ✓ A partir de la combinaison des deux cartes d'occupation du sol et des sols que nous avons préparées auparavant, et qui sont importées vers le ARCGIS, nous allons

pouvoir calculer un paramètre d'état du bassin nommé CN nécessaire à la fonction de production

- ✓ Saisir les informations concernant les précipitations : hauteur et type d'averse ;
- ✓ Saisir les informations concernant le module débit de base et compléter les entrées de la fonction de production (la et % d'imperméable) ;
- ✓ Introduire la configuration de la simulation : date et heure de début, date et heure de fin et le pas de temps.

### II.3.3. Description du modèle HEC-HMS

Le modèle hydrologique HEC-HMS a été développé par le Hydrologic Engineering Center (HEC) de l'U.S. Army Corps of Engineers (USACE).

Le HEC-HMS est un système complet de modélisation hydrologique des bassins versants qui permet de simuler les processus pluie-débit, depuis les précipitations brutes jusqu'au débit total de ruissellement à un temps donné, à un point donné du bassin étudié. Sa conception a été lancée par l'USACE pour évoluer vers une nouvelle génération du logiciel qui va remplacer son antécédent le HEC-1, tous appartenant à la fameuse gamme HEC (HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS, ...). (AHBARI A. 2005).

➤ Le logiciel HEC-HMS permet de traiter ou de simuler à la fois les différentes données Suivantes :

- ✓ **Les précipitations** : Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique.
- ✓ **Les pertes** : Par infiltration, retenue ou évapotranspiration qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant.
- ✓ **Les ruissellements directs** : Qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge.
- ✓ **L'hydrologie fluviale** : Concernée par l'écoulement de l'eau dans le lit de la rivière.

#### II.3.3.1. Mentionner que les points forts résumés comme suit :

- Diversité dans les formalismes proposés : la variété remarquable de ces méthodes de calcul, offre à l'utilisateur l'opportunité du choix en fonction de ses moyens, ses finalités et de son expérience.
- Diversité dans les combinaisons modulaires possibles : ce critère est garanti par le principe de tâches séparées qui le distingue des autres modèles, et qui lui confie une caractéristique incroyable : « plusieurs modèles en un modèle ».



- Aptitude de calibration et nature des résultats issus : pour plusieurs modèles la calibration est effectuée par un autre programme, d'autres peuvent même la faire, mais avec un choix limité de fonctions objectives et d'optimisation. En plus, ces modèles ne peuvent afficher à la fin que les valeurs des paramètres calibrés, l'hydrogramme simulé et observé et la variation de la fonction objective. En revanche, le HEC-HMS avec ses deux fonctions d'optimisation, ses sept fonctions objectives sans oublier ses graphes explicatifs et analytiques, avec tout ceci, il accorde à la calibration une précision inédite, et à la modélisation une exploitation au bout des choses.

### II.3.3.2. Le module structural du bassin

- L'élément « Subbassin » : matérialise le bassin si la modélisation est globale, et les sous bassins si on opte pour une modélisation semi-distribuée. Parmi ses attributs de base : la surface, la fonction de production associée et la fonction de transfert associée.
- L'élément « Reach » : représente le plus souvent la rivière, et sert à faire la connexion entre les autres éléments. L'information de base attachée est la fonction de routage.
- L'élément « Reservoir » : décrit les réservoirs, les retenues de barrage, etc. ses caractéristiques attribuées permettent de définir les conditions stockage-déstockage.
- L'élément « Source » : permet d'ajouter des stations de mesure de débit ou de représenter les conditions aux limites.
- L'élément « Jonction » : utilisé pour combiner aux moins deux débits véhiculés par deux éléments, comme dans le cas d'une confluence entre deux rivières.
- L'élément « Diversion » : représente des endroits où se produit des prélèvements d'eau, c'est le cas par exemple des seguias et des canaux de diversion.
- L'élément « Sink » : simule l'exutoire des sous bassins versants.

### II.3.3.3. Simulation hydrologique par le logiciel HEC-HMS

#### A. Érosion et transport des sédiments

L'écoulement extérieur érode le sol et transportent les matériaux. Les sédiments sont souvent déposés dans les portées inférieures où la vitesse d'écoulement faible. L'érosion et le transport des sédiments mènent à un certain nombre de problèmes mieux évalué en même temps que la simulation hydrologique.

#### B. Propriétés de sédiment du bassin versant

L'érosion et la modélisation de transport des sédiments exigent un certain nombre de propriétés. Ces propriétés globales sont appliquées à tous les éléments dans le modèle de

bassin.

### C. Sélection d'une méthode d'érosion

La méthode d'érosion pour un sous bassin est choisie sur le rédacteur composant pour l'élément de sous bassin. Accéder au rédacteur composant en cliquant icône d'élément de sous bassin sur l'étiquette de « composants » de l'explorateur du bassin versant.

### D. Sélection d'une méthode de sédiment

La méthode de sédiment pour une portée est choisie sur le rédacteur composant pour l'élément de portée ; Les paramètres pour chaque méthode de sédiment sont présentés sur un rédacteur composant séparé du rédacteur d'élément de portée. Le rédacteur de « sédiment » est toujours montré à côté du rédacteur de « cheminement ».

#### II.3.3.4. Etapes d'une simulation avec HEC-HMS

Pour effectuer une première simulation, il est nécessaire de créer une base de données pour caractériser le bassin versant et déterminer les averses qui seront employées comme données d'entrée du modèle. Les principales étapes de la simulation sont :

Démarrage d'un nouveau projet

- Définition du modèle de bassin versant
- Entrée des données météorologiques
- Définition du modèle de précipitation
- Définition des paramètres de contrôle de la simulation
- Simulation USEL par HEC- HMS
- Création et exécution d'une simulation
- Visualisation des résultats

#### II.3.4. Le modèle HEC-RAS sous ARCGIS :

**II.3.4.1. Présentation :** HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center de l'U.SArmy Corps of Engineers. Il s'agit d'une nouvelle version d'un modèle hydraulique auparavant nommé HEC-2, qui comporte maintenant une interface graphique permettant d'éditer, modifier et visualiser les données d'entrée, de même qu'observer les résultats obtenus. (SGHARA N.2013)

HEC-RAS est un logiciel basé sur le modèle 1D de Saint Venant permanent ou non-permanent de calcul de la ligne d'eau en graduellement varié. Il résout « l'équation de l'énergie unidimensionnelle », les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements à

proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement.

Il utilise des équations d'hydraulique à surface libre (Saint-Venant 1D, Manning-Strickler...) et des modèles pour les seuils, le frottement etc.

Le calcul de transport des sédiments et le changement morphologique d'un canal mobile ;

Le calcul des écoulements permanents et non permanents dans un réseau de cours d'eau ;

Ce logiciel est capable de modéliser des ouvrages hydrauliques, qui se trouvent dans un tronçon du cours d'eau. Il permet de réaliser des sections transversales avec un coefficient de Manning variable, de différencier les zones actives et non actives dans un canal ou un oued et de créer des sections transversales interpolées. (SGHARA .N,2013)

#### **II.3.4.2. Description du modèle**

Dans le cadre du modèle hydraulique nous avons utilisé le logiciel HEC-RAS. Ce logiciel permet de modéliser les débits et les hauteurs d'eau dans une rivière. La première étape consiste à modéliser la rivière. Le modèle de la rivière nous a été fourni par les enseignants. Ce modèle se constitue d'une succession de sections dans lesquelles on calcule le débit et la hauteur d'eau : elles correspondent au maillage de la rivière. Ces sections ont été mesurées et sont donc assez fidèles à la réalité. On peut y observer le lit majeur et le lit mineur ainsi que l'érosion due aux lacets de la rivière. Le Lez comporte de nombreux seuils sur la partie que nous étudions et ces seuils sont également modélisés.

#### **II.3.4.3. Fonctionnement de HEC-RAS :**

HEC-RAS est capable de modéliser avec une extrême finesse un large éventail de conditions d'écoulement. Le centre de contrôle, pièce maîtresse d'HEC-RAS permet de gérer et de combiner les différents types de données :

- Géométrie ;
- Débits et conditions aux limites ;
- Conditions de calcul ;
- Résultats.

Un même projet peut contenir plusieurs descriptions géométriques, les conditions de calcul étant des combinaisons de débits et de géométries.

#### **II.3.4.4. Géométrie du cours d'eau simulé :**

Les réseaux de cours d'eau sont organisés en biefs séparés par des connections où s'opèrent les additions et séparations de débits. Il est possible de simuler des réseaux ramifiés

et maillés. Dans chaque bief, les profils en travers définissant la géométrie sont classés selon leur position kilométrique.

Les données relatives à chaque section sont :

- Le profil en travers, défini par une série de couples distance-altitude ;
- Les coefficients de rugosité et de perte de charge ;
- La distance à la section suivante.

Une série d'options permet de placer des obstacles et des zones d'eau morte.

D'autres éléments, tels que ponts, ponceaux, épis, glace peuvent également être simulés par HEC-RAS.

#### **II.3.4.5. Débits, conditions aux limites et de calcul**

Les calculs peuvent être effectués pour plusieurs débits simultanément, soit en régime torrentiel, soit en régime fluvial, ou pour les deux régimes d'écoulements. Dans ce dernier cas, HEC-RAS utilise l'équation de quantité de mouvement pour déterminer les changements de régime torrentiel fluvial, caractérisés par un ressaut. (SGHARA N.2013)

#### **II.3.4.6. Visualisation des Résultats**

Tous les résultats obtenus peuvent être consultés sous forme graphique (profil en long, sections, courbes hauteur débit, vue 3D) ainsi que sous forme de tableaux, exportables, via les procédures standard de copier-coller, vers tout tableur ou traitement de texte

#### **II.3.4.7. Objectif du logiciel :**

L'objectif principal de ce programme est tout à fait simple, il est conçu pour exécuter le calcul hydraulique unidimensionnel pour tous les réseaux de canaux naturels et artificiels par le calcul des hauteurs de la surface de l'eau en toute section d'intérêt pour un ensemble de données d'écoulement en régime permanent et par des hydrogrammes de propagation des crues pour la simulation de l'écoulement en régime non permanent.

HEC-RAS est un logiciel basé sur le modèle 1D de Saint Venant permanent ou non-permanent de calcul de la ligne d'eau en graduellement varié. Il résout « l'équation de l'énergie unidimensionnelle », les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements à proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement.

# Chapitre III :

## Présentation du milieu étude : le bassin versant de l'oued Labiod

### Chapitre III : Présentation du milieu d'étude : le bassin versant de l'oued Labiod

#### III.1. Introduction :

Le réseau hydrographique de l'Algérie est drainé par plusieurs grands oueds répartis en dix-sept bassins versants du pays. Les ressources renouvelables en eaux superficielles totalisent environ 9.8 km<sup>3</sup>/an pour l'ensemble du pays dont le Sahara, le bassin le plus grand, ne renferme que 0.6 km<sup>3</sup>/an. Les ressources en eau souterraine renouvelables contenues dans les nappes du nord du pays sont estimées à près de 1.5 km<sup>3</sup>/an.

Le sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraines très importantes provenant des nappes du continental intercalaire et du complexe terminal. Les ressources totales renouvelables s'élèvent à 11.3 km<sup>3</sup>/an, les ressources exploitables sont évaluées à 7.9 km<sup>3</sup>/an. (Ghenim A., Terfous A., et Seddini A., 2007).

#### III.2. Situation géographique du B.V d'oued LABIOD

Le bassin versant Oued El Abiod est situé dans le massif des Aurès. Il fait partie du grand bassin hydrologique de Chott Melghir (codé 06 par l'ANRH) qui se compose de trois principaux oueds (sous- bassin): oued Ichmoul ; oued Boughrara et oued Tkout formant par leur confluence oued Labiod.

L'Oued Labiod est formé par la réunion des torrents descendants des raides pentes de Chelia (2328m) et Ichemoul (2100m). Après avoir traversé Tighanimine, il s'encaisse dans les canyons de Rhoufi et les gorges de Mchouneche, jusqu'aux gorges de Foum el Gherza.

Le bassin versant est caractérisé par sa dissymétrie, une partie montagneuse au Nord à plus de 2000 m (Chelia) et une autre basse au Sud (295m El Habel). Il s'étale sur une superficie de 1300 Km<sup>2</sup> circonscrite par un périmètre de 218Km.

Le bassin versant objet d'étude est situé à 60 km au Sud-Est de la wilaya de Batna, il englobe 6 Communes et 3 Daïras qui s'étendent de Khenchela (Nord-est) jusqu'à Biskra (Sud-ouest)

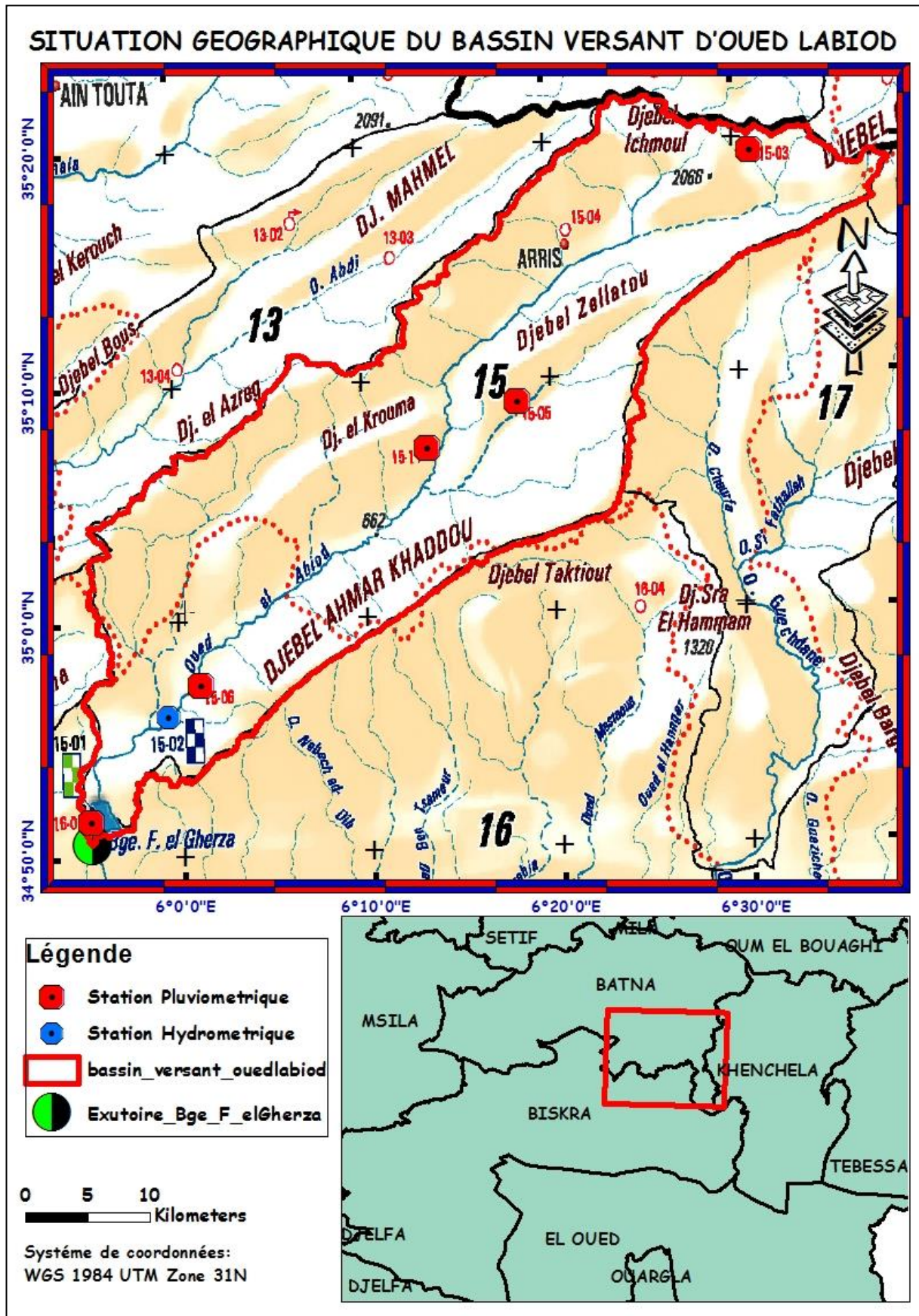


Figure III.1 : Situation géographique du bassin versant d'oued labiod (établi par ArcGis)

### III.3. Couvert végétal

La végétation joue un rôle essentiel dans la protection du sol. Elle exerce une protection mécanique directe sur l'écoulement fluviale, en diminuant la force vive des eaux et en favorisant leur infiltration. Cette résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense. Elle fournit une quantité appréciable d'humus qui joue le rôle de ciment et maintient la structure en grumeaux. Les formations végétales protègent donc le sol, mais n'empêchent pas totalement contre l'érosion. Elle est toujours très faible.

L'absence du couvert végétal dans certaines zones a favorisé un ruissellement violent ce qui se répercute négativement sur l'apparition de l'érosion. (Haoues.C,2007)

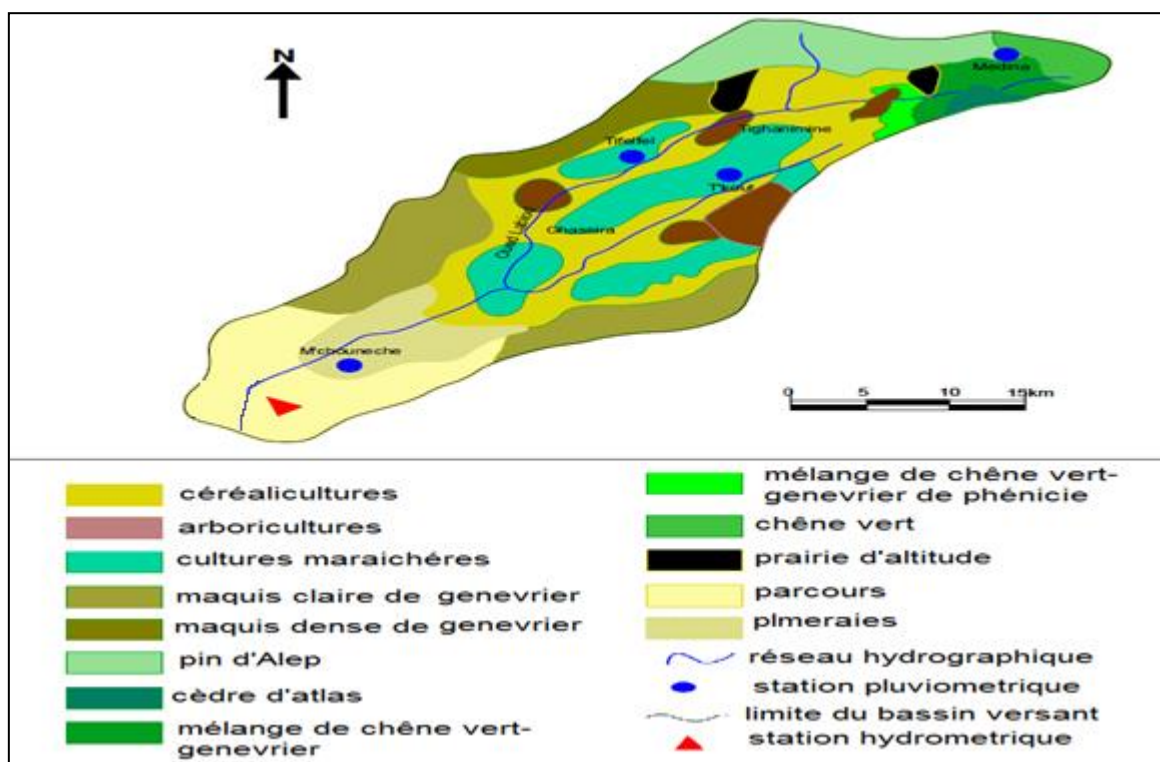


Figure III . 2 : Carte d'occupation du sol dans le bassin versant. (Haoues.C,2007)

### III.4- Cadre géologique

Le massif des Aurès constitue l'extrémité orientale de la chaîne Atlasique; séparant ainsi les hautes plaines constantinoises du Sahara. A l'est les monts de Nememcha limitent ce massif sans discontinuité, avec un abaissement sensible des sommets sans dépasser la côte 1800 m.

