

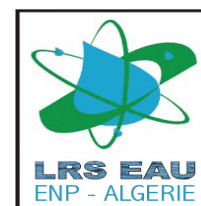
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'EAU ET DEVELOPPEMENT**

**DURABLE**

**OPTION : SCIENCES DE L'EAU**



**MEMOIRE DE MAGISTER**

**Présenté par : BOUACH Ahcène**

**Ingénieur d'état en hydraulique**

**THEME**

**« SIMULATION NUMERIQUE DU TRANSPORT SOLIDE PAR  
CHARRIAGE VIA LE CODE DE CALCUL RUBAR20TS »**

**Soutenu publiquement le : 09/03/2011**

**Devant le jury:**

**Présidente : BELHANECHÉ Naïma Pr ENP**

**Directeur de mémoire : BENMAMAR Saâdia M.C (A)**

**Examineur : MITICHE KETTAB Ratiba MC (A) ENP**

**Examineur : MIHOUBI Mustapha Kamel MC (A) ENP**

**Examineur: SOUAG Doudja MC (A) USTHB**

**PROMOTION 2010/2011**

	Page
Sommaire.....	i
Résumé court.....	vi
Dédicaces.....	vii
Remerciements.....	viii
Liste des figures.....	ix
Liste des photos.....	xii
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des notations.....	xiv
Introduction Générale.....	1
<b>CHAPITRE I Notions générales sur le transport solide</b>	
1- Les différents modes de transport solide.....	4
1-1- Le charriage.....	5
1-2- La suspension.....	5
2- Mécanisme de transfert d'énergie.....	5
3- La capacité de transport.....	5
4- Caractéristiques de l'écoulement liquide.....	6
5- Les forces agissant sur la particule solide.....	6
5-1- La force d'entraînement.....	7
5-2- La force de frottement.....	8
6- La contrainte adimensionnelle (paramètre de Shields).....	8
7- La taille des particules.....	10
7-1- L'analyse granulométrique.....	10
7-2- Coefficient d'uniformité.....	10
7-3- La méthode de Vincent Koulinski.....	10
7-4- Classification des sédiments.....	11
7-5- Coefficient de rugosité.....	11
7-6- La courbe granulométrique des sédiments des cours d'eau.....	11
7-7- Influence de la taille des particules.....	12

7-8- Effet de masquage/exposition.....	12
8- Quantification de transport solide .....	13
8-1- Mesure de transport solide.....	13
8-1-1. Mesure particules charriées.....	13
8-1-2. Mesure de particules en suspension.....	13
8-2- Formules empiriques pour le transport à granulométrie uniforme.....	14
8-2-1. Charriage.....	13
.....	
8-2-1.1. Formule à seuil.....	14
8-2-1.2. Formule sans seuil.....	15
8-3- Formules empiriques pour le transport à granulométrie étendue.....	16
8-3-1. Approche statistique.....	16
8-3-2. Approche de Bagnold (1948).....	16
8-3-3. Formule de Smart et Jaeggi (1983).....	16
9- Apport solide à l'échelle de bassin versant.....	17
9-1- Facteurs de l'érosion.....	17
9-1-1. Le climat.....	17
9-1-2. La végétation.....	17
9-1-3. La topographie.....	18
9-1-4. L'utilisation des terres.....	18
9-2- Estimation du taux de production des sédiments.....	18
9-2-1. Modèle Shesed.....	18
9-2-2. Modèle de Ngev.....	18
9-2-3. Méthode de Tixeront .....	19
9-2-4. Méthode du Fournier .....	19
9-2-5. Méthode de SOGREAH .....	20
9-2-6. Méthode du Meddi.....	21
9-3- L'érosion en Algérie.....	21
<b>CHAPITRE II Etat de l'art sur les modèles mathématiques traitant le transport solide</b>	
1- Approche classique.....	23
1-1- Modélisation monodimensionnelle .....	24
1-2- Modélisation bidimensionnelle.....	25

1-3- Modélisation tridimensionnelle.....	26
2-Modélisation diphasique du transport solide.....	28
3- Principaux codes numériques existants.....	29
3-1- Codes unidimensionnels.....	29
3-2- Codes bidimensionnels.....	30
3-3-Codes tridimensionnels.....	32
<b>CHAPITRE III Présentation de la zone d'étude : Vallée du M'zab</b>	
1- Bassin versant du M'zab.....	36
2- Climat.....	37
3- Précipitations.....	38
4- Températures.....	38
5- Vent, et érosion éolienne .....	39
6- Occupation du sol.....	40
6-1- Couverture végétale.....	40
6-2- Urbanisme.....	41
7- Géologie, et morphologie .....	42
8- Granulométrie.....	42
9- Inondations à Ghardaïa.....	43
10- Inondation du mois Octobre 2008 .....	46
10-1- Apport liquide.....	50
10-1-1. Hydrogramme de crue.....	50
10-1-1.1 Description de l'hydrogramme de crue.....	50
10-2- Application de la méthode Fournier sur le bassin versant du M'zab.....	54
<b>CHAPITRE IV Modélisation mathématique du phénomène du transport solide - Présentation du code Rubar20TS</b>	
1- Partie liquide.....	57
1-1- Equations de Saint-Venant.....	57
1-2- Principe de résolution des équations .....	58
1-2-1. Conditions aux limites .....	58
1-2-2. Conditions initiales.....	58
1-2-3. Maillage.....	59
2- Partie solide.....	59

2-1- Equation de convection-diffusion.....	59
2-2- Transport en suspension.....	59
2-2-1. Taux d'érosion E .....	59
2-2-2. Taux de sédimentation S.....	60
2-3- Transport par charriage.....	62
2-4- Méthode de résolution.....	63
3- Description du code de calcul Rubar 20TS	64
3-1- Construction du maillage .....	64
3-1-1. Construction du fichier (*.ST).....	64
3-1-2. Construction du fichier (*.M).....	66
3-1-3. Construction du fichier (*.IMA).....	66
3-1-4. Construction du fichier (*.MAI).....	67
3-2- Définitions des données de calcul.....	67
3-2-1. Utilisation du programme VF2M .....	68
3-2-2. Utilisation du logiciel FUDAA.PREPRO .....	69
3-2-2.1. Définitions des données brutes .....	68
3-2-2.2. Définition des positions des limnigrammes.....	69
3-2-2.3. Définition des ouvrages et leurs caractéristiques.....	69
3-2-2.4. Définition des conditions aux limites .....	70
3-2-2.5. Définition des conditions initiales .....	71
3-2-2.6. Définition des paramètres du calcul .....	71
3-3- Calcul via Rubar20TS.exe.....	76
3-4- Exploitation des résultats.....	77
3-4-1. Extraction des résultats.....	77
3-4-2. Visualisation des résultats.....	78
<b>CHAPITRE V Etude du transport solide dans la ville de Ghardaïa suite à la crue d'octobre 2008</b>	
1- Objectif de la simulation.....	81
2- Données disponibles, résultats de calcul et calage du modèle.....	81
2-1- Données topographiques .....	82
2-2- Coefficient de forttement .....	83
3- Construction du maillage.....	85

3-1- Maillage initial .....	85
3-2- Maillage final.....	86
4- Conditions aux limites.....	88
5- Les conditions initiales .....	89
6- Les zones urbanisées.....	90
7- Les paramètres de calcul.....	91
8- Les résultats de calcul.....	92
8-1- Partie hydrodynamique.....	92
8-1-1. Résultats sur les hauteurs d'eau.....	92
8-1-2. Résultat sur le débit d'eau .....	95
8-1-3. Résultats sur la vitesse d'écoulement.....	100
8-2-Partie sédimentaire.....	103
8-2-1-L'évolution du taux dépôt/érosion.....	103
8-2-2-L'évolution de la concentration.....	106
8-2-3-La vitesse de frottement de fond.....	108
8-2-4-L'évolution de la bathymétrie .....	111
Conclusion Générale.....	120
Perspectives.....	121
Références bibliographiques.....	123

## ملخص

يشكل نقل الرواسب مصدر قلق كبير للحفاظ على الموارد المائية، تهيئة الإقليم، وحماية المدن في الجزائر، تسمح دراسة هذه الظاهرة من فهم العملية الفيزيائية، كما تسهل من محاربة العواقب السيئة للظاهرة.

خلال العمل المقدم، قمنا في المقام الأول بتقديم مختلف آليات نقل الرواسب بصفة عامة، كما أننا قمنا في المقام الثاني بدراسة التغيرات المائية و الترسبية المرتبطة بفيضان اكتوبر 2008 بمدينة غرداية بواسطة البرنامج الرقمي ريبار 20 تي اس، يعتبر هذا الأخير برنامج محاكاة يسمح بحل معادلات السانت فيينانت بالنسبة للحالة السائلة و معادلة الانتشار و الحمل الحراري بالنسبة للحالة الصلبة.

**كلمات مفتاحية:** نقل الرواسب، تراكم الطمي، تآكل التربة، ريبار 20 تي اس، معادلات السانت فيينانت، معادلة الانتشار و الحمل الحراري

## Résumé

Le transport solide représente un problème majeur pour la préservation des ressources hydriques, l'aménagement des territoires et la protection des villes en Algérie. Une étude de ce phénomène permet de bien comprendre le processus physique, et facilite la lutte contre ses mauvaises conséquences.

Dans notre travail, nous avons en premier lieu décrit d'une façon générale les différents mécanismes de transport solide. Nous avons étudié en second lieu l'évolution hydrosédimentaire associée à la crue d'Octobre 2008 au niveau de la ville de Ghardaïa via le code numérique *Rubar20Ts*. Ce dernier est un code de calculs qui permet de résoudre les équations de Saint Venant pour la phase liquide et l'équation de convection – diffusion pour la phase solide.

**Mots clés :** Transport solide, envasement, érosion, Rubar20Ts, équations de Saint Venant, équation de convection – diffusion.

## Abstract

Sediment transport is a major concern for the preservation of water resources, land management and protection of cities in Algeria. A study of this phenomenon allows to good understanding the physical process, and facilitates the fight against its evil consequences. In our work, we first described in general the different mechanisms of sediment transport. Secondly we have studied secondly the evolution hydro-sedimentary associated with the flood of October 2008 at the Ghardaïa City by the numerical code *Rubar20Ts*. The latter is a computer code that solves the Saint-Venant equations for the liquid phase and the convection-diffusion equation for the solid phase.

**Keywords:** Sediment transport, siltation, erosion, Rubar20Ts, Saint-Venant equations, convection-diffusion equation.

## Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Mes parents*

*Mon frère*

*Mes sœurs*

*Toute ma famille*

*Mes amis*



## Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier très chaleureusement ma directrice de thèse Mlle S. BENMAMAR, *Maitre de conférences à l'école nationale polytechnique*, pour son soutien, pour ses consignes, et pour sa générosité. C'est grâce à elle que j'ai pu faire ce travail, car elle s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, c'était le principal moteur qui m'a vraiment poussé et aidé pour bien travailler. Avec sa compétence dans le travail et ses connaissances dans le domaine, elle m'avait facilité énormément la tâche.

Je remercie le Professeur BELHANECHÉ Naïma de m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

Je remercie les Docteurs MITICHE KETTAB Ratiba, SOUAG Doudja et MIHOUBI Mustapha Kamel d'avoir accepté de jurer ce travail et d'y avoir contribué à sa réalisation.

Je remercie également Mr A. KETTAB (*Professeur à l'école nationale polytechnique*) pour son soutien sur tous les plans, pour sa gentillesse et son efficacité lors des difficultés que j'ai rencontrées.

Je remercie aussi Mr A. PAQUIER (*Cemagref*) qui a mis à ma disposition le code de calcul *Rubar20TS*, qui m'a permis de profiter de ses vastes connaissances techniques et scientifiques, et qui a accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Je remercie enfin toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Liste des figures

	page
<b>Figure I.1</b> : Différents modes de transport solide.....	4
<b>Figure I.2</b> : Forces appliquées sur les parois.....	8
<b>Figure I.3</b> : Force d'entraînement et la force de frottement qui s'exercent sur une particule solide	8
<b>Figure I.4</b> : Diagramme de Yalin-Shield.....	9
<b>Figure I.5</b> : Courbe granulométrique in-situ.....	12
<b>Figure I.6</b> : Effet de masquage exposition.....	13
<b>Figure II.1</b> : Procédure de simulation via Rubar20TS.....	31
<b>Figure II.2</b> : Fonctionnement de Fluent.....	33
<b>Figure III.1</b> : Bassin versant du M'zab.....	36
<b>Figure III.2</b> : Oueds du M'zab.....	37
<b>Figure III.3</b> : Précipitations moyennes mensuelles du Ghardaïa.....	38
<b>Figure III.4</b> : Températures moyennes mensuelles à Ghardaïa.....	39
<b>Figure III.5</b> : Courbe granulométrique approximative de l'oued.....	43
<b>Figure III.6</b> : Précipitations de la crue d'Octobre 2008.....	47
<b>Figure III.7</b> : Description de l'hydrogramme de crue.....	51
<b>Figure III.8</b> : Hydrogramme type de la crue centennale de l'oued M'Zab au site d'El Abiod.....	53
<b>Figure III.9</b> : Hydrogramme de crue de la ville de Ghardaia.....	54
<b>Figure III.10</b> : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab.....	55
<b>Figure III.11</b> : Apport solide au niveau de la ville de Ghardaia.....	56
<b>Figure IV.1</b> : Construction des sections en travers et des lignes directrices par le Fudaa.modeleur	65
<b>Figure IV.2</b> : Sous-programme Secma.....	66
<b>Figure IV.3</b> : Définition des paramètres de la simulation via le logiciel Fudaa-Prepro.....	68
<b>Figure V.1</b> : Profil en travers du lit de l'oued M'zab.....	82
<b>Figure V.2</b> : Bathymétrie de la zone d'étude.....	83
<b>Figure V.3</b> : Topographie au niveau du lit mineur de l'oued.....	83
<b>Figure V.4</b> : Carte des frottements de fond au niveau de la ville.....	85
<b>Figure V.5</b> : Maillage initial généré par le logiciel Fudaa- modeleur.....	86
<b>Figure V.6</b> : Maillage final du domaine de calcul.....	88
<b>Figure V.7</b> : Fenêtre du sous programme Mcoxima.....	88
<b>Figure V.8</b> : Données aux limites au niveau des sections d'entrées (Fudaa-Prepro).....	89
<b>Figure V.9</b> : Fenêtre permettant la définition des conditions initiales.....	90
<b>Figure V.10</b> : Délimitation et définition des zones urbanisées.....	91

<b>Figure V.11</b> : Fenêtre du sous programme Rubar20TS indiquant la fin de calcul.....	92
<b>Figure V.12</b> : Hauteur d'eau pour t = 4875s.....	93
<b>Figure V.13</b> : Hauteur d'eau pour t = 13185.2s.....	93
<b>Figure V.14</b> : Hauteur d'eau pour t = 32280s.....	94
<b>Figure V.15</b> : Hauteur d'eau pour t = 68160s.....	95
<b>Figure V.16</b> : Débit unitaire, t = 32835s.....	96
<b>Figure V.17</b> : Evolution du débit unitaire au niveau de la section 1.....	96
<b>Figure V.18</b> : Evolution du débit unitaire au niveau de la section 2.....	97
<b>Figure V.19</b> : Evolution du débit unitaire au niveau de la section 3.....	97
<b>Figure V.20</b> : Répartition des sections de calcul au niveau de la rive droite.....	98
<b>Figure V.21</b> : Courbes des débits au niveau de la rive droite.....	99
<b>Figure V.22</b> : Sens et vitesse d'écoulement pour t = 47700s.....	99
<b>Figure V.23</b> : Sens et vitesse d'écoulement pour t= 55005s.....	100
<b>Figure V.24</b> : Vitesse d'écoulement t = 32835s.....	101
<b>Figure V.25</b> : Evolution de la vitesse d'écoulement au niveau de la section1.....	101
<b>Figure V.26</b> : Evolution de la vitesse d'écoulement au niveau de la section 2.....	102
<b>Figure V.27</b> : Evolution de la vitesse d'écoulement au niveau de la section3.....	102
<b>Figure V.28</b> : Taux d'érosion pour t = 11250.2 s.....	103
<b>Figure V.29</b> : Taux de dépôt pour t = 11250.2 s.....	104
<b>Figure V.30</b> : Taux d'érosion pour t = 32835s.....	104
<b>Figure V.31</b> : Taux de dépôt pour t = 32835 s.....	105
<b>Figure V.32</b> : Taux d'érosion pour t = 65895s.....	105
<b>Figure V.33</b> : Taux de dépôt pour t = 65895s.....	106
<b>Figure V.34</b> : Concentration de l'eau pour t = 32835 s.....	107
<b>Figure V.35</b> : Evolution de la concentration en sédiments au niveau de la section 1.....	107
<b>Figure V.36</b> : Evolution de la concentration en sédiments au niveau de la section 2.....	108
<b>Figure V.37</b> : Evolution de la concentration en sédiments au niveau de la section 3.....	108
<b>Figure V.38</b> : Vitesse de frottement de fond pour t = 32835s.....	109
<b>Figure V.39</b> : Evolution de la vitesse de forttement au niveau de la section 1.....	110
<b>Figure V.40</b> : Evolution de la vitesse de forttement au niveau de la section 2.....	110
<b>Figure V.41</b> : Evolution de la vitesse de forttement au niveau de la section 3.....	111
<b>Figure V.42</b> : Bathymétrie avant la crue.....	112
<b>Figure V.43</b> : Bathymétrie après la crue.....	112
<b>Figure V.44</b> : Délimitation des zones sensibles à l'érosion et au dépôt.....	113

<b>Figure V.45</b> : Projection des zones sensible sur la carte de la ville.....	113
<b>Figure V.46</b> : Répartition des points de calcul de l'évolution du fond pour les zones sensibles....	114
<b>Figure V.47</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de E1.....	114
<b>Figure V.48</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de E2.....	115
<b>Figure V.49</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de E3.....	115
<b>Figure V.50</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de E4.....	116
<b>Figure V.51</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de E5.....	116
<b>Figure V.52</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de E6.....	117
<b>Figure V.53</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de E7.....	117
<b>Figure V.54</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de D1.....	118
<b>Figure V.55</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de D2.....	118
<b>Figure V. 56</b> : Évolution de la bathymétrie au niveau de D3.....	119

## Liste des photos

	page
<i>Photo III.1</i> : Ville de Ghardaïa.....	36
<i>Photo III.2</i> : Couverture végétale à Ghardaïa.....	40
<i>Photo III.3</i> : Escaliers et Rues des Ksour à la ville de Ghardaïa.....	41
<i>Photo III.4</i> : Hamada : qui est un plateau caillouteux.....	42
<i>Photo III.5</i> : Dépôts et débris solides après la crue.....	48
<i>Photo III.6</i> : Débordement de l'oued M'zab.....	49
<i>Photo III.7</i> : Dépôts et débris solides après la crue.....	49
<i>Photo III.8</i> : Destruction du barrage El Haimeur par la crue.....	50
<i>Photo V.1</i> : Délimitation de la zone d'étude.....	80
<i>Photo V.2</i> : Zone étudiée –photo satellitaire.....	81

## Liste des tableaux

	page
<b>Tableau I.1</b> : Expressions des différentes forces agissant sur la particule solide.....	7
<b>Tableau I.2</b> : Classification de Ramette.....	10
<b>Tableau I.3</b> : Degré d'érosion en fonction de la pluviométrie.....	19
<b>Tableau I.4</b> : Corrélations de Fournier.....	20
<b>Tableau I.5</b> : Valeurs de $\alpha$ pour différentes perméabilités.....	21
<b>Tableau III.1</b> : Historiques des crues à Ghardaïa.....	44
<b>Tableau III.2</b> : Valeurs de $\gamma$ en fonction des caractéristiques du bassin.....	52
<b>Tableau III.3</b> : Hydrogramme de crue au niveau de la ville de Ghardaïa.....	53
<b>Tableau III.4</b> : Apport solide au niveau de la ville de Ghardaïa.....	56
<b>Tableau IV.1</b> : Options de calcul utilisés par le RUBAR20TS pour le calcul du terme érosion/dépôt	75
<b>Tableau V.1</b> : Valeurs des différents facteurs de la formule de Chow.....	84
<b>Tableau V.2</b> : Pas d'espace des différentes zones du domaine de calcul.....	87

## Liste des notations

Ces notations sont utilisées dans l'ensemble du mémoire sauf indication contraire.

A	Superficie du bassin versant	m <sup>2</sup>
B	Largeur du cours d'eau	m
C	Concentration des sédiments	Kg/m <sup>3</sup>
C'	Coefficient de Chézy relatif aux grains	--
C <sub>e</sub>	Concentration à l'équilibre	Kg/m <sup>3</sup>
C <sub>EZ</sub>	Coefficient de l'érosion relative.	--
C <sub>f</sub>	Coefficient de frottement	--
C <sub>F</sub>	Coefficient de portance	--
C <sub>m</sub>	Coefficient de la masse ajoutée	--
C <sub>st</sub>	Coefficient de Strickler total	--
C <sub>to</sub>	Coefficient de torrentialité	--
C <sub>tp</sub>	Coefficient de la température	--
C <sub>T</sub>	Coefficient de traînée	--
C <sub>y</sub>	Concentration des sédiments à la profondeur y	Kg/m <sup>3</sup>
C <sub>z</sub>	Coefficient de Chézy pour les frottements au fond	--
d	Diamètre de la particule	m
d <sub>m</sub>	Diamètre moyen du grain	m
d <sub>*</sub>	Diamètre adimensionnel	--
D <sub>x</sub>	Coefficients de diffusion suivant l'axe des x et y	m <sup>2</sup> /s
E	Taux d'érosion	mm/h
E <sub>s</sub>	Taux d'érosion spécifique	Kg/m <sup>2</sup> /an
F <sub>r</sub>	Nombre de Froude	--
F <sub>x</sub>	Contraintes dues au vent	Kg/ms <sup>2</sup>
g	Accélération de la pesanteur	m/s <sup>2</sup>
h	Hauteur d'eau	m
H <sub>m</sub>	Hauteur moyenne du relief	m
I	Pente du lit du cours d'eau	--
I <sub>A</sub>	Indice d'aménagement	--
I <sub>C</sub>	Indice de culture caractérisant la couverture végétale	--
I <sub>CL</sub>	Coefficient climatique	--
I <sub>h</sub>	Indice de précipitations érosives	--
I <sub>K</sub>	Indice de sol (érodabilité)	--

$I_L$	Indice lithologique	--
$k$	Constante de Von Karman	--
$k_s$	Rugosité du fond	m
$K$	Coefficient de viscosité ou diffusion	--
$L_{char}$	Distance de chargement	m
$L$	Longueur de l'oued	m
$LS$	Indice de pente et de longueur de pente	--
$M$	Coefficient empirique	--
$P$	Apport local de pluie	mm
$P_t$	Pluie tombée durant le pas de temps $t$	h
$P_x, P_y$	Composantes des frottements à la paroi verticale	Kg/ms <sup>2</sup>
$Pr$	Porosité des sédiments	--
$q_c$	Débit solide unitaire des sédiments charriés	m <sup>2</sup> /s
$q_{cr}$	Débit unitaire critique	m <sup>2</sup> /s
$q_s$	Débit solide unitaire	m <sup>2</sup> /s
$q_{ss}$	Débit solide unitaire des sédiments en suspension	m <sup>2</sup> /s
$q_s^*$	Capacité maximale de transport	--
$q_x, q_y$	Débits unitaires suivant l'axe des x et y	m <sup>2</sup> /s
$Q$	Débit d'écoulement	m <sup>3</sup> /s
$Q_c$	Débit solide des sédiments charriés	m <sup>3</sup> /s
$Q_{cr}$	Débit critique	m <sup>3</sup> /s
$Q_p$	Débit de la pointe de crue	m <sup>3</sup> /s
$Q_s$	Débit solide	m <sup>3</sup> /s
$R$	Indice d'agressivité climatique (érosivité)	--
$R_e$	Nombre de Reynolds	--
$R_h$	Rayon hydraulique	m
$s$	Densité des sédiments	--
$S$	Taux de sédimentation	mm/h
$S_0$	Stock initial maximum	--
$S_s$	Densité relative	--
$t_b$	Temps de réponse du bassin	h
$t_c$	Temps de concentration	h
$t_m$	Temps de montée	h
$T_k$	Constante adimensionnelle égale à 0.0016	--



$u, v$	Vitesses liquides suivant l'axe des x et y	m/s
$u_{ch}$	Vitesse des sédiments charriés	m/s
$u_s, v_s$	Vitesses des sédiments suivant l'axe des x et y	m/s
$u_*$	Vitesse de frottement de l'écoulement	m/s <sup>1/2</sup>
$u_{*cr}$	Vitesse frottement critique	m/s <sup>1/2</sup>
$\vec{u}_\lambda$	Vitesse relative de la particule	m/s
$U$	Vitesse d'écoulement	m/s
$V_{ch}$	Volume des sédiments charriés	m <sup>3</sup>
$V_s$	Volume moyen annuel de sédiments produits	m <sup>3</sup>
$V_e$	Volume de l'eau	m <sup>3</sup>
$w_s$	Vitesse de chute des sédiments	m/s
$W$	Vitesse du vent à 10 m du sol	m/s
$Z$	Côte du fond	m
$\alpha$	Paramètre de calage adimensionnel	--
$\alpha_1, \alpha_2$	Coefficients de forme de la particule	--
$\beta$	Angle de frottement interne de matériau	--
$\gamma_s$	Poids volumique des grains solides	KN/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	Poids volumique de l'eau	KN/m <sup>3</sup>
$\eta$	Hauteur d'onde des rides	m
$\theta$	Angle de pente du lit	rad
$\lambda$	Longueur d'onde des rides	m
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide	Kg/m.s
$\mu_t$	Viscosité turbulente dynamique	m <sup>2</sup> /s
$\nu$	Viscosité cinématique du fluide	m <sup>2</sup> /s
$\nu_x, \nu_y$	Coefficients de diffusion liquide	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Masse volumique de l'eau	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Masse volumique des sédiments	Kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Nombre de Schmidt	--
$\tau$	Contrainte de cisaillement	Kg/ms <sup>2</sup>
$\tau_{cr}$	Contrainte d'érosion critique	Kg/ms <sup>2</sup>
$\tau_{crs}$	Contrainte critique de sédimentation	Kg/ms <sup>2</sup>
$\tau^*$	Contrainte de cisaillement adimensionnelle	--
$\tau_{cr}^*$	Contrainte adimensionnelle critique	--
$\Omega$	Vitesse angulaire de la particule.	rad/s

## **Introduction générale**

Le transport solide représente un problème majeur pour la préservation des ressources hydriques, l'aménagement des territoires et la protection des villes en Algérie. En effet, parmi les conséquences directes de ce phénomène, on trouve l'envasement des barrages, l'ensablement des terres agricoles...etc, ce qui provoque une perte économique importante pour le pays. Un autre résultat de ce phénomène c'est l'érosion du sol au niveau du fond des oueds, ce qui peut endommager les biens publics et privés.

Une étude de ce phénomène permet de bien comprendre le processus physique, et facilite la lutte contre ses mauvaises conséquences. Une telle étude est nécessaire pour pouvoir élaborer un bon plan d'action pour la protection des villes ou des barrages contre le problème de l'envasement ou de l'érosion.

Dans notre travail, nous avons en premier lieu décrit d'une façon générale les différents mécanismes de transport solide. Nous avons étudié l'évolution hydrosédimentaire associée à la crue d'Octobre 2008 au niveau de la ville de Ghardaïa via le code numérique *Rubar20Ts*. Ce dernier est un code de calcul qui permet de résoudre les équations de Saint Venant pour la phase liquide et l'équation de convection – diffusion pour la phase solide. Pour cela, nous avons structuré notre mémoire en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre sont données les différentes notions élémentaires qui régissent le phénomène de transport, à l'échelle de lit de l'oued et à l'échelle de bassin versant, et qui sert d'abord à la bonne compréhension de l'aspect physique. Ces notions seront utilisées dans le modèle mathématique, et dans le calcul des différents termes de transport solide.

Dans le deuxième chapitre, est présenté l'état de l'art sur les modèles de transport solide, où nous avons décrit et classé les principaux modèles mathématiques qui traitent le transport solide. Ces modèles sont regroupés selon leur type, en modèle unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel.

Dans le troisième chapitre, est présentée la zone d'étude (ville de Ghardaïa), nous avons exposé les différentes caractéristiques de la région qui influent sur le transport solide, tels que le climat, la nature et l'occupation de sol, la couverture végétale, la morphologie de la région...etc. Puis nous nous sommes concentrés sur l'étude de la crue d'Octobre 2008 qu'a connu la région. Nous avons estimé les différents paramètres essentiels pour le calcul, tel que l'apport liquide et solide.

Dans le quatrième chapitre, une présentation générale des équations régissant le transport solide utilisé pour l'élaboration du modèle mathématique du phénomène est donnée. Les équations de Saint-Venant sont utilisées pour la phase liquide, et l'équation de convection-diffusion pour la phase solide. En plus, nous avons exposé les différentes formules et options de calcul utilisées par le modèle. Par la suite, nous avons présenté le code de calcul

Rubar20TS, en commençant par la construction du maillage, puis l'instruction des données et le paramétrage du système, jusqu'au lancement de calcul et l'exploitation des résultats.

Dans le cinquième chapitre, nous avons exposé les démarches de la simulation et de la visualisation des résultats relatives à la crue d'Octobre 2008 au niveau de la ville de Ghardaïa. Le chapitre rassemble deux volets, dans le premier volet, nous avons donné les étapes de la simulation : la construction de maillage, la définition des données et le paramétrage du système, tandis que dans le deuxième volet, nous avons présenté et analysé les différents résultats de calcul fournis par Rubar20TS, comme la hauteur d'eau, le taux de sédimentation...etc.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

## Chapitre I

### Notions générales sur le transport solide

Le transport solide est le transport des sédiments et débris transportés par un cours d'eau ou une rivière. On désigne souvent par le transport solide le transport des matériaux granulaires (matériaux alluvionnaires, ou autres matériaux granulaires apportés à la rivière), car souvent un cours d'eau peut transporter des arbres arrachés des berges, qui ne sont pas pris en considération. Ces matériaux granulaires transportés proviennent soit du bassin versant, soit du fond ou des berges du lit.

Les matériaux du bassin versant proviennent de sa surface sous l'effet de vent, des pluies, des fontes des neiges, et des cycles gel-dégel. Seulement une partie du produit de cette érosion va atteindre le cours d'eau, et ce type d'érosion s'appelle érosion aréolaire.

Le second type des matériaux provient du fond et des berges du cours d'eau ; les forces qui s'exercent sur les particules sont considérables, et elles peuvent entraîner des particules de plus en plus grossières.

Le transport solide se diffère suivant les caractéristiques du régime d'écoulement. Pour distinguer entre eux, nous adaptons la définition de *Bernard* (1925) pour les rivières, les rivières torrentielles et les torrents (*Dufresne*, 2005).

- Les rivières : ont une pente inférieure à 1% ;
- Les rivières torrentielles : ont une pente comprise entre 1 et 6% ;
- Les torrents : ont une pente supérieure à 6%.

En ce qui concerne les rivières (y compris les cours d'eau) et les rivières torrentielles, nous pouvons distinguer entre la phase liquide et la phase solide. Par contre, pour les torrents la présence de la phase solide perturbe l'écoulement liquide, et au-delà d'une pente de 6 à 10%, la hauteur d'écoulement est supérieure à ce qu'elle serait en présence d'eau seule, de plus nous ne pouvons pas considérer que le fluide a un comportement newtonien.