Au sud la plate-forme saharienne, cette et a l'Ouest les deux bassins Néogène le Hodna et son annexe El Outaya. (Haoues.C,2007)



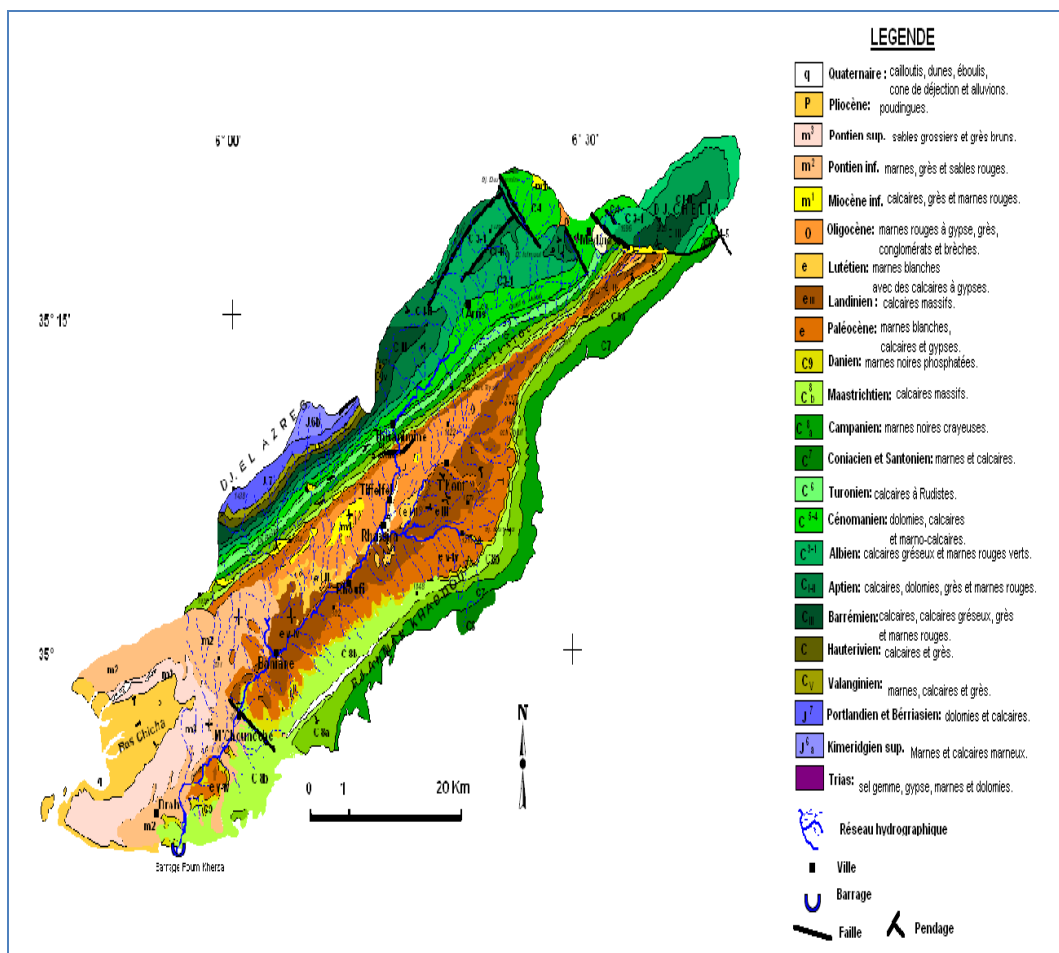
**III.4.1- Stratigraphie :**

La région de l’oued El Abiod présente une série stratigraphique qui s’échelonne du Jurassique au Quaternaire faisant 6000 m d’épaisseur environs. Géologiquement le bassin versant est subdivisé en deux parties :

La première partie comprise entre djebel Chélia jusqu’au gorges de Tighanimine est occupée par les formations du Cénomanién, de l’Albien, et de l’Aptien.

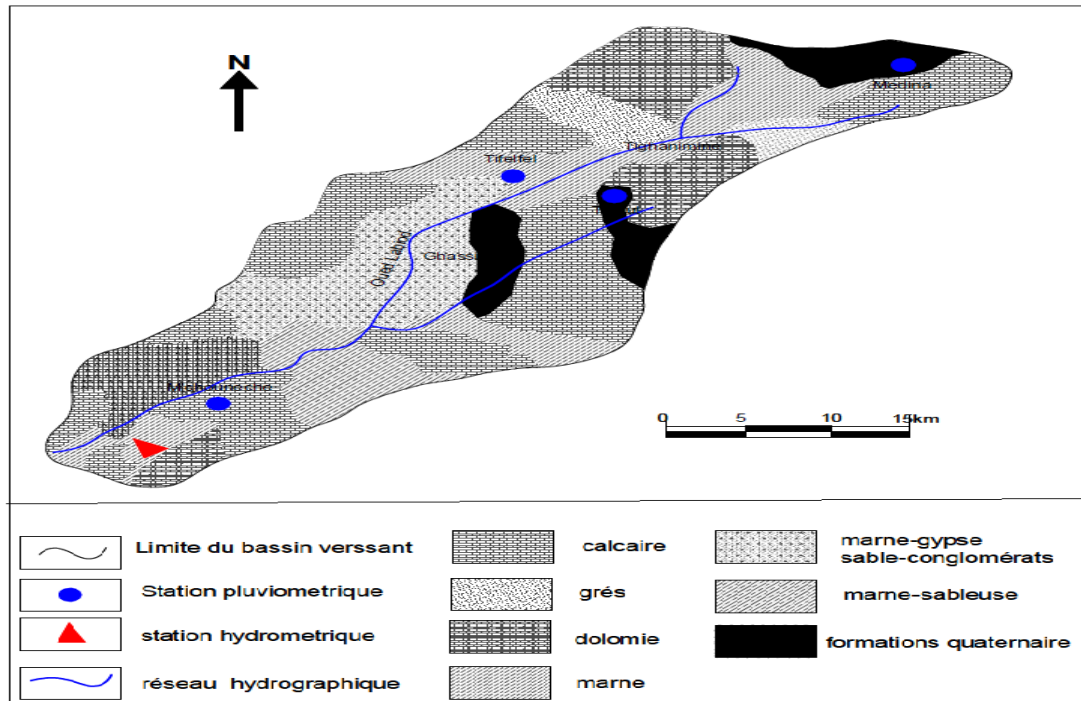
La deuxième partie s’étend des gorges de Tighanimine jusqu’aux gorges de Foug El Gherza, et qui contiennent les formations du Damien, de l’Eocène inférieur et moyen.

La description lithologique des deux affleurements est comme suit : **(Haoues.C,2007)**



**Figure III .3 :** Carte géologique de la vallée d’Oued el Abiod **(Haoues.C,2007).**

Théoriquement, la répartition lithologique du B.V. montre des zones à érodibilité moyenne à faible au Nord et d'autres secteurs à érodibilité forte au sud en raison de la lithologie favorable qui coïncide avec l'absence du couvert végétal, ce qui favorise un ruissellement violent et donc l'érosion sera plus ou moins importante.



**Figure III. 4 :** Carte lithologique du bassin versant Oued el Abiod. (Haoues.C,2007).

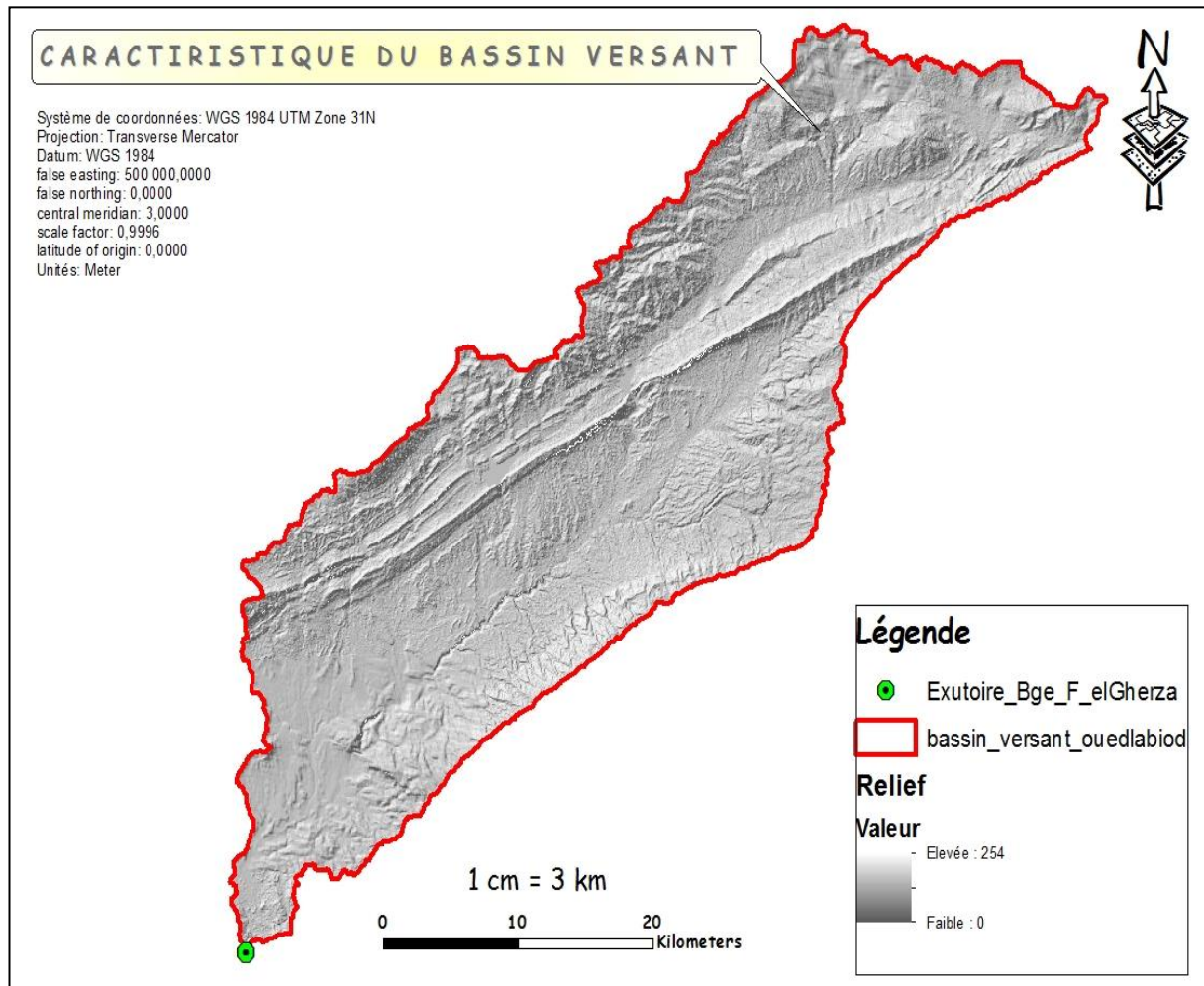
### III.5. Morphométrie du bassin versant :

Les différents paramètres morphométriques du bassin notamment, la forme, l'altitude caractéristique, la pente et le relief, interviennent et souvent d'une façon combinée dans les modalités de l'écoulement, donc il convient de les préciser dès le début dans toute étude.

#### III.5.1. Caractéristiques des altitudes (le relief)

L'importance des reliefs et leur articulation dans l'espace jouent un rôle essentiel dans le bilan hydrique et par conséquent dans l'aptitude aux écoulements.

L'orographie définit un gradient pluviométrique et thermique chaque bassin est caractérisé par la répartition altitudinale de son impluvium.



**Figure III.5 :** Carte des reliefs du bassin versant oued labiod (établi par ArcGis)

### III.5.2. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude.

Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

Le but recherché ici, est la détermination de la classe de relief, la hauteur moyenne, la médiane et le pourcentage des aires partielles entre les différentes courbes de niveau.

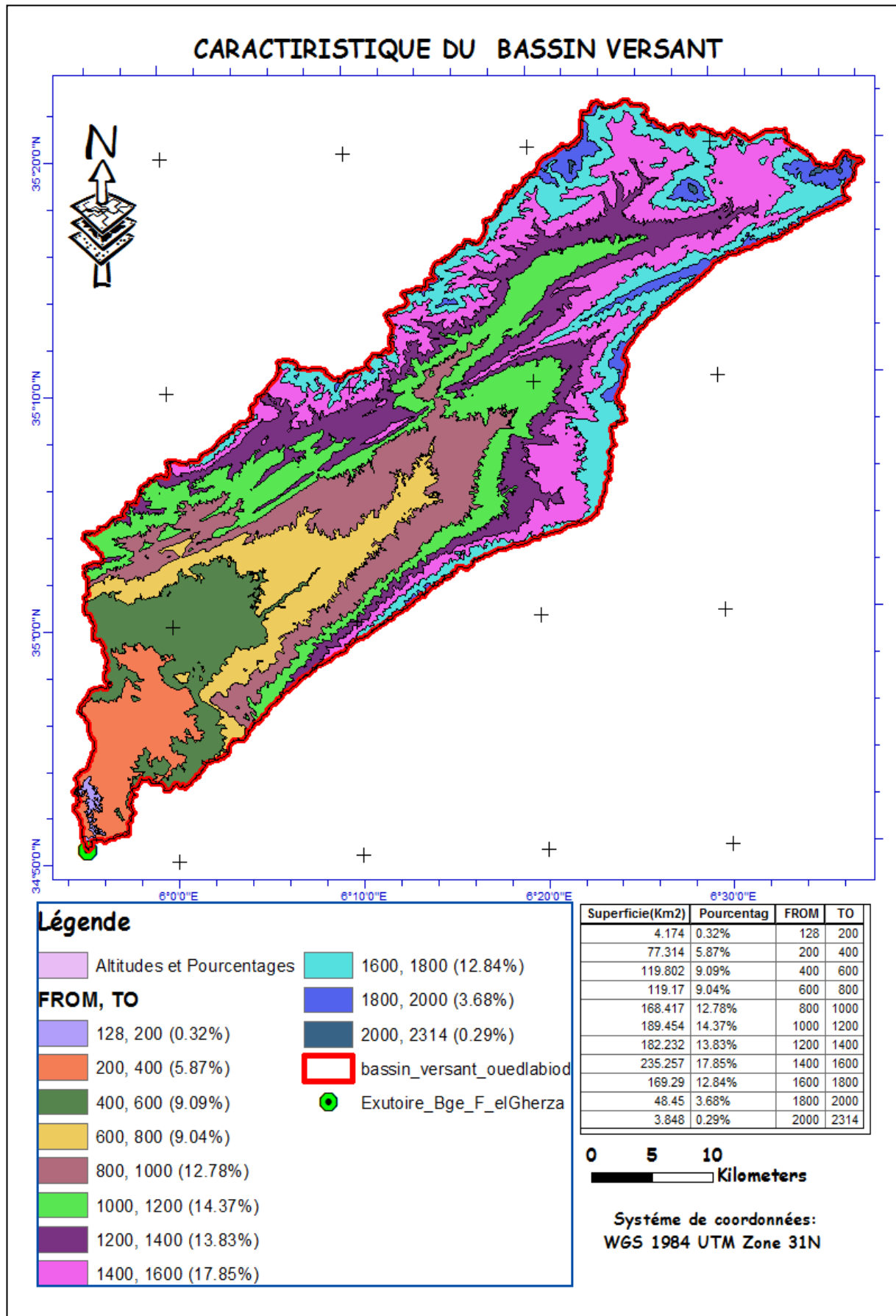


Figure III.6 Carte hypsométrique du Bassin d'oued El abiod (établi par ArcGis)

**III.5.3. Les indices de pente :**

**III.5.3.1. Indice de pente de Roche (IP) :** Cet indice rend compte de l'influence de la pente sur le ruissellement, il est défini à partir du rectangle équivalent :

$$J_i = J_{i.1} = d_i \text{ (la dénivelée).}$$

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{B_i \cdot d_i} \dots\dots\dots [1]$$

**L :** Longueur du rectangle équivalent.

**B<sub>i</sub> :** Fraction de la surface totale du bassin versant comprise entre J<sub>i</sub> et J<sub>i.1</sub> donnée par la répartition hypsométrique.

**III.5.3.2. L'indice de pente globale (I<sub>g</sub>) :** Cet indice prend en compte la dénivelée D entre H5% et H95% par rapport à la longueur du rectangle équivalent L.

$$I_g = \frac{D}{L}$$

- D = H5% - H95%

**III.5.3.3. L'indice de pente moyenne (I<sub>m</sub>) :** C'est le rapport entre la dénivelée totale du bassin versant et la longueur du rectangle équivalent L.

$$I_m = \frac{D}{L} \dots\dots\dots [2]$$

- D = H max - H min

**III.5.3.4. La dénivelée spécifique :**

$$D_s = I_g \times \sqrt{S}$$

**Tableau III.1 :** La classification de l'ORSTOM

Classe de relief	DS (m)	Type
R1	DS < 10	Très faible
R2	10 < DS < 25	Faible
R3	30 < DS < 50	Assez faible
R4	60 < DS < 100	Modéré
R5	110 < DS < 250	Assez fort
R6	260 < DS < 500	Fort
R7	DS > 500	Très fort

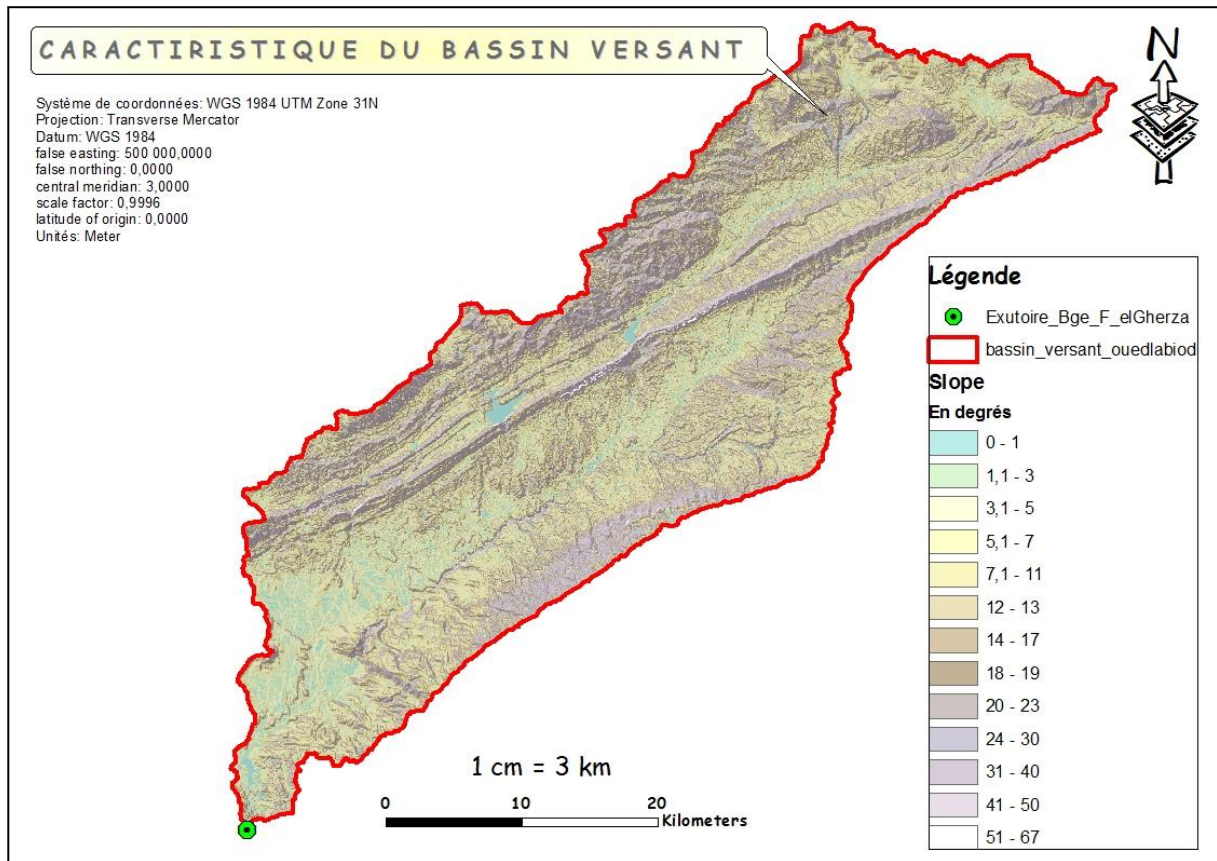


Figure III.7 : Carte hypsométrique du Bassin d’oued El abiod (établi par ArcGis)

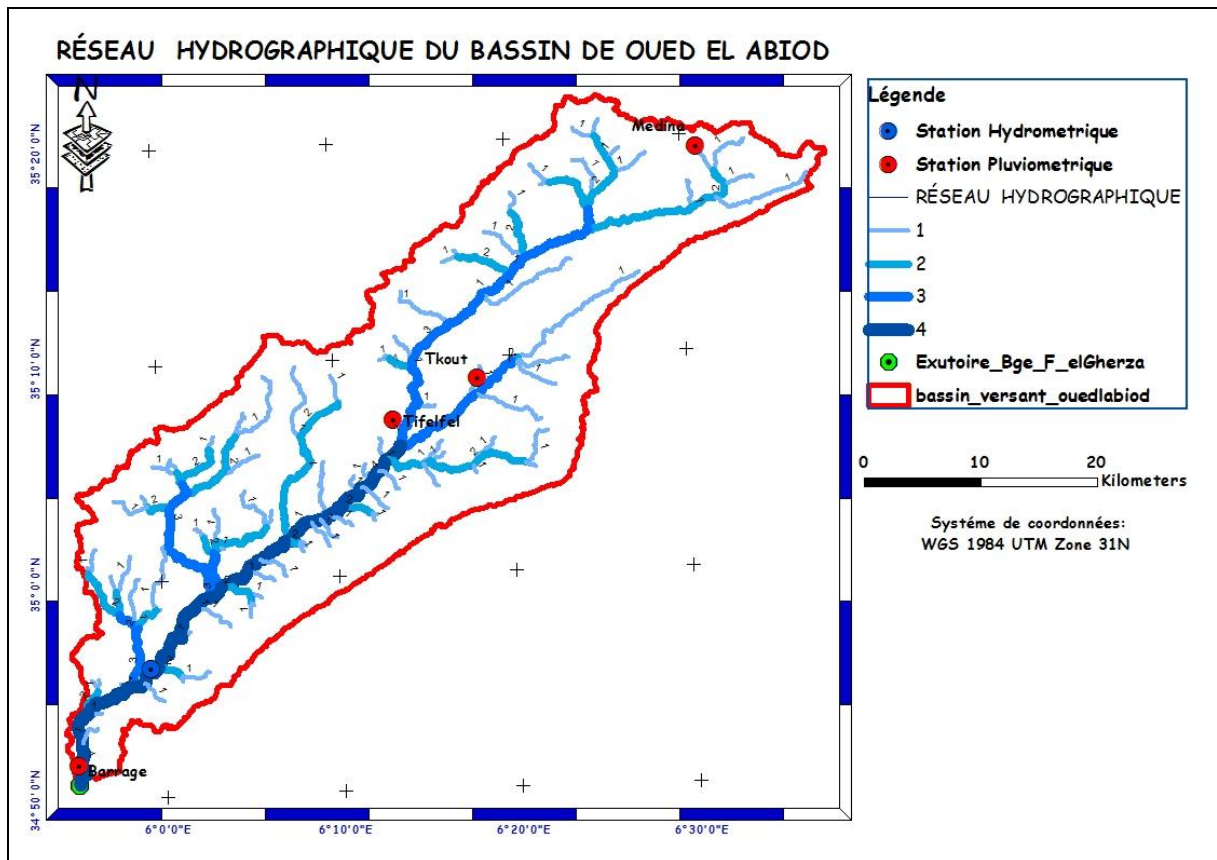


Figure III.8 : Carte du réseau hydrographique du bassin de oued El abiod (établi par ArcGis)

**Tableau III.2** : récapitulatif des caractéristiques du B.V d'Oued LABIOD

Paramètres	Unités	Symboles	Valeurs
<b>Longueur du thalweg principal</b>	Km	Lp	50.01
<b>Superficie du BV</b>	Km <sup>2</sup>	S	1314.72
<b>Périmètre du BV</b>	Km	P	870.157
<b>Altitude maximale</b>	m	Hmax	2314
<b>Altitude moyenne</b>	m	Hmoy	1170
<b>Altitude minimale</b>	m	Hmin	128
<b>Altitude 5%</b>	m	H5%	2096
<b>Altitude 95%</b>	m	H95%	556
<b>Indice de compacité de Gravelius</b>	--	Kc	1.56
<b>Rectangle équivalent</b>			
<b>Longueur</b>	Km	L	81.97
<b>Largeur</b>	Km	l	16.05
<b>Indice de pente global</b>	m/Km	Lg	17.98
<b>Dénivelée spécifique</b>	m	Ds	666.25
<b>Classe de relief suivant la classification de l'OSTROM</b>	--	R7(relief très fort) Ds>500	
<b>Densité de drainage</b>	Km/Km <sup>2</sup>	Dd	3.80
<b>Temps de concentration</b>	h	Tc	16

### III.6. Etude des précipitations

Pour l'étude des précipitations du bassin versant de l'oued El Abiod, on dénombre quatre (4) stations pluviométriques (Médina, Tifelfel, Tkout et la station du barrage) et une station hydrométrique (Mchouneche). Le tableau ci-dessous détaille les caractéristiques des stations et les séries d'observations.

**Tableau III.3 :** Caractérisation des stations pluviométriques et hydrométrique

Nom de la station	Code	X	Y	Z(m)
Tifelfel	061511	821.9	207.65	740
Médina	061503	846.80	231.10	1450
Tkout	061505	829	211	998
Mchouneche	061506	800.8	186.8	390
Barrage	061601	9864.41	15631.09	200

#### III.6.1 Précipitations moyennes annuelles :

On dispose des données concernant 4 stations pluviométriques dont le fonctionnement date de 1969 ainsi que la station hydrométrique qui a fonctionné depuis 1947.

✓ *Méthode des isohyètes :*

Les cartes isohyètes sont tracées en joignant les points d'égaies précipitations. Ceci nécessite une très bonne connaissance de l'environnement général du bassin versant.

La pluie moyenne sur la surface S est donnée par la moyenne pondérée

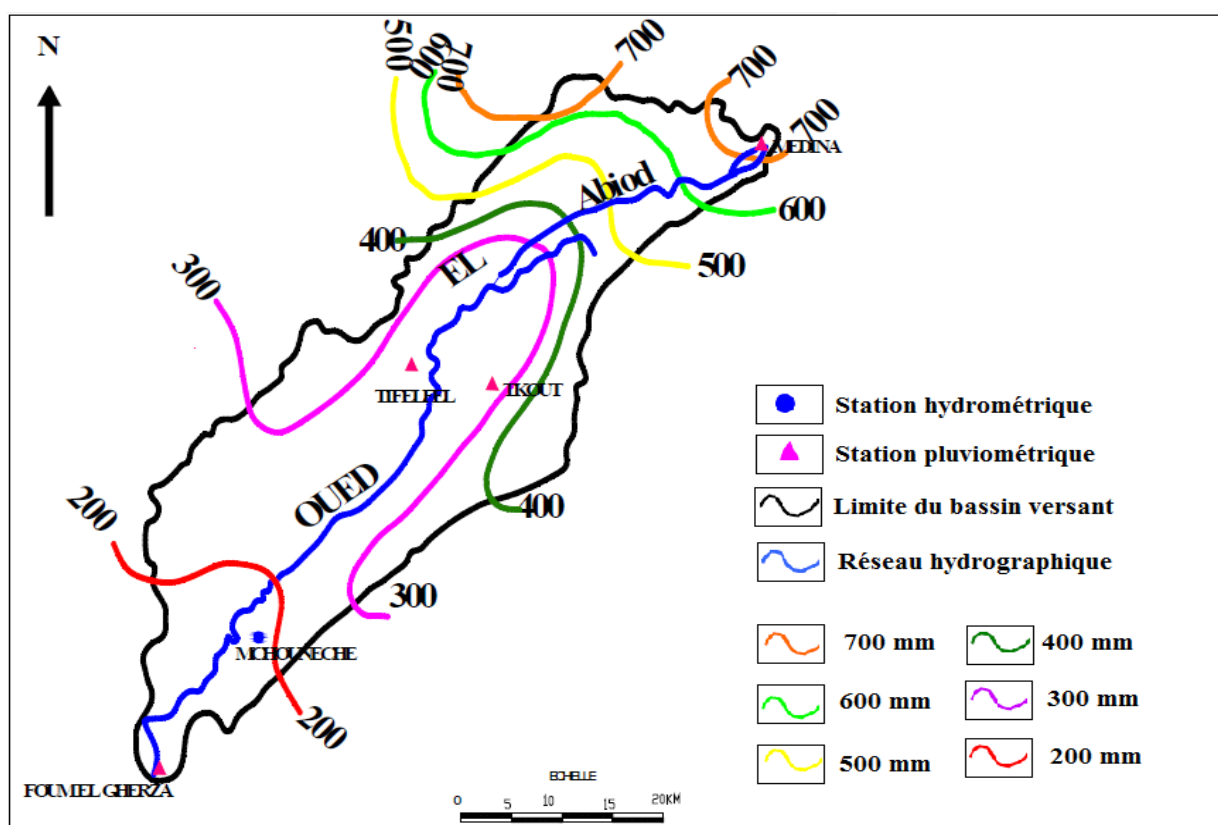
$$\bar{P} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{S_i P_i}{S_T} \dots\dots\dots[3] .$$

**Tableau III .4 Estimation de la lame d'eau par la méthode des isohyètes.**

N°	Isohyètes des hauteurs (mm)	Zone d'influence Si(Km <sup>2</sup> )	Pi	Si*Pi
1	>600	27.20	660.80	17973,76
2	600-500	70.40	550.60	38762,24
3	500-400	112	483.10	54107,2
4	400-300	150.80	388	58510,4
5	300-200	207.60	298.50	61968,6
6	200-150	566	186.70	105672,2
7	<150	163.30	186.50	30455,45



La pluie moyenne sur l'ensemble du bassin est de l'ordre de **283 mm**.



**Figure III .9 :** Estimation de la pluviométrie par les isohyètes

### III .6. 2. Précipitations moyennes mensuelles :

On dispose de données concernant la station de Tkout, avec une période allant de 1960 à 2005.

**Tableau I.5 :** Répartition mensuelle des précipitations (Source : A.N.R.H)

mois	sept	octo	Nov	Dec	Janv	Fer	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
P (mm)	27.5	25	23.7	17.1	16.6	16.4	27.6	23.6	23.2	15.2	5.8	16.9	238.6

Le bassin objet d'étude est caractérisé par l'irrégularité et la diminution des précipitations qui s'affirment en allant de plus en plus vers le Sud (climat aride).

### III.6.3. Ajustement des précipitations moyennes annuelles à la loi Log-normale

L'ajustement par la loi Log-normale est détaillé comme suit : les données statistiques des pluies sont rapportées à une autre échelle à savoir l'échelle du log normale.

Nous avons l'équation de la droite de Galton :  $\Rightarrow \text{Ln}(X_{p\%}) = \overline{\text{Ln}(X)} + \delta_{\text{Ln}} * U_{p\%} \dots$

$\text{Ln}$  : symbole de l'opérateur mathématique correspondant au logarithme népérien.

$X_{p\%}$  : précipitation probable à  $p\%$ .

$\overline{\text{Ln}(X)}$  : Moyenne arithmétique des logarithmes des précipitations observées.

$\delta_{\text{Ln}}$ : la variance, calculée pour les précipitations observées sous l'échelle logarithmique sa

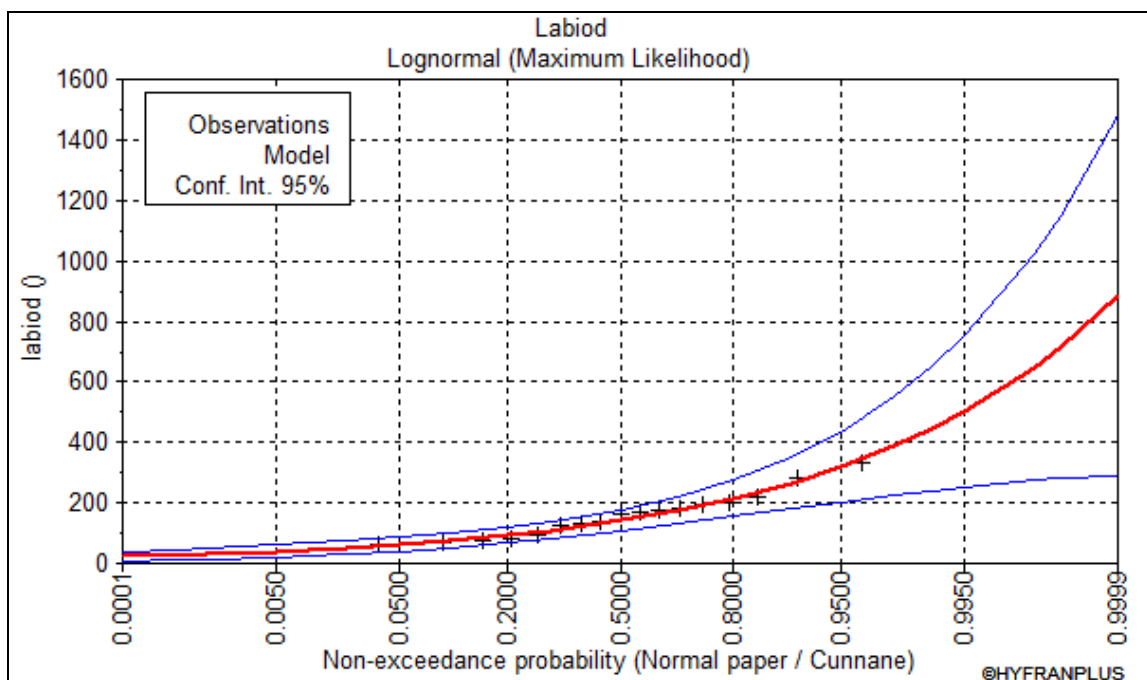
Formule s'écrit comme suit :

$$\delta_{\text{Ln}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{i=n} [\text{Ln}(X_i) - \overline{\text{Ln}(X)}]^2} \quad \text{Si } n < 30 \dots \dots \dots [4]$$

$$\delta_{\text{Ln}} = \sqrt{\frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^{i=n} [\text{Ln}(X_i) - \overline{\text{Ln}(X)}]^2} \quad \text{Si } n \geq 30 \dots \dots \dots [5]$$

$U_{p\%}$ : variable réduite de Gauss..

Les résultats obtenus dans le tableau N°III-8 et dans la Figure III.6



**Figure III .10** : Ajustement des pluies maximales journalières a la loi de log-normal

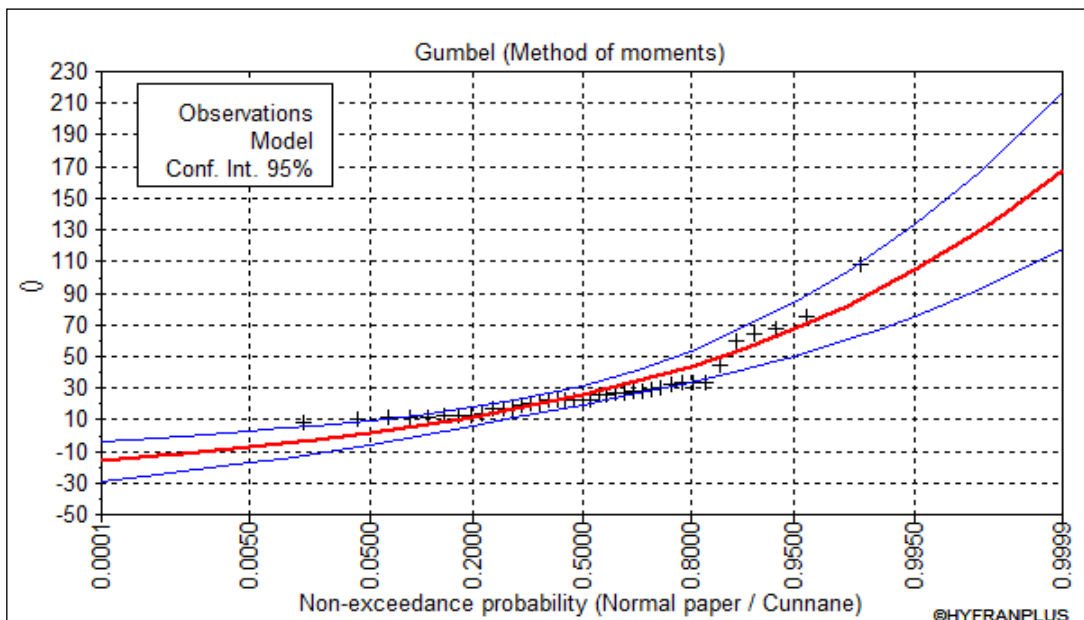
**Tableau N°III-6** : Les résultats de la loi de Galton.

Nombre d'observations : 29					
T = 1/q	q = F(X) (probabilité au non-dépassement)				
T	Q	XT	Ecart-type	Intervalle de confiance (95%)	
100	0.99	445	6.94	240	650
50	0.98	4389	5.79	226	533
20	0.95	319	5.05	202	435
10	0.90	266	4.69	181	352

**III.7.4. Ajustement des précipitations maximales journalières à la loi de Gumbel**

La loi de Gumbel est très universellement utilisée pour caractériser la distribution de valeurs extrêmes. La fonction de répartition de la loi de Gumbel s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right) \dots\dots\dots [6]$$



**Figure III.11** Ajustement des pluies maximales journalières a la loi de Gumbel

### III.7. Etude des apports solides :

Les sédiments qui pénètrent dans une retenue sont transportés jusqu'à la retenue par les lits mineurs des réseaux hydrographique ainsi que par mis elle direct. Ces apports solides qui sont d'une granulométrie extrêmement variée, allant des graviers et des cailloux jusqu'aux particules de limons et d'argile.

#### III.7.1 Estimation du transport solide de la zone d'étude

L'estimation des apports solides permet de quantifier les volumes solides annuels et de prévoir la durée de vie des ouvrages de protection tels que les ouvrages et les de retenue.

Plusieurs formules ont établi par des hydrologues, en vue de quantifier les apports solides. Dans notre cas, on se base sur les méthodes recommandées par l'ANRH, à savoir les formules de Tixeront, et Gravellovic.

##### ■ Méthode de Tixeront-Sogreah

Cette méthode simple permet d'estimer le transport solide en fonction de la lame d'eau ruisselée :  $T_a = K L_e^{0.15}$  .....[7]

**Avec :**  $L_e$  : la lame d'eau ruisselée (mm).

$K$  : un paramètre dépendant de la perméabilité du sol, il est donné par le tableau suivant :

**Tableau III.7 : Variation du paramètre K en fonction de la perméabilité**

<b>K</b>	<b>Degré de perméabilité</b>
8.5	Élevée
75	Moyenne
350	Moyenne à faible
1400	Faible
3200	Imperméabilité

Dans notre cas, le paramètre  $K$  est de 350.