Pour bien comprendre le transport solide, il faut connaître les propriétés de l'écoulement liquide, mais également celles de la phase solide.

L'écoulement liquide est caractérisé par le fluide incompressible. L'étude de l'écoulement nécessite l'application des deux équations régissant l'écoulement de fluide incompressible, qui sont l'équation de conservation de la masse et celle de Navier Stokes.

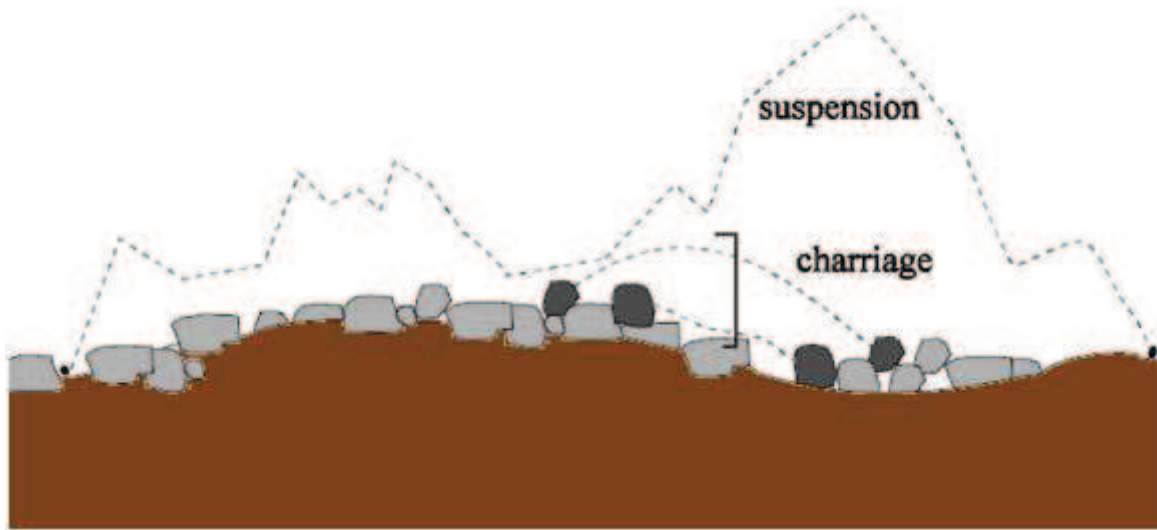
En ce qui concerne la phase solide, nous devons connaître la nature des grains et ses propriétés physique telles que la densité, la taille, la forme, la courbe granulométrique, ainsi que les différentes forces agissant sur la particule solide ce qui nous permet de bien comprendre le phénomène du transport avec ses différents modes et ses mécanismes de transfert d'énergie.

## 1. DIFFERENTS MODES DE TRANSPORT SOLIDE

D'une façon générale, on distingue entre les deux types de transport solide :

- le charriage
- la suspension

Une continuité et une interaction entre les deux types est toujours présente, c.à.d. la suspension est toujours associée au charriage, et lorsque il ya des particules en suspension il y'a également du charriage (*figure I.1*).



*Figure I.1* : Différents modes de transport solide (*Gyr*, 1983).

Ces deux types de transport solide sont fonction de la vitesse de l'écoulement et des matériaux transportés à la fois. Pour un cours d'eau dont le lit est constitué d'alluvions de tailles identiques, pour de faibles vitesses d'écoulement toutes les particules sont au repos, si la vitesse augmente, les particules se déplacent sur le fond en roulant, en glissant ou en effectuant des bonds successifs (des sauts) : c'est le charriage. Si la vitesse augmente encore, toutes les particules seront entraînées par le courant, c'est le transport en suspension. Cet exemple, nous montre que la vitesse d'écoulement est un paramètre essentiel dans le mode de transport.

Un autre exemple, nous montre l'importance de la taille des particules dans la désignation du mode d'écoulement : soit un cours d'eau dont le fond est constitué de matériaux de tailles différentes, sables fins, graviers et galets, pour une vitesse donnée, il y a simultanément des particules au repos pour celles qui sont très lourdes, et des particules transportées par charriage pour les particules moins lourdes et enfin des particules transportées en suspension pour les plus légères.

### 1.1. Charriage

C'est le mouvement des particules près du fond, par roulement, par glissement ou par saltation, la portance et la trainée liée au champ moyen de vitesse sont responsables de leurs trajectoires.

---

Avant que les particules soient charriées elles doivent être arrachées du fond ; le charriage concerne beaucoup plus les graviers, les galets et les blocs.

## 1.2. Suspension

C'est le mouvement des particules au sein de l'écoulement ; les fluctuations verticales des vitesses et les vitesses moyennes longitudinales sont responsables de leur trajectoire, et pour qu'une particule charriée passe en suspension, il faut que la turbulence de l'écoulement soit forte, et plus précisément lorsque la composante de la vitesse turbulente est supérieure à sa vitesse de chute. La suspension concerne particulièrement les sables, les limons et les argiles.

La délimitation des différents modes de transport est compliquée, et voici quelques valeurs purement indicatives utilisant le rapport en la vitesse de frottement de l'écoulement  $u_*$ , et la vitesse de sédimentation des particules  $w_s$  (**Graf**, 1971).

$u_*/w_s > 0.10$  commencement du transport par charriage ;

$u_*/w_s > 0.40$  commencement du transport en suspension.

## 2. MECANISME DE TRANSFERT D'ENERGIE

Le transfert d'énergie se fait entre l'écoulement moyen, la turbulence et les particules solides ; ce mécanisme de transfert est très complexe et il se passe par des étapes.

Au début l'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie cinétique du champ moyen des vitesses fluides, une partie de cette énergie est transformée en énergie cinétique turbulente sous l'effet du cisaillement de l'écoulement induit par le fond, et l'autre partie est communiquée aux particules solides par des forces de trainée ou de portance.

L'énergie cinétique turbulente sera soit dissipée en chaleur sous l'effet de la viscosité dans les plus petites structures turbulentes, soit communiquée aux particules solides.

La chute des particules transforme une partie de son énergie aux structures turbulentes, et dissipe le reste en chaleur au cours des chocs.

## 3. CAPACITE DE TRANSPORT

Le débit solide est le volume de particules solides transportées par le courant d'eau par unité du temps, il existe plusieurs formules empiriques d'estimation du débit solide.

La capacité de transport d'un cours d'eau dépend de la vitesse d'écoulement et de l'énergie de l'eau. Un cours d'eau est capable de transporter des particules jusqu'à la saturation. On dit qu'un écoulement est saturé lorsque le débit solide égal à la capacité de transport.

Pour un écoulement donné, si le débit solide est supérieur à la capacité de transport, l'eau est surchargée, et on a dépôt des particules solides.

Si le débit solide est inférieur à la capacité de transfert, l'eau est peu chargée et on a donc érosion du fond.

## 4. CARACTERISTIQUES DE L'ECOULEMENT LIQUIDE

Les équations qui régissent les écoulements de fluide incompressible, sont :

- l'équation de conservation de la masse ;
- l'équation de Navier Stokes.
- **L'équation de la conservation de la masse (équation de continuité)**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (\text{I-1})$$

- **L'équation de Navier Stokes**

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \quad (\text{I-2})$$

Les deux nombres adimensionnels caractérisant l'écoulement sont :

### **Le nombre de Reynolds**

Ce nombre représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité (**Jodeau**, 2004) :

$$R_e = \frac{U 4R_h}{\nu} \quad (\text{I-3})$$

$R_e$  est le nombre de Reynolds ;

$R_h$  : Le rayon hydraulique, est donné par :  $R_h = \frac{\text{Surface mouillée}}{\text{Périmètre mouillé}}$

$\nu$  : La viscosité cinématique du fluide est égale  $\frac{\mu}{\rho}$  où,  $\mu$  : la viscosité dynamique du fluide.

### **Le nombre de Froude**

C'est le rapport entre la vitesse d'écoulement du fluide, et la vitesse de propagation de l'onde de gravité dans l'eau. Il est donné par la formule suivante (**Jodeau**, 2004) :

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gh \cos(\theta)}} \quad (\text{I-4})$$

avec,  $F_r$  : Le nombre de Froude ;  $h$  : La hauteur d'eau et  $\theta$  : l'angle de pente.

## **5. FORCES AGISSANT SUR LA PARTICULE SOLIDE**

Les différentes forces agissant sur la particule solide sont :

- les forces du liquide (forces de pression, forces de contrainte agissant à la surface de la particule);
- les forces de la gravité ;
- les forces de contact avec le lit.

Les expressions des forces qui s'exercent sur une particule de forme sphérique et de rayon  $a$  sont données dans le tableau I.1 suivant (**Jodeau**, 2004):

Tableau I.1 : Expressions des différentes forces agissant sur la particule solide

	L'expression	Observations
Le poids et la poussée d'Archimède	$\vec{F} = (\rho_s - \rho) \frac{4}{3} \pi a^3 \cdot \vec{g}$	---
La force de la masse ajoutée	$\vec{F}_m = \rho \frac{4}{3} a^3 C_m \frac{\partial \vec{u}_\Delta}{\partial t}$	Représente l'effet de la masse fluide qui est entraînée par particule dans son mouvement
La force de Basset	$\vec{F}_{Basset} = \frac{3}{2} d^2 \rho \sqrt{\pi \nu} \int_{-\infty}^t \frac{d}{d\tau} (\vec{u} - \vec{u}_s) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}$	Représente la résistance de la particule
La force de traînée	$\vec{F}_T = -\frac{1}{2} \rho \pi a^2 C_T  \vec{u}_s - \vec{u}  (\vec{u}_s - \vec{u})$	---
La force de portance	$\vec{F}_p = -\frac{1}{2} \rho \pi a^2 C_p (u_{\Delta T}^2 - u_{\Delta B}^2) \vec{u}_z$	---
La force de Magnus	$\vec{F}_{Magnus} = \rho_s  \vec{u} - \vec{u}_s  \left( \Omega - \frac{1}{2} \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \right) \vec{u}_z$	due à la rotation de la particule
La force de l'accélération du fluide	$\vec{F}_{af} = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \frac{D\vec{u}}{Dt}$	---

Avec,  $C_T$  : Coefficient de traînée ;  $C_p$  : Coefficient de portance ;  $C_m$  : Coefficient de la masse ajoutée ; T : indique le dessus, B indique le dessous de la particule ;  $\vec{u}_\Delta$  : la vitesse relative de la particule  $\vec{u}_\Delta = \vec{u} - \vec{u}_s$  où,  $\vec{u}_z$  : Vecteur unitaire normal à la direction moyenne du lit et  $\Omega$  : La vitesse angulaire de la particule.

### 5.1. Force d'entraînement (cisaillement)

Pour un régime permanent uniforme, l'écoulement exerce sur une particule du fond de diamètre ( $d$ ) une contrainte de cisaillement (Jodeau, 2004):

$$\tau_0 = \rho g R_h \sin \theta \approx \rho g R_h I \quad (I-5)$$

La force d'entraînement est égale à :  $\tau_0 \alpha_1 d^2$ , avec  $\alpha_1$  : Coefficient de forme de la particule.



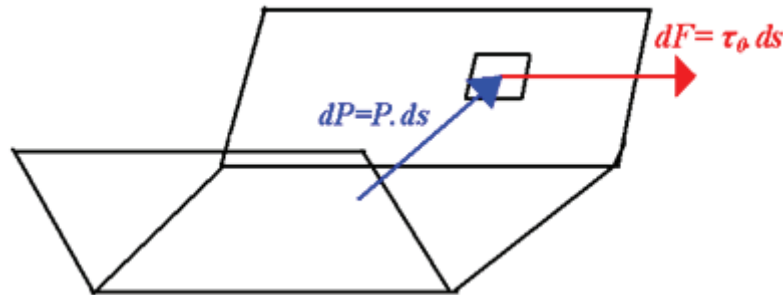


Figure I.2 : Forces appliquées sur les parois

## 5.2. Force de frottement

Pour les mêmes conditions précédentes, la force de frottement est donnée par la formule (Jodeau, 2004) :

$$C_f(\rho_s - \rho) g \alpha_2 d^3 \quad (I-6)$$

Avec,  $C_f$  : Coefficient de frottement et  $\alpha_2$  : Coefficient de forme de la particule.

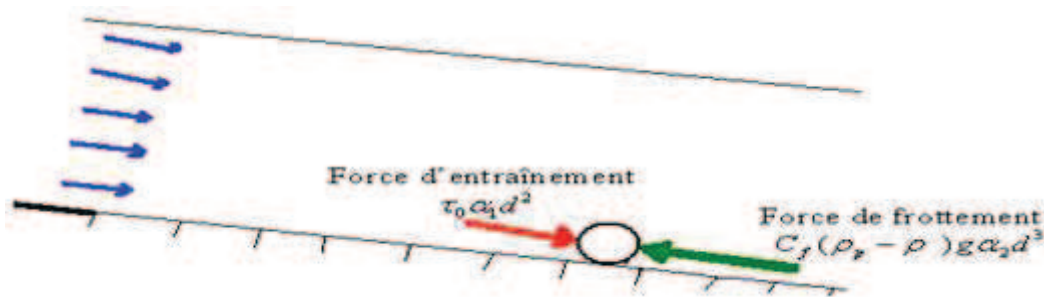


Figure I.3 : Force d'entraînement et la force de frottement qui s'exercent sur une particule solide

## 6. CONTRAINTE ADIMENSIONNELLE (PARAMETRE DE SHIELDS)

On définit la contrainte adimensionnelle comme étant le rapport de la force d'entraînement et celle de frottement (Jodeau, 2004) :

$\tau_*$  (Paramètre de Shields) = Force d'entraînement / Force de frottement. Il est donné par :

$$\tau_* = \frac{\tau \alpha_1 d^2}{C_f(\rho_s - \rho) g \alpha_2 d^3} \quad (I-7)$$

Pour  $C_f = 1$  et  $\alpha_1 = \alpha_2$ , on a :

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g d} \quad (I-8)$$

Ce nombre adimensionnel permet de caractériser le début du mouvement des particules solide, c.à.d. le début du mouvement d'une particule se produit quand le paramètre de Shields dépasse une certaine valeur relativement constante appelée la contrainte adimensionnelle critique  $\tau_{*cr}$ .

Une autre présentation est celle de Yalin (1972) qui a transformé la relation de Shields en relation entre  $\tau^*$  et  $d^*$  (diamètre adimensionnel) sous forme de graphe, ce qui permet de déterminer la contrainte adimensionnelle critique et donc le début du transport.

$$d_* = d \left( \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (I-9)$$

Avec,  $d$  est le diamètre du grain ;  $\gamma_s$  est le poids volumique des grains solides, égal à :  $\gamma_s = 26 \text{ KN/m}^3$  ;  $\gamma_w$  est le poids volumique de l'eau, égal à :  $\gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$  et  $\nu$  est la viscosité cinématique de l'eau, égale à  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (Degoutte, 2004).

En introduisant les différentes valeurs dans l'expression de  $d_*$ , on a :  $d_* \approx 25000 d$

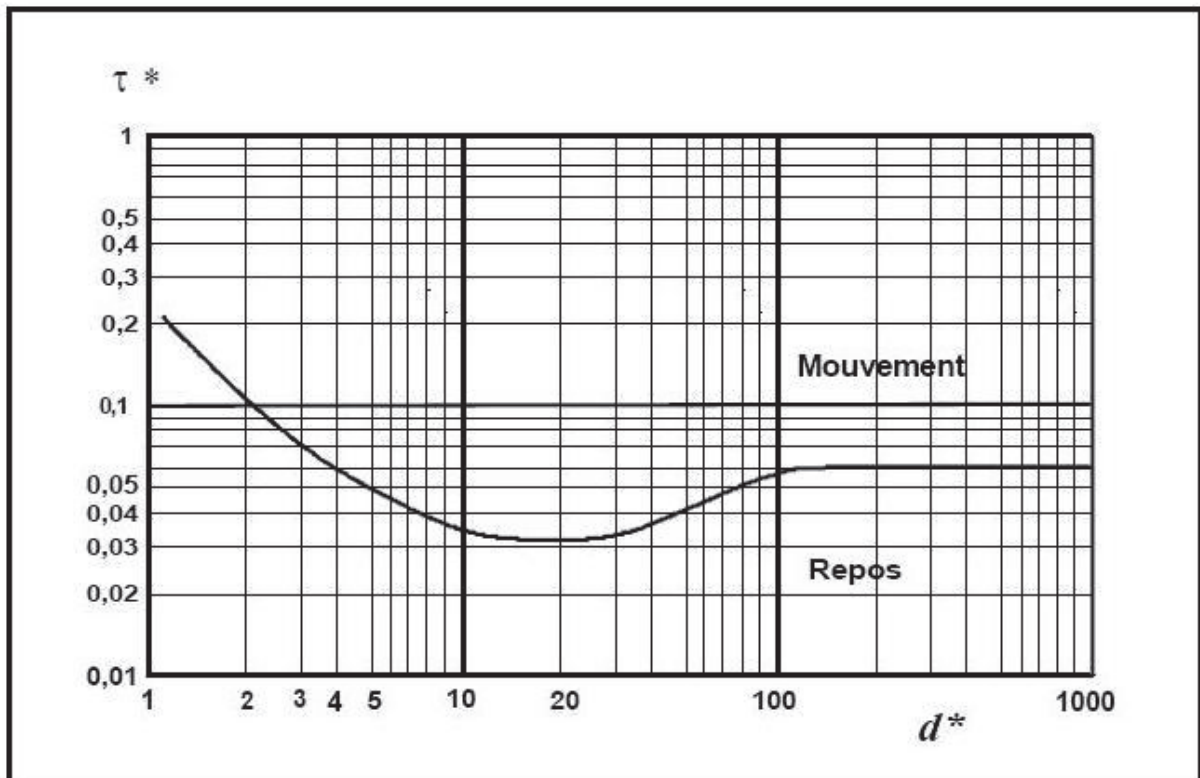


Figure I.4 : Diagramme de Yalin-Shield (Degoutte, 2004)

La figure I.4 montre qu'à 20°C, le matériau correspondant au plus faible paramètre de Shields a pour diamètre environ 0,6 - 1 mm (sable).

Pour  $d_* \leq 15$ , ce qui correspond à des diamètres de moins de 0,6 mm, les caractéristiques cohésives de matériau rentrent en jeu, et plus le diamètre diminue plus le paramètre de Shields augmente

Une classification pratique est proposée par Ramette (Degoutte, 2004).

Tableau I.2 : Classification de Ramette

$\tau_*$	0 ÷ 0,027	0,027 ÷ 0,047	0,047 ÷ 0,062	0,062 ÷ 0,25	0,25 ÷ 2,5	2,5-----
<b>Etat de grain</b>	Le grain est au repos	Apparition des premiers mouvements	Le grain est charrié sur fond plat	Le grain est charrié par dunes	Le grain est transporté par dunes en suspension	Le grain est transporté en suspension sur fond plat

## 7. TAILLE DES PARTICULES

### 7.1. Analyse granulométrique

On appelle l'analyse granulométrique, le processus qui permet de déterminer les différentes caractéristiques granulométrique d'un sol donné, tel que le  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ ...etc.

La courbe granulométrique représente le pourcentage en poids des grains de dimension inférieure à  $d$  en fonction de la dimension  $d$  d'un grain.

La courbe granulométrique est obtenue par tamisage pour les grains dont le diamètre est supérieur à 80  $\mu\text{m}$ , la dimension  $d$  est la maille des tamis. Pour les grains dont le diamètre est inférieur à 80  $\mu\text{m}$ , la répartition granulométrique est obtenue par densimétrie.

### 7.2. Coefficient d'uniformité (coefficient de Hazen)

Ce coefficient représente l'état de la granulométrie, uniforme ou étalée (étendue), il est défini par le rapport  $d_{60}/d_{10}$ .

Avec,  $d_x$  : indique x % du poids des grains de diamètre égal ou inférieur au diamètre qui correspond au pourcentage x.

$$d_{60}/d_{10} < 3 \quad \textit{granulométrie uniforme}$$

$$d_{60}/d_{10} > 3 \quad \textit{granulométrie étalée}$$

#### Remarque

En dessous d'une certaine valeur limite du diamètre, située autour de 60  $\mu\text{m}$ , les sédiments fins présentent des propriétés cohésives qui modifient considérablement leur comportement (augmentation de leurs contraintes critiques).

### 7.3. Méthode de Vincent Koulinski

En pratique l'analyse granulométrique des dépôts solides d'un cours d'eau s'effectue sur site, parmi les méthodes utilisées pour l'analyse granulométrique des cours d'eau, on a la méthode de Vincent Koulinski (*Degoutte*, 2004), qui consiste à :

- déplier un décamètre en ligne droite ou brisée sur un banc de galets ou de cailloux ;

- prélever chaque grain de surface, dont le centre se trouve le plus près possible de la graduation pour un pas d'espace défini ;
- mesurer le diamètre des particules prélevées (sur le terrain pour les grosses particules, et en laboratoire pour les particules fines) ;
- la courbe granulométrique est construite en fréquence d'apparition des diamètres.

Remarque :

- Pour les particules non sphériques, on prend le diamètre intermédiaire, c.-à-d. on mesure les épaisseurs de la particule dans les trois directions orthogonales, et on retient le diamètre intermédiaire.
- Le pas d'espace doit être supérieur à  $d_{90}$ , et le nombre de prélèvements soit environ 100.
- Il est conseillé de répéter l'opération au moins deux fois pour chaque granulométrie souhaitée.

#### 7.4. Classification des sédiments

Le critère de classement des sédiments est le diamètre, donc selon le diamètre moyen des grains on peut les classer. À noter ici que les frontières entre les différentes familles diffèrent d'un auteur à autre.

Parmi ces classements, on a ce qui a été présenté par le Coastal Engineering Manual (1998) (*Villaret*, 2003) :

- Sables fins :  $0,075 \text{ mm} < d < 0,425 \text{ mm}$ .
- Sables moyens :  $0,425 \text{ mm} < d < 2,000 \text{ mm}$ .
- Sables grossiers :  $2,00 \text{ mm} < d < 4,75 \text{ mm}$ .
- Gravier :  $4,75 \text{ mm} < d < 7,50 \text{ mm}$ .

#### 7.5. Coefficient de rugosité

Le coefficient de rugosité équivalente (*Villaret*, 2003), noté  $k_s$ , est le facteur important l'état de surface ce qui détermine la nature d'écoulement près du fond.

Pour les fonds plats, le coefficient de rugosité est proportionnel au diamètre médian des sédiments, le coefficient de proportionnalité est obtenu expérimentalement, il est égal à 1 pour les particules sphériques uniformes.

Pour les sédiments naturels, il est recommandé de prendre  $k_s$  égal au diamètre  $d_{90}$ .

En présence des rides, le coefficient de rugosité est proportionnel aux dimensions des rides, et s'écrit (formule de Swart 1976) :

$$k_s = 25 \eta^2 \lambda \quad (\text{I -10})$$

Avec,  $\lambda$  : la longueur d'onde des rides et  $\eta$  : la hauteur d'onde des rides

Bijker (1992) a utilisé :

$$k_s = \eta \quad (\text{I -11})$$

#### 7.6. Courbe granulométrique des sédiments des cours d'eau

Généralement, le sable au niveau du milieu littoral est un sable à particules fines dont le diamètre médian est inférieur à 0,5 mm, et la courbe granulométrique est uniforme.



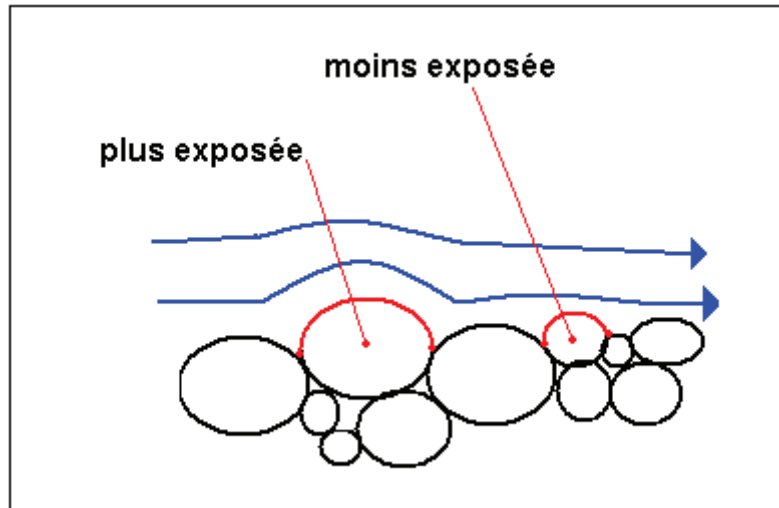


Figure I.6 : Effet de masquage exposition

## 8. QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE

D'une façon générale, il existe trois méthodes qui permettent l'évaluation du transport solide, qui sont :

- Mesures in situ;
- Formules empiriques et semi-empiriques ;
- Modèles physiques et numériques.

Par la suite, nous allons présenter quelques formules empiriques, classées suivant leurs applications, et suivant le type de transport des sédiments.

### 8.1. Mesure de transport solide

La mesure in situ du transport solide se fait de différentes manières, suivant le type de charriage ou suspension, et suivant les moyens.

#### 8.1.1. Mesure des particules charriées

Les mesures de débits de sédiments charriés représentent un problème dont la solution n'est pas complète. Deux méthodes de mesures sont souvent pratiquées: par la nasse et par les traceurs radioactifs ou fluorescents.

#### 8.1.2. Mesure des particules en suspension

Comme pour le charriage, la quantification des sédiments en suspension peut se faire de différentes manières. Parmi les méthodes les plus utilisées, on a la mesure des sédiments en suspension à partir des prélèvements. La méthode donne une très bonne description de l'évolution de la concentration au cours des crues.

## 8.2. Formules empiriques pour le transport à granulométrie uniforme

### 8.2.1. Charriage

Les formules que nous allons présenter sont obtenues pour des écoulements uniformes, lorsque l'équilibre entre le lit mobile et l'écoulement est atteint, elles représentent la capacité de transport de l'écoulement.

Il existe un grand nombre de formules semi-empiriques qui permet d'estimer le taux de transport solide en fonction des différents paramètres hydro-sédimentaires.

On peut classer ces formules en deux types : formules à seuil, et formules sans seuil.

Pour les formules à seuil, le transport se fait à partir d'un seuil déterminé (la contrainte adimensionnel critique) sinon il n'y a pas de transport.

Pour les formules sans seuil, le transport est permanent et quelle que soit la valeur de la contrainte de cisaillement le transport se manifeste.

#### 8.2.1.1. Formule à seuil

- *Formule Meyer-Peter et Muller (1948)*

Le taux de transport est relié à la différence entre le frottement et le frottement critique (*Villaret, 2003*) :  $q_c = \Phi_c \sqrt{gd_{50}^3(s-1)}$  (I-12)

avec,  $q_c$  : taux de transport par charriage ;  $s$  : densité du sédiment  $\rho_s/\rho$  ;  $\Phi_c$  : est une fonction du frottement de paramètre de Shields  $\tau_*$ , donnée par :  $\Phi_c = M(\tau_* - \tau_{cr}^*)^n$  (I-13)

où,  $\tau_{cr}^*$  : frottement critique adimensionnel.

Les valeurs des paramètres semi-empiriques  $n$ , et  $m$  utilisées dans la formule de Meyer-Peter, sont :  $n = 3/2$  et  $M = 8$ .

La formule de Meyer-Peter a été validée par rapport à un grand nombre d'expériences. Elle est recommandée pour des sédiments de taille moyenne comprise entre 0,4 et 29 mm, et aux écoulements fluviaux, pour des pentes de 2,2% au maximum avec des sédiments de granulométrie uniforme.

- *Formule de Van Rijn (1984)*

La formule de Van Rijn s'écrit (*Villaret, 2003*) :

$$\begin{aligned} Q_c &= 0,053d_*^{-0,3}T^{2,1}\sqrt{gd_{50}^3(s-1)} && \text{pour } T < 3 \\ Q_c &= 0,1d_*^{-0,3}T^{1,5}\sqrt{gd_{50}^3(s-1)} && \text{pour } T \geq 3 \end{aligned} \quad \text{(I-14)}$$

avec,  $d_*$  : diamètre adimensionnel et  $T$  : contrainte adimensionnelle définie par :

$$T = \frac{\tau_* - \tau_{cr}^*}{\tau_{cr}^*} \quad \text{(I-15)}$$

La formule est préconisée pour des sédiments fins dont le diamètre  $d_{50}$  est compris entre 0,2 et 2mm.

- *Formule de Rickenmann (1990)*

La formule proposée par Rickenmann a été établie à partir des données expérimentales de Meyer-Peter et Smart et Jaeggi, complétées par ses propres résultats expérimentaux, avec une particularité de ne pas faire appel à des contraintes dans l'expression de la formule, qui nécessite le calcul de la hauteur d'eau.

Il a relié directement le débit solide unitaire  $q_c$  au débit liquide unitaire  $q$  par rapport à une valeur de débit critique  $q_{cr}$ .

Rickenmann a utilisé dans ses essais des écoulements plus ou moins chargés de matière en suspension, et donc plus ou moins dense, la formule est valable pour des pentes comprises entre 0.2 et 20 % et s'écrit (*Ildefonse & col*, 1997)

$$q_c = 12,6 \left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \frac{I^2}{(s-1)^{1,6}} (q - q_{cr}) \quad (I-16)$$

avec,

$$q_{cr} = 0,065(s-1)^{1,67} \sqrt{gd_{50}^{1,5}} I^{-1,12} \quad (I-17)$$

- *Formule de Lefort (1991)*

Lefort a calé une formule exprimant le débit solide  $Q_s$ , en fonction de débit liquide  $Q$  par rapport à un débit critique  $Q_{cr}$ . La forme de la relation est très proche de celle de la formule de Smart et Jaeggi dont elle dérive (*Ildefonse & coll*, 1997) :

$$Q_c = Q \cdot 4,45 \left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} \frac{I^{1,5}}{s-1} \left( 1 - \left( \frac{Q_{cr}}{Q} \right)^{0,375} \right) \quad (I-18)$$

avec,

$$Q_{cr} = 0,0776(s-1)^{8/3} g^{1/2} d_{50}^{2,5} I^{-13/6} (1 - 1,2 \cdot I)^{8/3} \quad (I-19)$$

### 8.2.1.2 Formule sans seuil

Parmi les formules qui n'utilisent pas un seuil pour le débit solide et considèrent que le transport se fait en permanence quelle que soit la valeur du débit ou de la contrainte de cisaillement, on cite les quelques formules suivantes :

- *Formule d'Engelund et Hansen (1967)*

Elle ne fait pas intervenir de seuil, peut être utilisée pour calculer le taux de transport total (suspension et charriage) de sédiments fins dont la taille entre 0.15 et 0.93 mm (*Villaret*, 2003) :

$$q_c = 0,05 \tau^{*5/2} \sqrt{gd_{50}^3 (s-1)} \quad (I-20)$$

- *Formule de Frijlink (1952)*

Qui a été étendue par Bijker (1992) pour prendre en compte l'effet de la houle, la formule s'écrit (*Villaret*, 2003) :

$$q_c = 1,6 \tau^{*0,5} e^{-0,27/\tau^*} \sqrt{gd_{50}^3 (s-1)} \quad (I-21)$$

- *Formule de Meunier*



Considérée parmi les formules les plus simples de transport solide, la formule est applicable dans le cas où le débit liquide du début de mouvement est négligeable devant le débit liquide total (Jodeau, 2004) :

$$Q_c = 6,3 I^2 Q \quad (I-22)$$

### 8.2.2. Suspension

L'approche utilisée par Einstein (1950), Bijker (1992), et d'autres, se base sur les formules suivantes (Villaret, 2003) :

$$q_{ss} = \Phi_s \sqrt{gd_{50}^3 (s-1)} \quad (I-23)$$

avec,

$$\Phi_s = \alpha \Phi_c \left[ I_2 + I_1 \text{Log} \left( \frac{30h}{k_s} \right) \right] \quad (I-24)$$

$I_1$  et  $I_2$  : se sont les intégrales d'Einstein, définis par :

$$I_1 = - \int_A^1 \left[ \frac{1-u}{u} \right]^Z du \quad \text{et} \quad I_2 = - \int_A^1 \text{logu} \left[ \frac{1-u}{u} \right]^Z du \quad (I-25)$$

$Z$  : paramètre « nombre de Rouse » ;  $A$  : hauteur de référence adimensionnelle,  $A = k_s/h$  ;  $k_s$  : coefficient de rugosité équivalente, généralement est égal à  $d_{50}$ .