$T_a=615$  (t/Km<sup>2</sup>/an)..... [8]

### ■ Formule de Gravellovic :

Une formule très applicable en Algérie, cette équation prend en considération plusieurs paramètres :

$$T_0 = T_{sp} * G_{rm} \dots\dots\dots[9]$$

tel que :

$$T_{sp} = T \cdot P_{moy} \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3} \text{ Tel que } \left[ T = \sqrt{\frac{t}{10}} + 1 \right]$$

$$G_{rm} = \frac{(\sqrt{P} + H_{moy})}{0,2(L + 10)} \dots\dots\dots[10]$$

Avec :

- $T_0$  : taux d'abrasion [t/Km<sup>2</sup>/an] ;
- $T_{sp}$  : le taux de la production annuel des matériaux en [m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/an] ;
- $G_{rm}$  : taux de rétention des sédiments produits par le bassin ;
- $T$  : coefficient thermique ;
- $Z$  : coefficient d'érosion relative en fonction de la description du B.V,  $Z = 0.8$ ;
- $P_{moy}$  : Pluie moyenne annuelle [ $P = 283$  mm] ;
- $t$  : température moyenne annuelle [°C] ; pour notre cas  $t = 20^\circ\text{C}$
- $P$  : périmètre du bassin versant [ $P = 217$  Km] ;
- $L$  : longueur du talweg principal [ $L = 103$  Km] ;
- $H_{moy}$  : Altitude moyenne [ $H_{moy} = 1143$  mm].

A, N :  $T_0 = 717 \text{ t/Km}^2/\text{an}$

Les résultats de calcul par les différentes méthodes sont donnés par le tableau suivant :

**Tableau III.8: Calcul du transport solide (Tonnes/an)**

Bassin	Tixeront	Gravellovic
Oued Labiod	800 000 t/an	932 000 t/an

**Discussion :** d'après les caractéristiques détaillées dans les tableaux précédents on voit que le taux d'abrasion moyen est de 665 T/km<sup>2</sup>/an. Vue la superficie du bassin et les

intensités pluviométriques, on conclut que notre bassin présente une forte vulnérabilité à l'érosion et aux transports solides.

### **III.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les principales caractéristiques hydrologiques et climatologiques du bassin versant de l'oued Labiod, soumis à un climat aride et un régime hydrologique très irrégulier.

De par sa superficie et sa lithologie, le bassin versant de l'oued Labiod est vulnérable à l'érosion et aux transports solides.

De ce fait, dans le chapitre suivant, une étude des transports solides en période de crue seront détaillée, en vue de simuler les épisodes débit-Mes qui pourront prévoir les sédiments à l'exutoire du bassin.

Chapitre IV :  
APPLICATION DU  
MODELE  
(HYDROLOGIQUE ET  
HYDRAULIQUE)

CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE (HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE)

**PARTIE -A-. La modélisation du bassin du Labiod avec HEC-HMS :**

**IV. Les données d’entrée du modèle :**

**IV.1. Le modèle numérique du terrain :**

Avant de procéder à n’importe quelle opération de préparation d’un fichier de simulation HMS, il est primordial d’avoir à sa possession le MNT de la zone d’étude, dont le rôle est fondamental dans la caractérisation physique du bassin et le calcul des paramètres. Ce type de MNT dont les propriétés sont définies dans le tableau 13, va subir des traitements sur le logiciel ARCGIS pour le rendre prêt à l’utilisation, à savoir :

- Convertir la projection initiale à une projection planimétrique afin de déverrouiller le processus de caractérisation du bassin.
- Découper la zone d’étude afin de minimiser le temps de calcul et augmenter sa précision.
- Ajuster le MNT à la topographie locale en se référant à une carte topographique par exemple.
- Remplir les dépressions éventuelles dues opérations précédentes.

**Tableau IV.01:** Les caractéristiques du MNT utilisé dans la modélisation

Caractéristiques	Descriptions
Capteur Satellit	Aster Global SRTM
Dimensions de la scène	1 degré par 1 degré
Résolution	1 arc-second (30 m)
Projection	Géographique latitude et longitude
Géoïde de référence	WGS 84 UTM zone 31N
Numéro de la scène utilisée	ASTGTM2_ N34E005, N34E006 _ N35E006, N35E005
Exutoire_(Bge_F_elGherza)	5° 55' 5.847" E et 34° 50' 38.432" N
Date d’acquisition des données	08 Decembre 2015



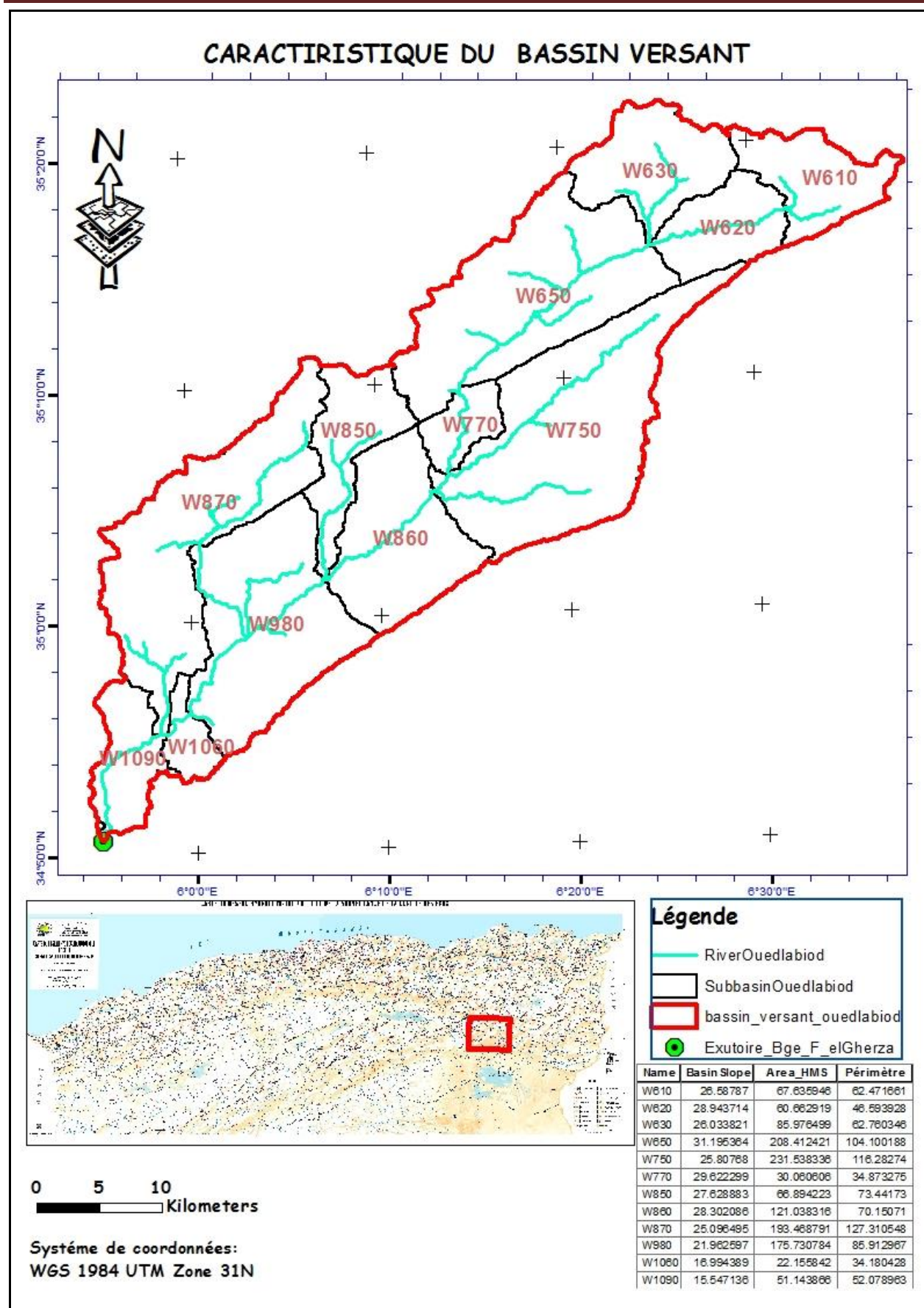


Figure IV.1 : Decoupage Bassin Versant Oued Labiod (etabli par ARCGIS)

IV.1 .2. Fonctionnalités

Les données d'entrée peuvent être conçues pour les éléments de bassins versants comme les sous bassins et les tronçons de cours d'eau ou bien simultanément pour des groupes d'éléments analogues.

- Les principales étapes –
- ✓ 1<sup>ère</sup> étape de fenêtre Preprocessing les raster (Fil, Fdr, ...) et les vecteurs ;
- ✓ 2<sup>ème</sup> étape de fenêtre Project Setup (Démarrage d'un nouveau projet)
- ✓ 3<sup>ème</sup> étape de fenêtre Basin Processing
- ✓ 4<sup>ème</sup> étape de fenêtre Characteristics (pente bassin...)
- ✓ 5<sup>ème</sup> étape de fenêtre Parametres (Définition du modèle de bassin versant, .....)
- ✓ Étape finale de fenêtre HMS (exporte HMS data).

Ainsi les sousroutines principales du modèle sont :

**Sous bassin (*Subbasin*)** : L'écoulement est calculé à partir des données climatiques en considérant les pertes par rétention et infiltration et la transformation du ruissellement en écoulement concentré dans le réseau hydrographique.

**Tronçon (*Reach*)** : L'affluent résulte d'autres éléments du système (tronçon, réservoir ...). L'écoulement est calculé en utilisant une des méthodes disponibles pour simuler la transformation de l'écoulement dans le cours d'eau (Muskingum, Muskingum, Cunge, Onde cinétique etc...).

**Réservoir (*Réservoir*)** : Un réservoir est un élément du système avec un affluent (entrée) ou plus (toutes les entrées sont additionnées pour obtenir une seule entrée dans le réservoir) et une seule sortie.

**Jonction (*Junction*)** : Une jonction est un élément du système avec une ou plusieurs entrées et une seule sortie. Toutes les entrées additionnées pour obtenir une seule entrée.

**Transfert (*Diversion*)** : Le transfert est un élément du système permettant le transfert de l'écoulement ; s'il y a lieu plusieurs entrées sont additionnées pour obtenir une seule entrée.

**Source (*Source*)** : Une source est un élément du système sans entrée. La source peut être utilisée pour représenter des conditions aux limites du bassin versant simulé.

**Exutoire (*Sink*)** : Un exutoire est un élément du système avec une ou plusieurs entrées mais aucune sortie. L'exutoire peut être utilisé pour représenter le point le plus bas d'une région où l'écoulement y débouche (cuvette, dépression, exutoire, mer, ...)

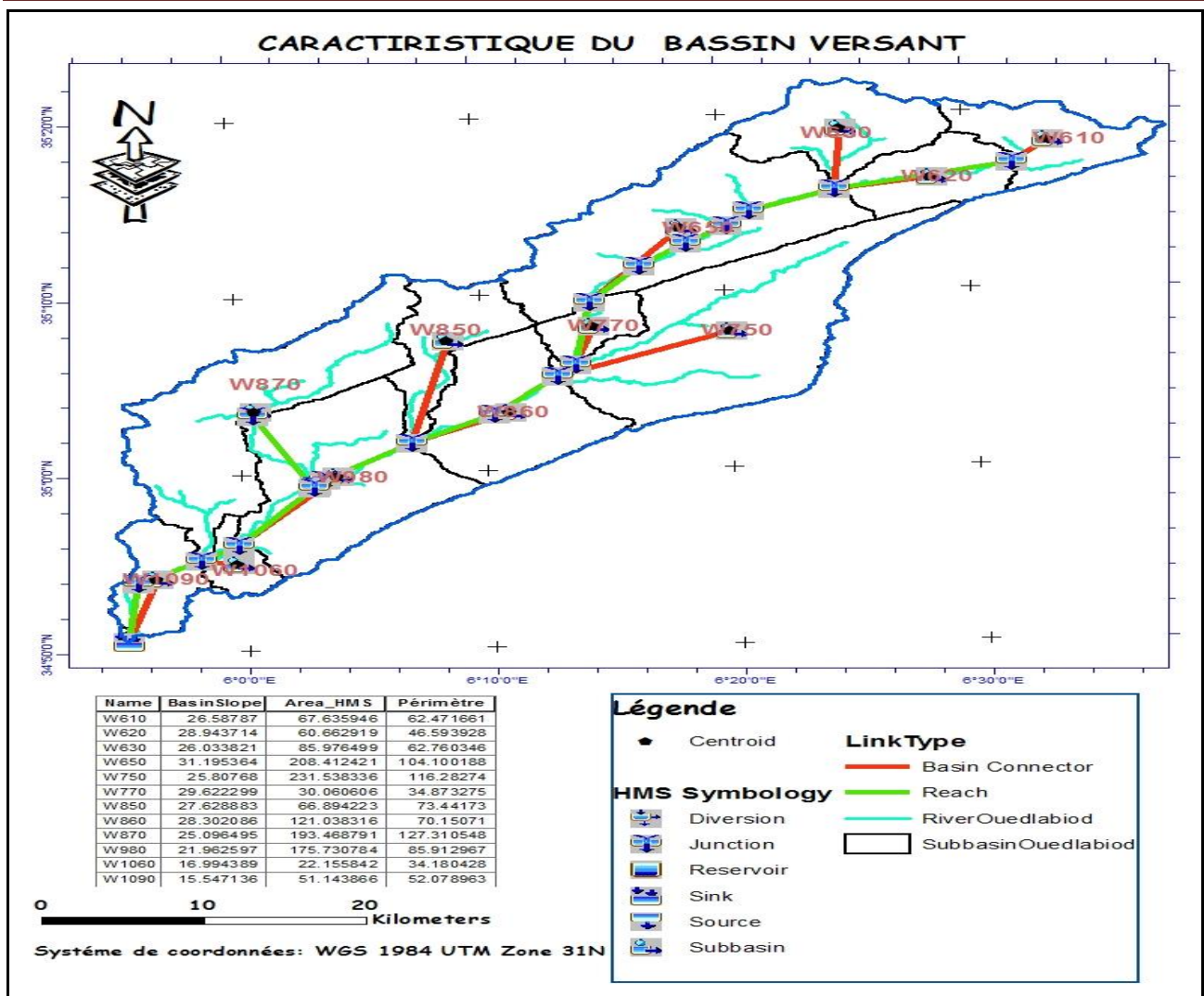


Figure IV.2: Affichage HEC-HMS Bassin Versant et Les Sous Bassins. (etabli par ARCGIS)

IV.1 .3. Modélisation du comportement hydrologique d’un bassin versant

La modélisation d’un bassin versant consiste, en premier lieu, en un découpage de celui-ci en plusieurs sous-bassins versants élémentaires, ensuite, spécifier les méthodes utilisées pour le calcul des infiltrations, de ruissellement et des écoulements souterrains. La représentation physique des cours d’eau ou des bassins et d’oueds est configurée dans le modèle du bassin versant. (MESEK A.2008).

Les éléments hydrologiques sont connectés pour former en un réseau afin de simuler les processus d’écoulement, et le calcul commence à partir des éléments amont suivant une direction aval. La modélisation proposée a pour objectif d’estimer le débit maximal probable de bassin versant d’oueds ainsi que le volume a son exutoire. Ce bassin versant à une superficie **1314.72 km<sup>2</sup>** et un périmètre **870.157 Km** découpé en deuze sous-bassins.

IV .1.4. Banque de données nécessaire à l’application de simulation avec HEC-HMS :

Tous les droits réservés à la Bibliothèque ENSH

L'application du modèle HEC-HMS nécessite une banque de données concernant le bassin ou les sites étudiés, afin qu'on puisse appliquer le modèle. Parmi les données indispensables on peut citer dans notre cas : (MESEK A.2008).

**Tableau IV.2 : Caractéristiques des bassins**

N°	Nom	La pente B.S (bassin)	Surface (km <sup>2</sup> )	C	G	M	CON	K	C
01	W610	0.2658	67.64	0.6	0.4	0	0	0.13	0.45
02	W630	0.2894	60.66	0.1	0	0.9	0	0.123	0.45
03	W620	0.2603	67.04	0.2	0.1	0.7	0	0.124	0.45
04	W650	0.3119	208.41	0.05	0.2	0.4	0.35	0.128	0.45
05	W770	0.2580	85.98	0.5	0.25		0.25	0.1375	0.35
06	W750	0.2962	231.53	0.3	0.7			0.115	0.35
07	W850	0.2707	30.06		0.35		0.65	0.1325	0.35
08	W860	0.2830	66.89	0.25		0.3	0.5	0.1425	0.35
09	W980	0.2509	121.03		0.4	0.2	0.4	0.124	0.35
10	W870	0.2196	193.47		0.45	0.4	0.15	0.1155	0.35
11	W1060	0.1699	22.16		1			0.1	0.35
12	W1090	0.1554	51.14		0.8	0.2		0.104	0.35

C : calcaire G : grès M : marne CON : conglomérat

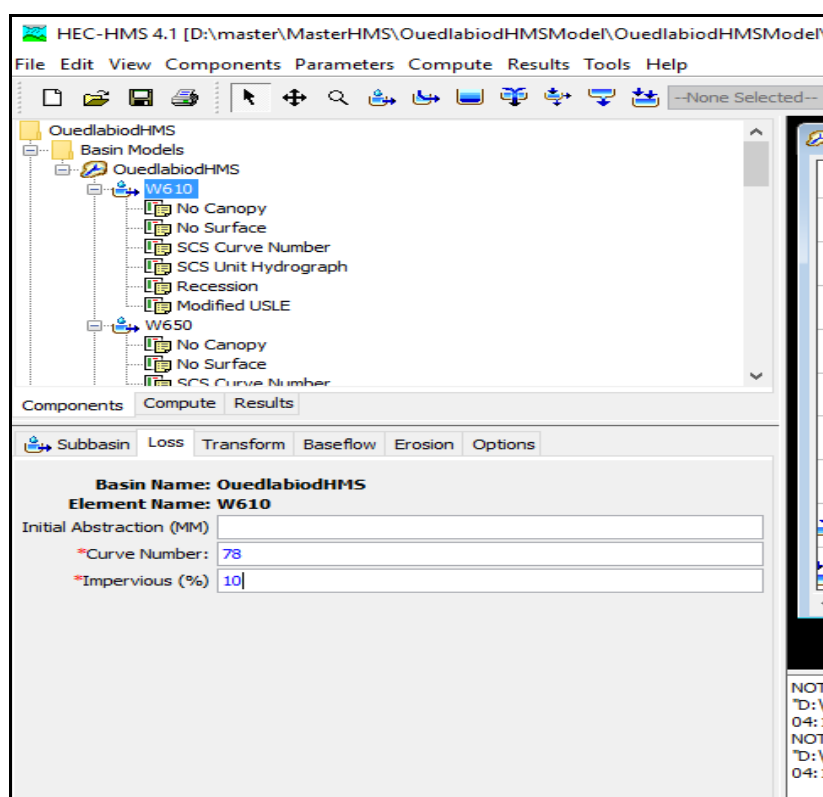
**IV.1.4.1. Données de base :**

Les sols de notre zone d'étude appartiennent aux groupes, ayant des coefficients d'infiltration variant de très faibles au moyen. Ces sols entraînent un potentiel élevé de l'écoulement superficiel et érosion important. Ils présentent une transmission rapide. Ils concernent généralement sols allant des argiles très fines aux calcaires très dures. (MESEK A.2008).

Les valeurs de CN sont données dans le tableau ci-dessus.

Tableau IV.3 : Données de base des douze sous -bassins

N°	Nom	Curve -number(CN)	Impervious (%)
1	W610	78	10
2	W630	74	10
3	W620	74	12
4	W650	80	15
5	W770	76	14
6	W750	75	10
7	W850	78	10
8	W860	78	14
9	W980	79	10
10	W870	80	10
11	W1060	78	10
12	W1090	76	10



Figur IV.3 : fenêtre de donnée de curve number

La valeur de CN dépend de la classe hydrologique du sol et du couvert végétal. Hydrologiquement les sols sont divisés en quatre (04) groupes.