## 8.3. Formules empiriques pour le transport à granulométrie étendue

### 8.3.1. Approche statistique

La quantification du transport est obtenue en intégrant les contributions de chacune des classes granulométrique (Villaret, 2003) :

$$Q_s = \int_0^\infty f(D) q_s(D) \partial D \quad (I-26)$$

où,  $q_s(D)$  : taux de transport correspondant à un sédiment de classe de diamètre  $D$  calculé par une des formule de transport de granulométrie uniforme, et corrigé pour prendre en compte les interaction entre particules de taille différente.

### 8.3.2. Approche de Bagnold (1948)

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour simplifier la difficulté d'étude de transport solide, parmi ces hypothèses, l'hypothèse de Bagnold (1948), qui suppose un équilibre dynamique entre flux liquide et solide, et que le flux solide est proportionnel à la différence entre la contrainte de cisaillement et la contrainte critique, et la formule s'écrit (Jodeau, 2004) :

$$q_s = (\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (I-27)$$

Cette hypothèse a été critiquée par Seminara et col, ils ont montré que cette formule n'est plus valable pour des pentes au-dessus d'une valeur qui est bien au-dessous de la valeur de l'angle de repos des particules, et dans ces conditions aucune concentration solide n'est suffisante pour réduire la contrainte de cisaillement  $\tau_0$  sur le lit à la valeur critique, ils proposent une hypothèse selon laquelle l'équilibre dynamique est maintenu par un équilibre entre l'entraînement des grains et leur dépôt, le taux d'entraînement des grains est une fonction croissante de la différence  $\tau - \tau_c$ , cette formule est valable pour des pentes de 0 à 22%.

### 8.3.3. Formule de Smart et Jaeggi (1983)

Smart et Jaeggi, ont entrepris de compléter les essais de Meyer-Peter par des essais analogues mais réalisés dans des conditions plus conforme aux écoulements torrentiels (pentes de 3 à

20% et sédiments de granulométrie étendue), la formule qu'ils proposent est proche de celle de Meyer-Peter, et elle s'écrit (*Ildefonse & coll.* 1997) :

$$q_s = 4 \left( \frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0.2} \frac{I^{1.6}}{s-1} \left( 1 - \frac{\tau_{cr}^*}{\tau^*} \right) q \quad (I-28)$$

avec, 
$$\tau_{cr}^* = 0.05 \cos \theta \left( 1 - \frac{\text{tg} \theta}{\text{tg} \beta} \right) \quad (I-29)$$

$$\tau^* = \frac{h \cdot I}{(s-1) d_{50}} \quad (I-30)$$

$\tau_{cr}^*$  : contrainte critique adimensionnelle ;  $\tau^*$  : contrainte de cisaillement adimensionnelle ;  $q_s$  : débit solide unitaire par unité de largeur du lit  $\text{m}^2/\text{s}$  ;  $q$  : débit liquide unitaire par unité de largeur du lit  $\text{m}^2/\text{s}$  ;  $h$  : la hauteur d'écoulement et  $\beta$  : angle de frottement interne de matériau.

Cette formule est un peu difficile à appliquer, car elle nécessite la connaissance de la hauteur d'écoulement, une loi de perte de charge empirique est proposée par Smart et Jaeggi à cette fin, mais dont la complexité oblige à procéder par itérations pour utiliser cette formule de transport de sédiments.

## 9. APPORT SOLIDE A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT

L'apport solide est fonction de système morphoclimatique dans lequel se situe le bassin versant, c'est-à-dire au différents processus qui permettant la production de sédiments, leur arrivée jusqu'aux cours d'eau, et leurs évacuation vers l'exutoire.

Les cours d'eau jouent deux rôles dans ce processus, premièrement le cours d'eau joue le rôle d'un agent d'érosion fluvial, et en plus c'est le facteur majeur de l'évacuation des sédiments produits par les différents mécanismes d'érosion au niveau du bassin versant.

La notion de bilan d'érosion s'applique à une analyse détaillée des entrées, stockages et sorties de sédiments au sein d'un bassin versant.

### 9.1. Facteurs de l'érosion

#### 9.1.1. Climat

L'érosion du sol dépend fortement des conditions climatiques, en Algérien par exemple, les précipitations tombent généralement entre novembre et mars, période durant laquelle les sols cultivés sont nus, et sur des parcelles peu couvertes, pendant les orages d'automne, le ruissèlement journalier maximal dépasse 19 à 32% et jusqu'à 70-85% des averses importantes en hiver, sur des sols détrempées (*Boukheir & col.* 2001), durant le reste de l'année sévit une période sèche. Les averses de fréquence rare sont à l'origine de la formation des ravines, de l'apparition des mouvements de masse et d'inondations, car lors de ces averses exceptionnelles, le ruissèlement de sols limoneux encroûtés en permanence peut augmenter de 15% à 90%.

#### 9.1.2. Végétation

L'érosion des sols est fortement contrôlée par la couverture végétale, dans les régions arides et semi-arides où la couverture végétale est faible, les terres seront très susceptibles à

l'érosion hydrique (*Thornes*, 1995). Dans les régions où le sol est protégé par une couverture forte (sous forêts par exemple) l'érosion est très faible, car la litière et les végétations basses favorisent l'infiltration.

### 9.1.3. Topographie

Sur les pentes fortes, l'eau de pluie ruisselle vite et cause une érosion grave, alors que dans les régions où les pentes sont faibles l'érosion ne présente pas de grande importance.

### 9.1.4. Utilisation des terres

Ce facteur dépend des activités humaines qui peuvent augmenter ou diminuer les pertes de terres, telle que les incendies, le déboisement des forêts...etc. Ce qui favorise fortement les ruissèlements et aboutit à une forte érosion par la suite.

## 9.2. Estimation du taux de production des sédiments

Il existe pas mal de méthodes qui permettent l'évaluation de la production des sédiments, soit à partir des formules empiriques qui font appel à des caractéristiques hydrologiques, morphologique, et climatiques du bassin versant, soit par des modèles à base physique fondés sur la description des processus, soit à partir des modèles dites conceptuels qui considèrent en général une combinaison de plusieurs mécanismes physiques sur le bassin.

### 9.2.1. Modèle Shesed

Le modèle Shesed est un modèle physique développé par l'Institut d'Hydrologie (U.K), l'institut d'Hydraulique du Danemark et la Sogreah (France). Le détachement par le ruissellement est fonction de la contrainte de cisaillement exercée par le ruissellement et la contrainte de cisaillement critique. Le modèle a été appliqué avec succès sur plusieurs bassins de tailles différentes, et la formule s'écrit (*Bessenasse*, 2004):

$$\begin{aligned}
 E &= k_f \left( \frac{\tau}{\tau_c} - 1 \right)^b & \text{si} & \quad \tau > \tau_c \\
 E &= 0 & \text{si} & \quad \tau < \tau_c
 \end{aligned}
 \tag{I-31}$$

Où, E : la quantité érodée par l'écoulement ;  $K_f$  : le coefficient d'érodabilité du sol ;  $\tau$  : la contrainte de cisaillement ;  $\tau_c$  : la contrainte de cisaillement critique et b : un exposant pris égal à 1.

### 9.2.2 Modèle de Negev

Proposé en 1967, c'est le premier modèle conceptuel qui fait intervenir la notion de stock de sédiments disponibles pour le transport.

La pluie produit une quantité de particules E qui alimente le réservoir de stockage, la même quantité arrive à l'exutoire, ce qui revient à dire que la production est 2 E.

Une quantité de sédiments arrive à l'exutoire provenant de l'érosion directe provoquée par l'écoulement.

L'équation de production est la suivante (*Bessenasse*, 2004) :

$$E_s = K_1 (1 - C_{fp}) I_A P_t^{J_r} \quad (I - 32)$$

Où,  $E_s$  : la masse de sédiments détachée ( $t. ha^{-1}$ ) ;  $K_1$  : un paramètre dépendant des caractéristiques du sol ;  $C_{fp}$  : la fraction protégée des pratiques culturales conservatrices ;  $P_t$  : la pluie tombée durant le pas de temps (mm) ;  $I_A$  : indice d'aménagement et  $J_r$  : un exposant qui dépend des caractéristiques du sol.

### 9.2.3. Méthode de Tixeront (1960)

L'auteur a travaillé sur 32 bassins algériens et 9 bassins tunisiens (*Rerboudj*, 2005), sur une durée comprise entre 2 et 22 ans, où il a essayé de mettre en évidence l'effet de plusieurs paramètres sur le taux d'érosion, tel que :

- les précipitations,
- les ruissellements,
- les facteurs géomorphologiques (substratum, pente...),
- l'effet saisonnier,
- le climat, la couverture végétale et la mise en valeur agricole.

Ce qui lui a permis d'établir une formule qui tient compte de la lame d'eau ruisselée, et de la perméabilité du bassin :

- $E_s = 354 \cdot Q_R^{0.15}$  pour les bassins tunisiens ;
- $E_s = 354 \cdot Q_R^{0.21}$  pour la région Est Algérien ;
- $E_s$  : apport solide spécifique en  $t/km^2/an$  ;

où,  $Q_R$  : Ecoulement en mm

Les principaux résultats qu'il a trouvé sont :

- le substratum est un facteur important concernant le taux d'abrasion
- les bassins à plus forte abrasion se situent dans des régions sismiques
- l'érosion est proportionnelle aux précipitations, ou il a défini trois zones (Tableau I.3).

**Tableau I.3** : Degré d'érosion en fonction de la pluviométrie

La pluviométrie	Le degré d'érosion
inférieure à 300 mm	insuffisante pour causer une érosion appréciable
de 300 à 700 mm	l'érosion est très active (supérieure à $1200 t/km^2/an$ )
supérieure à 700 mm, plus couverture végétale	inférieur à $350 t/km^2/an$

### 9.2.4. Méthode de Fournier (1960)

Après une longue recherche d'un élément de coordination entre l'érosion du sol par l'eau dans les différentes parties du monde, Fournier a établi quatre corrélations entre le coefficient climatique  $p^2/P$  et la dégradation spécifique des bassins versants, cette quadruple corrélation selon Fournier est due à des degrés différents d'agressivité climatique et à l'action du relief, les quatre équations sont données dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Corrélations de Fournier.

Equation	Caractéristiques de bassin
$E_S = 6.14 I_{CL} - 49.78$	Erosion moyenne en zone tempérée, en condition de relief peu accentué ( $H_m^2/A < 6$ )
$E_S = 7.12 I_{CL} - 475.4$	Erosion moyenne en zones tropicales, subtropicale semi aride, en condition de relief peu accentué ( $H_m^2/A < 6$ )
$E_S = 52.49 I_{CL} - 513.21$	Erosion moyenne sous tous les climats sauf semi-aride, en condition de relief accentué ( $H_m^2/A > 6$ )
$E_S = 91.78 I_{CL} - 737.62$	Erosion moyenne sous climat semi aride en condition de relief accentué ( $H_m^2/A > 6$ )

avec,  $H_m^2/A$  : coefficient orographique ;  $H_m$  : la hauteur moyenne du relief, est égale à la différence entre son altitude moyenne et son altitude minimum ;  $A$  : la surface du bassin versant ;  $E_S$  : dégradation spécifique (tonnes de terre entraînées annuellement par  $km^2$ ) et  $I_{CL}$  : coefficient climatique égal à  $p'^2/P$  ; où,  $p'$  : la hauteur d'eau reçue par le bassin versant pendant le mois le plus arrosé de l'année et  $P$  : la hauteur de précipitation annuelle reçue par le bassin.

Fournier a introduit des simplifications sur le coefficient  $I_{CL}$ , qu'il a défini comme suit (*Fournier*, 1960):

$I_{CL} = P/144$ , si les précipitations sont également réparties sur les 12 mois de l'année.

$I_{CL} = p'$ , si toutes les précipitations de l'année tombent en un seul mois de l'année.

Les corrélations établies s'applique à des bassins étendus, plus de  $2000km^2$ , mails il semble qu'elles restent valables même à l'échelle des petits bassins à condition que le milieu naturel les composant permette l'entrée en jeu des facteurs généraux de l'érosion du sol (présence continu d'un manteau continu de sols).

#### 9.2.5. Méthode de SOGREAH (1969)

La méthode est basée sur les données d'observation au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques, pour étudier l'importance des transports solides des oueds sur les aires d'irrigation.

Les résultats sont représentés graphiquement traduisant des relations de la forme suivante, (*Bessenasse*, 2004) :

$$E_S = \alpha \cdot Q_R^\beta \quad (I-33)$$

Où,  $E_S$  : apport solide spécifique en  $t/km^2/an$  ;  $Q_R$  : l'écoulement moyen annuel (mm/an) et  $\beta = 0.15$  et  $\alpha$  : coefficient dépendant de la perméabilité du sol, variant avec le degré de perméabilité des bassins de (3,3) pour les bassins à perméabilité élevée à (3200) pour les bassins imperméables.

**Tableau I.5** : Valeurs de  $\alpha$  pour différentes perméabilités (*Bouanani*, 2004) :

Perméabilité	Valeur de ( $\alpha$ )
Forte	8.5
Moyenne	75
Moyenne à faible	350
Faible	1400
imperméable	3200

### 9.2.6. Méthode de Meddi (1998)

L'auteur a établi une formule empirique pour la dégradation spécifique annuelle, qui est fonction de débit liquide et de la superficie du bassin versant. L'étude est basée sur les données de 18 barrages algériens, 50 stations hydrométriques algériennes, 11 barrages tunisiens, et de 16 barrages marocains, la formule s'écrit, (*Bessenasse*, 2004) :

$$E_s = 9313,31.Q^{0,079} A^{-0,548}, \text{ valable pour l'Algérie.}$$

$$E_s = 31697,72.Q^{-0,26}.A^{-0,242}, \text{ valable pour l'Algérie et la Tunisie.}$$

$$E_s = 9802,57.Q^{-0,469}.A^{-0,212}, \text{ valable pour l'Algérie et le Maroc.}$$

$$E_s = 3754,09.Q^{0,34}.A^{-0,142}, \text{ valable pour les trois pays.}$$

avec,  $E_s$  : dégradation spécifique annuelle (t/km<sup>2</sup>/an) ; Q : débit liquide (m<sup>3</sup>/s) et A : superficie (km<sup>2</sup>).

### 9.3. Erosion en Algérie

Les facteurs économiques et sociaux participent fortement dans l'accélération de la dégradation des sols en Algérie. 85% des superficies cultivables en Algérie sont situés dans les bassins versants menacés par l'érosion.

Le taux d'érosion en Algérie est parmi les taux les plus élevés en Afrique du nord : avec un taux près de 2000 t/km<sup>2</sup>/an pour les bassins versant de l'Atlas Tellien (Rhiou, Fodda, Mazafran, Isser, Soummam...), 4000 t/km<sup>2</sup>/an pour la chaîne des côtières Dhara, 5000 t/km<sup>2</sup>/an pour le bassin de l'ouest Agrioum qui alimente le barrage d'Ighil-Emda.

Le grand pourcentage de sédiments arrachés se fait durant les crues, c'est ainsi que les fortes crues de mars 1974 qui ont touché la région Algéroise ont érodé en trois jours environ 30 millions de tonnes de sédiments.

Des concentrations supérieures à 200 g/l sont régulièrement observées lors des crues orageuses d'été et d'automne dans le bassin du Cheliff est de 460 g/l, du Hodna avec une concentration de 674 g/l, de l'Isser est d'environ 387 g/l (*Bessenasse*, 2004).

## CONCLUSION

On conclut que le transport solide se manifeste généralement selon deux modes : transport par charriage, ou transport par suspension. La limite entre ces deux modes reste difficile à définir, du fait de l'interaction qui existe entre les deux modes.

Les deux principaux paramètres d'étude de transport sont, la concentration et la contrainte de fond, et à partir desquels on peut évaluer le transport solide dans le cours d'eau. En effet, la concentration concerne beaucoup plus le transport par suspension, tandis que la contrainte de fond est liée au transport par charriage.

Un autre paramètre important, est la granulométrie des particules solides, en effet, la taille des sédiments et le type de la courbe granulométrique (uniforme ou étendue) ont leurs influences sur le mécanisme et le mode de transport. Puisque les frottements sont reliés directement à la taille des particules, et les différentes formules empiriques sont établies en fonction de type de la granulométrie étudiée.

La charge solide au niveau de l'oued est fonction non seulement des caractéristiques de l'oued mais elle dépend de plusieurs facteurs et caractéristiques du bassin versant, tels que le climat, la nature du sol, la présence ou non de la couverture végétale...etc, ces facteurs intrinsèques du bassin font que la charge solide augmente ou diminue au niveau de l'oued, et c'est pour ça que dans la région aride par exemple où le sable représente la majeure partie du sol, et la végétation est généralement faible, la concentration en sédiments en cas de crue sera élevée.

L'étude du transport solide fait toujours appel à l'expérimentation pour évaluer les différents paramètres hydrosédimentaires qui régissent le phénomène. Mais actuellement et avec l'apparition et le développement des outils numériques, plusieurs modèles numériques ont été élaborés pour simuler le processus de transport solide.

## Chapitre II

### Etat de l'art sur les modèles mathématiques traitant le transport solide

La modélisation numérique joue un rôle indispensable dans le domaine hydraulique (la gestion et l'aménagement des cours d'eau et des barrages par exemple). Les raisons pour lesquelles la modélisation est indispensable sont :

- Dès que le système de calcul devient très complexe cela nécessite l'outil numérique qui permet de faire de nombreux calculs en un temps très court.
- Elle peut remplacer l'étude expérimentale car dans certains cas l'expérimentation devient trop difficile d'un point de vue économique, et des conditions de travail.

Dans les années 60 avec l'apparition de l'outil informatique, de nombreux modèles ont été établis. Au début on s'intéressa aux écoulements monodimensionnels, pour étudier les crues, la propagation de la marée...etc. Ces modèles donnent des vitesses moyennes sur la section et la hauteur d'eau (*Chauchat, 2007*).

Avec les modèles bidimensionnels horizontaux (Saint-Venant), (*Cole & Miles, 1983; Nguyen, 1988; Guillou, 1996; Galland & col., 1991*) et verticaux (*Boericke & Hogan, 1977; De Borne de Grandpré, 1979; Li, 1994; Li & col., 1994*), l'écoulement a été bien représenté.

A partir des années 80, les modèles tridimensionnels sont apparus, ces modèles ont permis de simuler les problèmes d'une manière plus précise. Parmi ces modèles on cite, FLUENT, POM, ECOMOD3D, TELEMAC3D, SAM3D, ROMS.

Ces modèles font ce qu'on appelle la modélisation classique. Récemment une autre vision de la modélisation du transport est apparue, c'est la modélisation diphasique, qu'on va détailler par la suite.

#### 1. APPROCHE CLASSIQUE

La modélisation classique consiste à diviser le domaine de calcul en deux sous-domaines, le premier concerne le fluide dans lequel la concentration des particules solides est faible, et le deuxième sous-domaine traite l'évolution du fond sédimentaire.

L'approche néglige l'interaction fluide-particule si la concentration en sédiments est faible (pour des concentrations volumiques en sédiments inférieurs à 0.01).

Les particules solides sont considérées comme un scalaire passif, exception faite de leur vitesse de chute qui doit être prescrite.

Suivant le type du modèle numérique (unidimensionnel, bidimensionnel ou tridimensionnel) les équations sur lesquelles le modèle se base diffèrent. Les modèles unidimensionnels et bidimensionnels se basent sur les équations de Saint Venant pour la phase liquide et l'équation de convection-diffusion pour la phase solide, et les modèles tridimensionnels se



basent sur les équations de Navier Stokes pour la phase liquide et sur des calculs eulériens ou lagrangiens pour la phase solide.

### 1.1. Modélisation monodimensionnelle

La modélisation monodimensionnelle convient pour les problèmes de continuité sédimentaire sur un tronçon donné par un profil en long du cours d'eau, ainsi elle est capable de localiser les zones de dépôt/érosion le long de ce profil pour des débits hydrauliques donnés.

Les modèles unidimensionnels utilisent des valeurs moyennes de vitesse, de pression, de débit.....etc., ce qui facilite la résolution du système d'équation, et la plupart des formules empiriques du débit solide par charriage, exigent l'utilisation du débit liquide dans la direction principale, ce qui favorise l'approche unidimensionnelle.

Dès que les tronçons de cours d'eau étudiés ont quelques kilomètres de longueur, l'approximation unidimensionnelle est favorisée,

Malgré ces avantages, l'approche unidimensionnelle a été critiquée, surtout en ce qui concerne la répartition transversale des zones de dépôt/érosion, et de la granulométrie, car au niveau d'une section transversale la répartition de ces paramètres peut être différenciée.

#### Equations hydrodynamiques

La modélisation unidimensionnelle est basée sur les équations de Saint-Venant-Exner (trois équations différentielles partielles), plus deux équations algébriques empiriques qui décrivent la perte d'énergie et le débit solide.

L'ensemble de ces équations forme un système non linéaire, hyperbolique à trois inconnues.

#### Equations de Saint-Venant-Exner

L'équation de continuité pour le fluide (**Graf**, 1971):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0. \quad (\text{II-1})$$

B : la largeur du cours d'eau

L'équation de continuité pour les particules solides :

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{(1 - Pr)} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (\text{II -2})$$

$P_r$  : la porosité des sédiments

L'équation dynamique de la quantité de mouvement (**Bouheniche**, 2005) :

$$\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - I = -J_e \quad (\text{II - 3})$$

I : la pente du cours d'eau =  $\text{tg}\theta = - dz/dx = \sin\theta$

Le regroupement de cette équation avec celle de continuité donne les équations de Saint-Venant monodimensionnelles.

L'adjonction de l'équation de continuité solide au système de Saint-venant forme le système Saint-venant-Exner gouvernant les deux phases d'écoulement (liquide+solide).

L'équation de perte d'énergie -formule de Chézy- :

$$J_e = \frac{U^2 n^2}{R_H^{4/3}} \quad (\text{II-4})$$

En ce qui concerne le débit solide plusieurs formules empiriques existent, parmi elles, on a par exemple la formule la d'Einstein-Brown :

$$q_s = \frac{40.F\sqrt{gd_m(S_s - 1)}}{(S_s - 1)^3 \cdot d_m^2} (R_h I)^3 \quad (\text{II-5})$$

avec,  $S_s$  : densité relative ( $S_s = \frac{\rho_s}{\rho}$ ) ;  $F$  : facteur dépend du  $d_{50}$ , et  $d_m$  : Diamètre moyen du grain sédimentaire correspond à 50% tamisât ( $d_{50\%}$ ).

## 1.2. Modélisation bidimensionnelle

### Phase liquide

Les modèles bidimensionnels utilisent les équations de Saint Venant :

L'équation de continuité -conservation de la masse- (**Paquier**, 2009):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (\text{II-6})$$

Les deux équations de quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \frac{q_x q_y}{h} \right)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{C_z^2 h^2} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{q_x}{h} \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{q_x}{h} \right)}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{II-7})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( \frac{q_x q_y}{h} \right)}{\partial x} \\ = -gh \frac{\partial Z}{\partial y} - g \frac{q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{C_z^2 h^2} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{q_y}{h} \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{q_y}{h} \right)}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{II-8})$$

avec,  $h$  : La hauteur d'eau;  $Z$  : La cote du fond,  $q_x, q_y$  : Les débits unitaires selon OX, et OY ;  $g$  : L'accélération de la pesanteur ;  $K$  : Coefficient de viscosité ou diffusion ;  $C_z$  : coefficient de Chézy pour les frottements au fond

Phase solide

Généralement les modèles bidimensionnels utilisent l'équation de convection-diffusion pour la modélisation des particules solide (*Cemagref*, 2009) :

$$\frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(huC)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(hD_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hD_y \frac{\partial C}{\partial y}) + E + S \quad (\text{II} - 9)$$

avec, C : est la concentration volumique de sédiments dans l'eau moyennée sur la verticale ; h : est la hauteur d'eau (m) ; u, v les composante horizontale et verticale de la vitesse ;  $D_x, D_y$  les coefficients de diffusion suivant l'axe des x et y [ $m^2/s$ ] ; E : le taux d'érosion ; S : le taux de sédimentation.

**1.3. Modélisation tridimensionnelle**

L'intérêt de l'approche tridimensionnelle réside dans la volonté d'étudier le comportement hydrodynamique des structures complexes dont le fonctionnement ne peut plus être décrit par une approche 1D ou 2D.

Phase liquide

Les modèles tridimensionnels sont basés sur les équations de Navier-Stokes pour la phase liquide, ces équations sont obtenues par application des lois de conservation de la masse, et de la quantité de mouvement (*Dufresne*, 2008) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \quad (\text{II} - 10)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}[\mu \text{grad}(u)] \quad (\text{II} - 11)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}[\mu \text{grad}(v)] + \bar{g} \quad (\text{II} - 12)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \bar{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}[\mu \text{grad}(w)] \quad (\text{II} - 13)$$

En raison de la faible viscosité de l'eau la quasi-totalité des écoulements rencontrés dans les rivières sont turbulents, se qui accroît la capacité de transport de l'écoulement.

Pour faire face à la variation aléatoire de la vitesse et de la pression lors de l'écoulement turbulent, on décompose ces variables en une composante moyenne et une composante fluctuante, de moyenne nulle, les équations de Navier Stockes sont alors moyennées dans le temps, ce qui introduit le terme de fluctuation de vitesse, et les équations obtenues prennent le nom des équations de Reynolds.

$$u'(t) = u(t) - U \quad (\text{II} - 14)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (\text{II} - 15)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho U \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}[\mu \text{grad}(U)] + \left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u' u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u' v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u' w'})}{\partial z} \right] \quad (\text{II-16})$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \text{div}(\rho V \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}[\mu \text{grad}(V)] + \left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u' v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v' v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v' w'})}{\partial z} \right] + \bar{g} \quad (\text{II-17})$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \text{div}(\rho W \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}[\mu \text{grad}(W)] + \left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u' w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v' w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w' w'})}{\partial z} \right] \quad (\text{II-18})$$

Si le terme en pression fluctuante disparaît suite à l'intégration temporelle, des termes de corrélation double en vitesse fluctuante subsistent, ces six termes constituent les contraintes de Reynolds.

Le système dispose de quatre équations et de dix inconnues (le vecteur vitesse moyenne  $U$  (3 inconnues), la pression moyenne (une inconnue), et les contraintes de Reynolds (six inconnues), la résolution de ce système nécessite un modèle de fermeture dite modèle de turbulence.

La plupart des modèles classiques de turbulence se fondent sur l'hypothèse de Boussinesq qui modélise les contraintes de Reynolds par une force de viscosité.

$$-\overline{\rho u' v'} = \mu_t \left[ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] \quad (\text{II-19})$$

$\mu_t$  : la viscosité dynamique turbulente

### Phase solide

La modélisation des particules solides doit tenir compte de l'écoulement, il faut dans un premier temps le simuler, ensuite utiliser le résultat hydraulique pour déterminer le comportement de la phase solide, parmi les approches, on a deux approches principales :

- l'approche eulérienne ;
- l'approche lagrangienne.

### ***Approche eulérienne***

Cette approche consiste à suivre la concentration au moyen d'une équation de convection dispersion, elle permet de déterminer des profils de concentration et donc les zones de fortes concentrations, mais elle ne permet pas d'accéder directement aux zones de dépôts.

Pour cela, une équation de continuité pour la phase solide doit être prise en compte, pour suivre l'évolution du fond au cours du temps, et un modèle de dépôt et d'érosion est donc nécessaire.

### Approche lagrangienne

Plus communément appelée « suivi de particules », consiste à suivre les trajectoires d'un grand nombre de particules individuelles puis effectuer un bilan sur leur devenir : particules déposée, transportée....etc.

Le lien entre les deux approches peut être vu dans l'assimilation de la concentration à la probabilité de présence de particules.

L'approche a l'avantage qu'elle constitue une description physique de phénomène et qu'elle permet de déterminer plus facilement le comportement de particules de différentes caractéristiques.

Les trajectoires des particules sont déterminées par l'intégration d'un bilan de forces, et les interactions entre les particules ne sont pas généralement prises en compte.

## 2. MODELISATION DIPHASIQUE DU TRANSPORT SOLIDE

Une nouvelle approche a été utilisée, basée sur le concept proposée par Wallis 1969, dans laquelle le milieu est défini en deux phases, une phase continue (l'eau) et une autre dispersée (les particules solides).

Les équations de conservation de la masse et de quantité de mouvement sont écrites pour les deux phases, l'approche est couplée car les échanges entre le fond et le fluide sont intégrés aux équations du modèle.

### Description mathématique de la modélisation diphasique

L'approche est basée sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement pour les deux phases.

On peut réécrire les équations de conservation de masse et de la quantité de pour les deux phases sous la forme suivante, où l'indice k désigne la phase -liquide ou solide- (*Chauchat et coll.* 2004) :

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) = 0 \quad (\text{II-20})$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k \vec{u}_k}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k \otimes \vec{u}_k) = \vec{\nabla} \cdot (\alpha_k (\overline{\overline{T}}_k^{\text{Re}} + \overline{\overline{T}}_k)) + \alpha_k \rho_k \vec{g} + \vec{M}_k \quad (\text{II-21})$$

Avec,  $\alpha_k$  : la fraction volumique ;  $\overline{\overline{T}}_k^{\text{Re}}$  : Le tenseur de contrainte de Reynolds ;  $\overline{\overline{T}}_k$  : Le tenseur des contraintes de frottement.

$$\overline{\overline{T}}_k = -p_k \overline{\overline{I}} + \overline{\overline{\tau}}_k \quad (\text{II-22})$$

$p_k$  : La pression et  $\overline{\overline{\tau}}_k$  : Le déviateur des contraintes (contraintes visqueuses).

Pour résoudre les deux équations un certain nombre de relations complémentaires, appelées lois de fermeture, sont nécessaires. Il en existe plusieurs types : les lois de transfert, constitutives et topologiques.

Les lois de transfert décrivent les interactions entre les phases, elles sont représentées dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement par le terme  $\bar{M}_k$ .

Le terme de contrainte  $\bar{T}_k$  est modélisé par des lois constitutives, il s'agit d'imposer la relation entre le tenseur des contraintes  $\bar{\tau}_k$  et le tenseur des vitesses de déformation  $\bar{D}_k = \frac{1}{2}[\bar{\nabla}\bar{u}_k + (\bar{\nabla}\bar{u}_k)^T]$ , ainsi que la relation exprimant le gradient de pression pour la phase solide.

Les lois topologiques sont utilisées pour les conditions liées à la géométrie du milieu.

Le système d'équations peut être envisagé par deux approches, la première consiste à écrire une équation de conservation de mouvement pour le mélange en sommant les équations de conservation de mouvement des deux phases, le terme de l'interaction se simplifie, et une équation semblable à l'équation de Navier Stokes pour un fluide est obtenue.

La deuxième approche considère les équations de conservation de la quantité de mouvement séparément pour chaque phase (Equation II-21), il s'agit alors de résoudre le système d'équations aux dérivées partielles couplées constitué des équations (Equation II-20) et (Equation II-21) pour chaque phase (*Chauchat et col*, 2004).

### 3. PRINCIPAUX CODES NUMERIQUES EXISTANTS

#### 3.1. Codes unidimensionnels

##### *Code RUBAR 3*

Il résout les équations de Saint-Venant unidimensionnelles sur un bief en régime torrentiel ou fluvial, il peut être utilisé pour la simulation des ondes de rupture de barrage, le transport solide, glissement de terrain dans une retenue...etc.

Le logiciel se compose de 4 programmes informatiques, écrits en Fortran 77:

- Un module de saisie des données
- Un module de calcul
- Un module de visualisation des résultats sous forme de courbes
- Un module d'exploitation des résultats sous forme de tableaux

Le module de saisie génère l'ensemble des fichiers de données nécessaires au module calcul, chaque type de donnée est défini en certain points de domaine à simuler puis interpolé à chaque point du domaine de calcul.

Le module engendre plusieurs fichiers de résultats, tel que les hydrogrammes, les limnigrammes, les lignes d'eau, la cote de la surface libre en fonction du temps, des lignes d'eau à des temps fixés...etc.

La résolution des équations de Saint-Venant se fait suivant un schéma numérique explicite.

### 3.2. Codes bidimensionnels

#### *Code RUBAR 20TS*

Il résout les équations de Saint-Venant bidimensionnelles par la méthode des volumes finis, en particulier lorsque les variations temporelles des caractéristiques hydrauliques sont importantes (*Cemagref*, 2009).

Il peut simuler des ouvrages hydrauliques pour lesquels la loi d'ouvrage se traduit par une relation entre le débit et les cotes amont et aval (déversoirs, vannes ...etc.). En outre, un module de transport solide en suspension peut être adjoint au calcul.

Il permet de simuler la propagation d'une de rupture de barrage, digue de protection, ou remblai routier.

Le logiciel est écrit en FORTRAN, et il utilise un schéma explicite en volumes finis, et qui permet d'effectuer des calculs dans des conditions hydrauliques complexes.

Il utilise un maillage constitué de quadrilatères et de triangles qui ont entre eux 0 ou 1 coté commun.

A chaque pas de temps, pour calculer les flux entrants et sortants de chaque maille, est résolu un problème de Riemann dans la direction normale à l'arête. Il résout au début le problème homogène pour les 3 équations dans cette direction, équations mises sous forme conservative, puis il ajoute les termes du second membre où on retrouvera le terme de gravité, les frottements....etc.

On peut lui ajouter un module complémentaire optionnel pour résoudre une équation de convection-diffusion qui permet de simuler le transport de solutés ou de sédiments en suspension.

Sa procédure de simulation nécessite le passage par plusieurs étapes (figure II.1), et la visualisation des résultats (hauteurs, vitesses), peut s'effectuer par le logiciel MOCAHY. L'utilisation normale de RUBAR 20TS requiert un ordinateur puissant (ou une station de travail) et du personnel expérimenté en modélisation hydraulique.

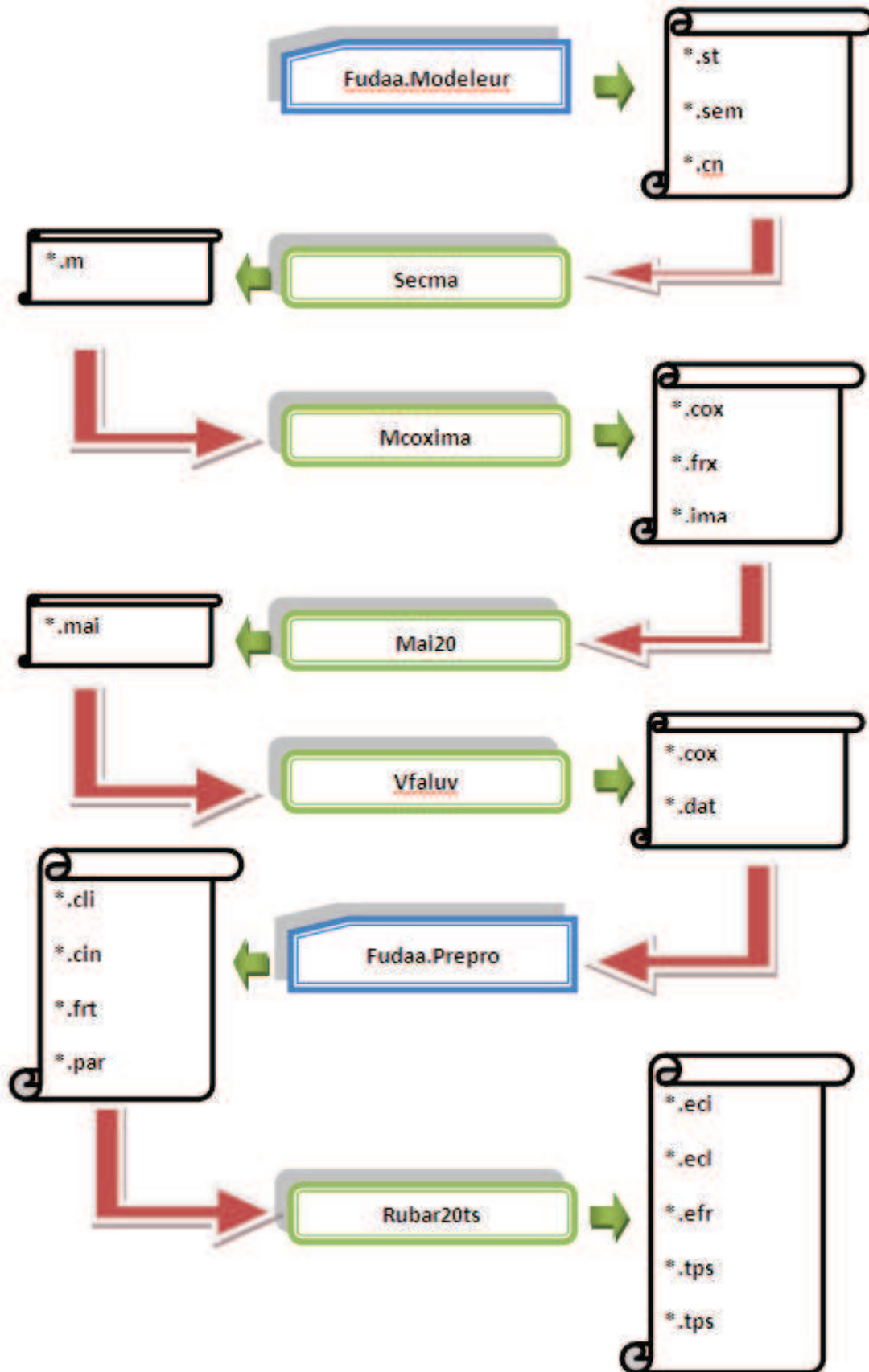


Figure II.1 : Procédure de simulation via Rubar20TS



### 3.3 Codes tridimensionnels

#### *Code FLUENT*

Le code traite des phénomènes physiques complexes, tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques...etc.

Il est programmé par le langage C et il utilise la méthode des volumes finis pour la résolution des problèmes 3 D, il se compose d'un préprocesseur (Gambit) pour la modélisation et la génération de maillage, d'un solveur de calcul, et d'un post-processeur.

Fluent résout les équations de mécanique de fluide tel que les équations de Navier Stockes.

#### *Procédure de calcul*

##### *a- Pré- processeur Gambit*

Dans lequel on doit définir et créer le maillage du domaine à simuler, le maillage il peut être de différents types : triangles, quadratiques en 2D, prisme, pyramides en 3D ...etc.

Ceci lui permet de :

- Représenter la géométrie ;
- Définir le type des conditions limites au frontière du domaine ;
- Spécifier le type de matériau (solide, liquide, et mixte) ;
- Discrétiser le domaine avec le maillage suivant la géométrie.

##### *b- Solveur FLUENT*

Dans lequel on doit établir les conditions aux limites de l'écoulement, et définir les propriétés du fluide, après le déroulement du calcul, les résultats sont présentés sous plusieurs formes graphes, tableaux...etc. On peut résumer les principales tâches du solveur par les points suivants :

- Définir les conditions opératoires numériques ;
- Spécifie les conditions aux limites ;
- Choisi le processus itératif ;
- Permet de contrôler l'état d'avancement des calculs.

Les étapes de calcul sont les suivantes :

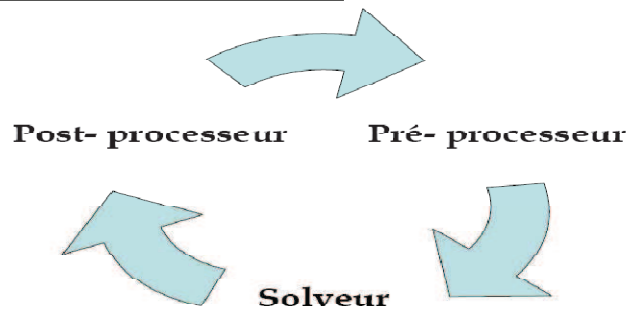
- Intégration des équations continues sur chaque volume de contrôle, le théorème d'Ostrogradski est utilisé pour transformer certaines intégrales de volume en intégrales de surface ;
- Discrétisation en espace et en temps (pour les écoulements non permanents) des équations : substitution des dérivés partielles par approximation en différences finies, transformation du système d'équation en système algébrique ;
- Résolution de système algébrique par un processus itératif, utilisation d'un algorithme pour corriger la pression et les composantes de la vitesse afin d'assurer la conservation de la masse.

## c- Post- processeur

Le poste processus permet :

- Visualiser la géométrie et le maillage du domaine ;
- Afficher les résultats obtenus sous forme de différents fichiers.
- De tracer des courbes et visualiser les lignes de courant ou la trajectoire des particules.

**Architecture du logiciel**



**Figure II.2** : Fonctionnement de Fluent (*Alaoui-M'hammedi, 2007*)

*Résolution des équations*

Fluent discrétise le domaine de calcul en plusieurs petits volumes appelés volumes de contrôles (les éléments de maillage : hexaèdre, tétraèdres, prismes ou un mélange des trois), les équations de calcul sont intégrés dans chaque volumes de contrôle, après linéarisation des équations, on doit choisir une méthode de résolution.

A chaque itération le code résout les équations de l'état de fluide, et la démarche de résolution des équations se fait comme suit :

- Résolution de l'équation de conservation de la quantité de mouvement. ;
- Correction des valeurs trouvées de vitesse et de pression ;
- Résolution des équations de turbulence ;
- Test de convergence.

Ce processus est répété jusqu'à la convergence, et la résolution est faite par une méthode multigrilles pour accélérer la convergence. Les variables de l'écoulement sont calculées aux centres des volumes de contrôles, mais les valeurs nécessaires à la résolution des équations doivent être au centre des faces, pour cela une interpolation des valeurs des valeurs aux centres des faces est faite à partir de celles des centres des volumes.

Plusieurs schémas de discrétisation sont proposés par Fluent tels que :

- Schéma de premier ordre : ce schéma permet une certaine stabilité dans les calculs mais est responsable de diffusion numérique.
- Schéma de deuxième ordre : l'utilisation de ce schéma permet de minimiser la diffusion numérique mais peut faire diverger le calcul.
- Schéma d'ordre supérieur (QUICK) : il prend en compte le flux aux interfaces

## CONCLUSION

Après cette brève présentation des différents codes de calcul relatifs au transport des sédiments, on constate et d'une façon générale que ces différents codes se classent suivant leurs dimension (1D, 2D et 3D). Au début la recherche scientifique s'est basée sur les modèles unidimensionnels, puis sur les bidimensionnels, et enfin sur les tridimensionnels, bien sûr l'évolution d'utilisation suit le développement des méthodes et des outils numériques dans ce domaine.

Ces programmes se basent sur les mêmes équations physiques régissant le phénomène que se soit pour l'eau ou pour les sédiments solides, telles que l'équation de la continuité et celle de la conservation de l'énergie, la différence est au niveau de calcul : la présentation des équations, la dimension du domaine, la méthode de calcul...etc.

Une autre chose qu'on doit mentionner, c'est l'existence de deux visions principales avec lesquelles les différents codes se basent, la première vision est dite classique et elle néglige l'interaction entre les sédiments et le liquide. Tandis que la deuxième vision tient compte de l'interaction entre les sédiments et le liquide, et elle considère que le milieu est défini par deux phases, une continue concerne le liquide et l'autre dispersée pour le solide. La majorité des codes numériques se regroupe dans ce concept général, et en ce qui concerne notre cas d'étude, on a utilisé le code Rubar20TS qu'on a déjà présenté et qu'on va voir d'une façon détaillée dans le chapitre suivant.

## **Chapitre III**

### **Présentation de la zone d'étude : Vallée du M'Zab**

La vallée du M'zab, est située dans la wilaya du Ghardaïa, près de 630km au sud D'Alger, aux coordonnées 33° et 31°15' de latitude nord et -2 ° et 30° 15' de longitude Est.

La région est très connue par ses cinq villes (KSOURS) fondées tout au long de l'oued M'zab. L'artisanat, le commerce et l'agriculture représentent les activités économiques et touristiques de la région.

Parmi les villes, nous avons la ville de Ghardaia, classée comme patrimoine national en 1972 et d'humanité par UNESCO en 1982, elle a été fondée en 1048, sur la rive gauche de l'oued M'zab.

La ville de Ghardaia est la cité la plus peuplée avec une population de l'ordre de 120000 habitants, et elle représente le centre économique et commercial de la wilaya.

L'architecture et l'urbanisme de la ville a un caractère très particulier et traditionnel, qui est parfaitement adaptée à l'environnement saharien (figure III.1), et qui protège l'intimité personnelle des maisons, avec une répartition pyramidale autour de la mosquée qui se situe au centre de la ville à l'altitude la plus haute.

En amont de la ville se trouve une palmeraie, avec 60 000 palmiers environs, c'est la partie florissante de la ville. En plus, elle est caractérisée par ses maisons de campagne en mois d'été, où les habitants de la ville la fréquentent pour chercher un peu de fraîcheur.

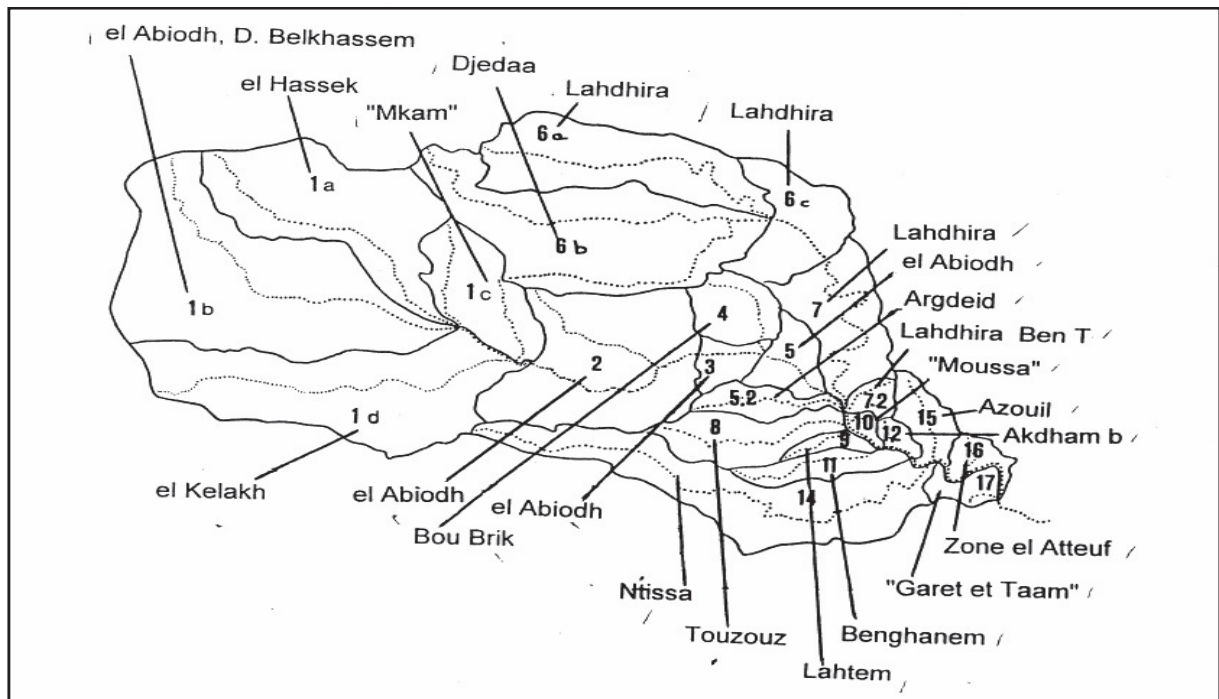
L'oued M'zab qui traverse la ville, et qui est le point de départ de la fondation de la ville, représente une source de vie dans un climat assez dur, les habitants de la vallée profitent des crues pour l'irrigation de leurs agricultures, mais parfois l'oued devient dangereux avec ses crues qui inondent la ville, et vu du caractère du bassin et la nature de sol, le transport solide a un effet majeur par rapport aux dégâts.



*Photo III.1 : Ville de Ghardaïa (Le fief du tourisme et de l'investissement. Wilaya de Ghardaïa).*

### 1. BASSIN VERSANT DU M'ZAB

Le bassin versant du M'zab a une surface de 1573Km<sup>2</sup>. Il est constitué de 23 sous-bassins élémentaires qui peuvent être combinés en de nombreux ensembles dont les grands bassins.



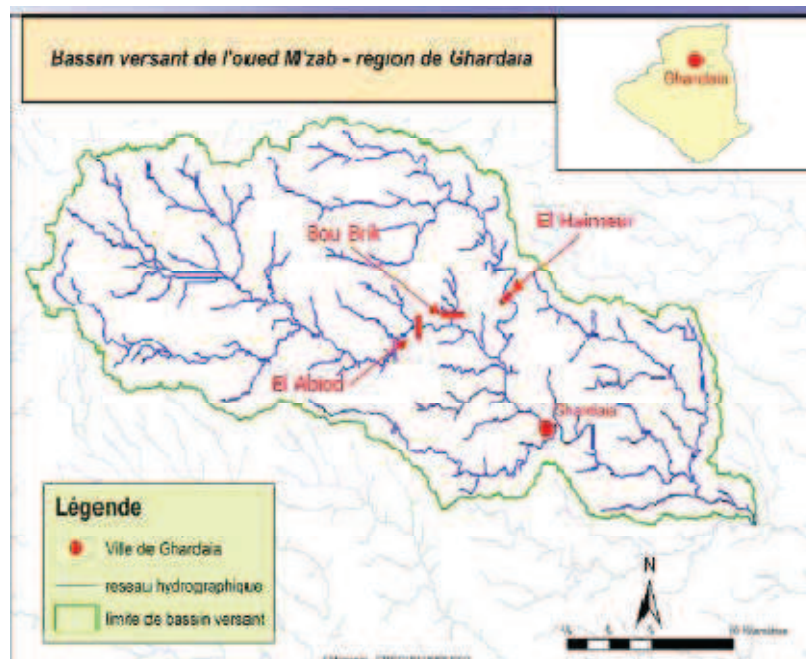
*Figure III.1 : Bassin versant du M'zab.*

Les oueds n'ont de l'eau que d'une façon exceptionnelle, on peut cependant trouver dans le lit de l'oued M'zab de vastes flaques permanentes dues à la remontée de la nappe phréatique, parmi les principaux oueds on cite : Oued Sebseb, Oued Metlili, Oued M'zab, Oued N'sa, Oued Zegrir...etc.

Les lignes d'eau sont orientées Ouest-Est (figure III.2), et chaque oued reçoit de nombreux affluents qui ravinent la surface de la Chebka. Une absolue irrégularité caractérise le régime de ces oueds.

L'oued M'zab Il s'étend de la région de El- Botma Rouila à 745m d'altitude jusqu'à la Sebket Safioune à 107m d'altitude, avec une longueur d'environ 320m.

Les ressources en eau souterraines se stockent dans deux aquifères qui sont : L'aquifères des alluvions, et le continental intercalaire. Leur profondeur est très variable, particulièrement du Nord au Sud. Dans les palmeraies, la profondeur d'eau varie entre 40 et 250 m, et elle est exploitable par des centaines de puits, et l'eau est répartie dans les champs par un réseau compliqué de séguias.



*Figure III.2 : Les oueds du M'zab (Djellouli-Tabet, Y)*

## 2. CLIMAT

Comme pour la majorité des régions sahariennes, le facteur dominant est la rareté des pluies. De plus ces pluies se produisent le plus souvent sous forme d'orage, rarement comme des précipitations régulières et fines.

La grande chaleur estivale, contraste avec les froids des mois de janvier et février, durant lesquels le thermomètre descend fréquemment la nuit au dessous de 0°C, un printemps s'ébauche en mars-avril, ainsi qu'un automne en novembre-décembre.

Les vents sont fréquents et violents, de Nord ou Nord-Ouest en hiver, de Sud à Sud-Ouest en été.

Ces trois facteurs expliquent que l'hygrométrie relative s'établisse entre 18% en été et 50% en hiver.

La nébulosité moyenne est, elle aussi, très faible : 2,6/10 de la surface du ciel.

Le caractère fondamental du climat est donc la sécheresse de l'air, mais les micro-climats jouent un rôle considérable au désert. En effet, Le relief, la présence d'une végétation abondante peuvent modifier localement les conditions climatiques.

Au sein d'une palmeraie, on peut avoir une température moins élevée que celle qu'on rencontre dans la partie urbanisée

### 3. PRECIPITATIONS

La région se caractérise par un climat désertique aride, dont les précipitations annuelles moyennes ne dépassent pas 67 mm, elles tombent essentiellement sous forme d'orage dans la période de l'automne au printemps, certaines années sont sèches, et d'autre sont exceptionnellement pluvieuses, (109 mm en 1951).

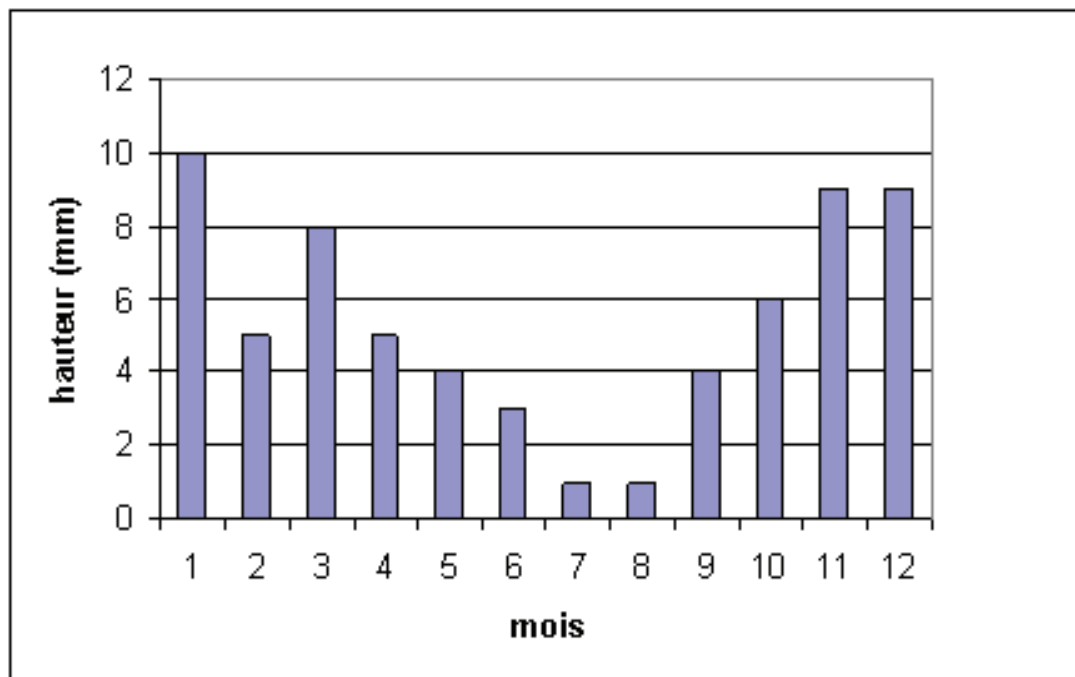


Figure III.3 : Précipitations moyennes mensuelles du Ghardaïa (*Atlas Ghardaïa*, 2004)

### 4. TEMPERATURES

La région se caractérise par des étés aux chaleurs torrides et des hivers doux surtout pendant la journée.

Elle est marquée par une grande amplitude entre les températures de jour et de nuit, d'été et d'hiver. La période chaude commence au mois de Mai et dure jusqu'au mois de Septembre.

La température moyenne enregistrée au mois de juillet est de 36,6° C ; le maxima absolu de cette période à atteint 46°C.

Pour la période hivernale, la température moyenne enregistrée au mois de janvier ne dépasse pas 12.2°C, le minima absolu de cette période a atteint 2.5° C.

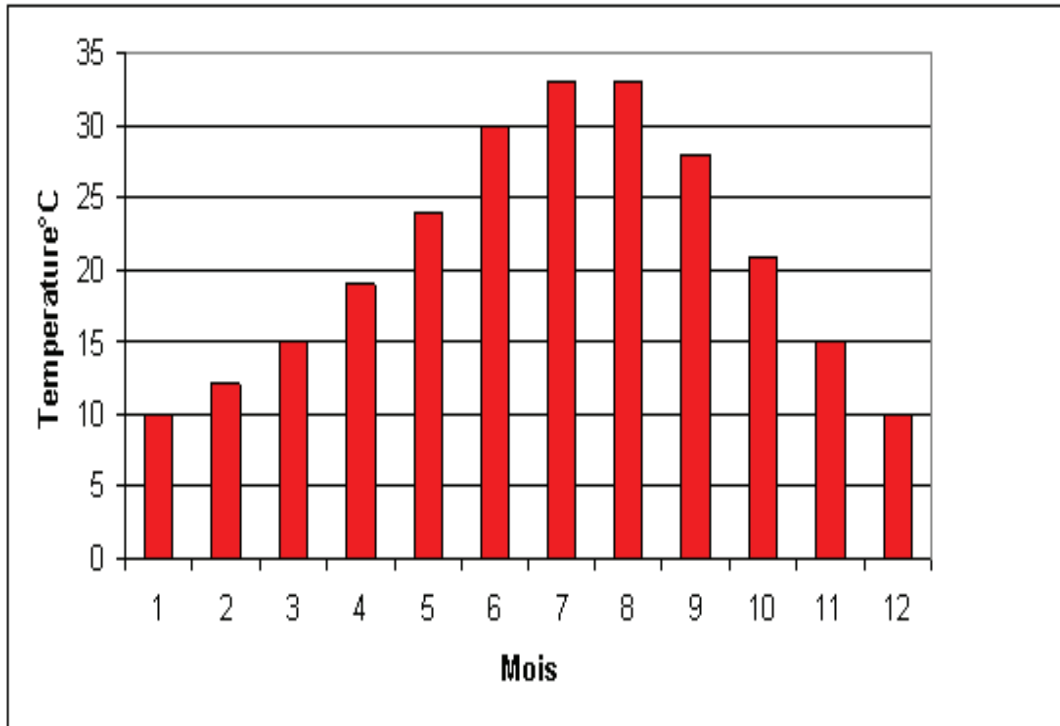


Figure III.4 : Températures moyennes mensuelles à Ghardaïa (*Atlas Ghardaïa*, 2004)

## 5. VENT ET EROSION EOLIENNE

En raison de la rareté de la végétation capable de réduire les déplacements d'air, les régions arides sont en général venteuses. Les vents évacuent l'air humide qui se trouve autour des plantes et du sol et accroissent par conséquent l'évapotranspiration (*FAO*, 1992).

Le cycle hydrologique s'achève par l'évaporation. La déperdition d'eau du sol par évaporation est importante lorsqu'on veut déterminer les précipitations "efficaces". L'évaporation est d'autant plus importante que les vents sont plus forts, que les températures sont plus élevées et que l'humidité est plus faible.

Ces mouvements d'air sont le facteur principal de la topographie désertique, et de l'érosion éolienne.

Les vents de la vallée pendant la période de mars à avril, transportent des grains de sable fin, ce qui provoque de véritables tempêtes de sable, appelés le vent de sable.

L'érosion du sol par le vent se produira chaque fois que les conditions pédologiques, végétatives et climatiques y sont favorables. Ces conditions (sol peu compact, sec ou fin, surface du sol lisse, couvert végétal rare et vent suffisamment fort pour induire des déplacements de terre) ce qui le cas de la région.



L'épuisement du couvert végétal est la cause fondamentale de l'érosion éolienne du sol. Le principal dommage causé par le vent en emportant des particules de terre est le tri des matériaux du sol; l'érosion éolienne enlève progressivement le limon, l'argile et les matières organiques de la surface du sol. Les matières restantes peuvent être sableuses et infertiles. Il est fréquent que le sable s'entasse pour former des dunes et présente une menace grave pour les terres environnantes. En plus, cet arrachement des particules influe aussi sur la composition granulométrique et évidemment sur les caractéristiques hydriques du sol.

## 6. OCCUPATION DU SOL

### 6.1. Couverture végétale

Le bassin versant du M'zab est d'une façon globale pauvre vis-à-vis la couverture végétale, en effet le climat et la nature du sol, ces deux facteurs ont joués un rôle négatif à l'existence des plantes et des forêts.

Mais, malgré l'aridité de la région, on trouve quelque verdure en amont de la ville, qui se compose généralement des palmeraies qui résistent à sécheresse et aux températures élevées.

En plus, des palmeraies on rencontre d'autres espèces de plantes qui s'adaptent aux conditions arides du Sahara, et qui se reverdissent après chaque pluie, comme les herbacées et des arbustes qui se localisent dans les lits des oueds et qui appartiennent à la flore saharien.

Ces plantes possèdent de longues racines ramifiées grâce auxquelles elles peuvent puiser profondément dans le sol l'eau fossile ou d'infiltration qui y séjourne sur les couches géologiques non absorbantes.