En fonction de la classe hydrologique et du couvert végétal, le tableau ci-après donne la valeur de CN du sol considéré.

**Tableau IV.4 : Les valeurs du CN**

Utilisation de la Terre			Groupe hydrologique			
Récolte	Couverture	Condition	A	B	C	D
Non productif	alignement	-	77.0	86.0	91.0	94.0
Récolte rangée	alignement	pauvre	72.0	81.0	88.0	91.0
Récolte rangée	alignement	bon	67.0	78.0	85.0	89.0
Récolte rangée	contourné	pauvres	70.0	79.0	84.0	88.0
Récolte rangée	contourné	bon	65.0	75.0	82.0	86.0
Récolte rangée	Contourné et terrassé	pauvre	66.0	74.0	80.0	82.0
Récolte rangée	Contourné et terrassé	bon	62.0	71.0	78.0	81.0
Petit grain graminées	alignement	pauvre	65.0	76.0	84.0	88.0
Petit grain graminées	alignement	bon	63.0	75.0	84.0	87.0
Petit grain graminées	Contourné	pauvre	63.0	74.0	83.0	85.0
Petit grain graminées	Contourné	bon	61.0	73.0	82.0	84.0
Petit grain graminées	Contourné et terrassé	pauvre	61.0	72.0	81.0	82.0
Petit grain graminées	Contourné et terrassé	bon	59.0	70.0	78.0	81.0
Semé-fermé	alignement	Pauvre	66.0	77.0	85.0	89.0
Légumineuses	alignement	bon	58.0	72.0	81.0	85.0
Rotation	Contourné	Pauvre	64.0	75.0	83.0	85.0
Prairie	Contourné	bon	55.0	69.0	78.0	83.0
Prairie	Contourné et terrassé	Pauvre	63.0	73.0	80.0	83.0
Prairie	Contourné et terrassé	bon	51.0	67.0	76.0	80.0
Pâturage	Contourné et terrassé	pauvre	68.0	79.0	86.0	89.0
Pâturage	Contourné et terrassé	bon	49.0	69.0	79.0	84.0
Pâturage	Contourné et terrassé	Pauvre	39.0	61.0	74.0	80.0
Pâturage	Contourné	bon	47.0	67.0	81.0	88.0
Pâturage	Contourné	passable	25.0	59.0	75.0	83.0
Pâturage	Contourné	bon	6.0	35.0	70.0	79.0
Bois	-	bon	30.0	58.0	71.0	78.0
Bois	-	Pauvre	45.0	66.0	77.0	83.0
Bois	-	passable	36.0	60.0	73.0	79.0
Bois	-	bon	25.0	55.0	70.0	77.0
Ferme	-	-	59.0	74.0	82.0	86.0
Chemin	-	-	72.0	82.0	87.0	89.0
Chemin (surface imp)	-	-	74.0	84.0	90.0	92.0

**IV.1.4.2. Données des sous-bassins versants**

**Tableau IV.5 : Données de base des douze sous-bassins versants**

Tronçon	Nœud aval	Nœud amont	Bassin	Distance(m)	Pente (m/m)
16R	W610	W650	W620	13007.54	0.01559
18R	W630	W770	W650	21584.14	0.00982
19R	W650	W860	W770	9901.12	0.02130
21R	W770	W980	W860	12623.98	0.01209
15R	W980	W1090	W1060	2703.75	0.00833
25R	W1060	W1060	W1090	12854.07	0.01507
23R	W980	W610	W1060	18990.13	0.01484
17R	W630	W750	W610	812.86	0.00945
20R	W770	W860	W750	601.32	0.01318
22R	W850	W980	W860	781.21	0.06791
24R	W870	W1090	W1060	699.68	0.01662

**IV.1.4.3. Données météorologiques :**

Diverses méthodes sont proposées pour la modélisation d'un épisode pluvieux, connu ou non. Nous disposons cependant la pluie hypothétique basée sur la fréquence (Frequency Storm). Pour chaque fréquence nous avons calculé les quantités de pluies correspondantes à différents pas de temps (06 ,15min, 1, 2, 3, 6, 12, 24). (MESEK A.2008).

Nous avons obtenu donc une série de données des précipitations pour chaque pas de temps et de chaque fréquence, les résultats sont présentés dans le tableau ci-après qui représente les données météorologiques utilisées dans le modèle HEC HMS :

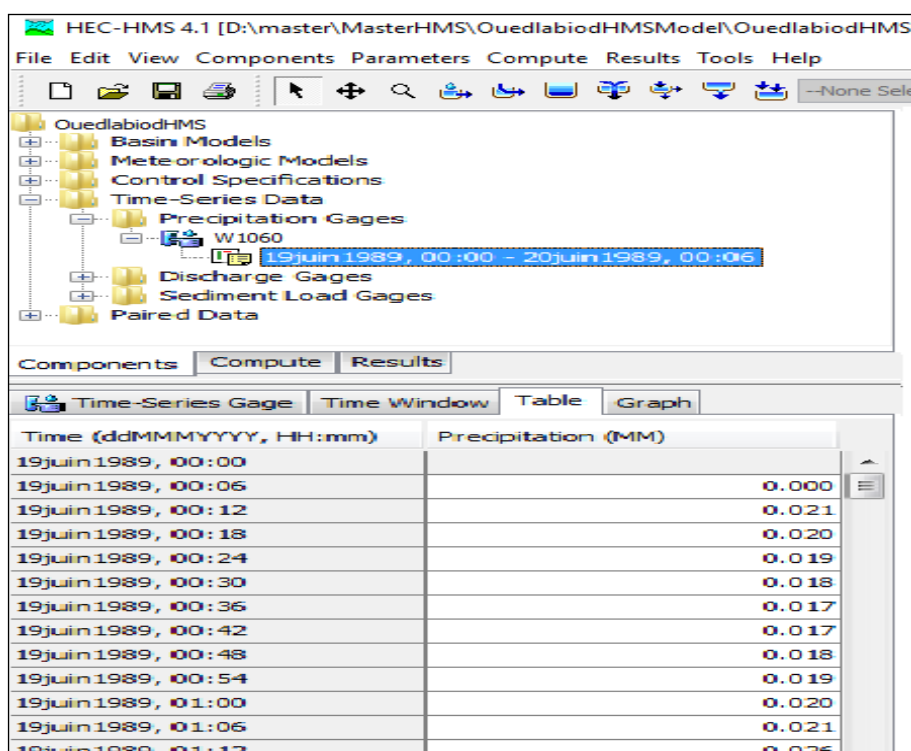


Figure IV.4 : fenêtre de table de précipitation des bassins

**IV.2. Les données de spécifications de contrôle :**

Les spécifications de contrôle sont l'une des composantes exigées pour une exécution du logiciel, avec un modèle de bassin versant et un modèle climatique. La date initiale et le temps de calcul ainsi que la date et le temps finaux sont spécifiés dans la fenêtre (*Control Spécification*). L'intervalle du temps, aussi appelé pas de temps de calcul, est aussi spécifié. L'intervalle du temps détermine la précision dans les résultats de calcul. La gamme des intervalles disponibles comprenant les intervalles de 1 minute à 24 heures est donnée comme suit :

- ✓ La date initiale
- ✓ La date finale
- ✓ L'intervalle de temps de calcul

**IV.2.1. Calcul de l'infiltration**

Un assortiment de méthodes diversifiées est disponible pour simuler les pertes par infiltration. Des options pour une modélisation éventuelle comprennent des infiltrations initiales et constantes, le nombre de la courbe SCS, le nombre de la courbe SCS par maillage, et la méthode de Green et Ampt. Le déficit pour une couche superficielle du sol et le modèle de perte constante.

Toutes ces méthodes peuvent être utilisées pour une modélisation simple et continue de l'infiltration et de l'évapotranspiration. Dans notre étude on prend la méthode de SCS (CN), puis qu'elle est simple et facile à appliquer (MESEK A.2008).

**IV.2.2. Ruissellement**

La modélisation du ruissellement sous le logiciel HEC-HMS se fait par l'intermédiaire de la méthode des hydrogrammes unitaires. Le modèle retenu est celui de l'hydrogramme unitaire de SCS (SCS unit hydrograph). (MESEK A.2008).

Ce modèle donne une relation empirique entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct. La méthode de l'hydrogramme unitaire vise à déterminer l'hydrogramme de ruissellement direct à l'exutoire d'un bassin versant à partir des hyétogrammes de l'averse correspondante reçue par ce même bassin.

L'hydrogramme unitaire par la méthode (SCS) est basé sur la transformation des pluies en débit avec l'utilisation du temps de réponse (ou retard) (*Tlag*), qui est le décalage de temps entre le centre de la masse pluviale et le sommet de l'hydrogramme unitaire des crues. On considère d'après les données expérimentales nombreuses que :

$Tlag = 0.6 Tc$ , avec ;  $Tc$  : est le temps de concentration ( $Tc = 13$  h).

**IV .3 . Résultats de la simulation :****IV .3 .1. Résultats des sous bassins :**

La figure ci-dessous définit les potentialités superficielles simulées au niveau de chaque site ainsi que les volumes apportés durant l'événement par chaque sous bassins du modèle et le volume total écoulé, particulièrement à l'exutoire du bassin versant (Oued Labiod) où est évalué le débit de pointe de crue

Le modèle donne des résultats, pour chaque sous bassin, dans un tableau (Voire Annexe) présentant le débit de pointe, les précipitations et les pertes à chaque pas de temps. Le passage du l'hyétogramme de pluie à l'hydrogramme de crue fait intervenir toutes les caractéristiques météorologiques, physiques et hydrologiques du bassin versant considéré.

**IV .3.2. Choix de crue :**

Dans cette application nous avons choisis trois (03) crues (dépendent de la saison et le  $P_{jmax}$ )



13/11/1988 ; 05/05/1985 ; 06/03/1986

**A- La calibration du modèle :**

Afin d’aboutir aux valeurs optimisées des paramètres du modèle, la calibration a été effectuée pour les (03) trois premières crues en utilisant la fonction d’optimisation automatique.

**B-Validation du modèle :**

Après calibration du modèle, nous passerons à la validation du modèle en utilisant ces valeurs et en appliquant le modèle aux deux dernières crues.

Pour chaque crue, on va présenter les résultats des deux sous bassins (2B et 13B), ainsi que le bassin total.

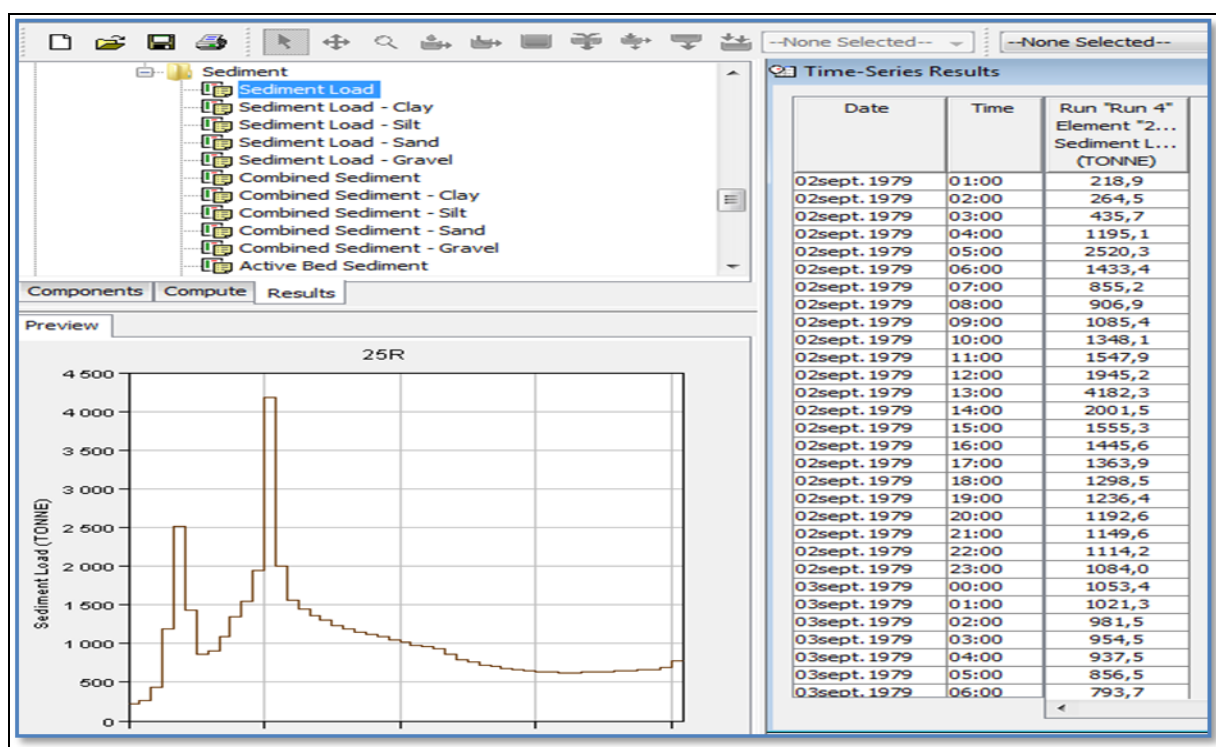


Figure IV.5 : Fenêtre de résultat de sédiment (simulée)

Le tronçon r25 représente l’exutoire de bassin versant et on a utilisé comme un repère de comparaison.

✓ Simulation de la crue du 13/11/1988

Résultat par HEC- HMS

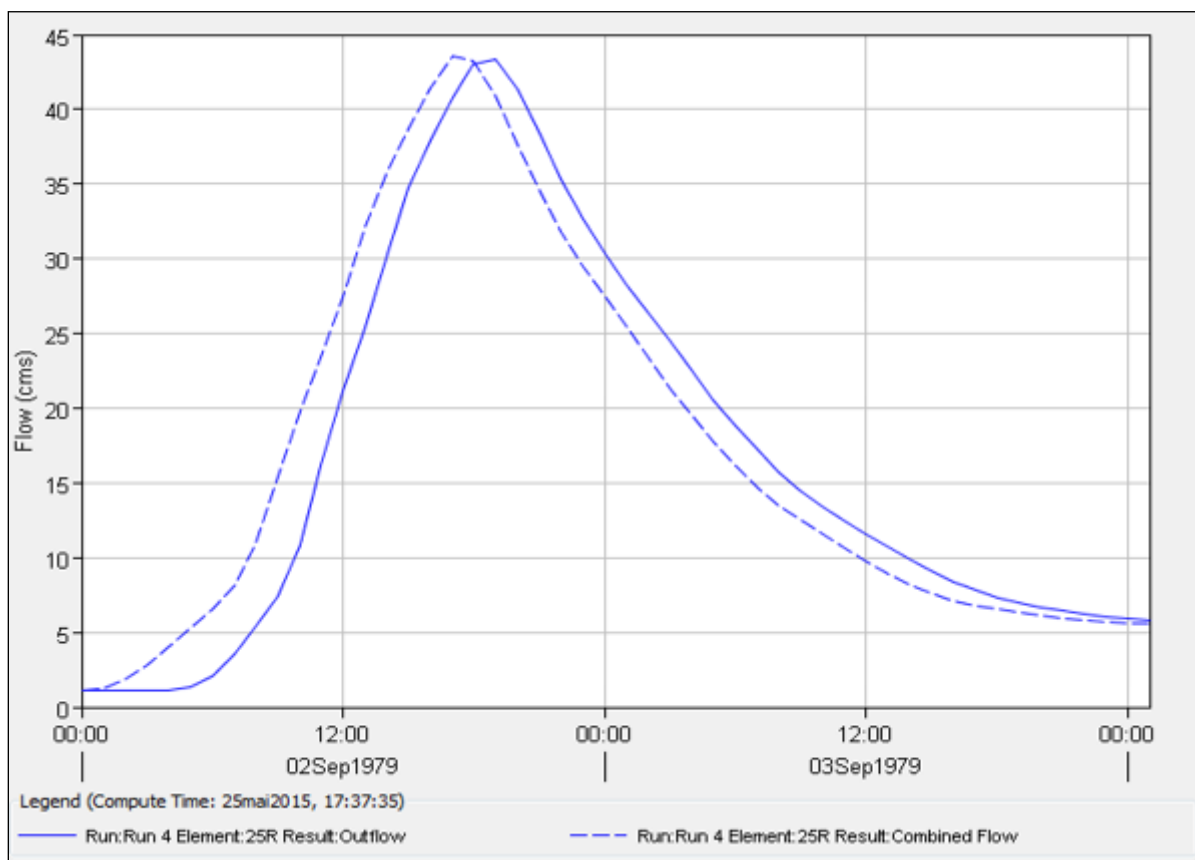


Figure IV.6: Fenêtre du graphe de l'hydrogramme de crue du bassin versant (simulée)

Tableau IV.6 : Volumes de sédiment de crue (13/11/1988)

Les valeurs données par HEC-HMS (Tonne)					
Oued Boughrara (17R)	Oued Ichemul (16R)	Oued T'kout (20R)	Oued Labiod (gorges de Thiganimine (19R)	Observé à la station de Mechouneche (25R)	Calculer (Données) (Tonne)
12.81	11.45	13.35	59.67	196.73	3378.96
15.91	14.55	14.95	67.47	222.33	4501.48
20.31	18.35	17.35	81.17	261.63	5518.80
23.81	21.05	20.35	95.67	308.83	3062.96
26.31	23.25	24.75	112.17	355.23	2681.15
28.31	25.35	28.65	124.77	412.93	483.84
30.71	28.25	32.25	138.27	531.03	2019.03
34.81	33.25	36.45	161.47	1524.53	889.89
41.61	40.85	41.05	192.87	2504.23	689.33
47.31	42.45	46.75	220.07	1377.53	523.82
49.51	39.95	53.15	235.07	837.83	374.58
46.11	37.55	58.25	238.57	834.23	238.72
42.01	34.05	62.65	235.27	900.03	215.93
38.81	31.15	63.85	228.97	923.43	194.57
36.51	28.55	64.05	221.17	912.63	180.68
34.91	26.75	63.05	211.07	902.93	160.40
33.91	25.55	60.95	198.67	887.53	140.42
33.11	24.55	58.95	187.87	865.13	121.88
32.51	23.85	57.35	179.57	846.83	105.82
31.91	23.25	56.05	173.17	828.13	91.55
31.51	22.85	54.95	167.37	805.83	83.87
31.01	22.25	54.05	162.47	782.73	80.62
30.61	21.75	53.25	157.77	761.63	77.42
30.11	21.15	52.55	154.07	745.13	74.26
29.21	20.15	51.85	149.37	728.33	71.14

**CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE (HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE)**

27.31	18.85	50.85	142.87	709.83	68.07
23.41	17.85	49.45	136.47	674.63	65.04
21.31	17.25	47.35	130.67	642.43	62.05
21.31	16.55	44.35	124.77	609.53	58.88
21.31	15.05	40.95	119.97	570.53	56.14
21.41	14.25	37.45	115.57	533.23	53.42
21.41	13.85	34.25	109.37	500.03	50.74
21.51	13.45	32.15	105.17	474.53	48.09
21.51	13.35	32.05	101.27	451.43	45.47
21.61	13.25	32.25	98.57	437.53	42.88
21.61	13.25	32.35	96.17	425.73	40.32
21.71	13.15	32.55	94.57	414.23	37.79
21.71	13.15	32.75	93.07	406.03	35.30
21.81	13.05	32.95	92.17	398.03	32.83
21.81	13.05	33.05	91.37	391.53	30.40
21.91	13.05	33.25	90.87	387.03	27.99
21.91	12.95	33.45	90.47	382.23	25.62
22.01	12.95	33.65	90.27	379.33	23.27
22.01	12.95	33.85	89.97	377.33	20.96
22.11	12.85	34.15	89.87	375.73	18.68
22.11	12.85	34.35	89.67	374.83	16.43
22.21	12.75	34.55	89.77	380.93	14.21
22.31	12.65	34.75	93.37	410.73	12.02
23.41	29.25	36.15	146.97	476.23	9.86
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.74
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.64
<b>1344.39</b>	<b>1013.75</b>	<b>2013.75</b>	<b>6677.33</b>	<b>31440.97</b>	<b>26900.52</b>