**Photo III.2 :** Couverture végétale à Ghardaïa, (*Le fief du tourisme et de l'investissement.* Wilaya de Ghardaïa).

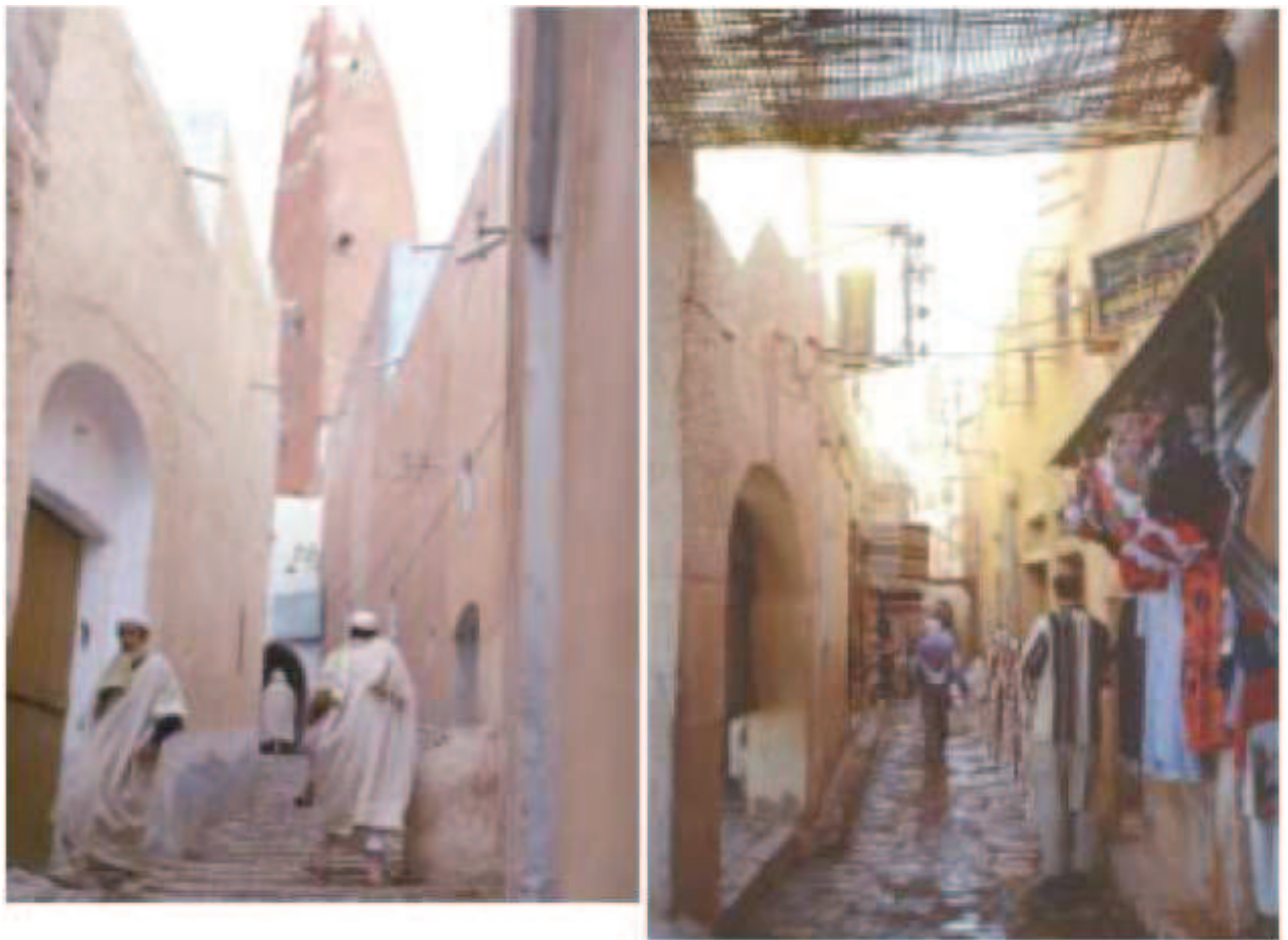
## 6.2. Urbanisme

L'urbanisme du M'Zab présente plusieurs caractéristiques et ce, en dépit de l'austérité imposée par la rigueur due à l'idéal social de rationalité et fonctionnalité dicté par la dureté du milieu.

L'image en perspective que la ville du M'Zab offre au regard est celle d'une masse bâtie dressée sur un piton rocailleux, qui impose par son ordre serré composé de maisons agglomérées harmonieusement et étagées en terrasses, par son ordonnancement et son aspect compact, la traduit la cohérence et la cohésion de son corps social.

La ville dessine un tracé concentrique autour de la mosquée et est entourée soit d'un rempart de type moyenâgeux, soit d'une ceinture de maisons mitoyennes faisant elles-mêmes rempart.

Les agglomérations sont principalement réparties sur la rive gauche de l'oued, caractérisé par une accumulation des maisons dense et concentrée, avec des rues étroites n'excèdent pas trois mètres et des escaliers s'enchevêtrent en un réseau inextricable, ce qui rend le sol moins vulnérable au problème d'érosion en cas d'inondation. Par contre ce caractère ne protège pas la ville du dépôt des sédiments.



*Photo III.3 : Escaliers et rues des Ksour à la ville de Ghardaia (Atelier du Patrimoine du M'Zab, 2001)*

## 7. GEOLOGIE ET MORPHOLOGIE

La région appartient géologiquement à la plate-forme-saharienne, qui est située au sud de l'Algérie alpine. Elle comprend un socle précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire.

Le sol de la vallée du M'zab, se compose de sable, d'argile, et des pierres en grande partie, cette composition a son effet sur la réponse hydrologique du bassin.

Le M'zab est caractérisé par un plateau rocailleux desséché émerge des dépôts d'origine à la fois fluviale et éolienne, appelé le HAMADA, dont l'altitude varie entre 300 et 800m, les terrains sont calcaires dolomitiques bruns à structure cristalline, avec une pente presque horizontale indique qu'ils sont restés en place à l'écart des mouvements orogéniques depuis leur formation, Leur paysage est dominé par une vaste étendue pierreuse ou affleure une roche nue de couleur brune et noirâtre.

Ce plateau était bordé de falaises rocheuses aux pentes rapides accusent une déclivité qui dépasse rarement 100 mètre, à cause de forte érosion fluviale du début de quaternaire qui a découpé dans sa partie sud des buttes à sommet plats et a façonné des vallées, qui surmontent des formations marneuses ou argileuses, l'ensemble de ces morphologie est appelé localement la CHEBKKA (filet, réseau) à cause de l'enchevêtrement de ses vallées, l'oued M'zab traverse ce CHEBKKA du nord-ouest au sud-est.



**Figure III.4** : Hamada : qui est un plateau caillouteux, (*Le fief du tourisme et de l'investissement*. Wilaya de Ghardaïa).

## 8. GRANULOMETRIE

Le sol de la vallée se compose en plusieurs familles, dans les plateaux est caractériser par des cailloux dont le diamètre peut aller de 6 à 80 mm.

Les falaises de ces plateaux attaquées par l'érosion, dépouillées des roches tendres, reculèrent, ne laissant devant elles que des îlots de roches dures, vestiges des anciennes formations.

Par contre au niveau de la dépression, le lit actif ou la bande active : est caractérisé par un sol composé de sable et de gravier, Leur substrat est constitué de sédiments grossiers (diamètre médian  $d_{50}$  supérieur à 2mm), de granulométrie assez étendue. Sa couche superficielle composée de grosses particules, a été formées lors des écoulements à faible débit d'eau, La formation de cette couche est liée au phénomène de tri granulométrique.

Dans le lit majeur ou le lit passif: on trouve de sable fin (limons), de l'argile, ainsi que quelques cailloux en provenance des plateaux de calcaire via l'érosion hydrique, leur substrat est constitué de matériau relativement fin (diamètre médian  $d_{50}$  inférieur à 2mm) de granulométrie peu étendue.

De faits, des caractéristiques du lit citées précédemment nous avons estimé le diamètre médian à 2.5mm, dont la courbe granulométrique est donnée par la figure III.5.

La force tractrice critique nécessaire à la mise en mouvement du sable étant faible, le transport solide est significatif même en période de faibles débits, ce qui rend le lit du oueds formé en grande partie de sable grossier, de gravier et des cailloux, ce phénomène est appelé le pavage qu'on l'a détaillé en premier chapitre.

De plus la domination du sable présente un caractère non cohésif, ce qui facilite aussi l'arrachement des particules et augmente la concentration des sédiments en cas de crue.

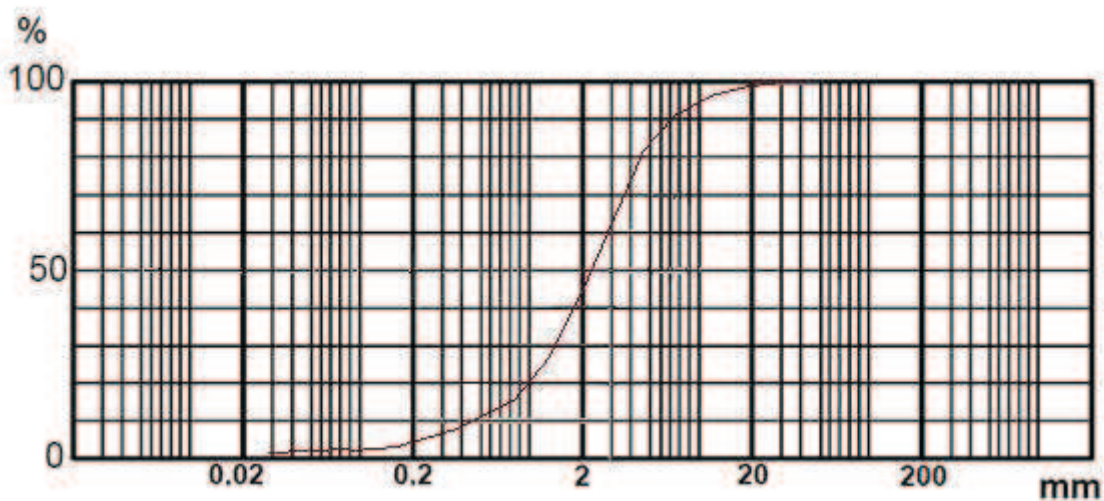


Figure III.5 : Courbe granulométrique approximative de l'oued,  $d_{50} = 2.5$  mm

## 9. INONDATIONS A GHARDAÏA

La vallée du M'zab est très vulnérable aux inondations et l'historique de la région montre ceci. Commençons par celle du mois d'Octobre 1884 et du 5 Janvier 1886 qui sont les plus anciennes crues enregistrées dans les archives de la région, puis celle du 30 septembre 1901 qui a engendré des dégâts considérables et catastrophiques, son débit n'a pas été mesuré mais les habitants ont évalué la hauteur d'eau à 10m, tous les barrages furent endommagés et l'oued M'zab coulait pendant deux jours jusqu'à atteindre la Sebkhha Séfouane. La région a connu d'autres crues plus ou au moins importants (Tableau III.1).

Tableau III.1 : Historiques des crues à Ghardaïa (*Ali Azouaou, 2008*)

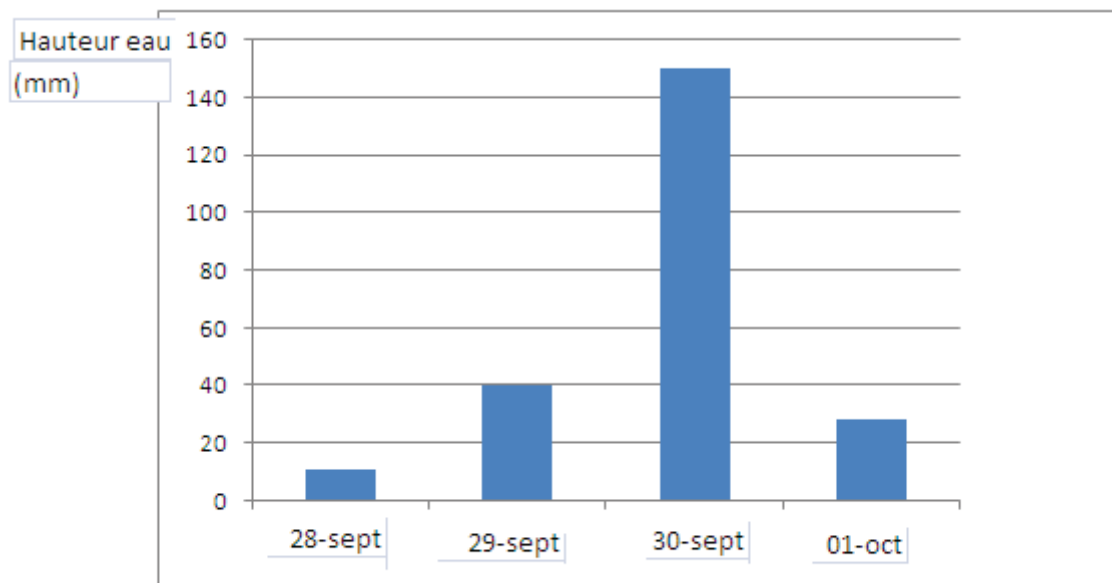
<b>Mai 1921</b>	Importante	La crue arrive au 3 <sup>ème</sup> barrage, la palmeraie est inondée.
<b>Mai 1923</b>	Importante	Inondation des oasis de Ghardaïa, Melika, Bou Noura, El Atteuf. Atteint Zelfana à 64 km en aval de Ghardaïa, à 150 km de la source.
<b>Mars 1925</b>	Importante	Dépasse Bou Noura après avoir rempli tous les barrages situés en amont.
<b>Septembre 1929</b>	Importante	Remplit tous les barrages
<b>Mai 1931</b>	Importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Novembre 1932</b>	Importante	Coule jusqu'au barrage; oasis arrosée.
<b>Décembre 1932</b>	Importante	Remplit les barrages de Ghardaïa et s'arrête à celui de Melika.
<b>Novembre 1933</b>	Très Importante	les barrages de Ghardaïa, Melika, et Bou Noura. S'arrête à celui d'El Atteuf qui n'a pas été atteint depuis 1932.
<b>Avril 1935</b>	Peu Importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Avril 1938</b>	Importante	Coule jusqu'à la ville de Ghardaïa.
<b>Novembre 1938</b>	Importante	Inondation totale des oasis de Ghardaïa, Beni Isguen, partielle de celle de Bou Noura (oued Zouil)
<b>Février 1939</b>	Importante	Arrive jusqu'à El Atteuf, remplissant à moitié le barrage d'aval de l'oasis. Tous les barrages situés sur le parcours aval de l'oued ont été remplis
<b>Mars 1940</b>	Légère	Crues des affluents des oueds El Abiodh et M'zab. Le barrage dit "Sed Edjedid" (dit aussi "Habbas Djedid") presque entièrement rempli.
<b>1941 mars</b>	Importante	Inondation de la palmeraie; premier barrage (à 1500 m en amont du Ksar) rempli.
<b>Avril 1941</b>	Moyenne	Inondation de l'oasis; barrage en parti rempli.
<b>Juin 1942</b>	Moyenne	Crue des oueds secondaires.
<b>Février 1943</b>	Faible	Oued Adhira au NW de Ghardaïa.
<b>Mars 1943</b>	Faible	Partie N de la palmeraie arrosée.
<b>Avril 1943</b>	Faible	Inondation de l'oasis. Fortes crues des oueds secondaires.

<b>Octobre 1943</b>	Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa; premier barrage rempli.
<b>Décembre 1943</b>	Peu Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Février 1944</b>	Peu Importante	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Mars 1944</b>	Peu Importante	
<b>Janvier 1946</b>	Très Importante	Inondation de toutes les oasis. L'oued M'zab est arrivé à El Atteuf, tous les barrages ont été remplis sauf El Atteuf qui ne l'a été qu'en partie.
<b>Avril 1946</b>	Assez Importante	Inondation de la partie nord de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Septembre 1946</b>	Faible	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Avril 1947</b>	Moyenne	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Avril 1948</b>	Faible	
<b>Septembre 1948</b>	Fortes	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa. oueds secondaires.
<b>Mars 1949</b>	Légère	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Avril 1949</b>	Importante	Inondation de l'oasis de Ghardaïa. Barrages partiellement remplis.
<b>Septembre 1950</b>	Forte	Inondation partielle de l'oasis de Ghardaïa.
<b>Octobre 1950</b>	Forte	Inondation de l'oasis de Ghardaïa; barrage de Ghardaïa rempli.
<b>Mars 1951</b>	Forte	Inondation de l'oasis de Ghardaïa. La crue arrive jusqu'à El Atteuf.
<b>Septembre 1951</b>	Moyenne	Crue moyenne des oueds secondaires Bouchamdjane, Takdit, Touzouze, Argdane. Une partie de la palmeraie a été arrosée. Une crue de l'oued M'Zab a été signalée dans son cours inférieur (renseignement de l'annexe d'Ouargla).
<b>Octobre 1951</b>	Forte	L'oued M'Zab est arrivé jusqu'à El Atteuf, après avoir rempli les barrages de Ghardaïa et Mélika. Plus en aval, la crue alimentée par les affluents inférieurs du M'Zabatteignit Hassi Chegga le 4 octobre. Le 17 le lit de l'oued était encore humide; un plan d'eau de 250 m <sup>2</sup> subsistait à Chaab M'Zab.
<b>Septembre 1952</b>	Assez forte	Crue de l'oued M'Zab alimentée par les oueds

		immédiatement en amont; barrages remplis. Forte crue de l'oued N'Tissa qui remplit le barrage d'El Atteuf: léger déversement de celui-ci. Le barrage de Beni-Isguen a été très endommagé. L'oued coule en aval d'El Atteuf, grâce aux crues des oueds inférieurs et surtout Noumerate.
<b>Mars 1953</b>	Faible	La palmeraie de Ghardaïa a été partiellement arrosée.
<b>Juillet 1953</b>	Faible	Oued Zouil. Quelques jardins de l'oasis de Bou Noura ont été arrosés.
<b>Septembre 1953</b>	Faible	Oueds secondaires: Touzouze, Akhalkhal, les crues y sont arrivées.
<b>Octobre 1984</b>	Aucun commentaire	Au moins le barrage en amont de la palmeraie de Ghardaïa est rempli.
<b>Mai 1990</b>	Aucun commentaire	Laisse de crue repérée à l'altitude de 498,85 à la distance de 473,70 m en amont du pont Adaoud.
<b>Juin 1991</b>	Très importante	Nombreux dégâts.
<b>Decembre 1993</b>	Probable forte	Aucun commentaire
<b>Septembre 1994</b>	Très importante	Aucun commentaire
<b>Octobre 1995</b>	Assez forte	Aucun commentaire

### 10. INONDATION DU MOIS D'OCTOBRE 2008

Certains spécialistes l'appellent le tsunami fluvial. Après quatre années de sécheresse, les précipitations ont commencé le 28 Sept 2008 avec une pluviométrie de 11mm. Le 29 septembre c'était 40,5mm (la nuit de 21h à 22h une averse d'une intensité de 15 mm/h était enregistrée), le 30 septembre a été enregistré une averse entre 3h et 4h du matin d'une intensité estimée à 150mm/h, et le 1 octobre avec une averse d'intensité de 28.2 mm/h ; c'était le déluge. Les principaux oueds de la région (M'zab, Zeghir, Metlili et Nsa) ont fonctionné à plein régime. D'après certains observateurs, c'est la première fois depuis 70 ans que les trois affluents du oued M'zab étaient en crue, d'habitude un des trois oueds déborde sans mettre en danger les populations environnantes. Les autorités parlent d'un débit de 900 m<sup>3</sup>/s, l'agence nationale des ressources hydrique l'a estimé à 1200 m<sup>3</sup>/s et certaines sources parlent d'un débit de 3500 m<sup>3</sup>/s (*Medejerab*, 2009). Dans notre cas après plusieurs séries de simulation par le Rubar20, nous avons pu estimer le débit de pointe à 3500 m<sup>3</sup>/s.



**Figure III.6 :** Précipitations de la crue d'Octobre 2008

De toute les façons, la crue était exceptionnelle, et d'après le critère de Dubieff elle est cinquantenaire (le critère consiste à considérer une crue qui atteint la Sebka de Séfiouane – ce qui est le cas- comme étant une crue cinquantenaire).

A Metlili située à 40 Km au nord de la ville de Ghardaia, la hauteur d'eau était de 6m, alors qu'en aval la hauteur a frôlé les 10m, tandis qu' en ville l'oued a débordé de son lit vers 4h du matin, et les dégâts étaient énormes, malheureusement il y a eu des pertes humaines (environ 100 décès, 89 blessées, 756 familles sinistrées), ainsi que des dégâts matériels qui ont été estimés à 20,1 Milliards de Dinars (environ 200 millions d'euro), à savoir (*Medejerab*, 2009) :

- L'effondrement d'une retenue collinaire construite en 2005 au niveau de l'oued Laadhira, située à 20Km du chef lieu de la wilaya.
- Plus de 300 véhicules emportés
- 7200 foyers privés d'électricité
- 2300 familles privées d'eau
- Plus de 1200 ha de cultures maraichères, arboricoles et de palmeraies ont été endommagées
- Plus de 1000 têtes de bétail ont péri.





*Photo III.5* : Dépôts et débris solides après la crue (*Behloui*, 2008)



*Photo III.6:* Débordement de l'oued M'zab (*La Tribune*, 2008)



*Photo III.7 :* Dépôts et débris solides après la crue (*ELAyam 2*, 2008)



*Photo III.8* : Destruction du barrage El Haimeur par la crue (*Djellouli-Tabet, Y*)

## 10.1. Apport liquide

### 10.1.1. Hydrogramme de crue

Le fonctionnement du code Rubar20TS nécessite des données initiales et aux limites, telles que l'apport liquide et solide entrant en amont de l'oued, ceci peut être exprimé en fonction de l'hydrogramme de crue, Malheureusement le bassin du M'zab est non jaugé, pas de mesure concernant le débit liquide et solide, le bassin est équipé d'une seule station météorologique, située dans l'aéroport de la ville et elle n'a pas doté d'un pluviographe, la plus proche est celle de Hassi R'mel n'a fonctionné que durant une courte période et dans des mauvaises conditions.

Nous sommes obligés donc d'estimer les deux apports, commençant par le débit liquide, pour cela on a opté pour la méthode de Sokolovski pour la construction de l'hydrogramme de crue, cette méthode est applicable pour les régions saharienne, et elle se base sur le débit de pointe et le temps de concentration.

#### *10.1.1.1. Description de l'hydrogramme de crue*

L'hydrogramme de crue reflète la réponse hydrologique de bassin versant, il présente la forme générale d'une courbe cloche dissymétrique que l'on divise généralement en quatre parties : tarissement (avant la pluie nette), crue, décrue et tarissement (après la recension hydropluviométrique étudiée).

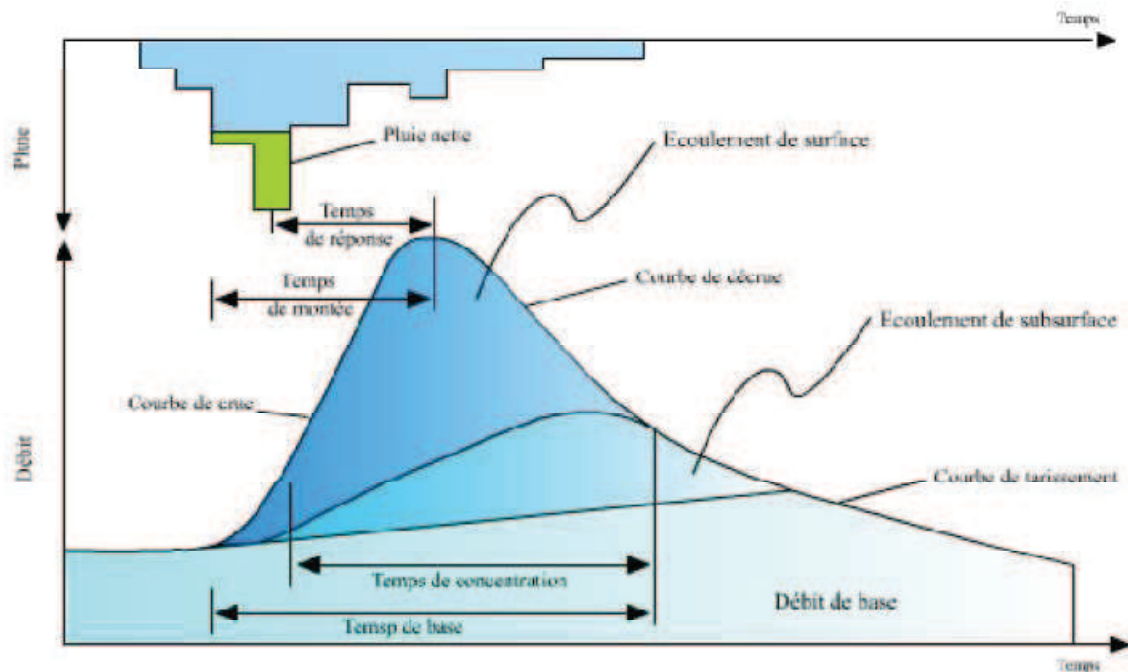


Figure III.7 : Description de l'hydrogramme de crue (Musy, 2004).

Les temps caractéristiques sont :

Le temps de réponse du bassin  $t_b$  : c'est l'intervalle de temps qui sépare le centre de gravité de la pluie nette de la pointe de crue.

Le temps de concentration  $t_c$  : temps que met la particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée hydrologiquement de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. L'estimation de  $t_c$  peut se faire en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie nette et la fin de ruissellement direct.

Le temps de montée  $t_m$  : temps qui s'écoule entre l'arrivée à l'exutoire de l'écoulement rapide et le maximum de l'hydrogramme dû à l'écoulement de surface.

Temps de base  $t_b$  : c'est la durée du ruissellement direct

#### Méthode de Sokolovski

La méthode de Sokolovski consiste à diviser l'hydrogramme en deux parties : la montée et la décrue, pour chaque partie Sokolovski a assimilé la courbe de l'hydrogramme à une équation parabolique en fonction du débit de pointe et du temps de concentration de bassin versant.

#### Montée

Le débit de montée est donné par la formule :

$$Q_t = Q_{\max} \cdot (t/t_m)^2$$

avec,  $t_m$  : le temps de montée de la crue selon Sokolovski, il peut être égal au temps de la concentration de la crue. Et  $Q_{\max}$  : le débit de pointe

**Décru**

$$Q_t = Q_{\max} \cdot ((t_d - t') / t_d)^3$$

Avec :

$$t' = t - t_c$$

$$t_d = \gamma \cdot t_m$$

$\gamma$  : coefficient en fonction des caractéristiques du bassin versant, voir le tableau suivant :

**Tableau III.2** : Valeurs de  $\gamma$  en fonction des caractéristiques du bassin

La valeur de $\gamma$	Les caractéristiques du bassin versant
2	Bassins versants dont la surface est inférieure à 5 km <sup>2</sup>
2 à 3	Bassins versants non boisés
3 à 4	Grands bassins versants boisés et perméables

Le bassin versant de M'zab est caractérisé par une couverture végétale pauvre et une superficie supérieure à 5 km<sup>2</sup>, nous avons pris un  $\gamma$  égal à 2,5.

**Calcul des différents paramètres****Débit de pointe  $Q_{\max}$** 

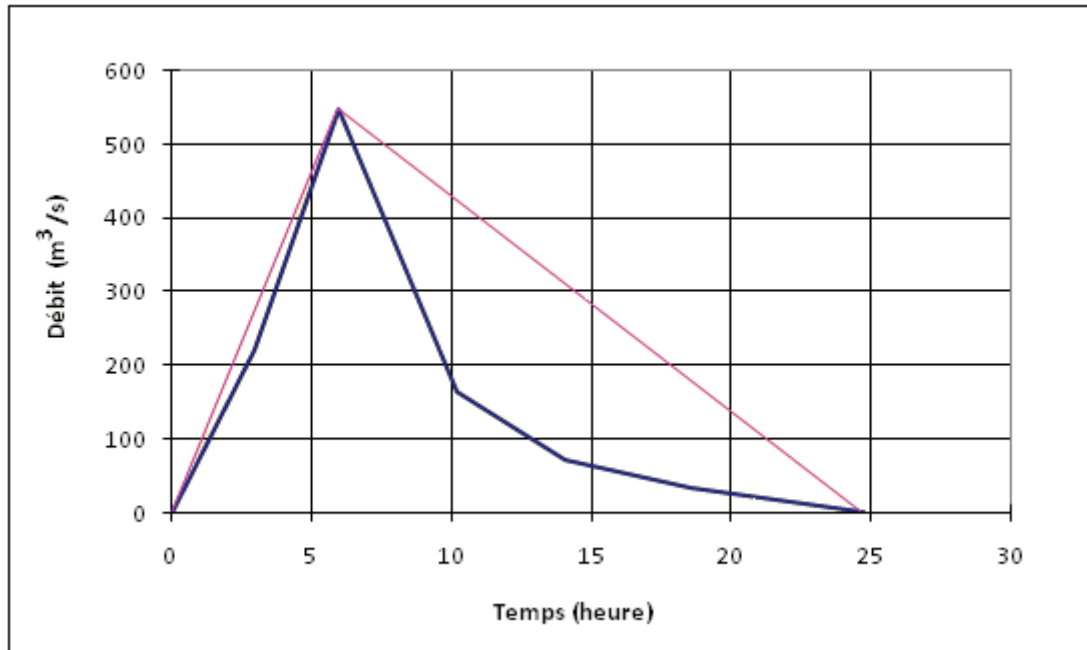
Le débit de pointe a été calculé à partir de plusieurs essais de simulation numérique via Rubar20, et ceci en fonction de la hauteur d'eau observée dans la ville, les simulations ont données un débit de pointe de 3500 m<sup>3</sup>/s.

**Temps de concentration au niveau de la ville**

Le calcul du temps de concentration, se fait à partir de l'hydrogramme de crue centennial au niveau du Barrage El Abiod, en appliquant la formule suivante :

$$t_c = (L / (3,6 \times U))$$

avec, L : la longueur de l'oued et U : la vitesse d'écoulement.



**Figure III.8** : Hydrogramme type de la crue centennale de l'oued M'Zab au site d'El Abiod (Azouaou, 2008)

La longueur de l'oued est égale à la distance entre le barrage et la ville. Elle est de 17,1 km, La longueur de l'oued El Abiod est égale à 52.5Km

#### **Vitesse de crue au niveau du barrage El Abiod**

$$U = L / (3,6 \times t_m)$$

avec, L : La longueur de l'oued El Abiod qui est égal à 52,5 km.  $t_m$  : temps de montée, est égal à 5,95 h.

L'application numérique donne une vitesse de 2.45 m/s.

Ce qui donne un temps de concentration :

$$t_c = (52,5 + 17,1) / (3,6 \times 2,45)$$

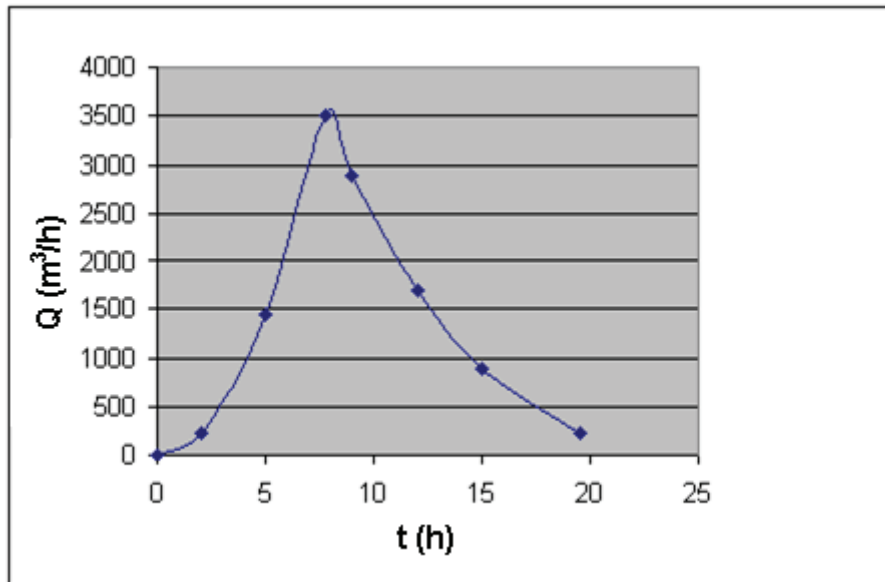
$$t_c = 7,8 \text{ h}$$

$$\text{D'où le } t_d = 2,5 \times 7,8 = 19,5 \text{ h}$$

En appliquant les formules de Sokolovski, nous obtenons le tableau suivant qui nous a permis de construire l'hydrogramme de crue au niveau de la ville.