❖ Les résultats obtenus et presque comparable et acceptable pour la crue de 13/11/1988

✓ Remarqué :

Que le volume de sédiment a l'exutoire ( $V_{R25}=31440.97\text{ton}$ ) est presque trois fois à volume qui Vien à partir d'oued tkout ( $V_{R20}=2013.75$ ) et oued ichmoule ( $V_{R19}=6677.33$ )

La somme des volumes  $V_{R16}$  et  $V_{R17}$  est très inférieure a  $V_{R19}$

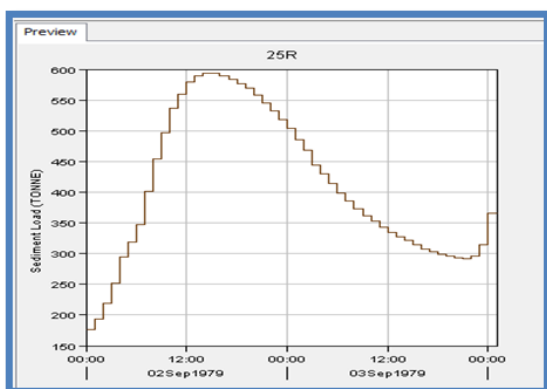
IV.3.2.1. Résultat des crues (trois crues)

Tableau IV.7 : Volumes de sédiment de trois crues :

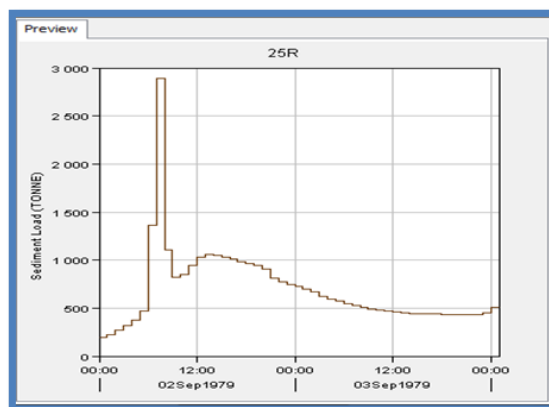
Méthodes de calcul	Les valeurs données par HEC-HMS (Tonne)	Données(Tonne)
	Observé à la station de Mechouneche (25R)	Calculer
CREU 05_05_1985	21833.68	8584.98
CREU_06_03_1986	36545.35	26868.61
CREU_13_11_1988	31440.97	26900.52

IV .3.3. Les graphes du sédiment :

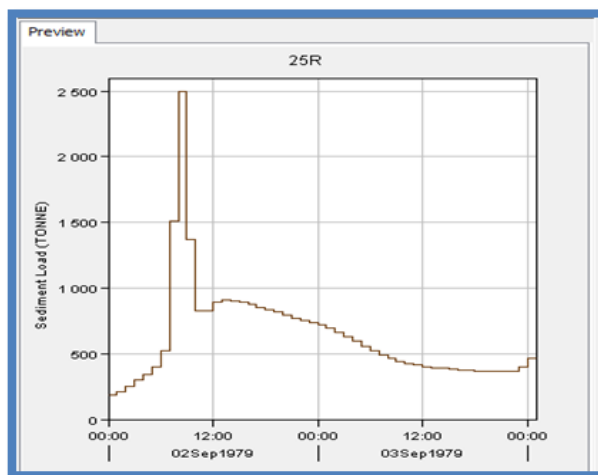
Crue de 05/05/1985



Crue de 06/03/1986



Crue 13/11/1988



V.3.4. Calibration et validation du modèle

Tableau IV.8 : Calibration et validation du modèle

Date	Vol. Observes (Tonnes)	Vol. Simulés (Tonnes)	Err (%)
05 mai 1985 crue de calibration	21833.68	8584.97	57.28
06 mars 1986 crue de calibration	26868.61	36545.35	20.55
13 nov 1988 crue de validation	26900.56	31440.97	12.93

On constate ce qui suit :

- Les résultats de la simulation à l'échelle de la crue sont acceptables
- Le pourcentage des apports de chaque sous bassin
  - Oued Boughrara (17R) : varie entre [5 % à 9%]
  - Oued Ichemul (16R) : varie entre [6 % à 12%]
  - Oued T'kout (20R) : varie entre [8 % à 15%]
  - Oued Labiod (gorges de Thiganimine) (19R) : varie entre [30 % à 45%]

Ce qui donne que plus de 50% des apports d'oued Labiod sont produites de la partie Sud du bassin Oued Labiod.

V.3.5. CONCLUSION :

- La partie inférieure de bassin versant elle et plus irrodable par apport la partie supérieure
- L'application du modèle USEL modifiée par HEC HMS, Dans cette partie d'étude nous avons constaté que l'application de l'équation universelle des pertes de sols modifiée à l'échelle de la crue donne des résultats acceptables, nécessitent une amélioration à savoir le découpage du bassin en un nombre de sous bassins plus important et d'étudier d'autre modèle de transports dans les talwegs.

**PARTIE -B-. APPLICATION DU MODELE HYDROLOGIQUE HEC-RAS :**

**IV.1. INTRODUCTION :**

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center du U.S Army Corps of Engineers. Il s'agit d'une nouvelle version d'un modèle hydraulique auparavant nommé HEC-2, qui comporte maintenant une interface graphique permettant d'éditer, modifier et visualiser les données d'entrées, de même qu'observer les résultats obtenus. Il est présentement utilisé dans plusieurs firmes d'ingénierie et organismes gouvernementaux. Ce logiciel englobe plusieurs aspects hydrologiques et hydrauliques : analyse du ruissellement des précipitations, hydraulique fluviale, analyse des dommages d'inondation, simulation des écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments, analyse de la qualité d'eau et certaines fonctions facilitant la conception d'ouvrages hydrauliques. (CHAREB YSSAAD I.2008)

**Objectif du logiciel :**

L'objectif principal de ce programme est tout à fait simple, il est conçu pour exécuter le calcul hydraulique unidimensionnel pour tous les réseaux de canaux naturels et artificiels par le calcul des hauteurs de la surface de l'eau en toute section d'intérêt pour un ensemble de données d'écoulement en régime permanent et par des hydrogrammes de propagation des crues pour la simulation de l'écoulement en régime non permanent.

HEC-RAS est un logiciel basé sur le modèle 1D de Saint Venant permanent ou non-permanent de calcul de la ligne d'eau en graduellement varié. Il résout « l'équation de L'énergie unidimensionnelle », les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement. Pour les situations rapidement variées telles que les ressauts hydrauliques, les écoulements à proximité des ponts, et les confluences de rivière, l'équation de l'énergie est remplacée par l'équation de quantité de mouvement. (SGHARA N.2013)

**IV.2. FONCTIONNEMENT DE HEC-RAS :**

HEC-RAS est capable de modéliser avec une extrême finesse un large éventail de conditions d'écoulement. Le centre de contrôle, pièce maîtresse d'HEC-RAS permet de gérer et de combiner les différents types de données :

- ✓ Géométrie ;
- ✓ Débits et conditions aux limites ;

- ✓ Conditions de calcul ;
- ✓ Résultats.

### **IV.3. APPLICATION HEC-RAS SUR OUED :**

#### **IV.3.1. Banque de données nécessaires à l'application du modèle HECRAS**

L'application du modèle HEC-RAS nécessite une banque de données concernant le site étudié :

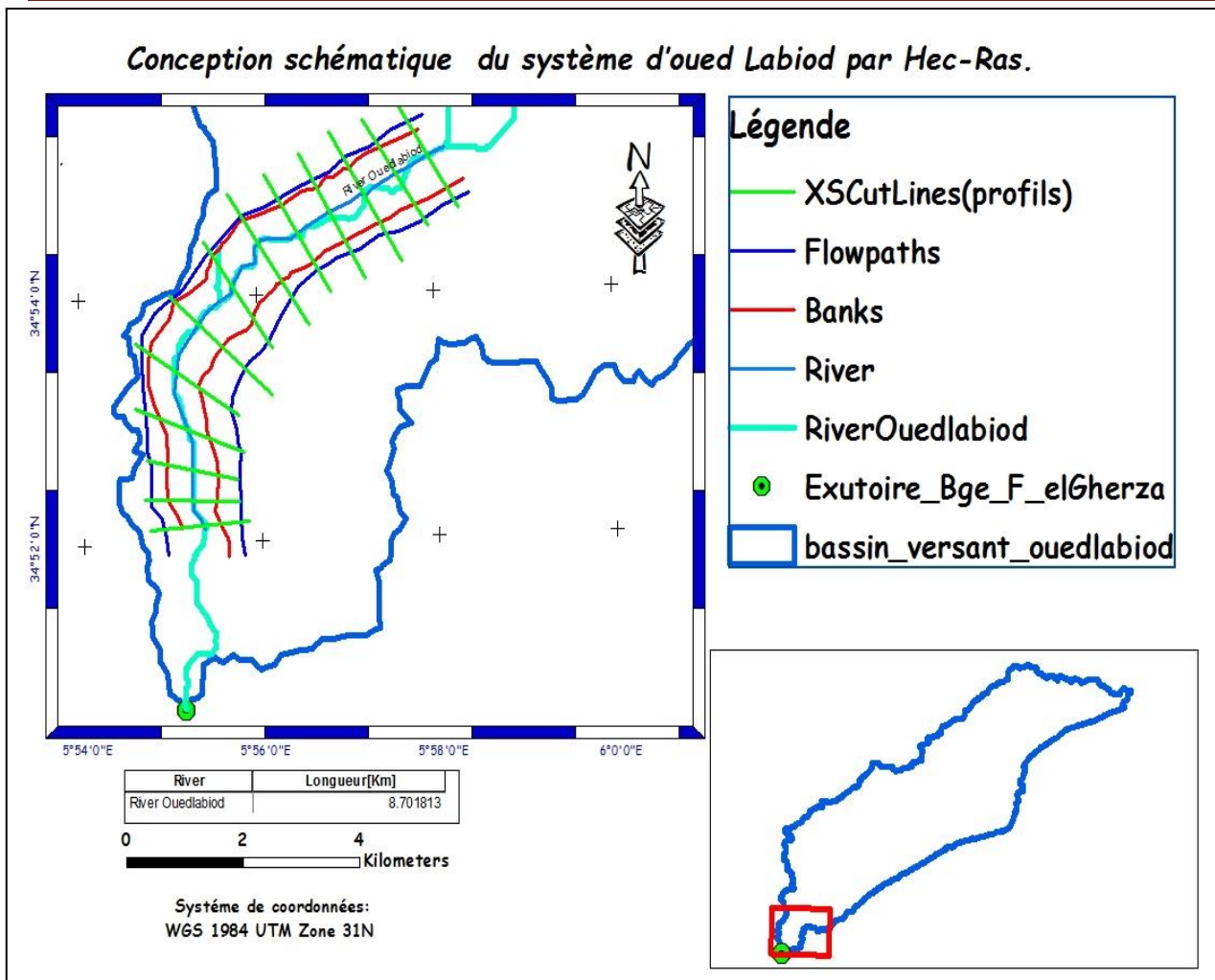
- Les données géométriques relatives à chaque section :
  - la section en travers, définie par une série de couples distance -altitude ;
  - la distance à la section suivante (Rives et axe canal).
  - Les coefficients de contraction et d'expansion.
  - Les données de l'écoulement et les conditions aux limites
  - Une singularité représentée dans notre travail par une ancienne diguette latérale le long du cours d'eau de protection contre les inondations implantée sur la partie droite du cours d'eau dans le lit majeur sur la partie de la plaine d'inondation, cette diguette à été édiféé durant les années cinquante.

#### **IV.3.2. Les données géométriques :**

Les données géométriques nécessaires, consiste {l'établissement de la connectivité de l'information pour le système de rivière (schéma de système de rivière), les données des sections transversales, et les données d'ouvrage hydraulique existants ou projets (ponts, levées, structures latérales, déversoirs, etc.). (**River Analysis System HEC-RAS,2008**)

Le traçage du schéma de système de rivières com me il est montré sur la figure (IV.7).





**Figure .VI.7. Conception schématique du système d'oued Labiod par HEC-RAS (établi par ARCGIS)**

### IV.3.3. Les données de l'écoulement et les conditions aux limites :

Après avoir saisi les données géométriques de chaque section, l'étape suivante de la modélisation hydraulique par HEC-RAS est de spécifier les débits d'entrée et toutes les conditions aux limites nécessaires pour pouvoir exécuter le calcul des profils de la surface de l'eau en chaque section du système de rivière. (River Analysis System HEC-RAS,2008)

### IV.3.4. Données d'écoulement (débits liquides) :

La collecte des données, fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) consiste en un dépouillement systématique des paramètres : hauteur d'eau et concentration en particules solides prélevées au droit des stations

### IV.3.5. Données d'écoulement (débits solides) :

Les données de sédiments utilisées pour le modèle sont les quantités mesurées aux stations hydrométriques situées en amont du système ainsi que les données granulométriques des lits des oueds.

#### IV.4. Étalonnage du model

##### IV.4.2. Calibrage du modèle hydraulique

Dans le but de l'étalonnage, les niveaux d'eau et les débits liquides calculés par le modèle HEC-RAS et les niveaux d'eau et les débits liquides mesurés à la station hydrométrique **Mchouneche** durant l'évènement (toutes les conditions aux limites sont des mesures disponibles) ont été utilisés. Après simulation et calculs d'erreurs (entre les variables simulées et les variables mesurées), les coefficients de Manning ont été choisis de telle sorte que l'erreur soit plus faible (Le coefficient de rugosité de Manning obtenus pour les lits d'oueds était 0,036).

##### IV.4.3. Calibrage de modèle de sédiments

Huit formules ont été utilisées par HEC-Ras pour prédire le transport solide, et cinq méthodes de calcul de la vitesse de chute. Ainsi, 40 combinaisons différentes qu'on a examinées dans cette étude. Les résultats de chacune de ces combinaisons ont été comparés avec les données naturelles (mesures à la station hydrométrique de **Mchouneche** de l'évènement, et enfin la combinaison ayant les résultats plus proches des données naturelles a été choisie. (La combinaison de l'équation de **YANG** et la méthode de calcul de vitesse de **VAN RIJIN** était plus compatible avec les conditions naturelles de la zone d'étude).

#### IV.5. Résultats et discussion

En total les données géométriques liées aux 14 sections transversales citées précédemment sont recueillies et introduites dans le modèle.

La répartition spatio-temporelle des apports a été prise en considération, les conditions aux limites amont ont été introduites alimentant oued Labiod en utilisant les données observées et les conditions aux limites latérales ont été introduites dans les sections initiales de tous les affluents situés entre les sections amont et la section aval en exploitant les résultats des études statistiques élaborées dans la région.

##### IV.5.1. ANALYSE DE LA SIMULATION :

Une fois que le modèle termine tous les calculs avec succès, la visualisation des résultats peut se faire. Plusieurs options de visualisation des résultats de calcul le sont disponibles et on peut visualiser et imprimer plusieurs types de résultats tabulés et graphiques.

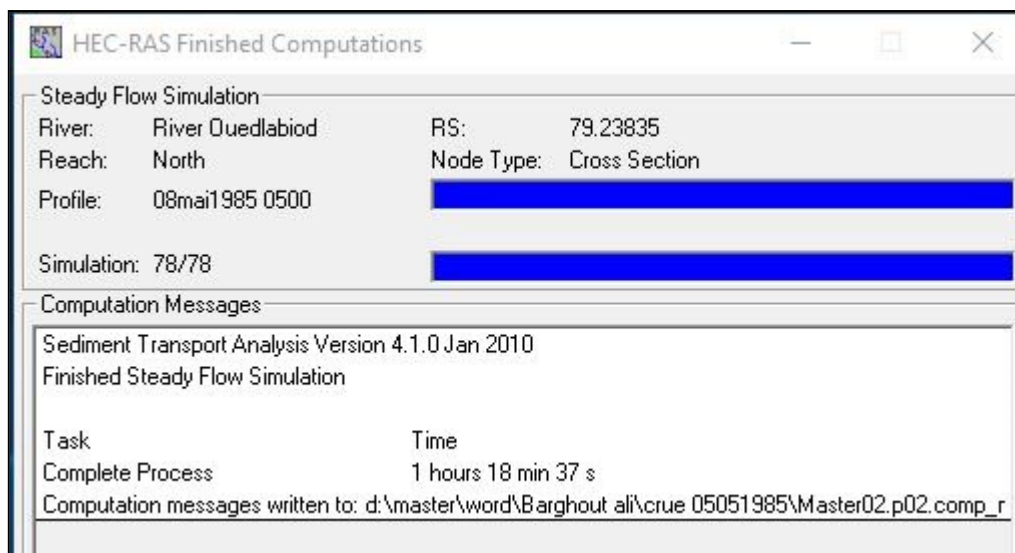


Figure .VI.8 : Fin du Simulation(simulée)

**Tableau IV.09 :** Caractéristiques topographiques et hydraulique des affluents de l'amont vers l'aval et de la droite vers la gauche.

CARACTITISTIQUE HYDRAULIQUE OUED LABIOD (données HEC-RAS)									
River Station	Q Total	Ch Dist	Crit W.S.	Ch Invert El	River Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m <sup>2</sup> )	(m)	
8401.671	0.64	1115	1115.04	1115.05	0.010653	0.28	2.33	103.03	0.58
7781.065	0.64	1094.26	1094.28	1094.29	0.042116	0.36	1.8	150.84	1.04
7141.458	0.64	1087.47		1087.55	0.002241	0.18	3.5	88.66	0.29
6483.125	0.64	1081.1	1081.11	1081.11	0.042178	0.25	2.57	370.96	0.95
5835.208	0.64	1074.66	1074.72	1074.73	0.028038	0.55	1.17	37.95	1
5110.864	0.64	1047.97	1048.01	1048.02	0.038174	0.47	1.35	68.78	1.08
4224.854	0.64	999.27	999.31	999.32	0.024732	0.38	1.69	86.58	0.87
3354.11	0.64	983.18	983.2	983.2	0.062545	0.35	1.82	210.02	1.21
2513.833	0.64	734.48	734.57	734.59	0.025251	0.64	1.01	24.31	1
1595.686	0.64	686	686.05	686.06	0.016357	0.4	1.62	57.34	0.75
985.3276	0.64	682.18		682.2	0.002812	0.12	5.43	314.5	0.29
521.7796	0.64	680.12	680.16	680.18	0.003112	0.18	3.55	116.99	0.33
79.23835	0.64	678.08	678.1	678.1	0.003002	0.09	7.06	636.91	0.28

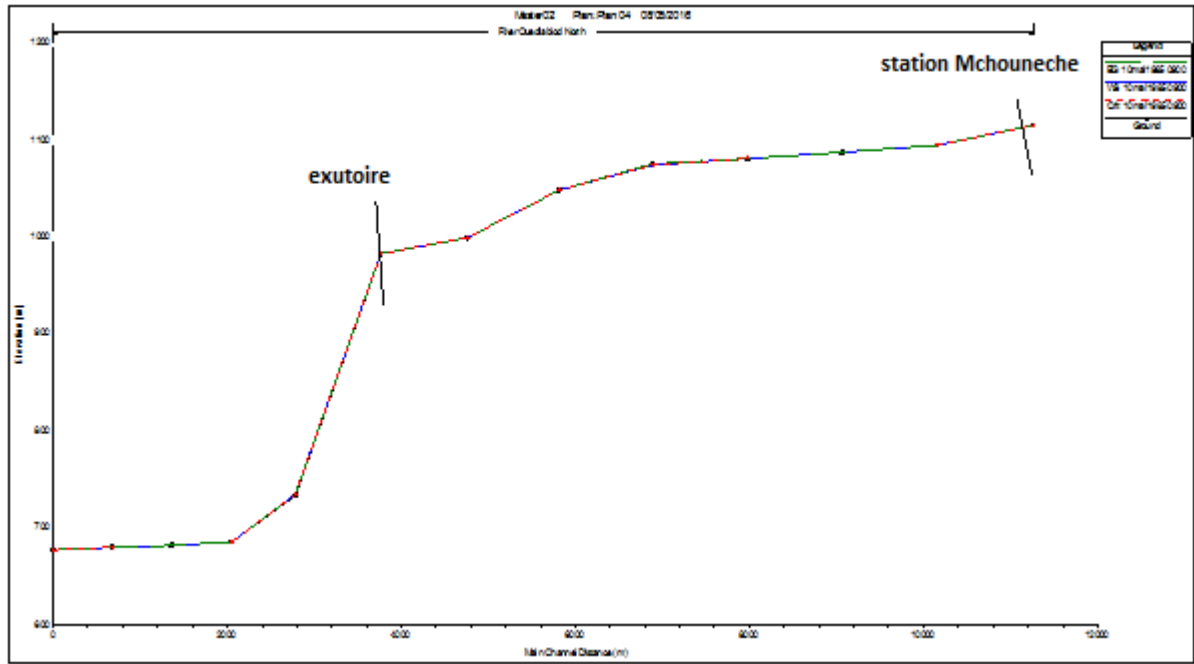


Figure .VI. 9 : Profil en long tronçon mchounach barrage fem elghareza

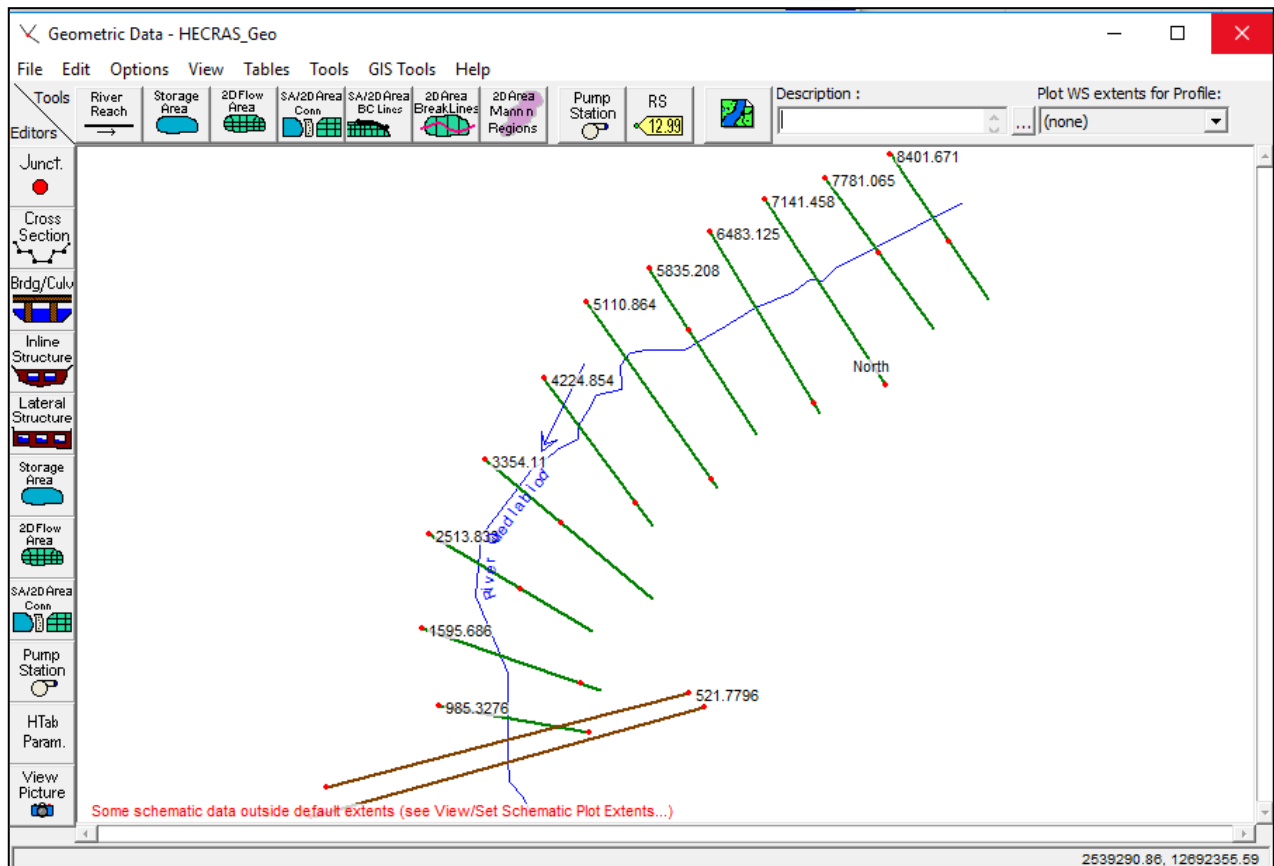
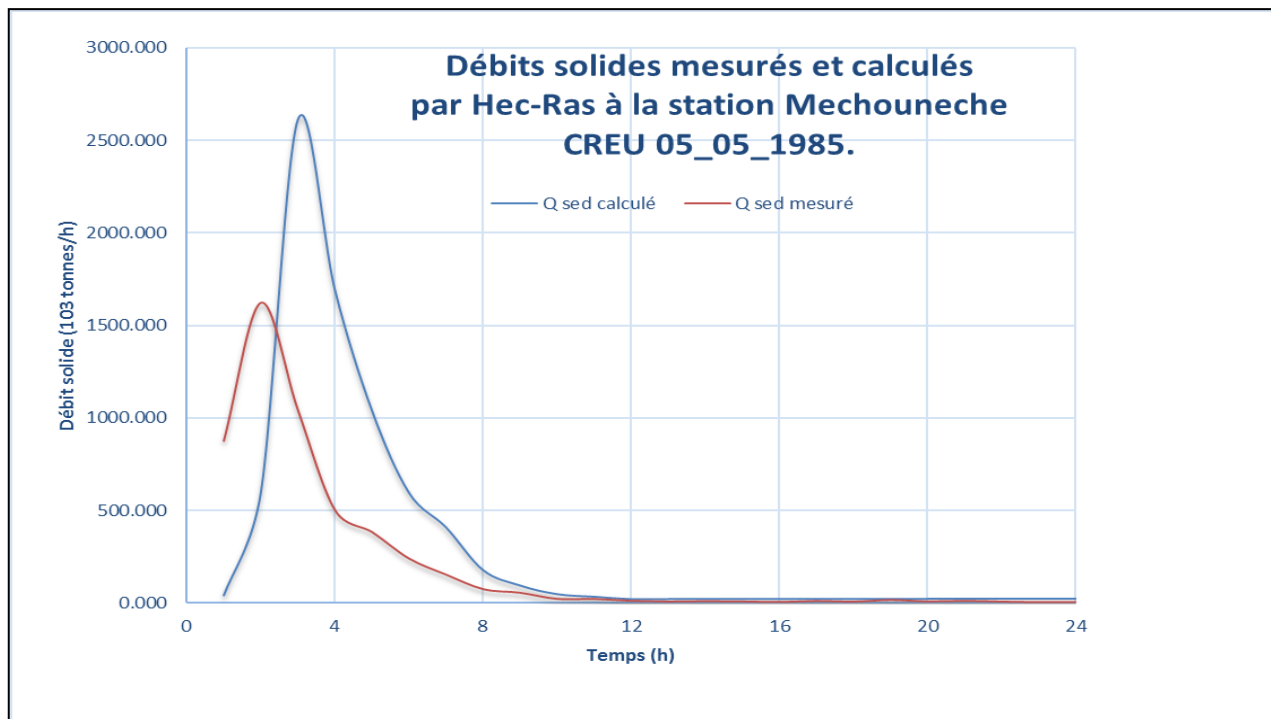


Figure .VI.10 : Profil en travers tronçon mchounach barrage fem elghareza

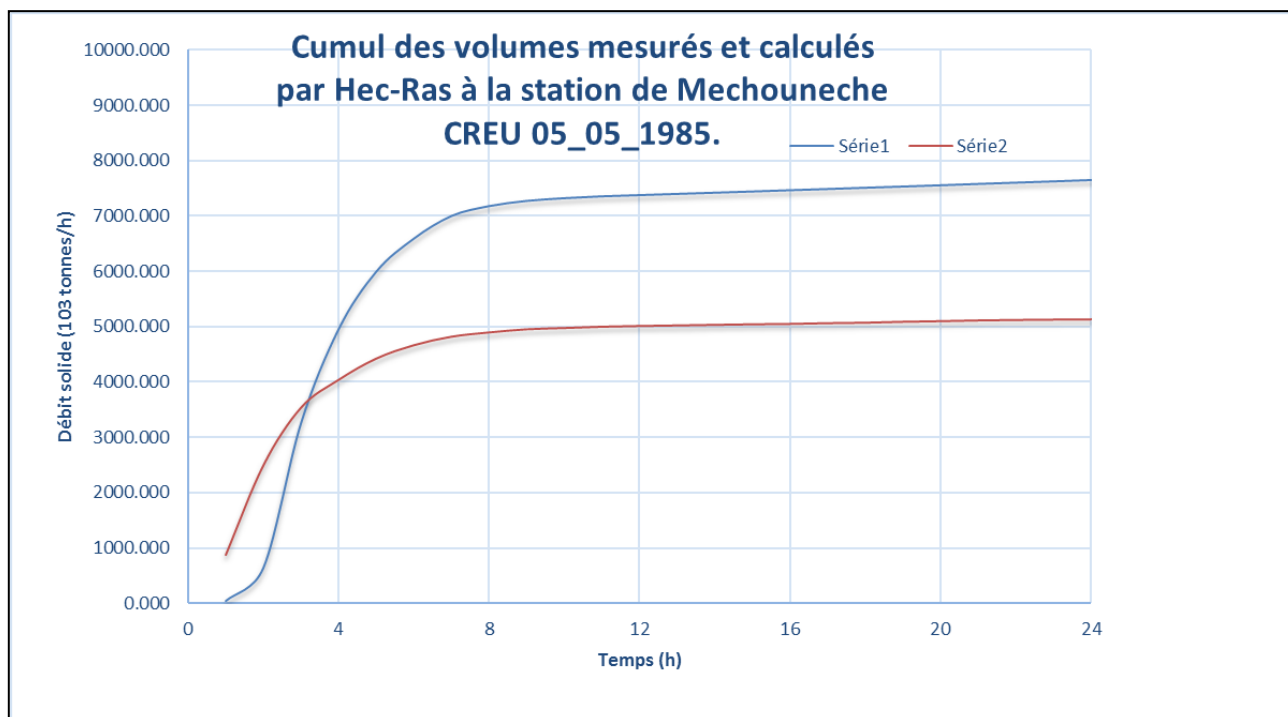
Tous les droits réservés à la Bibliothèque ENSH

Tableau IV.10 : Caractéristiques hydrauliques(CREU\_05\_05\_1985)

Tems	Débit solide			Tems	Débit Solide		
	Calcul	Mesuré	Mesuré		Calcul	Mesuré	Mesuré
Heur	Tonne	Out	In	Heur	Tonne	Out	In
1	41.750	875.555	948.581	42	19.638	7.650	3.738
2	598.421	1620.462	1334.268	43	19.250	5.887	3.600
3	2613.609	1042.600	865.388	44	18.866	7.035	3.489
4	1692.645	502.806	374.517	45	18.486	6.711	3.385
5	1040.688	384.525	343.842	46	18.110	6.032	3.270
6	596.257	241.443	220.609	47	17.738	5.565	3.177
7	409.226	154.606	72.322	48	17.369	5.097	3.075
8	177.940	76.363	83.222	49	17.004	4.769	2.994
9	94.833	56.742	61.444	50	16.644	6.634	2.905
10	48.167	23.513	6.283	51	16.287	6.178	2.833
11	34.244	23.332	34.247	52	15.934	5.705	2.757
12	21.382	13.139	6.354	53	15.584	6.266	2.696
13	21.582	9.253	5.430	54	15.293	5.952	2.647
14	21.778	11.525	7.595	55	15.165	5.878	2.627
15	21.972	9.951	5.610	56	15.038	5.810	2.608
16	22.161	6.870	5.261	57	14.910	5.747	2.590
17	22.348	12.587	5.208	58	14.783	7.742	4.913
18	22.531	8.829	5.174	59	14.656	11.893	3.486
19	22.711	17.693	18.096	60	14.528	6.463	3.071
20	22.888	9.828	7.101	61	14.401	6.056	2.863
21	23.061	13.174	9.153	62	14.273	5.861	2.722
22	23.269	9.012	6.587	63	14.146	5.726	2.636
23	23.477	5.556	5.786	64	14.018	5.629	2.582
24	23.681	5.456	5.496	65	13.891	5.553	2.547
25	23.881	5.490	5.494	66	13.764	5.491	2.522
26	24.051	5.602	5.570	67	13.636	7.637	4.929
27	24.172	5.969	5.904	68	13.509	5.885	3.114
28	24.291	6.094	5.980	69	13.381	5.542	2.724
29	24.406	6.678	6.556	70	13.254	5.491	2.672
30	24.637	9.677	6.410	71	13.126	5.464	2.663
31	24.226	9.291	5.978	72	12.999	5.436	2.656
32	23.818	5.724	5.713	73	12.871	5.400	2.641
33	23.413	5.690	5.479	74	12.744	5.356	2.620
34	23.012	5.556	5.248	75	12.617	5.310	2.596
35	22.615	5.404	5.033	76	12.489	5.395	2.573
36	22.214	5.238	4.818	77	12.362	6.105	2.551
37	21.773	5.083	4.613	78	12.319	2.810	2.531
38	21.336	4.928	4.409	$\Sigma$	<b>8584.977</b>	<b>5463.251</b>	<b>4636.929</b>
39	20.903	4.776	4.218				
40	20.475	7.457	4.044		<b>%</b>	<b>63.637</b>	<b>54.012</b>
41	20.051	6.613	3.885				
42	19.638	7.650	3.738				



**Figure .VI.11 : débit solides mesures et calculer**



**Figure .VI.12 : Cumul des volumes mesurés et calculés**

IV.5.2. Résultats simulés pour l’Oued Labiod :

Après la simulation des trois crues par HEC-RAS sont résumée dans le tableau suivant

- Les résultats des simulations de trois crues sont donnés en annexe.

Tableau IV.11 : Résultat de simulation

<b>Section 2513 (exutoire)</b>								
<b>CREU 05_05_1985</b>			<b>CREU_06_03_1986</b>			<b>CREU_13_11_1988</b>		
<b>Débits solides (tonne)</b>			<b>Débits solides (tonne)</b>			<b>Débits solides (tonne)</b>		
<b>Qs</b>	<b>Calculé</b>	<b>Mesuré</b>	<b>Qs</b>	<b>Calculé</b>	<b>Mesuré</b>	<b>Qs</b>	<b>Calculé</b>	<b>Mesuré</b>
<b>∑</b>	<b>8584.977</b>	<b>5463.251</b>	<b>∑</b>	<b>26868.615</b>	<b>94161.404</b>	<b>∑</b>	<b>26900.52</b>	<b>122518.378</b>
<b>Pourcentage %</b>		<b>63.637%</b>	<b>Pourcentage %</b>		<b>350.451%</b>	<b>Pourcentage %</b>		<b>455.450</b>
<b>Dure de la simulation 78h</b>			<b>Dure de la simulation 54h</b>			<b>Dure de la simulation 77h</b>		

IV.6. Conclusion :

- Pour petites crue (crue 05/05/1985) le pourcentage faible de sédiment arrive à la station Mechonache a tains barrage.
- Pour un débit important (CREU 06/03/1986, CREU 13/11/1988) les sédiments entrant le barrage dépasse des sédiments enregistré à station de mechenache il est intéressé calibrer le tronçon d’oued labiod entre Mechonache et le barrage pour minimise la capacité de transport de l’oued

### CONCLUSION GENERALE

L'érosion hydrique est un phénomène naturel dont l'intensité varie en fonction des précipitations et de la force du courant, mais aussi de la nature du sol, de la pente et du drainage du terrain, et de son exposition aux intempéries.

L'érosion hydrique reste un problème majeur en Algérie dont le principal facteur est le ruissellement dont la répartition spatiale est contrôlée par celles des précipitations, et autres facteurs naturels : topographiques, couvert végétal etc.

L'Algérie est, de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion.

Plusieurs méthodes existent pour quantifier ce phénomène complexe. L'introduction de la modélisation comme outil pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants, et d'aide à la décision est actuellement l'une des meilleures méthodes reconnues à la fois simple et fructueuse.

Dans ce mémoire, notre recherche s'intéressait premièrement à appliquer une combinaison appropriée du modèles HEC-HMS et HEC-RAS à l'un des sous bassins d'oued Labiod dans la wilaya de Biskra, qui est très vulnérable à l'érosion et à la sédimentation des ouvrages.

La modélisation des crues du bassin en question a été faite en utilisant le modèle HEC-HMS et de sa combinaison modulaire configurée sous ARCGIS.

Ensuite le modèle HEC-RAS a été utilisé pour simuler les débits et leurs sédiments de l'évènement (crue) produite dans l'ensemble du bassin.

Dans cette partie d'étude nous avons constaté que l'application de l'équation universelle des pertes de sols modifiée à l'échelle de la crue donne des résultats acceptables, mais nécessitent une amélioration à savoir le découpage du bassin en un nombre de sous bassins plus important et d'étudier d'autre modèle de transports dans les talwegs.

En dépit des résultats obtenus, on peut conclure que la modélisation sous ARCGIS est une contribution importante pour la compréhension du phénomène de l'érosion et sa conséquence sur la sédimentation des ouvrages à l'exutoire d'un bassin.



## REFERENCES

---

- Achite M., Meddi M., 2004.** " Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien) " Sécheresse 2004 ; 15 (4) : 367-73
- Agence Nationale des ressources hydraulique (A.N.R.H.),** "Bassin versant de la Macta ", 1996.
- Benkaci Tarik (2006):** Modélisation de la relation pluie-débit au pas temps journalier et mensuel par les réseaux de neurones artificiels et les systèmes neuro-flous. Thèse doctorat ENSA- ALGER
- Ben Khaled A. et Remini B., 2003.** " Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie)". Hydrological Sciences Journal–des Sciences Hydrologiques, 48(2) avril 2003.
- Ben Khaled A. et Rimini B., 2003.** "Analyse de la relation de Puissance : débit solide – débit Liquide à l'échelle du bassin versant de l'oued Wahrane (Algérie) ". Rev. Sci. Eau 16/3(2003) 333-356.
- Bencharab K.,2008.** "Mécanisme du transport solide en amont du barrage Tabia cas du bassin Versant d'oued Mekerra" Mémoire de Magister, Université de DJILALI LIABES- Sidi Bel Abbès- p.144.
- Borsali H. et al, 2005.** Aspect hydrologique des catastrophes naturelles : « Inondations – Glissement de terrain » Etude d'un cas : Oued mekerra(Sidi Bel Abbes) XXIIIème Rencontres Universitaire de Génie civil 2005 Risque & Environnement.
- Bouanani A., Megnounif A., et Terfous A., 2001.** " Étude du transport solide en Suspension dans l'Oued Mouilah (Nord-Ouest Algérien) ", Revue des sciences de l'eau / Journal Of Water Science, vol. 14, n° 2, p. 173-185
- Bouanani. A., 2004.**" Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous Bassins de la Tafna (NW – Algérie) ", Doctorat d'état à l'université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, p.249.
- Bouanani A., Megnounif A., et Terfous A., 2003,** " Production et transport des matières Solides en suspension dans le bassin versant de la Haute-Tafna (Nord-Ouest Algérien) ",Revue Des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 16, n° 3, p. 369-380.
- Bouasria S., Khalladi. M., Khaldi . A., 2010.** "Ralentissement Dynamique des Inondations au Niveau d'un bassin Versant de l'OuestAlgérien : cas de l'Oued Mekerra (Sidi Bel Abbes)". European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.43 No.2 (2010), p.172-182.
- Boumesseneh Amel, 2007.** "Les inondations dans la ville de BISKRA Causes et Impacts " Mémoire de Magister, Université du colonel El Hadj Lakhdar -BATNA-p.2002.