**Tableau III.3:** Hydrogramme de crue au niveau de la ville de Ghardaïa

t(h)	0,0	2,0	5,0	7.8	9,0	12,0	15,0	19.5
Q(m <sup>3</sup> /s)	0,00	230,11	1438,19	3500,00	2892,79	1690,59	878,37	224,00

**Figure III.9 :** Hydrogramme de crue de la ville de Ghardaia

### 10.2. Application de la méthode Fournier sur le bassin versant du M'zab

Comme nous avons cité précédemment le bassin n'est pas jaugé, ce qui rend la tâche un peu délicate vis-à-vis de la procédure de la récolte des données nécessaires à la simulation. Mais cela ne nous a pas empêché à rechercher un moyen pour évaluer l'apport solide au niveau du bassin.

On a appliqué la méthode de Fournier pour estimer le taux des sédiments au niveau du bassin du M'zab.

#### Calcul du coefficient orographique $H^2/A$

$H_m$  : la hauteur moyenne du relief [m]

$$H_m = Alt_{moy} - Alt_{min}$$

$$Alt_{moy} = 597,5 \text{ m}$$

$$Alt_{min} = 445 \text{ m}$$

$$H_m = 152,5 \text{ m}$$

$$A = 1573 \text{ km}^2$$

$$H^2/A = 152,5^2/1573 = 14,78 > 6$$

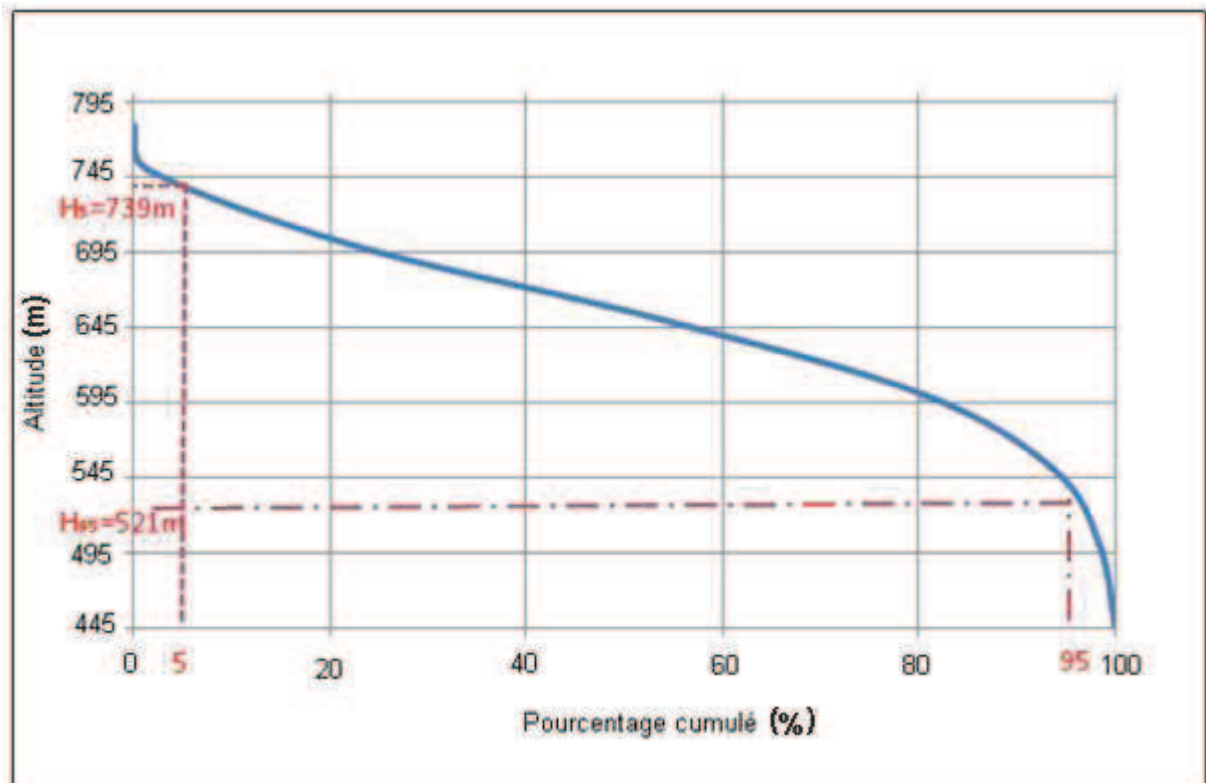


Figure III.10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'Zab (Azouaou, 2008)

#### Calcul du coefficient climatique $I_{CL}$

$I_{CL} = p'$  si les précipitations tombent en un seul mois, ce qui est notre cas, puisque les précipitations moyennes annuelles de la région ne dépassent pas le 64mm généralement, alors qu'en octobre 2008, nous avons une averse qui a provoqué une hauteur d'eau, estimée à 229,7mm, d'où  $I_{CL} = 229,7\text{mm}$ .

#### Calcul de l'apport solide $E_s$

Le bassin est caractérisé donc par un relief accentué ( $H^2/S > 6$ ), et un climat aride. Qui se correspond à la quatrième équation de Fournier :

$$E.S = 91,78 I_{CL} - 737,62$$

A.N :

$$E_s = 91,78 (229,7) - 737,62$$

$$E_s = 20\,344,25 \text{ tn/an/km}^2$$

$$E_s = 20\,344,25 \times 1573 = 32\,001\,499 \text{ tn/an}$$

Estimation du volume d'eau

$$V_e = 0,2297 \times 1573\,000\,000 = 361318100 \text{ m}^3$$

Ce qui nous permet de calculer la concentration des sédiments

$$C = E_s / V_e$$



$$C = 32001499 / 361318100$$

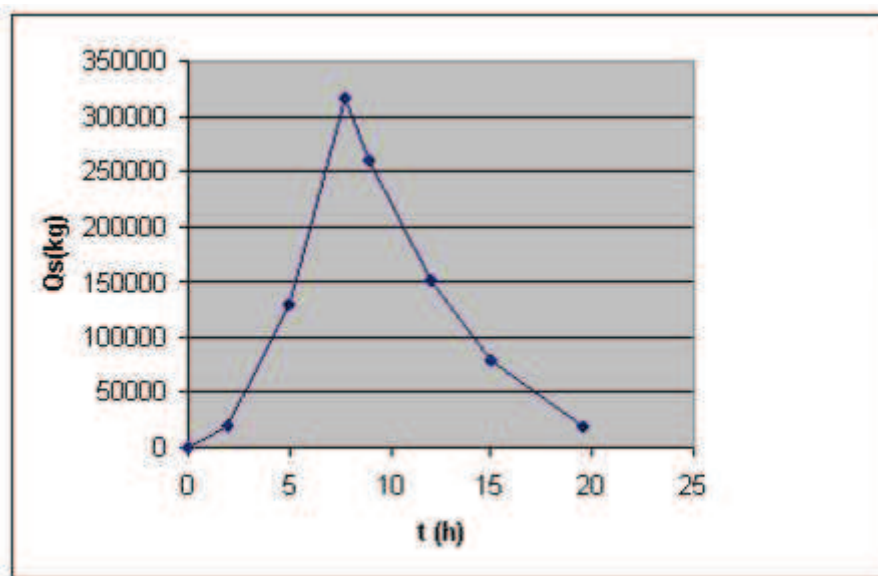
$$C = 0,0885 \text{ tn/m}^3$$

$$C = 88,56 \text{ kg/m}^3 = 90 \text{ kg/m}^3$$

En multipliant l'apport liquide par la concentration des sédiments, nous aurons l'apport solide entrant du bassin versant, (voir le tableau suivant) :

**Tableau III.4** : Apport solide au niveau de la ville de Ghardaïa

t(h)	0,0	2,0	5,0	7.8	9,0	12,0	15,0	19.5
Qs (kg)	0,0	20709,9	129438,0	315000,0	260352,0	152154,0	79053,3	20160,0



**Figure III.11** : L'apport solide au niveau de la ville de Ghardaïa

## CONCLUSION

Du fait de la particularité que présente la ville de Ghardaïa, bâtie sur les bords de l'oued M'zab, ainsi que d'autres facteurs humains et naturels, font que la ville est sensible au risque provoqué par une crue comme celle d'Octobre 2008. En effet, l'érosion du sol, l'envasement, et l'inondation de la ville sont les résultats directs pour un scénario pareil.

D'une façon générale, le climat et le type de sol représentent les principaux facteurs naturels qui favorisent l'érosion du sol au niveau de la région. La nature des précipitations se faisant sous forme d'averses, et le non cohésion de sol, augmentent l'érosion et la charge solide.

Parmi les principaux facteurs humains participant à l'augmentation de ce risque majeur, on cite : la présence des zones urbanisées au niveau du lit majeur de l'oued, le mauvais aménagement de l'oued et de bassin et la pénurie des infrastructures de protection.

Tous ces facteurs font que le danger reste présent, si on ne trouve pas une solution fiable et efficace de cette problématique.

## Chapitre IV

### Modélisation mathématique du phénomène du transport solide – présentation du code Rubar20TS

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation bidimensionnelle employée pour la simulation du transport solide au niveau de l'oued M'zab pendant la crue du mois d'Octobre 2008. Car généralement, pour les problèmes d'inondations à grande échelle (y compris le transport solide), on utilise souvent ce type de modélisation mathématique.

La modélisation bidimensionnelle utilisée se base sur l'approche dite couplée, car on prend en compte le changement de la morphologie du cours d'eau, ainsi que d'autres paramètres hydrosédimentaires, dus aux effets de l'évolution engendrée par l'érosion ou par le dépôt au cours du temps.

D'une manière générale, cette modélisation, comme les autres modélisations bidimensionnelles usuelles, est basée sur les équations de Saint-Venant pour la phase liquide, et l'équation de convection-diffusion pour la phase solide.

#### 1. Partie liquide

##### 1.1. Equations de Saint-Venant

Les équations de Saint-venant bidimensionnelles, s'écrivent (*Cemagref*, 2009) :

L'équation de continuité (conservation de la masse) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = P \quad (\text{IV} - 1)$$

L'équation de quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( \frac{q_x q_y}{h} \right)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{C_z^2 h^2} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{q_x}{h} \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{q_x}{h} \right)}{\partial y} \right) \right] + F_x(W) \\ + P_x \end{aligned} \quad (\text{IV} - 2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( \frac{q_x q_y}{h} \right)}{\partial x} \\ = -gh \frac{\partial Z}{\partial y} - g \frac{q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{C_z^2 h^2} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{q_y}{h} \right)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial \left( \frac{q_y}{h} \right)}{\partial y} \right) \right] + F_y(W) \\ + P_y \end{aligned} \quad (\text{IV} - 3)$$

avec,

$h$  : La hauteur d'eau ;  $Z$  : La cote du fond ;  $q_x, q_y$  : Les débits unitaires selon OX, et OY ;

$g$  : L'accélération de la pesanteur ;  $K$  : Coefficient de viscosité ou diffusion ;  $C_z$  : coefficient de Chézy pour les frottements au fond (ou coefficient de Strickler multiplié par  $h^{1/6}$ )

$W$  : la vitesse du vent à 10 m du sol ;  $F_x, F_y$  : Les contraintes dues au vent.

$P_x, P_y$  : les composantes du frottements à la paroi verticale ;  $P$  : l'apport local de pluie ;

*Remarque :*

- On peut ajouter aux équations de conservation de l'énergie une force qui s'appelle la force de Coriolis, qui donnée par la formule :  $-aq_y$  et  $-aq_x$  pour les deux équations de l'énergie respectivement,  $a = 1.4584 \times 10^{-4} \times \sin(\text{latitude})$  ; cette force est généralement négligeable.
- Il est possible d'introduire des ouvrage, la loi de l'ouvrage donne un débit qui vient de s'ajouter ou de substituer au débit fourni par les équations de Saint-Venant.

## 1.2. Principe de résolution des équations

La méthode de résolution est celle des volumes finis, appliquée à un maillage constitué de quadrilatères ou de triangles, ayant entre eux un coté commun.

Pour calculer le flux entrant et sortant à de chaque maille et à chaque pas du temps, on résout un problème de Rieman dans la direction normale à l'arête.

Deux schémas numériques sont alors utilisés :

- Un schéma de VAN LEER, avec 2<sup>ème</sup> ordre en espace et 1<sup>er</sup> ordre en temps
- Un schéma de VAN LEER, avec deuxième ordre en temps et en espace.

En premier temps, on résout le problème homogène pour les trois équations unidimensionnelles mises sous forme conservative, puis on ajoute les termes du second membre où on retrouve le terme de gravité, de frottement ...etc. (Paquier 1995).

### 1.2.1. Conditions aux limites

Quatre types des conditions aux limites sont définis :

- Réflexion : flux nul sur l'arête
- Flux sortant déterminé par le fluide
- Flux entrant en imposant 2 des 3 variables (les 3 variables en régime torrentiel)
- Flux sortant avec une condition qui peut être soit, une hauteur imposée, soit une loi de tarage, ou un régime critique.

### 1.2.2. Conditions initiales

Les conditions initiales sont données par l'utilisateur, qui sont, la hauteur d'eau et les débits, et ceci à chaque centre des mailles à au début de calcul.

### 1.2.3. Maillage

Le maillage est constitué généralement, de :

- Sections en travers : qui représentent soit, des sections mouillées pour un cours d'eau ou un canal, soit des crêtes faisant obstacles pour un remblai ; les points caractéristiques de chaque section doivent être bien définis (coordonnées x, y, plus côtes).
- Les lignes directrices : en reliant les points caractéristiques de même rang de chaque section en travers, on aura les lignes directrices qui sont approximativement perpendiculaires aux sections en travers

## 2. PARTIE SOLIDE

### 2.1. Equation de convection-diffusion

Dans cette partie, une équation de convection diffusion est ajoutée aux équations sur l'eau (équation de Saint-venant : conservation de masse et d'énergie).

L'équation de convection diffusion s'écrit (*Cemagref*, 2009) :

$$\frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(Chu_s)}{\partial x} + \frac{\partial(Chv_s)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( hD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E - S \quad (IV - 4)$$

Où, C : est la concentration dans l'eau [ $m^3/m^3$ ] ou [ $kg/m^3$ ] ; h : la hauteur d'eau [m] ;

$u_s, v_s$  : les vitesses des sédiments suivant Ox et Oy (m/s) :

- Dans le cas du transport en suspension : elles sont supposées égales aux vitesses liquides.
- Dans le cas du charriage :  $u_s = u \frac{u_{ch}}{\sqrt{u^2+v^2}}$        $v_s = v \frac{u_{ch}}{\sqrt{u^2+v^2}}$

Avec :  $u, v$  : Les vitesses liquides ;  $u_{ch}$  : La vitesse des sédiments charriés.

$D_x, D_y$  : Coefficients de diffusion [ $m^2/s$ ]

Où :

$$D_x = \sigma v_x \quad \text{et} \quad D_y = \sigma v_y$$

$v_x, v_y$  : les coefficients de diffusion liquide [ $m^2/s$ ] ;  $\sigma$  : Le nombre de Schmidt (compris entre 0 et 1) ; E : taux d'érosion ; S : taux de sédimentation.

### 2.2. Transport en suspension

#### 2.2.1. Taux d'érosion E

Il est modélisé comme suit (*Cemagref*, 2009) :

$$E = M \left[ \frac{\tau}{\tau_{cr}} - 1 \right] \quad \text{si } \tau > \tau_{cr}, \text{ sinon } E=0 \quad (IV-5)$$

Avec :

$M$  : coefficient empirique à caler (m/s).

$\tau_{cr}$  : contrainte d'érosion critique ;

$$\tau_{cr} = \tau_{cr}^* \times d_{50} \times (\rho_s - \rho) \times g \quad (IV-6)$$

$\tau_{cr}^*$  : Contrainte adimensionnelle critique calculé à partir du diagramme de Shields en fonction de  $d_{50}$ .

On considère  $M$  et  $\tau_{cr}$  comme des constantes vis-à-vis des paramètres hydrodynamiques de l'écoulement, de la concentration et du temps, le paramètre le plus important de l'érosion est le coefficient  $M$ , les résultats des différents tests apparaissent sensible à la valeur de ce coefficient.

### 2.2.2. Taux de sédimentation S

Il est modélisé comme suit :

$$S = \alpha w_s (C - C_e) \text{ si } C > C_e, \text{ sinon } S = 0 \quad (IV-7)$$

$C$  : La concentration adimensionnelle ;  $C_e$  : la concentration à l'équilibre ;

$\alpha$  : Paramètre de calage adimensionnel ;  $w_s$  : La vitesse de chute des sédiments [m/s]

On la calculer par la formule de Stokes si  $d_{50} < 0.1 \text{ mm}$  :

$$w_s = \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50}^2 / 18\nu \quad (IV-8)$$

### **Le calcul du paramètre $C_e$**

Deux méthodes sont utilisées :

#### 1<sup>er</sup> méthode :

La méthode considère qu'il y a dépôt lorsque la contrainte du fond est inférieure à la contrainte critique de sédimentation.

$$C_e = C \frac{\tau}{\tau_{crs}} \quad (IV-9)$$

avec,  $\tau$  : La contrainte de fond ;

$\tau_{crs}$  : La contrainte critique de sédimentation donnée par la relation :

$$\tau_{crs} = \frac{(\rho_s - \rho) g h w_s C}{T_k \sqrt{u^2 + v^2}} \quad (IV-10)$$

où  $T_k$  : Constante adimensionnelle égale à 0.0016.

#### 2<sup>ème</sup> méthode :

La seconde méthode considère que le dépôt aura lieu lorsque  $C > C_e$

Avec  $C_e$  est calculé par la méthode inspirée de [Leo C. van. Rijn. 1984].

*i-Calcul du paramètre de transport T :*

$$T = \frac{(u_{s*})^2 - (u_{*,cr})^2}{(u_{*,cr})^2} \quad (IV-11)$$

$u_{*,cr}$  : La vitesse frottement critique, donnée par la formule :

$$u_{*,cr} = \frac{\tau_{cr}}{\rho} \quad (IV-12)$$

$u_{s*}$  : vitesse de frottement propre aux grains.

$$u_{s*} = \frac{\sqrt{g}}{C'} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (IV-13)$$

$C'$  : Coefficient de Chézy relatif aux grains

$$C' = 18 \log \left( \frac{12h}{3d_{90}} \right) \quad (IV-14)$$

*ii-calcul de la concentration au fond  $C_a$ :*

La référence sera prise à la cote  $a$ , avec  $a = k_s$

Avec  $a_{min} = 0.1h$

$k_s$  : la rugosité du fond, égale à  $d_{90}$

$$C_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T^{1.5}}{d_*^{0.3}} \quad (IV-15)$$

avec,  $d_*$  diamètre adimensionnel calculé à partir de  $d_{50}$  et est donné par :

$$d_* = d_{50} \left[ \frac{(\rho_s - 1)g}{\rho v^2} \right]^{1/3} \quad (IV-16)$$

*iii-calcul du paramètre  $\eta$  :*

$\eta$  est le rapport des forces gravitationnelles descendantes et des forces de turbulence ascendantes.

$$\eta = \frac{w_s}{\beta \kappa u_{s*}} \quad (IV-17)$$

$\beta$  : Coefficient relatif à la diffusion des particules donné par :

$$\beta = 1 + 2 \left[ \frac{w_s}{u_{s*}} \right] \quad (IV-18)$$

$\kappa$  : Constante de Von Karman ;

On définit  $\varphi$ , tel que :

$$\varphi = 2.5 \left[ \frac{w_s}{u_{s*}} \right]^{0.8} \left[ \frac{C_a}{C_0} \right]^{0.4} \quad (\text{IV-19})$$

On définit aussi :

$$\eta' = \eta + \varphi \quad (\text{IV-20})$$

et

$$F = \frac{\left[ \frac{a}{h} \right]^{Z'} - \left[ \frac{a}{h} \right]^{1.2}}{\left[ 1 - \frac{a}{h} \right]^{Z'} [1.2 - \eta']} \quad (\text{IV-21})$$

Enfin, on a la concentration à l'équilibre, égale à :

$$C_e = F \cdot C_a \quad (\text{IV-22})$$

### Le paramètre $\alpha$ :

Les tests menés ont pu montrer que  $\alpha$ , agit de deux façons :

- il influence sur la quantité des sédiments déposés
- il influence sur la répartition du dépôt ; si  $\alpha$  augmente le dépôt est déplacé vers l'amont de l'écoulement.

### 2.3. Transport par charriage

Pour tenir compte du transport par charriage, les formules donnant E et S seront modifiées :

On a :

$$E - S = \frac{q_s^* - q_s}{L_{\text{char}}} \quad (\text{IV-23})$$

avec,

$q_s^*$  : La capacité maximale de transport

$q_s$  : Débit solide

$L_{\text{char}}$  : La distance de chargement [m].

$q_s^*$  peut être calculée par la formule de (Meyer-Peter & Muller, 1948)

$$q_s^* = 8\sqrt{sgd_{50}^3} (\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \text{ si } \tau^* > \tau_c^* ; \text{ sinon } q_s^* = 0 \quad (\text{IV-24})$$

Soit par une formule progressive, par exemple la formule de (Camenen et Larson 2005).

$$q_s^* = 12\sqrt{s \cdot g \cdot d_{50}^3} \tau^{*3/2} e^{(-4.5 \frac{\tau_c^*}{\tau})} \quad (\text{IV-25})$$

L'équation (IV-23) se traduit par la formule de Meyer Peter et Muller par :

$$E = \beta(\tau_{\text{eff}} - \tau_{\text{cr}})^{3/2} \quad (\text{IV-26})$$

et

$$S = h C u_{\text{ch}} / L_{\text{char}} \quad (\text{IV-27})$$

avec,

$$\beta = \frac{8M}{g(\rho_s - \rho)\sqrt{\rho}L_{\text{char}}} \quad (\text{IV-28})$$

M : coefficient multiplicateur de la capacité maximale de base (donné par l'utilisateur)

$\tau_{\text{eff}}$  : est calculée à partir de  $\tau$  la contrainte totale au fond,  $\tau_{\text{eff}} = \tau \left[ \frac{C_{\text{st}}}{21/D^{1/6}} \right]^{3/2}$

$C_{\text{st}}$  : Coefficient de Strickler total

$u_{\text{ch}}$  : vitesse des sédiments charriés. Elle est donnée par :  $u_{\text{ch}} = \xi \sqrt{u^2 + v^2}$  (IV-29)

où :  $u_{\text{ch}} = 10\xi u_* (1 - 0.7 \sqrt{\frac{\tau_c}{\tau}})$  si  $\tau > 0.5\tau_c$ , (IV-30)

sinon  $u_{\text{ch}} = 0$  (formule de Engelund et Fredose. 1976)

avec,  $u_*$  : la vitesse de frottement calculée classiquement à partir de  $\tau$  et  $\xi$  : Coefficient donné par l'utilisateur constant dans le temps et dans l'espace.

Dans le cas du charriage, la direction des sédiments est différente de celle de l'eau, à cause :

- des courants secondaires
- de l'effet de la pente du fond.

Soit  $\varphi$  étant l'angle de déviation entre la direction de l'eau et celle des particules.

La vitesse charriée en fonction de l'angle de déviation, est donnée par la formule suivante :

$$u_{\text{ch},x} = \frac{u - v \cdot \text{tg}(\varphi)}{\sqrt{(u^2 + v^2)(1 + \text{tg}^2(\varphi))}} \quad (\text{IV-31})$$

$$u_{\text{ch},y} = \frac{u \cdot \text{tg}(\varphi) + v}{\sqrt{(u^2 + v^2)(1 + \text{tg}^2(\varphi))}} \quad (\text{IV-32})$$

Calcul de  $\varphi$  :

$$\text{tg}(\varphi) = -A \frac{h}{R} - \frac{1}{f(\tau)} \frac{\partial Z}{\partial n} \quad (\text{IV} - 33)$$

avec,  $A = 7$  (Englelun 1974) ;  $h$  : La hauteur d'eau ;  $R$  : Le rayon de courbure des lignes de courant ;  $n$  : Le normal à la direction du courant ;  $f$  : Fonction définie par (Talmon et al, 1995) comme  $B\sqrt{\tau}$  ; où,  $B = 9 \cdot \frac{d_{50}}{h}$  selon Talmon et col 1995, mais elle n'est pas utilisée dans le modèle ( $B$  est considéré comme étant une constante allant de 0,85 à 7,00).

## 2.4. Méthode de résolution



La méthode de résolution de l'équation est la même que pour l'hydrodynamique, et elle se fait couplée, dont le pas de temps est identique à celui de l'hydrodynamique.

Le modèle prend en compte dans la partie hydrodynamique la modification du lit au calcul, cette option est primordiale lorsque le taux d'érosion ou de sédimentation est important.

Le modèle tient compte des fonds durs (inérodables), fourni dans un fichier DUR, de même format que le fichier COF obtenu par le sous-programme VF2M, ou la partie correspondant à un seul temps d'un fichier ZEN obtenu par le programme du calcul.

Dans le cas d'erreur où les cotes dans DUR se trouvent plus hautes que les cotes dans COF, elles sont mises égales à ces dernière cotes, comme il est recommandé de choisir l'option de calcul d'érosion ou dépôt directement aux nœuds.

### 3. DESCRIPTION DU CODE DE CALCUL RUBAR 20TS

Comme nous avons vu précédemment, tous les programmes qui constituent le code Rubar20TS sont écrits en FORTRAN ; la saisie des données, ainsi que la visualisation des résultats et des données s'effectuent à partir de deux logiciels (un pré-processeur et un post processeurs), qui seront:

- Mocha, ou fudaa-modeleur (pré-processeur)
- Fudaa-Prepro (post-processeur)

Pour lancer une simulation avec RUBAR 20, on passe par trois étapes, qui sont la saisie des données, le lancement du calcul, et en fin l'extraction des résultats.

#### 3.1. Construction du maillage

La construction du maillage de calcul peut se faire soit, directement à partir du programme MAIL20, ou à partir d'une chaîne de programmes qui ont comme point de départ le logiciel Fudaa.modeleur, qui permet de construire le fichier (\*.ST)

##### 3.1.1. Construction du fichier (\*.ST)

Dans cette étape, on doit définir les caractéristiques topographiques du domaine du calcul. Pour cela, on doit définir les sections en travers et les lignes directrices.

#### Sections en travers :

On définit les sections en travers de lit mineur levées d'une manière précise et on utilise un modèle numérique de terrain plus générique pour le lit majeur.

En premier lieu on doit introduire pour chaque structure linéaire une représentation par une série de sections en travers, en général un trapèze (voir un triangle) est suffisant pour représenter le profil en travers d'une structure de faible ampleur (dimension horizontale inférieure à la taille moyenne).

Les points caractéristiques de chaque section doivent être définis par ses coordonnées (x,y), comme on peut rajouter la cote du fond.

Si deux points représentent la même structure, ils doivent avoir des noms identiques (en 3 caractères alphanumériques).

### Lignes directrices :

En reliant les points de même nom, on formera ce qu'on appelle les lignes directrices, qui sont approximativement perpendiculaires aux sections.

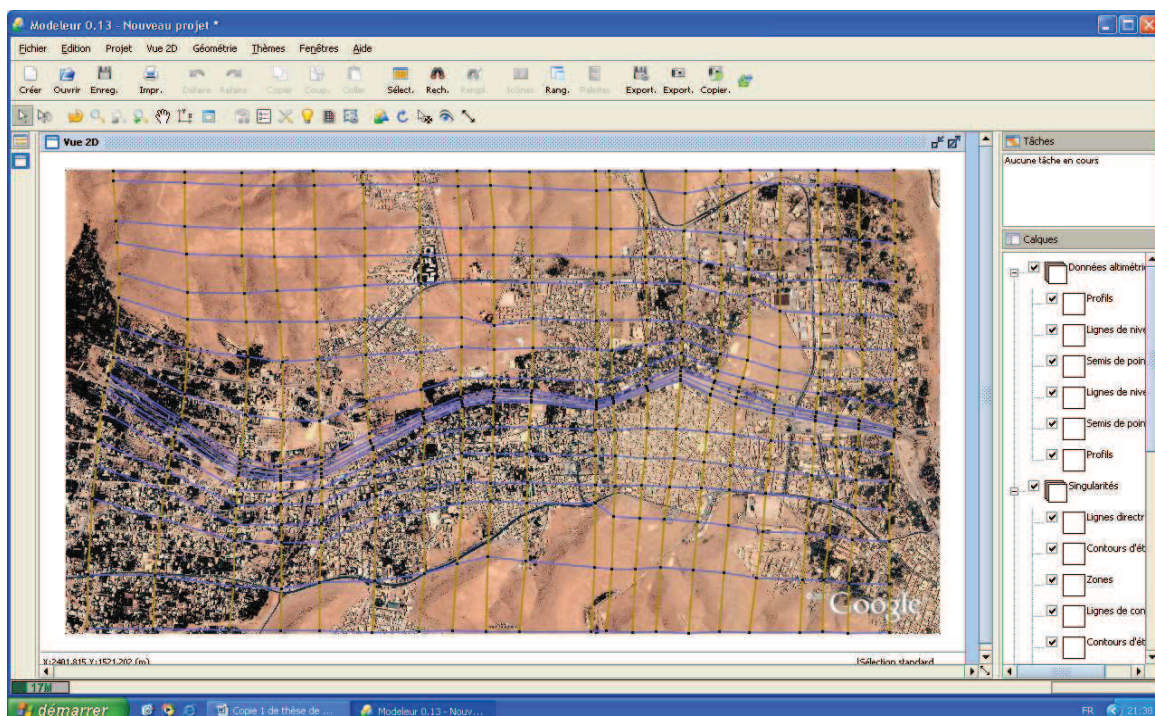
Ces lignes directrices suivent les traits dominant de la topographie et des structures anthropiques.

Si la structure linéaire est perpendiculaire au cours d'eau, tous les points définissant une même caractéristique seront mis dans une section.

Après définition des sections en travers et des lignes directrices, on arrive à une couverture du domaine d'étude par ces séries.

### Remarques :

- Dans une section toutes les lignes directrices doivent être représentées par un point, et ces points doivent être dans le même ordre dans chaque section.
- Deux points dans une section, ou dans deux sections différentes peuvent avoir les mêmes coordonnées x, y et z, mais il est déconseillé d'utiliser des points de même coordonnées x, y et de z différente, car pour la projection en plan ces points seront confondus.
- Un fichier (\*.st) doit avoir au-moins deux sections en travers et deux lignes directrices.