## REFERENCES

---

**Chahmi. A., Boudahri B., 2007.** " Contribution à l'étude du transport solide en suspension dans le sous bassin versant de l'oued Mekerra " Mémoire d'ingénieur, Université de Mohamed Boudiaf USTOran, p. 81 de contrôle, quantification et réhabilitation". Sécheresse, 11,4 :3 17-326.

**CHAREB YSSAAD Ismahane,** Contribution à la méthodologie des études de protection contre les inondations : Application des modèles HEC-RAS et HEC-FDA. Thèse de Magister Université de Mohamed Boudiaf U.S.T.O.

**Demmak A. ,1982** " Contribution à l'étude de l'érosion et des transport solides en Algérie septentrionale", thèse de doctorat, Paris 6, 1982.

**El amine C., ErrihM .& Madani cherif H., 2009.** " Modélisation statistique du transport solide du bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie) en zone semi-aride méditerranéenne". Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 54(2) Avril 2009.

**Ferka zazou N., 2006.** "impact de l'occupation spatio-temporelle des espaces sur la conservation de l'écosystème forestier. cas de la commune de Tessala, wilaya de sidi bel Abbès, Algérie" Mémoire de Magister, Université AboubekrBelkaïd Tlemcen, p.114.

**Guardia P., 1975.** "Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord occidentale". Thèse .Doct. Nice. p. 256.

**Hallouche B., 2007.** "Cartographie des zones inondables de la plaine de SIDI BEL ABBES par L'approche hydrogéomorphologique" Mémoire de Magister, Université de DJILALI LIABES-Sidi Bel Abbès- p.153.

**Hasbaia M., 2011.** " Critique du transport solide et ses conséquences sur les cours d'eau naturels"Doctorat d'état à l'université de Mohamed Boudiaf USTOran

**Hydrologic Modeling System HEC-HMS.** Version 3.5, Application Guide Hydrologic Engineering Center (HEC). Mars 2008.

**Jodeau M., 2004.** "Etude expérimentale des mécanismes de transport solide par charriage Torrentiel" Mémoire de DEA. CEMAGREF Grenoble, division ETNA.

**Khalidi A., 2005.** " Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien (Monts de Tlemcen –Saida)" thèse Doctorat d'état, Université d'ORAN, p.229.

**Madani chérif H., 2005.** " contribution à l'étude des débits liquides et solides des cours d'eau de l'Algérie septentrionale : procédés et qualité des mesures ", thèse de magister, Université de Mohamed Boudiaf USTOran

**Meddi M., Talia A., et Martin C., 2009** " Evolution récente des conditions climatiques et des Écoulements sur le bassin versant de la Macta (nord-ouest de l'Algérie) " Physio-Géo.

## REFERENCES

---

Revues.org/686, vol. III - 2009 (p. 61-84).

**Merabet A., 2008.** "Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbès contre les inondations  
"Mémoire de Magister, Université de DJILALI LIABES- Sidi Bel Abbès- p.217.

**Monaci, L., Downie, M., Oduori, S. 2007.** " Land Cover of Selected Study Areas in  
Somaliland and Southern Somalia ". FAO-SWALIM. Project Report No L-03., Nairobi, Kenya.

**NRCS (1997):** National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. United States,  
Department of Agriculture,  
762p.

**Remini B., 1999.** "Envasement des barrages dans le Maghreb". Bul. Int. De l'Eau et de l'Env.,  
22 : 4-8.

**MESEK ABDELKADER,** Modélisation pluie-débit des bassins versants de l'oued mina:  
application du modèle hydrologique HEC-HMS. Thèse de Magister Université de Mohamed  
Boudiaf U.S.T.O.

**Motevalli S., Hosseinzadeh M., Esmaili R., Derafshi K. et Gharehchahi S. (2012):**  
Assessing the Effects of Land Use Change on Hydrologic Balance of Kan Watershed using  
SCS and HEC-HMS Hydrological Models – Tehran, IRAN. Australian Journal of Basic and  
Applied Sciences, 6(8): 510-519, 2012. ISSN 1991-8178.

**ROCHE M., 1990** – hydrologie de surface. Livre.

**ROCHE M., 1991-** Modélisation hydrologique, typologie des modèles hydrologiques, calage  
et incertitudes

[**Rmich A. et Hafoud N. (2004):** Relation entre les précipitations et les débits au niveau du  
bassin versant de Rhéraya de 1962-2003, mémoire de maîtrise d'hydrogéologie, FSTG,  
université Cadi Ayyad Marrakech. 50p.

**Roose E., De Noni G., 2004.** "Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique ": revue et  
Perspectives. Sécheresse 2004 ; 15 (1) : 121, p. 9.

**Roose E., 1985.** "Dégradation de terres et développement en Afrique de l'Ouest". Bull.Rech.  
Agron. Gembloux, 20 3/4, 505-537.

**Roose E., 1967.** "Dix années de mesure du ruissellement et de l'érosion à Séfa au Sénégal".  
Agron. Trop. , 22,2 : 123-152.

**Roose E., 1973.** "Dix-sept ans de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur  
un sol ferrallitique sableux de Basse Côte d'Ivoire". ORSTOM, Abidjan, 12p. Thèse Doc. Ing.

**Roose E., 1984.** "Causes et facteurs de l'érosion hydrique sous climat tropical, conséquences  
Pour les méthodes antiérosives". Machinisme Agric. Trop.87 : 4-18.

**Roose E., Bourouga L., Chehebbani R., 2001.** "Le ravinement en Algérie : typologie. Facteurs

## REFERENCES

---

Sogreah, 1967. "Étude générale des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie". Dossier, Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, Algérie.

**River Analysis System HEC-RAS**, Version 4.0: Hydraulic Reference Manual, et application GUIDE. US Army Corps of Engineers. Mars 2008.

**River Analysis System HEC-RAS, Version 4.0:**User's Manuel Hydrologic Engineering Center (HEC). US Army Corps of Engineers.

**SARI AHMED ABDELWAHED**, L'hydraulique de surface, cours et exercices, Université de Bab Ezzouar. Alger. [21]

**Yahiaoui A., Touaibia B., 2006.** " Modélisation du régime de crues des bassins versants : Application et utilité des hydrogrammes synthétiques mono–frequence HSMF " Proceedings of The AMHY-FRIEND International Workshop on Hydrological Extremes, held at University of Calabria, Cosenza (Italy), May 3-4, 2006.

**TOUAIBIA T.**, Manuel Pratique d 'Hydraulique, Mars 2005. Institut de l'ENSH Blida.

**Annexe**

**Tableau IV.6 : Volumes de sédiment de crue (05/05/1985)**

<b>Les valeurs données par HEC-HMS (Tonne)</b>					
<b>Oued Boughrara (17R)</b>	<b>Oued Ichemul (16R)</b>	<b>Oued T'kout (20R)</b>	<b>Oued Labiod (gorges de Thiganimine (19R)</b>	<b>Observé à la station de Mechouneche (25R)</b>	<b>Calculer (Données) (Tonne)</b>
17.32	11.50	20.20	61.74	198.86	3378.96
19.52	12.90	21.30	69.24	215.96	4501.48
21.82	15.40	22.90	80.14	240.66	5518.80
25.32	17.90	25.00	92.24	273.46	3062.96
27.22	19.20	27.80	102.94	316.06	2681.15
28.72	20.50	30.50	112.84	340.56	483.84
30.52	22.70	33.20	124.14	368.86	2019.03
33.72	26.30	36.00	139.44	424.26	889.89
39.12	30.50	39.10	156.44	476.46	689.33
44.12	31.70	42.90	173.34	518.36	523.82
44.92	30.50	46.60	185.64	558.86	374.58
42.52	29.30	49.60	190.94	582.06	238.72
38.92	27.90	51.20	190.24	601.66	215.93
36.22	25.90	53.60	187.54	611.86	194.57
34.32	23.90	53.30	181.74	616.46	180.68
33.12	22.40	52.20	177.04	615.46	160.40
32.32	21.20	50.80	171.54	611.86	140.42
31.72	20.40	49.50	164.84	605.46	121.88
31.22	19.80	48.40	158.64	599.36	105.82
30.82	19.30	47.50	152.34	591.66	91.55
30.42	19.00	46.70	147.54	580.86	83.87
30.12	18.60	46.10	143.44	567.96	80.62
29.72	18.20	45.50	139.74	554.16	77.42
29.32	17.60	44.90	135.84	540.56	74.26
28.72	17.00	44.20	131.84	526.26	71.14
26.12	16.40	43.40	127.74	508.16	68.07
24.32	16.00	42.30	123.04	490.46	65.04
22.62	15.70	40.70	118.44	466.66	62.05
22.32	15.30	38.80	115.44	451.46	58.88
22.32	14.90	36.70	111.94	435.96	56.14
22.32	13.30	34.60	106.64	420.56	53.42
22.32	13.00	32.60	103.14	407.26	50.74
22.32	12.40	30.60	99.24	394.76	48.09
22.32	12.30	30.20	96.14	383.16	45.47
22.42	12.10	30.30	92.74	374.96	42.88
22.42	12.00	30.30	90.64	364.76	40.32
22.42	11.90	30.40	88.64	356.46	37.79

### Annexe

22.42	11.90	30.40	87.24	350.06	35.30
22.42	11.90	30.50	85.14	343.56	32.83
22.52	11.80	30.50	84.34	336.66	30.40
22.52	11.80	30.60	83.24	329.86	27.99
22.52	11.80	30.60	82.54	325.66	25.62
22.52	11.80	30.70	81.94	321.66	23.27
22.52	11.70	30.80	81.44	317.76	20.96
22.62	11.70	30.80	81.04	314.76	18.68
22.62	11.60	30.90	80.84	313.46	16.43
22.62	11.60	30.90	80.84	318.36	14.21
22.62	12.20	31.00	84.34	336.06	12.02
22.72	12.30	31.90	137.04	387.66	9.86
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	7.74
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	5.64
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	3.57
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.13
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.12
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.11
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.11
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.10
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.09
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.08
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.08
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.07
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.06
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.05
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.05
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.04
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.03
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.02
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.02
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.01
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	0.99
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	0.99
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	0.98
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	0.97
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	0.96
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	0.96
0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	0.94
<b>1336.68</b>	<b>847.00</b>	<b>1819.50</b>	<b>5895.16</b>	<b>21833.68</b>	<b>8584.98</b>

## Annexe

Tableau IV.7 : volume de sédiment de crue (06/03/1986)

Les valeurs données par HEC-HMS (Tonne)					
Oued Boughrara (17R)	Oued Ichemul (16R)	Oued T'kout (20R)	Oued Labiod (gorges de Thiganimine (19R)	Observé à la station de Mechouneche (25R)	Calculer (Données) (Tonne)
33.05	16.85	41.55	81.65	245.85	4673.38
36.55	20.45	43.45	90.35	275.05	3232.44
41.55	24.85	46.15	106.75	321.55	2558.07
45.55	27.95	50.25	121.75	375.35	1963.35
48.35	30.45	54.55	143.05	427.65	1449.07
50.75	32.65	58.95	154.65	523.25	976.44
53.35	35.35	63.15	175.55	1421.75	900.33
57.95	42.85	67.55	200.25	2947.75	823.33
65.95	49.85	72.95	233.25	1157.45	747.24
72.75	52.65	79.75	267.75	872.95	696.86
75.15	49.65	87.15	282.45	901.15	619.93
71.25	46.35	93.65	286.15	998.95	586.83
66.45	41.95	98.15	283.25	1085.05	518.18
62.75	38.75	99.65	273.65	1117.25	506.63
60.15	35.75	99.85	263.85	1107.05	430.26
58.55	34.05	99.05	249.95	1085.15	408.47
57.35	32.65	96.65	237.75	1063.45	396.79
56.45	31.65	94.45	226.85	1042.35	385.33
55.75	30.85	92.65	217.15	1023.25	364.36
55.15	30.25	91.25	209.35	999.25	337.97
54.65	29.65	90.05	203.05	957.95	307.78
54.05	29.15	89.05	197.85	871.15	277.64
53.55	28.55	88.15	192.45	833.35	261.64
52.95	27.95	87.35	187.75	797.95	233.48
52.05	27.05	86.65	182.15	778.55	208.12
49.85	25.85	85.55	177.05	752.95	188.61
46.45	24.85	84.05	168.55	722.15	163.65
43.95	24.05	81.65	161.55	681.25	138.74
43.95	23.15	78.45	156.15	651.65	119.55
43.95	21.75	74.55	150.45	626.05	101.22
44.05	20.55	70.45	143.45	598.95	101.12
44.15	19.95	66.65	138.15	580.15	101.03
44.15	19.45	64.25	132.95	561.55	100.94
44.25	19.35	64.35	128.85	545.85	100.85
44.35	19.25	64.65	126.65	534.75	100.75
44.35	19.15	64.85	124.15	524.45	100.66

### Annexe

44.45	19.15	65.15	122.65	514.15	100.57
44.55	19.05	65.45	121.45	507.85	100.48
44.55	19.05	65.65	120.65	500.55	100.38
44.65	19.05	65.95	120.05	497.15	100.29
44.75	18.95	66.25	119.65	494.05	100.20
44.85	18.95	66.55	119.35	492.75	100.11
44.85	18.85	66.85	119.15	492.05	90.92
44.95	18.85	67.15	118.95	492.35	90.84
45.05	18.75	67.55	118.75	492.15	90.75
45.15	18.75	67.85	118.45	491.05	90.67
45.15	18.75	68.25	118.85	489.65	90.58
44.65	18.45	68.55	128.55	505.05	90.50
44.85	34.85	69.45	164.55	566.35	90.42
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.33
0.00	0.00	0.00	0.00		90.25
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.16
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.08
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.07
<b>2467.95</b>	<b>1346.95</b>	<b>3642.15</b>	<b>8287.65</b>	<b>36545.35</b>	<b>26868.61</b>



## Annexe

Tableau IV.03 : Caractéristiques hydrauliques CREU\_06\_03\_1986

	Débit solide	Débit solide	Débit solide		Débit solide	Débit solide	Débit solide
Tems	Calcul	Mesure	Mesure	Tems	Calcul	Mesure	Mesure
Heur	Tonne	Out	In	Heur	Tonne	Out	In
1	4673.381	12805.540	9693.699	38	100.476	1446.369	738.302
2	3232.440	2435.544	1422.743	39	100.384	1250.962	2382.423
3	2558.065	1804.856	1025.142	40	100.291	1573.735	837.253
4	1963.351	1449.945	463.501	41	100.198	1295.327	813.521
5	1449.067	1531.597	790.326	42	100.106	1298.668	836.401
6	976.445	1228.529	669.876	43	90.921	1360.197	1067.896
7	900.326	1358.014	736.848	44	90.837	1534.176	1134.674
8	823.333	1522.206	899.943	45	90.752	1238.688	1191.482
9	747.235	979.468	390.437	46	90.668	1784.665	1170.509
10	696.856	958.940	378.797	47	90.584	1517.807	1175.534
11	619.931	1329.919	783.947	48	90.500	1278.156	1203.042
12	586.829	1186.163	675.556	49	90.415	1561.373	1503.402
13	518.180	891.341	552.168	50	90.331	1318.884	1836.845
14	506.635	897.890	542.410	51	90.247	1389.847	1002.511
15	430.258	1134.799	922.466	52	90.163	1115.635	1064.254
16	408.471	898.867	810.422	53	90.078	1754.914	1064.792
17	396.791	1073.640	1097.254	54	90.072	1506.616	1731.030
18	385.325	956.250	1143.761	∑	<b>26868.615</b>	<b>94161.404</b>	<b>88056.345</b>
19	364.358	1223.891	1972.393	%		350.451	327.729
20	337.969	964.220	1138.340				
21	307.780	1031.707	527.563				
22	277.637	1391.022	903.592				
23	261.637	1448.819	5397.606				
24	233.477	1863.655	6986.455				
25	208.121	1693.951	2223.345				
26	188.608	2497.843	986.355				
27	163.654	1942.094	2762.046				
28	138.739	4157.877	3328.618				
29	119.546	3055.373	5910.912				
30	101.218	2700.672	1333.803				
31	101.125	2813.327	1073.314				
32	101.032	1706.980	2761.883				
33	100.940	1660.183	894.363				
34	100.847	1108.878	1287.476				
35	100.754	1629.957	782.927				
36	100.662	1331.457	2953.285				
37	100.569	1269.971	1078.902				

## Annexe

Tableau IV .04: Caractéristiques hydrauliques CREU\_13\_11\_1988

	Débit solide	Débit solide	Débit solide		Débit solide	Débit solide	Débit solide
Tems	Calcul	Mesure	Mesure	Tems	Calcul	Mesure	Mesure
Heur	Tonne	Out	In	Heur	Tonne	Out	In
1	3378.96	7065.026	5296.900	40	30.40	1427.995	1080.519
2	4501.48	2415.738	1499.184	41	27.99	1076.305	1307.093
3	5518.80	1829.367	864.727	42	25.62	1437.298	1923.052
4	3062.96	1502.004	784.142	43	23.27	1356.946	1075.258
5	2681.15	1395.569	711.428	44	20.96	1476.266	1080.781
6	483.84	918.827	362.568	45	18.68	1380.955	1065.286
7	2019.03	1398.488	706.491	46	16.43	1827.087	1577.352
8	889.89	838.747	1106.853	47	14.21	1629.594	1047.104
9	689.33	1114.608	807.301	48	12.02	1749.234	1072.777
10	523.82	1593.352	8091.674	49	9.86	1550.036	1402.177
11	374.58	1625.089	2292.008	50	7.74	1906.179	1033.109
12	238.72	3925.623	1644.126	51	5.64	977.151	1050.324
13	215.93	2316.684	3196.805	52	3.57	1972.360	1073.681
14	194.57	2078.716	1447.342	53	1.13	2015.392	1096.390
15	180.68	1383.225	2783.636	54	1.12	1897.482	1067.712
16	160.40	2011.448	2218.290	55	1.11	1587.928	1565.170
17	140.42	1796.449	3210.196	56	1.11	850.191	1004.961
18	121.88	1860.052	4576.675	57	1.10	1765.911	1031.866
19	105.82	2142.508	1732.373	58	1.09	1815.238	1047.086
20	91.55	2316.716	684.048	59	1.08	967.083	1601.002
21	83.87	2568.196	486.174	60	1.08	1556.300	964.825
22	80.62	1662.227	403.831	61	1.07	1422.395	933.490
23	77.42	1475.835	279.396	62	1.06	834.669	834.669
24	74.26	1019.980	557.691	63	1.05	859.141	865.136
25	71.14	1654.111	9537.235	64	1.05	1279.307	699.185
26	68.07	1399.770	1760.619	65	1.04	1276.538	847.267
27	65.04	1432.141	1531.180	66	1.03	1172.952	822.226
28	62.05	1576.612	1327.134	67	1.02	1322.274	901.406
29	58.88	1446.333	1586.690	68	1.02	943.986	1105.630
30	56.14	2568.582	314.324	69	1.01	1202.118	737.638
31	53.42	1546.529	3493.609	70	1.00	1211.513	959.669
32	50.74	788.234	1382.005	71	0.99	876.727	961.774
33	48.09	1892.231	1373.381	72	0.99	1221.170	893.876
34	45.47	1920.441	1352.259	73	0.98	1213.834	740.725
35	42.88	1503.850	1355.642	74	0.97	1039.627	510.157
36	40.32	1375.480	1367.459	75	0.96	1125.708	719.200
37	37.79	723.504	1281.007	76	0.96	690.863	715.774
38	35.30	1793.205	1573.461	77	0.94	1121.192	714.312
39	32.83	1605.936	1206.538		<b>26900.52</b>	<b>122518.378</b>	<b>115316.061</b>