**Figure IV.1:** Construction des sections en travers et des lignes directrices par le Fudaa.modeleur

### 3.1.2. Construction du fichier (\*.M)

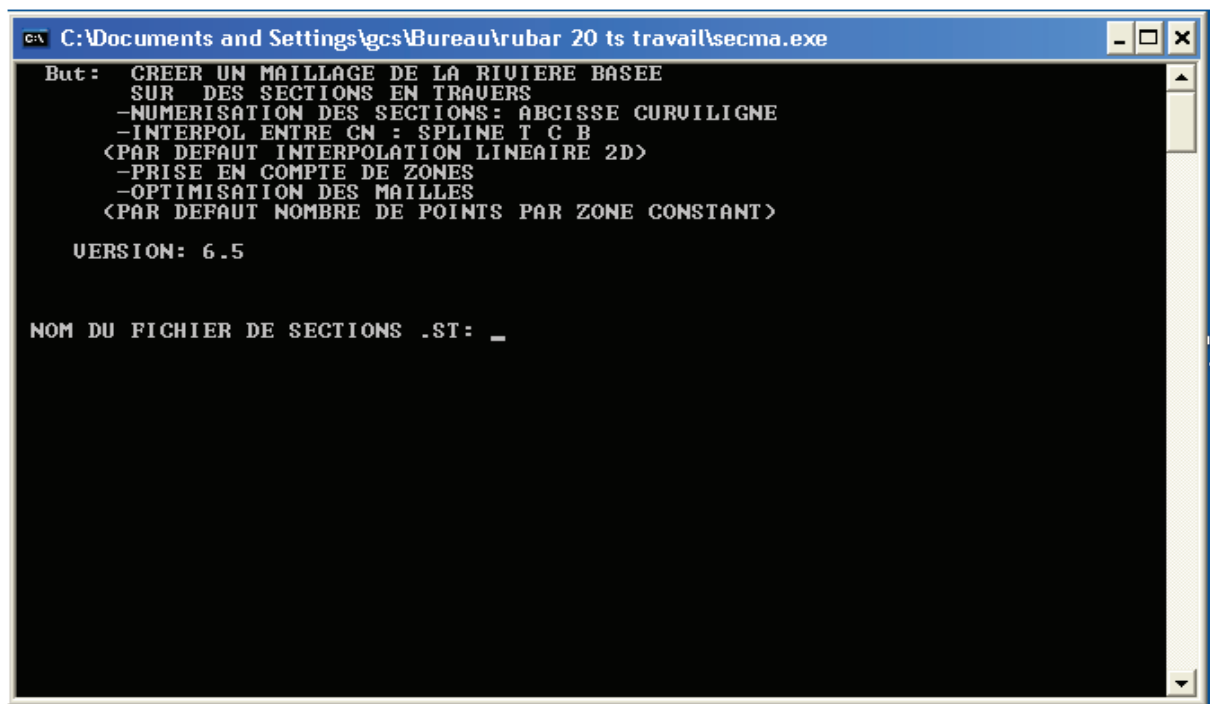
A fin d'obtenir le maillage de calcul, il suffit d'interpoler au pas d'espace nécessaire en utilisant le programme SECMA ; ce maillage est stocké dans un fichier (\*.m) appelé fichier de maillage.

Le traitement se fait par zones (une zone, est le domaine compris entre deux lignes directrices).

L'interpolation transversale se fait soit avec un pas d'espace, soit avec par un nombre de mailles, puis on passe l'interpolation longitudinale avec un pas d'espace donné par l'utilisateur.

*Remarques :*

- Le programme SECMA offre la possibilité de définir et d'éliminer les petites mailles, ces petites mailles qui accroissent fortement le temps de calcul.
- Dans l'interpolation transversale, soit le pas d'espace est constant, soit le nombre de points par zone est constant ; c'est l'option d'optimisation qu'offre le programme.



```
C:\Documents and Settings\gcs\Bureau\rubar 20 ts travail\secma.exe
But :  CREER UN MAILLAGE DE LA RIVIERE BASEE
      SUR DES SECTIONS EN TRAUERS
      -NUMERISATION DES SECTIONS: ABCISSE CURVILIGNE
      -INTERPOL ENTRE CN : SPLINE T C B
      <PAR DEFAUT INTERPOLATION LINEAIRE 2D>
      -PRISE EN COMPTE DE ZONES
      -OPTIMISATION DES MAILLES
      <PAR DEFAUT NOMBRE DE POINTS PAR ZONE CONSTANT>

      VERSION: 6.5

      NOM DU FICHIER DE SECTIONS .ST: _
```

*Figure IV.2 :* Sous-programme Secma

### 3.1.3. Construction du fichier (\*.IMA)

L'exécution du programme Mcoxima, va générer le fichier de maille (\*.IMA), qui contient les coordonnées des sommets des quadrilatères de base du maillage, et le nombre de mailles par quadrilatère.

De plus, le programme crée les fichiers suivant :

**Le fichier (\*.COX) :** Qui contient les cotes du fond sur une grille régulière orienté Nord-sud et ouest-est ou sur des parallélogrammes

**Le fichier (\*.FRX) :** Qui contient les frottements au fond en certain points définis par leurs coordonnées

Le programme permet aussi d'éliminer les petites mailles. Comme il affiche :

- Le nombre des sections en travers
- Le nombre des lignes directrices
- Le nombre de mailles

#### 3.1.4. Construction du fichier (\*.MAI)

Le programme MAIL20 offre la possibilité :

- De lire le fichier (\*.IMA) précédent.
- De modifier le maillage (en rajoutant ou en supprimant des éléments).
- De Créer le fichier (\*.MAI).

**Le fichier (\*.MAI) :** Contient les données de maillage (numérotation des mailles, des nœuds, et des coordonnées)

### **Eventuelles erreurs d'un maillage**

Les erreurs les plus fréquentes pour un maillage, sont :

- deux quadrilatères ayant un coté commun, mais n'ont pas le même nombre de nœuds sur ce coté ;
- un coté commun à deux quadrilatères, se trouve deux fois avec des coordonnées légèrement différents ;
- les mailles sont définies pour certains en sens trigonométrique et pour les autres en sens inverse.

Le programme MAIL20 génère un fichier texte dénommé (TOTO2.TXT), contient des messages d'erreurs et d'avertissements.

### **3.2. Définitions des données de calcul**

La définition des principaux paramètres se fait à partir du logiciel VF2M (VFALUV pour la partie transport solide), ou à partir du logiciel Fudaa-Prepro.

#### *Remarque*

Le passage par le programme VF2M est indispensable pour utiliser le Fudaa-Prepro et ceci juste pour générer un fichier (\*.DAT) nécessaire au démarrage du FUDAA.PREPRO.

L'utilisation de Fudaa-Prepro pour saisir ces données est recommandé, car il est plus souple et plus maniable que le VF2M, de plus il permet de visualiser les données en temps réel.

**Le fichier (\*.DAT) :** contient l'ensemble des données par mailles, y compris les cotes du fond et les arêtes limites.

#### 3.2.1. Utilisation du programme VF2M

Comme on a dit précédemment ce programme permet de saisir les données, mais dans notre cas d'étude on va utiliser le Fudaa-Prepro pour des raisons on a déjà cités, donc le passage par

le VF2M est juste pour créer le fichier (\*.DAT), qui contient des valeurs par défauts, ce fichier est nécessaire au démarrage du Fudaa-Prepro.

Pour cela on choisit la génération des structure des données, ce qui permet de lire le fichier (\*.COX) existant et de générer un fichier (\*.COF).

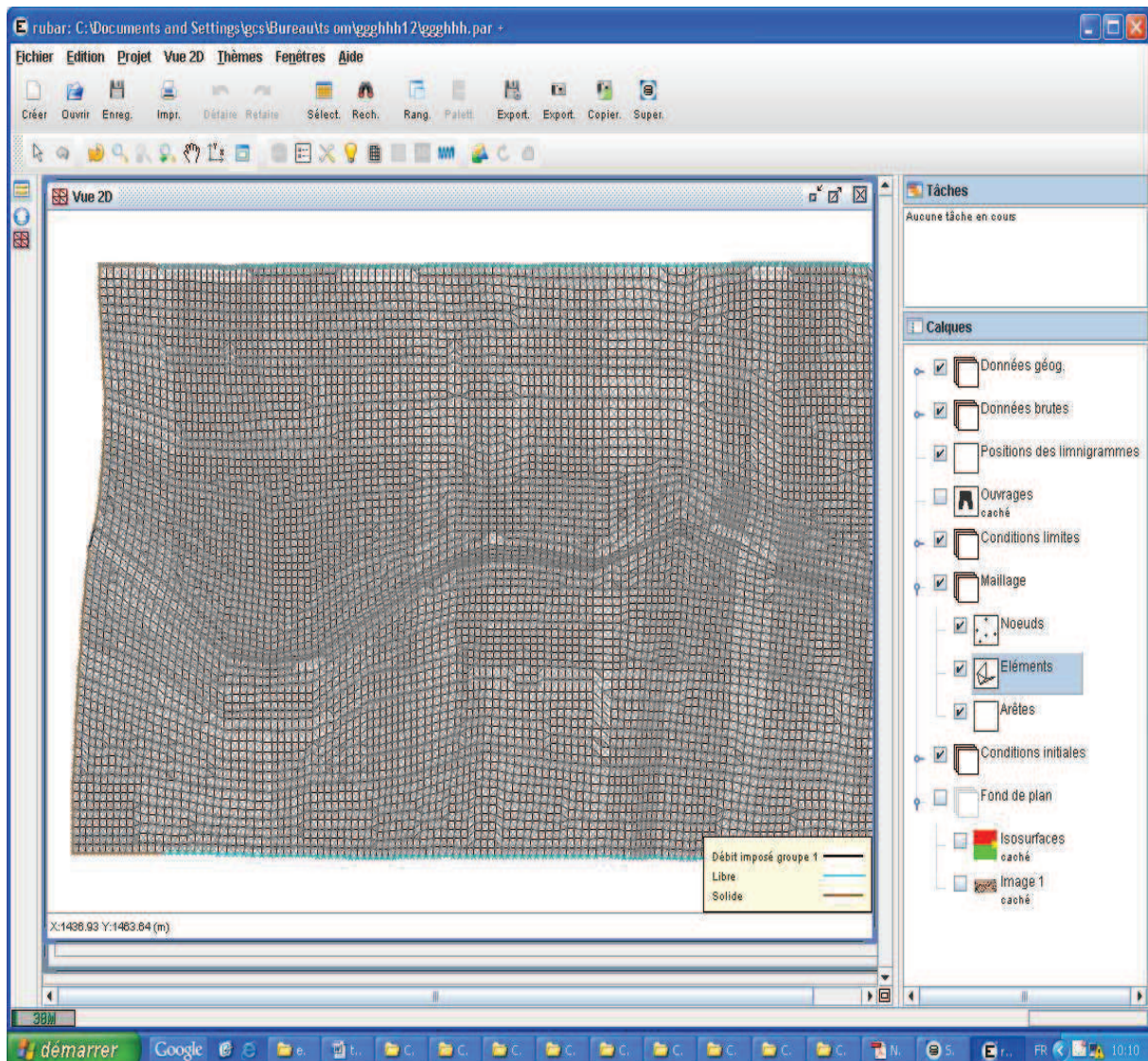
Le programme permet aussi d'éliminer les petites mailles, et même de modifier les cotes du fond.

A noter que le VF2M ne permet pas de définir les conditions aux limites.

**Le fichier (\*.COF) :** contient les cotes du fond en chaque nœud du maillage.

### 3.2.2. Utilisation du logiciel Fudaa-Prepro

Le Fudaa-Prepro permet de définir, de saisir et de modifier tous les principaux paramètres de calcul ainsi que les conditions initiales et aux limites, à l'inverse de VF2M qui ne permet pas de définir les conditions aux limites.



**Figure IV.3 :** Définition des paramètres de la simulation via le logiciel Fudaa-Prepro

Les principaux paramètres qu'on doit définir sont les suivants.

### **3.2.2.1. Définitions des données brutes**

#### **Bathymétrie**

A chaque nœud de maillage, on doit définir la côte du fond, les données seront stockées dans un fichier (\*.COF), en outre le FUDAA.PREPRO permet de modifier les cotes déjà définis dans un fichier (\*.COF).

#### **Coefficients de frottement au fond**

Pour les frottements au fond, on utilise soit, le coefficient de Chézy, soit celui de Strickler, soit Darcy Weisback, il est recommandé d'utiliser le coefficient de Chézy pour des faibles hauteurs d'eau.

#### **Diffusion**

La diffusion est supposée identique dans les deux directions, (0 : valeur par défaut).

### **3.2.2.2. Définition des positions des limnigrammes**

Dans le cas où on veut utiliser des limnigrammes, on doit des définir les point (x, y) où on souhaite les installer, les données seront stockés dans un fichier (\*.DTR).

**Le fichier (\*.DTR) :** qui contient les coordonnées des points ou on souhaite les limnigrammes.

### **3.2.2.3. Définition des ouvrages et leurs caractéristiques**

Les ouvrages sont simulés comme étant un moyen de transfère de débit d'une maille à une autre, l'ouvrage est définit dans le code par les éléments suivants, qu'on doit les définir pour chaque ouvrage installé, ces données sont stockées dans un fichier (\*.OUV), qui est lu que si le paramètre IOSMB du fichier (\*.PAR) est égale à 1, ou 3, ou 11, ou 13, ou 21, ou 23 :

**L'arête 1 :** c'est l'arête amont de l'ouvrage.

**La maille 1 :** c'est la maille amont ou sera prélever le débit

**Les mailles internes :** qui constituent le corps interne de l'ouvrage.

**L'arête 2 :** c'est arête avale de l'ouvrage.

**La maille 2 :** c'est la maille avale de l'ouvrage, ou sera injecté le débit.

**Le mode de calcul :** le code propose deux modes de calcul, premier mode consiste à ajouter le débit de l'ouvrage à celui des équations de Saint-Venant qui représente le flux interne de l'ouvrage, le second mode consiste à faire passer uniquement le débit de l'ouvrage.

**Le type de l'ouvrage :** le code permet de choisir plusieurs types d'ouvrages, tel que : déversoir, brèche, apport de débit ponctuel, transfert de débit...etc. Pour chaque type d'ouvrage on doit définir les éléments spécifiques à l'ouvrage, pour un déversoir par exemple on doit définir la longueur de déversement, la côte de seuil, la côte de mise en charge, et le coefficient de débit, et ainsi de suite pour les autres ouvrages.

*Remarque*

On peut représenter un mur par ouvrage, pour cela il suffit de choisir un déversoir avec une longueur de déversement égale à zéro, avec un mode de calcul qui ne tient pas en compte le débit relatif aux équations de Saint-Venant.

**3.2.2.4. Définition des conditions aux limites**

Dans cette étape, on doit définir le type des arêtes entrantes et sortantes, ainsi que les courbes temporelles pour les débits d'eau et les flux pour les sédiments à noter qu'on donne la concentration pour le flux entrant,

Et pour flux sortant des sédiments, ce sont les calculs à l'intérieur du domaine qui fixe la concentration

Si la concentration entrante est négative, c'est la concentration interne qui est utilisée même si le flux est entrant.

**Différents types des arêtes externes**

Un maillage contient des arêtes internes, et d'autres externes, en premier temps on doit définir pour l'ensemble des arêtes externes leurs type associé, à noter que pour chaque arête le code lui donne une référence, pour les arêtes interne le référence est de zéro par défaut, et pour les arêtes externes chaque type correspond à un référence, ces différents types sont :

- i. Le mur imperméable : définit par la référence 2, et qui correspond au cas de réflexion, c'est-à-dire que la vitesse normale à l'arête est nulle.
- ii. Les différentes sortie : on a plusieurs types de sortie à imposer, tels que :
  - sortie libre : de référence égale à 1, dont la vitesse normale à l'arête est dirigé vers l'extérieur, sans aucune donnée particulière est imposée, et c'est la sortir à choisir pour un régime torrentiel. En cas d'un régime torrentiel ou permanent à géométrie régulière cette condition conduise généralement à un écoulement uniforme en sortie.
  - sortie définie par la côte d'eau.
  - sortie définie par une loi de tarage, dans ce cas on doit définit la courbe de tarage par une série des (couples débit unitaire normal sortant, côte d'eau).
  - sortie définie par un régime critique (nombre de Froude égale à un sur les arêtes).
- iii. Les différentes entrées :
 

C'est la même chose que pour les sorties, le code permet de définir plusieurs types d'entrée, qu'on les associé a une ou plusieurs arêtes. Les différents types sont :

  - entrée définie par la cote d'eau, par la côte d'eau, et le débit tangentiel unitaire et débit normal unitaire, ce type est de référence égale à 5.
  - entrée définie par un groupe de débit, le code offre la possibilité de définir neuf groupe de débit, le groupe 1 est de référence 31, et le groupe 2 est de référence 32, et ainsi de suite jusqu'au groupe 9 de référence 39, chaque groupe est défini à partir de l'éditeur des courbes temporelles, qui permet de définir la courbe des côtes en fonction de temps, la courbe de débit global normal  $m^3/s$  en fonction de temps, et la courbe de

débit global tangentiel  $m^3/s$  en fonction de temps, la répartition des débits globaux sur chaque arête étant donnée par le code en fonction des valeurs initiales sur les mailles limites, mais ceci n'est possible que si le régime est fluvial, sinon on a pas d'influence sur les valeurs limites.

*Remarque :*

- La saisie se fait à partir du programme TRARET (TRALUV) ou du logiciel FUDAA.PREPRO, et les données seront stockés dans un fichier (\*.CLI).
- Le passage par le programme TRARET est indispensable, dans le cas ou on a défini les éléments géométriques par le programme VF2M.

### **3.2.2.5. Définition des conditions initiales**

On doit définir les conditions initiales à chaque centre de mailles, qui sont : les débits selon les deux directions, les cotes d'eau, et les concentrations des sédiments. Ces données sont stockées dans un fichier (\*.CIN).

Si les concentrations sont négatives, la concentration d'équilibre est prise en condition initiales.

### **3.2.2.6. Définition des paramètres de calcul**

Les paramètres qu'on va définir sont stocké dans un fichier (\*.PAR). Les paramètres sont :

#### **L'accélération de la pesanteur**

C'est la valeur de l'accélération de la pesanteur qui corresponde la région d'étude (9,81 comme valeur par défaut) ;

#### **Calcul à nombre de courant constant ou non (le paramètre ICFL)**

Cette option permet de conserver le pas de temps pendant le calcul. Pour ne pas conserver le pas du temps il faut choisir l'option du calcul à nombre de courant constant (introduire le pas de temps initial ICFL égal à 1). Si non, le pas sera conserver durant tout le calcul (ICFL = 0).

#### **Conditions aux limites variables dans le temps ou non (paramètre ICLVAR)**

0 : si les conditions aux limites sont fixe dans le temps

1 : si les valeurs aux limites soit fluctuant dans le temps.

#### **Correction de Van Leer (le paramètre ALPHA)**

Représente la valeur de pente pour les schémas de Van Leer, la valeur est comprise entre 0,5 et 1 (0,6 : par défaut).

Plus la valeur est proche de 1, plus on a de la précision mais le schéma sera moins stable.

#### **Définition du type de frottement (le paramètre IOFR)**

Que ce soit pour les frottements du fond ou des parois (le cas des arêtes des ouvrages de référence -2 ou pour les arêtes externe imperméables) on doit définir le type des frottements, donc le paramètre IOFR représente le type des frottements, on a :



- 0: pour Chézy ;
- 1: pour Strickler ;
- 2: pour Darcy Weisbach.

### **Calcul avec ouvrage ou non (le paramètre IOSMB)**

Ce paramètre permet de définir le calcul vis-à-vis aux ouvrages, aux apports de pluies...etc.

IOSMB=3 : si il y a des ouvrages.

IOSMB=0,2 : pas d'ouvrage ;

IOSMB=2,3 : si il y a des apports de pluies.

### **Pas de temps de sauvegarde (le paramètre DTR)**

Ce paramètre représente le pas du temps de sauvegarde des lignes d'eau dans les fichiers (\*.TPS), (\*.ENV), (\*.OUT), le temps est compté depuis le début de chaque simulation, il ne doit pas être trop petit pour éviter des fichiers très importants.

### **La précision sur les hauteurs (le paramètre PARAY)**

Ce paramètre représente la précision sur les hauteurs d'eau, autrement c'est la hauteur minimale au dessous de laquelle, les hauteurs sont considérés comme nulles. ( $10^{-4}$  comme valeur par défaut)

Pour bien représenter les apports d'eau, on doit augmenter la précision sur les hauteurs d'eau, et donc il est recommandé d'utiliser un PARAY inférieur à  $10^{-10}$

### **Reprise de calcul (le paramètre IREP)**

Si on choisit cette option (IREP=1), ceci permet dans le cas de reprise du calcul de préciser un temps et une ligne d'eau dans un fichier (\*.TPS), les fichiers (\*.TPS) et (\*.ENV) précédents sont relus (sont utilisés comme étant des fichiers de conditions initiales) et puis seront compléter pendant le calcul.

Dans le cas du calcul sans reprise (IREP=0), le RUBAR20TS utilise directement le fichier (\*.CIN) comme fichier des conditions initiales.

### **Schéma de calcul (paramètre ISCHEM)**

(2 : Valeur par défaut) Ce paramètre permet de définir le type de schéma numérique, il vaut :

- 1 : pour schéma de Van Leer d'ordre 1 en temps
- 2 : pour schéma de Van Leer d'ordre 1 en temps et en espace (cette schéma est plus précise).

### **Paramètre CFL**

Ce paramètre correspond à la valeur de nombre de courant à ne pas dépasser (condition de courant de Friedrichs Lévy pour les schémas explicites), cette valeur ne doit passer un, (0.5 : valeur par défaut).

### **Vitesses du vent (Le paramètre FVIX, et VFIY)**

Ce paramètre représente la vitesse du vent dans les deux directions, en [m/s], et si un fichier (\*.VEN) existe le programme utilise automatiquement les valeurs contenues dans ce fichiers, sinon il utilise le FVIX, et VFIY.

### **Paramètres relatifs à l'édition des fichiers**

Ce qui permet de générer les fichiers suivants :

Le fichier (\*.TRC) : qui contient les lignes d'eau à pas du temps fixe en certaines mailles.

Le fichier (\*.EDM) : édition du maillage, en fonction du paramètre EDM les données seront éditer sur les mailles, ou les arêtes ...etc.

Les valeurs d'EDM sont :

EDM=1: sortie des données sur les arêtes, les nœuds, et les mailles.

EDM=2: sortie des données sur les mailles

EDM=3: sortie des données sur les arêtes

EDM=4 : sortie des données sur nœuds

EDM=5 : sortie des données sur les mailles et les arêtes

EDM=6 : sortie des données sur les mailles et les nœuds

EDM=7 : sortie des données sur les arêtes et les nœuds.

Le fichier (\*.ECL) : édition des conditions initiales.

Le fichier (\*.EFR) : édition des frottements au fond.

Le fichier (\*.OUT) : contient les valeurs aux arêtes rentrantes ou sortantes et sur les ouvrages.

Le fichier (\*.ENV) : qui contient les maximas des résultats depuis le de début de calcul.

Le fichier (\*.CVI) : qui contient les constantes de viscosités supposées identiques dans les deux directions (0 : valeur par défaut), si le CVI <0 un fichier DIF est lu

Le fichier (\*.DIF) : contient les coefficients des diffusions spatialisés pour mailles.

Le fichier (\*.FRO) : contient les coefficients des frottements aux parois (0 : valeur par défaut), donc il est utilisé pour les arêtes de référence 2 (mur imperméable) et de référence -2 (pour les ouvrages). Et comme les frottements au fond le type est défini par le paramètre IOFR

### **Paramètres relatifs au transport**

Paramètres NIUX, NIUY :

Constantes de viscosité (ou diffusion) pour le liquide selon l'axe des x et des y, (0 par défaut) ces constantes devraient égales à CVI.

Elles sont utilisées seulement pour le calcul des concentrations.

Si elles sont négatives ou nulles, le code prend automatiquement la valeur donnée pour le liquide comme valeur sur chaque direction.

Si la valeur NIUX est négative, la vitesse de chute des particules sera égale à NIUX, au lieu de la calculer à partir du diamètre de la particule.

Les lignes où se trouve NIUX peuvent être complétées par :

- Le coefficient multiplicateur ( $\xi$ ), utilisé pour le calcul des sédiments charriés (1 : valeur par défaut).
- La valeur de l'exposant ( $m$ ) de dépendance de la contrainte critique à pente

Dans le cas des options 13, 14 et 16 du tableau 4.1, la ligne où se trouve NIUY peut être complétée par les constantes  $A$  et  $B$ , de la déviation du charriage, si ces valeurs ne sont pas données par l'utilisateur, elles prennent les valeurs 7 et 0.85 respectivement.

#### Paramètre SIGM

Représente le nombre de Schmidt, c'est coefficient multiplicateur des paramètres précédents pour passer à la diffusion des contraintes, est inférieur à un généralement.

#### Paramètre DENS

Masse volumique ou densité des sédiments (2.65 : valeur par défaut).

- On utilise la masse volumique dans le cas où la concentration des sédiments est exprimée en ( $\text{Kg/m}^3$ ) ou ( $\text{g/l}$ ).
- On utilise la densité, dans le cas où la concentration est adimensionnelle.

Si la valeur de DENS est égale à la valeur de DEN, ceci signifie qu'il s'agit de solutés et non de sédiments.

#### Paramètre DEN

C'est la masse volumique ou la densité de l'eau (1 : comme valeur par défaut).

De la même façon que pour le paramètre DENS, on utilise soit la masse volumique ou la densité en fonction de l'unité de la concentration.

#### Paramètre M

C'est un coefficient d'érosion ou multiplicateur de la capacité solide adimensionnelle pour les options de traitement de charriage (11 à 16 dans le tableau 4.1, avec  $b$  un coefficient adimensionnel pour le calcul de la vitesse de surface),

$M$  est exprimé en [ $\text{m/s}$ ], (0.000003 : comme valeur par défaut dans le programme)

#### Paramètre IKDS

Option de calcul (voir le tableau IV.1)

#### Paramètre DIAM

C'est la valeur du diamètre  $d_{50}$  des sédiments exprimée en mètre ( $a$  : coefficient pour le calcul des vitesses de surface).

Paramètre ALPHA

Coefficient de vitesse de dépôt [adimensionnel], (0.1 : valeur par défaut) et la distance de chargement est en mètre.

Porosité des sédiments

C'est la part de vide dans un volume unitaire du fond, (0.4 : comme valeur par défaut).

Paramètre KDS

Selon les options de calcul :

- Soit  $d_{90}$  [m]
- Soit la contrainte critique adimensionnelle  $\tau^*_{cr}$  (0.047 : valeur par défaut) ;
- Soit la variable n'est pas utilisée.

**Tableau IV.1** : Options de calcul utilisés par le RUBAR20TS pour le calcul du terme érosion/dépôt (*Cemagref*, 2009).

<p><b>Option 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• taux de sédimentation calculé par <math>S = \alpha w_s C (1 - \tau / \tau_{crs})</math></li> <li>• taux d'érosion calculé par <math>E = M (\tau / \tau_{crs} - 1)</math></li> <li>• <math>\tau_{cr} = \tau_{crs}</math></li> <li>• la contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur.</li> </ul>	<p><b>Option 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• taux de sédimentation calculé par <math>S = \alpha w_s C (1 - \tau / \tau_{crs})</math></li> <li>• taux d'érosion calculé par <math>E = M (\tau / \tau_{crs} - 1)</math></li> <li>• <math>\tau_{cr} = \tau_{crs}</math></li> <li>• la contrainte critique <math>\tau_{cr}</math> calculée à partir de <math>d_{50}</math> par le diagramme de Shields.</li> </ul>
<p><b>Option 3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• taux de sédimentation calculé par <math>S = \alpha w_s C (1 - \tau / \tau_{crs})</math></li> <li>• taux d'érosion calculé par <math>E = M (\tau / \tau_{crs} - 1)</math></li> <li>• <math>\tau_{crs}</math> calculé spécifiquement</li> <li>• la contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur.</li> </ul>	<p><b>Option 4</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• taux de sédimentation calculé par <math>S = \alpha w_s C (1 - \tau / \tau_{crs})</math></li> <li>• taux d'érosion calculé par <math>E = M (\tau / \tau_{crs} - 1)</math></li> <li>• <math>\tau_{crs}</math> calculé spécifiquement</li> <li>• la contrainte critique <math>\tau_{cr}</math> calculée à partir de <math>d_{50}</math> par le diagramme de Shields.</li> </ul>
<p><b>Option 5</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terme E ou S calculé par <math>S = \alpha w_s (C - C_{eq})</math></li> <li>• <math>C_{eq}</math> calculé par la méthode de Van Rijn</li> <li>• Contrainte critique calculé automatiquement</li> <li>• Sans correction de la vitesse de chute</li> </ul>	<p><b>Option 6</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terme E ou S calculé par <math>S = \alpha w_s (C - C_{eq})</math></li> <li>• <math>C_{eq}</math> calculé par <math>C_{eq} = C \cdot \tau / \tau_{cr}</math></li> <li>• Contrainte critique <math>\tau_{cr}</math> calculée à partir du <math>d_{50}</math> par le diagramme de Shields</li> <li>• Sans correction de la vitesse de chute</li> </ul>

<p><b>Option 7</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terme E ou S calculé par <math>S=\alpha w_s(C-C_{eq})</math></li> <li>• <math>C_{eq}</math> calculé par la méthode de Van Rijn</li> <li>• Contrainte critique calculé automatiquement</li> <li>• Avec correction de la vitesse de chute</li> </ul>	<p><b>Option 8</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terme E ou S calculé par <math>S=\alpha w_s(C-C_{eq})</math></li> <li>• <math>C_{eq}</math> calculé par <math>C_{eq}=C.\tau/\tau_{cr}</math></li> <li>• Contrainte critique <math>\tau_{cr}</math> calculée à partir du <math>d_{50}</math> par le diagramme de Shields</li> <li>• avec correction de la vitesse de chute</li> </ul>
<p><b>Option 9</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terme E ou S calculé par <math>S=\alpha w_s(C-C_{eq})</math></li> <li>• <math>C_{eq}</math> calculé par <math>C_{eq}=C.\tau/\tau_{cr}</math></li> <li>• Contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur</li> <li>• Sans correction de la vitesse de chute</li> </ul>	<p><b>Option 10</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terme E ou S calculé par <math>S=\alpha w_s(C-C_{eq})</math></li> <li>• <math>C_{eq}</math> calculé par <math>C_{eq}=C.\tau/\tau_{cr}</math></li> <li>• Contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur</li> <li>• avec correction de la vitesse de chute.</li> </ul>
<p><b>Option 11</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de sédimentation calculé par <math>S=hC u_{ch}/L_{char}</math></li> <li>• Taux d'érosion calculé par <math>E=\beta(\tau_{eff}-\tau_{cr})^{3/2}</math></li> <li>• <math>u_{ch}</math> vitesse des sédiments charriés, <math>\beta</math> calculé spécifiquement</li> <li>• <math>\tau_{cr}^*</math> contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur</li> </ul>	<p><b>Option 12</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de sédimentation calculé par <math>S=hC u/L_{char}</math></li> <li>• Taux d'érosion calculé par <math>E=\beta(\tau_{eff}-\tau_{cr})^{3/2}</math></li> <li>• <math>u</math> vitesse de l'écoulement, <math>\beta</math> calculé spécifiquement comme pour l'option 11</li> <li>• <math>\tau_{cr}^*</math> contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur</li> </ul>
<p><b>Option 13</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de sédimentation calculé par <math>S=hC u_{ch}/L_{char}</math></li> <li>• Taux d'érosion calculé par <math>E=\beta(\tau_{eff}-\tau_{cr})^{3/2}</math></li> <li>• <math>u_{ch}</math> vitesse des sédiments charriés, <math>\beta</math> calculé spécifiquement, déviation du charriage</li> <li>• <math>\tau_{cr}^*</math> contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur</li> </ul>	<p><b>Option 14</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de sédimentation calculé par <math>S=hC u/L_{char}</math></li> <li>• Taux d'érosion calculé par <math>E=\beta(\tau_{eff}-\tau_{cr})^{3/2}</math></li> <li>• <math>u</math> vitesse de l'écoulement, <math>\beta</math> calculé spécifiquement comme pour l'option 11, déviation du charriage</li> <li>• <math>\tau_{cr}^*</math> contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur</li> </ul>
<p><b>Option 15</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de sédimentation calculé par <math>S=hC u_{ch}/L_{char}</math></li> <li>• Taux d'érosion calculé par <math>E=\beta\tau^{3/2}\exp(-4.5\tau/\tau)</math></li> <li>• <math>u_{ch}</math> vitesse des sédiments charriés, <math>\beta</math> calculé spécifiquement</li> <li>• <math>\tau_{cr}^*</math> contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur</li> </ul>	<p><b>Option 16</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux de sédimentation calculé par <math>S=hC u_{ch}/L_{char}</math></li> <li>• Taux d'érosion calculé par <math>E=\beta\tau^{3/2}\exp(-4.5\tau/\tau)</math></li> <li>• <math>u_{ch}</math> vitesse des sédiments charriés, <math>\beta</math> calculé spécifiquement, déviation du charriage</li> <li>• <math>\tau_{cr}^*</math> contrainte critique adimensionnelle donnée par l'utilisateur</li> </ul>

### 3.3. Calcul via Rubar20TS.exe

L'enchaînement des programmes précédents génère les fichiers nécessaires au calcul, il suffit donc d'exécuter le programme RUBAR 20 TS ; on lui donne le nom du fichier d'étude correspondant.

On peut lancer le calcul soit directement en exécutant le programme RUBAR20 TS, et on leur introduit le nom de fichier d'étude.

Soit à partir du logiciel Fudaa-Prepro qui permet de lancer le calcul (le calcul se fait par le programme Rubar20TS, le Fudaa-Prepro est juste un support pour exécuter le programme du calcul).

Le programme lance le calcul qui permet de déterminer l'évolution de la ligne d'eau et les concentrations des sédiments, à partir de la résolution des équations de Saint-Venant et l'équation de convection-diffusion selon un schéma explicite en volume finis, la méthode de résolution implique un pas du temps très faible, ce qui rend l'emploi du code à des phénomènes hydraulique rapidement transitoire recommandé.

Le raffinement de maillage locale pour décrire des singularités géométriques est déconseillé, car il y a immédiatement réduction du temps.

Les résultats de calcul sont stockés dans des fichiers résultats, à savoir :

**Fichier (\*.ENV) :** contient les maxima des résultats depuis le début du calcul.

**Fichier (\*.TPS) :** contient la ligne d'eau à pas de temps fixe.

**Le fichier (\*.TRC) :** contient les lignes à pas de temps fixe en certaines mailles

**Fichier (\*.OUT) :** contient les valeurs aux arêtes rentrantes et sortantes et sur les ouvrages.

**Fichier (\*.MAS) :** contient les valeurs aux arêtes rentrantes ou sortantes et sur les ouvrages pour le transport.

**Fichier (\*.TPC) :** contient les valeurs pour transport à pas de temps fixe.

**Fichier (\*.HYC) :** contient les valeurs pour transport à pas de temps fixe pour certaines mailles

**Fichier (\*.ZEN) :** contient les côtes du fond en chaque nœud d'un maillage en différents temps en cas de transport solide.

#### *Remarque*

Pendant le calcul, les hauteurs sont considérées comme nulles si elles sont inférieures au PARAY donné par l'utilisateur, pour les autres variables sont considérées comme nulles pour des valeurs inférieures à  $10^{-10}$ , sauf les vitesses qui sont considérées nulles pour des valeurs inférieures à 0.001 m/s car la méthode de Newton utilisée pour trouver les valeurs limites se converge pour des précisions de  $10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s sur les débits (50 itérations autorisées).

### **3.4. Exploitation des résultats**

#### **3.4.1. Extraction des résultats**

On peut utiliser plusieurs programmes pour représenter les différents résultats du calcul, parmi ces programmes, on a :

#### **Programme TRXYH**

Ce programme transforme le fichier enveloppe (\*.ENV) et le fichier de ligne d'eau (\*.TPS), en un fichier (\*.XYH) qui contient pour chaque maille les coordonnées du centre, la hauteur d'eau et la cote du fond.

Une version spécifique de TRXYH permet de sortir les résultats en concentration du fichier (\*.TPC).

### **Programme TRXYHT**

Ce programme transforme le fichier enveloppe (\*.ENV) en fichier (\*.XYHT), où la hauteur d'eau est remplacée par le temps de cette hauteur, et le frottement par le temps ou la vitesse est maximale en module.

### **Programme CALDEB**

Ce programme crée un fichier (\*.HLI) contenant en colonnes  $t$ ,  $h$ ,  $z$ ,  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_n$ , et  $q_t$  à partir d'un fichier (\*.TPS), (\*.TRC), (\*.TPC), (\*.HYC), ou (\*.ZFN), comme il peut définir un débit qui traverse un segment défini par deux points (chacun des deux points sera remplacé par le nœud le plus proche dans le programme).

Le programme crée aussi fichier (\*.PLO) qui contient le profil du niveau d'eau en long parallèlement à une ligne directrice, et un fichier (\*.STR) qui contient le profil du niveau d'eau en travers dans la direction perpendiculaire.

### **Programme CALVMAX**

Ce programme calcul pour un temps donné la vitesse maximale, il peut aussi calculer les vitesses maximales définies par leurs coordonnées contenant dans un fichier (\*.ENV) et (\*.TPS).

#### 3.4.2. Visualisation des résultats

La visualisation des résultats est possible à l'aide d'un post processeur, qui peut être soit FUDAA.PREPRO, soit MOCAHY.

Les fichiers de résultats seront visualisés de différentes manières, sous forme de cartes, de tableaux, de courbes, d'animation...Etc.

## **CONCLUSION**

Le modèle utilise la méthode de volumes finis pour la résolution des équations de Saint-Venant et de convection-diffusion. Il applique la méthode à un maillage défini par l'utilisateur, constitué de quadrilatères ou de triangles, comme il permet de choisir entre deux schémas numériques de calcul, dits schémas de Van Leer.

Parmi les avantages que dispose le modèle, est qu'il se base sur l'approche couplée, où il prend en compte le changement de certains paramètres en fonction du temps, à cause de l'évolution de lit provoquée par l'érosion/dépôt.

Le modèle numérique se base sur la concentration d'équilibre pour le calcul de débit solide pour la suspension, et sur la formule Meyer-Peter et Muller pour le charriage.

Le code de calcul est présenté sous forme de sous-programmes écrits en Fortran, pour cela il sera très maniable d'utiliser des logiciels qui facilitent l'introduction des données, le paramétrage du système et la visualisation des résultats, parmi ces logiciels : on a préprocesseur Fudaa-modeleur et le poste-processeur Fudaa-Prepro.

L'utilisation directe du code Rubar20TS est un peu difficile de fait qu'il soit présenté sous formes de sous-programmes exécutables, d'où pour définir et décrire le problème à traiter cela nécessite le passage par plusieurs étapes, mais avec l'utilisation de certains logiciels comme le Fudaa-Modeleur et le Fudaa-Prepro, la manipulation devient de plus en plus souple et pratique.

La première étape à faire pour commencer la simulation, c'est la construction du maillage de calcul, cette étape est très importante, car un mauvais maillage peut créer des instabilités numériques, comme il peut encombrer le calcul et donc augmenter le temps de calcul. Par la suite on passe à l'interpolation du domaine de calcul à l'aide des trois sous-programmes Secma, Mcoxima et Mail20 qui permettent de définir le maillage final et d'interpoler les différentes valeurs pour chaque nœud ou centre de maillage final.

Le paramétrage du système de calcul, ainsi qu'une éventuelle modification des données de calcul peut se faire à l'aide du poste processeur Fudaa-Prepro, qui permet de définir les différents paramètres numériques et physiques. Après l'exécution de calcul, le code génère des fichiers résultats, la visualisation de ces résultats se fait à partir des utilitaires tels que Mocha ou Fudaa-Prepro qui permettent de visualiser la plupart des résultats, le code fournit donc des graphes, des tableaux et même des animations en 2D ce qui facilite l'interprétation des résultats.



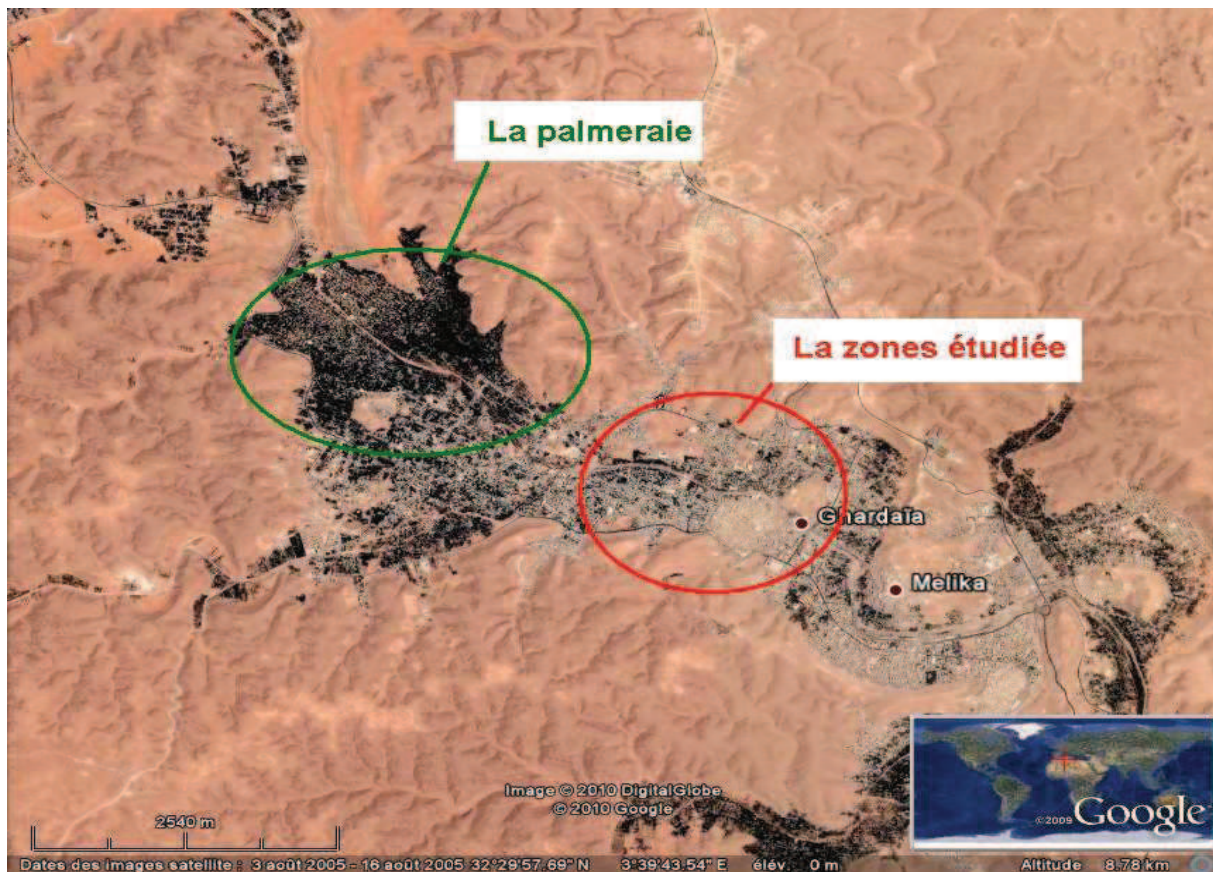
## Chapitre V

### Etude du transport solide dans la ville de Ghardaïa suite à la crue d'octobre 2008

Dans ce chapitre, nous allons déterminer et étudier les différentes caractéristiques du transport solide au niveau de la ville de Ghardaïa suite à la crue d'octobre 2008. Parmi ces caractéristiques, on a le taux d'érosion/dépôt, qui est le paramètre le plus important d'une telle étude du phénomène du transport des sédiments.

Tout d'abord, commençons par la définition du domaine de calcul, ou bien le site d'étude. Il se trouve au niveau de la ville de Ghardaïa, et délimité par un rectangle dont la longueur est de 3,8km et la largeur de 2km (figures V.1, et V.2).

L'oued M'zab traverse la ville du Nord-Ouest au Sud-Est. La largeur de son lit mineur varie entre 15 et 40m. Il divise la ville en deux parties, dont la rive gauche est caractérisée par une forte concentration urbaine.



*Photo V.1 : Délimitation de la zone d'étude (Google Earth, 2010)*



*Photo V.2 : Zone étudiée –photo satellitaire (Google Earth, 2009)*

## 1. OBJECTIF DE LA SIMULATION

L'objectif de la simulation est de reproduire l'inondation du mois d'Octobre 2008, et d'étudier l'évolution hydrosédimentaire pendant la crue. En effet, du point de vue transport solide le code localise les zones sensibles à l'érosion et au dépôt. Il permet de voir leurs variations en fonction du temps. Ces résultats sont représentés sous forme de graphes, d'animations...etc. D'autre part, le Rubar20TS tient compte de la partie hydrodynamique telle que la hauteur et le débit d'eau.

Ce travail nous permettra par la suite de mettre un plan d'action pour lutter contre ce genre de catastrophe dans l'avenir. Côté urbanisme, les résultats obtenus peuvent servir à définir géographiquement les différentes zones sensibles de la ville et donc de les protéger en cas de pareilles crues.

## 2. DONNEES DISPONIBLES, RESULTATS DE CALCUL ET CALAGE DU MODELE

Comme la plupart des codes, le Rubar20TS a besoin des données nécessaires aux calculs, telles que : les données brutes, les données initiales et aux limites...etc.

Ces données ont été obtenues soit directement ou bien nous les avons évalués en utilisant des méthodes d'estimation - chapitre III-

Ces données sont introduites dans le code de différentes manières : sous forme de cartes, graphes, valeurs...etc.

Après le calcul, les résultats numériques fournis doivent être comparés à des données de terrain afin de s'assurer de la fiabilité de l'outil numérique dans des conditions opérationnelles. Ce processus, appelé validation opérationnelle, inclut la tâche de calage du

modèle. Le calage vise à reproduire des événements de référence aussi fidèlement que possible par un ajustement de paramètre à base physique (Vidal, 2005).

Malheureusement pour la vallée de M'zab, nous ne disposons pas de données suffisantes et exactes permettant un bon calage du modèle. Mais en se basant sur des laisses de crues dans la ville (hauteur de l'eau dans l'oued et dans certains quartiers de la ville), nous sommes arrivés à faire le calibrage de certaines données hydrauliques. Idem pour les données sédimentaires, nous ne disposons pas de valeurs exactes, malgré que nous savions qu'il y avait ensablement et érosion dans certains endroits (délimitation géographique).

Le calage des données s'est fait donc en lançant la simulation avec des conditions initiales précises. On compare ensuite les résultats obtenus par le calcul à ceux du terrain, on répète la simulation plusieurs fois (à chaque fois, on change un paramètre, tel que : le débit de pointe, le diamètre des particules, le coefficient de Strickler...etc.) afin d'obtenir des résultats de calcul identiques à ceux du terrain.

### 2.1. Données topographiques

Pour faire introduire la topographie de la zone étudiée, on s'est basé sur un plan topographique fourni par l'OPVM, qui contient les côtes des niveaux pour le lit mineur de l'oued. Seulement, par la suite nous avons complété ces données en utilisant le Google Earth pour couvrir l'ensemble de la zone. Ces données topographiques sont des données brutes, intrinsèques qui représentent le premier point de départ de la simulation, et qui serviront par la suite à la construction du maillage initial.

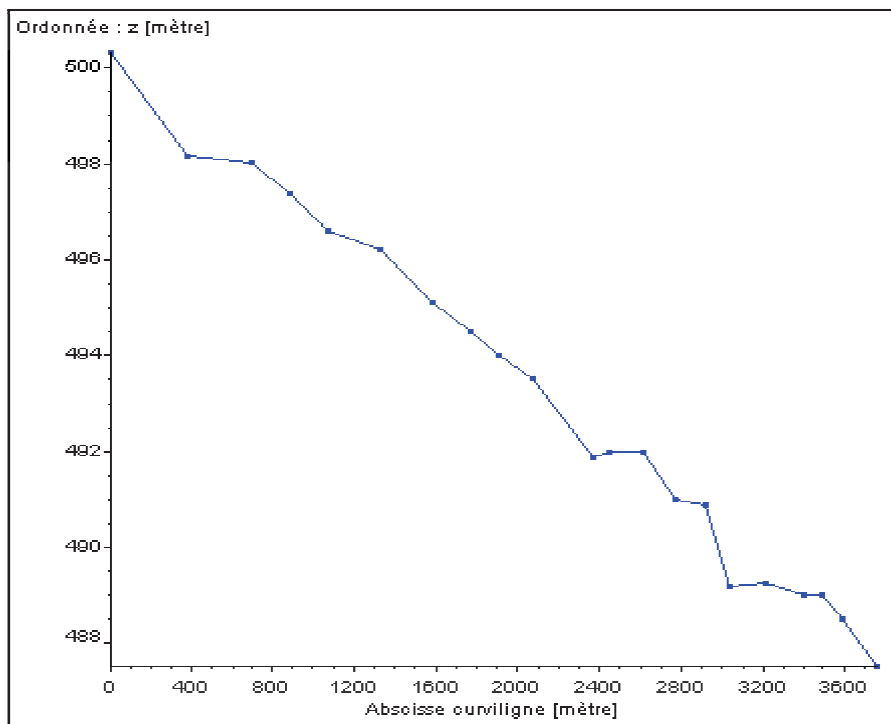


Figure V.1: Profil en travers du lit de l'oued M'zab

La pente moyenne de l'oued est de 4‰ ( $\theta \approx 0.21^\circ$ ).

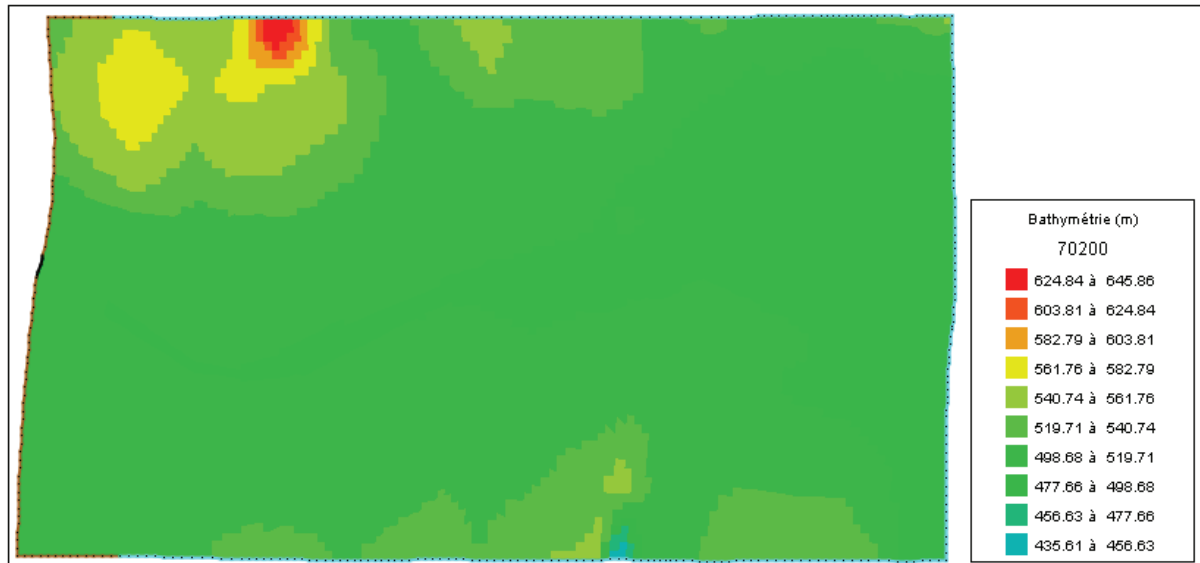


Figure V.2 : Bathymétrie de la zone d'étude

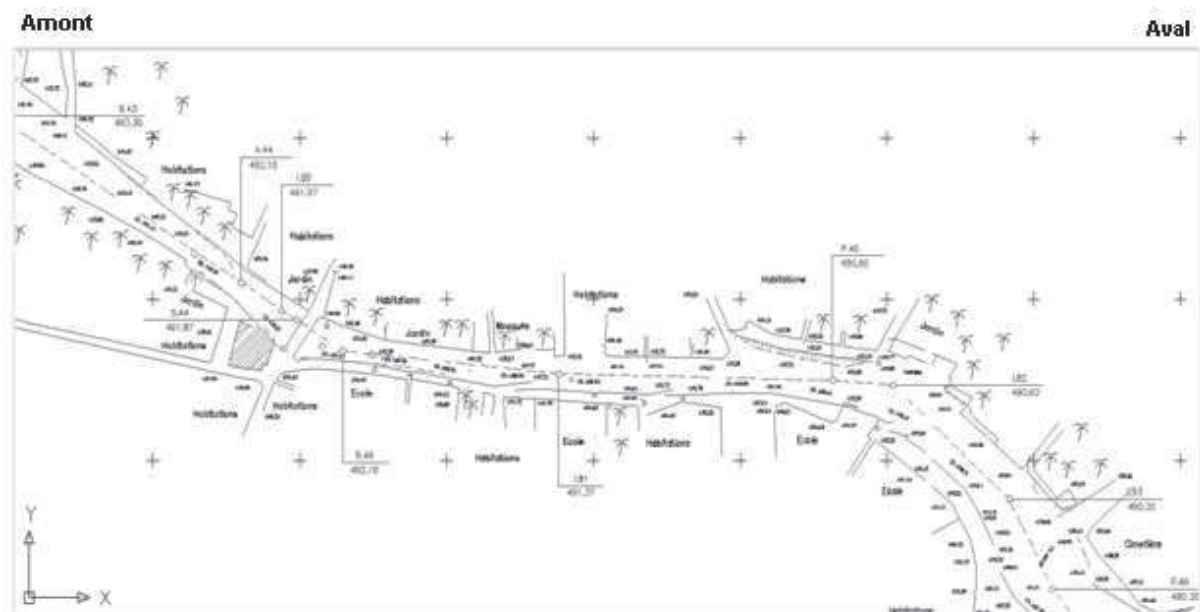


Figure V.3 : Topographie au niveau du lit mineur de l'oued (Ali Azouaou, 2008)

## 2.2. Coefficient de frottement

L'édition du frottement de fond se fait aux centres des mailles, le Rubar20Ts permet de choisir entre le coefficient de Chézy et de Strickler. Dans notre cas, nous avons opté pour celui de Strickler, c'est le plus couramment utilisé.

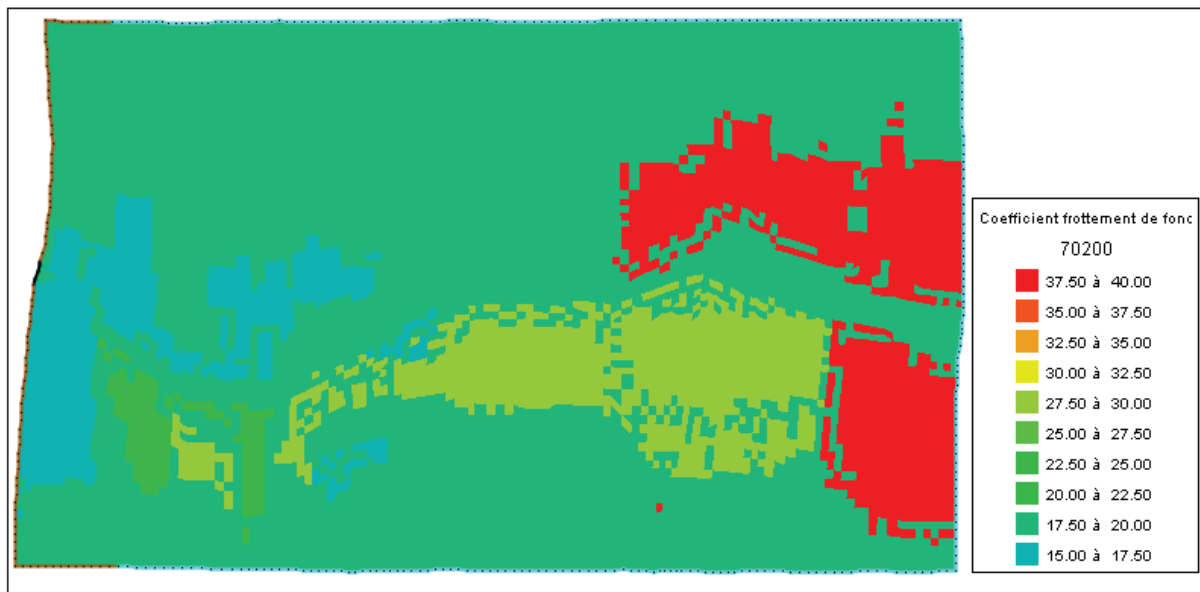
La carte des frottements de fond (figure V.6), a été établie à partir des photos satellitaires Le coefficient de Manning  $n$  est exprimé par la formule du Chow (Chow, 1973 ; Cowan, 1956) :

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

Avec,  $n_0$  : facteur correctif du type de sol du lit de la rivière,  $n_1$  : facteur correctif des irrégularités de la rivière,  $n_2$  : facteur correctif du type et de la forme du profil en travers,  $n_3$  : facteur correctif des effets des obstacles,  $n_4$  : facteur correctif de l'effet de la présence de la végétation sur les berges et  $m_5$  : facteur correctif du degré de méandre dans la rivière.

**Tableau V.1** : Valeurs des différents facteurs de la formule de Chow (*Ali Azouaou*, 2008) :

Facteurs	Caractéristiques	Valeur
$n_0$	terre	0.02
	Roche	0.025
	gravie	0.024
	Gravier grosse	0.028
$n_1$	Parois lisses	0.001
	Parois présentent une légère irrégularité	0.005
	Parois présentent une irrégularité modérée	0.01
	Parois présentent une irrégularité importante	0.02
$n_2$	Variations progressives du profil en travers	0
	Variations altérées du profil en travers	0.005
	Variations altérées fréquentes du profil en travers	0.001 à 0.015
$n_3$	Obstruction négligeable	0
	Obstruction faible	0.01 à 0.015
	Obstruction appréciable	0.03 à 0.04
	Obstruction importante	0.06
$n_4$	Végétation faible	0.005 à 0.01
	Végétation modérée	0.01 à 0.025
	Végétation importante	0.025 à 0.050
	Végétation très importante	0.05 à 0.1
$m_5$	Influence des méandres modérée	1
	Influence des méandres appréciable	1.25
	Influence des méandres importante	1.3



*Figure V.4* : Carte des frottements de fond au niveau de la ville

### 3. CONSTRUCTION DU MAILLAGE

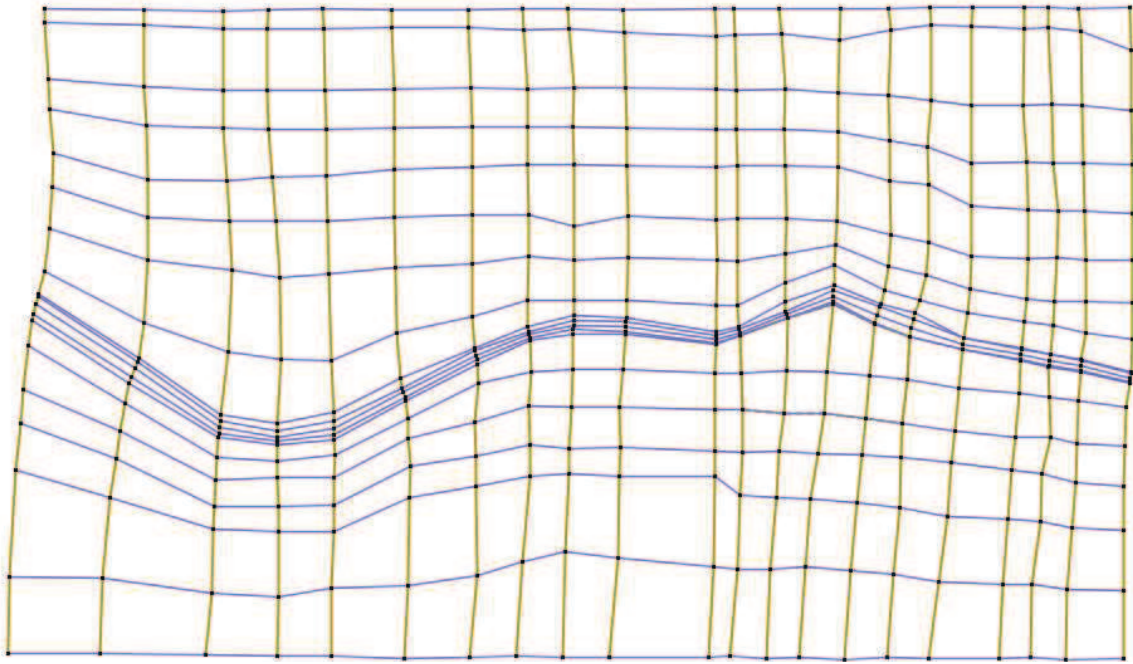
#### 3.1. Maillage initial

Nous avons utilisé le logiciel Fudaa-Modeleur pour construire le maillage initial en se basant sur les données topographiques, le principe qu'on a suivi pour le traçage c'est de resserrer les lignes directrices au niveau de l'oued, pour bien représenter les profils en travers au niveau de lit, et en s'éloignant du lit de l'oued la distance entre les lignes directrices deviennent de plus en plus importantes (pas d'espace moyen d'environ 150 m), et ceci pour ne pas encombrer le calcul.

Les sections en travers sont réparties d'une façon uniforme pour l'ensemble du domaine, et les points d'intersection entre les lignes directrices et les sections en travers (ou bien les nœuds de maillage initial) sont définis par leurs coordonnées (x, y, z).

En fin, nous obtenons une grille qui couvre toute la zone étudiée et qui sert par la suite à la construction du maillage final. Ce maillage comporte 18 zones composées de (figure V.7) :

- 21 sections en travers
- 19 lignes directrices



**Figure V.5 :** Maillage initial généré par le logiciel Fudaa- modeleur

### 3.2. Maillage final

Le maillage final est obtenu par interpolation du maillage initial. Cette interpolation se fait à partir des sous-programmes Secma et Mcoxima.

L'interpolation se fait en deux étapes :

- Interpolation transversale : à l'intérieur de chaque zone pour obtenir des sections à nombre de points identique. Dans cette étape et pour chaque zone, on a associé un pas d'espace donné (tableau V.2).
- Interpolation longitudinale : sur chaque ligne directrice à fin de créer des sections intermédiaires, le pas d'espace utilisé est de 30m.

Le maillage final est composé de (figure V.9) :

- 118 sections en travers ;
- 104 lignes directrices ;
- 12272 nœuds : contient les côtes du fond ;
- 12051 mailles élémentaires : contient les conditions initiales, et le coefficient de frottements...etc.

Tableau V.2 : Pas d'espace des différentes zones du domaine de calcul

	<b>Longueur moyenne [m]</b>	<b>Longueur min [m]</b>	<b>Longueur max [m]</b>	<b>Pas d'espace [m]</b>
<b>Zone 1</b>	71,40	46,37	139,16	30
<b>Zone 2</b>	201,00	166,00	255,00	30
<b>Zone 3</b>	138,90	92,80	186,55	30
<b>Zone 4</b>	137,15	113,90	173,90	30
<b>Zone 5</b>	155,70	108,20	194,20	30
<b>Zone 6</b>	131,40	77,50	181,50	25
<b>Zone 7</b>	141,30	61,80	274,46	25
<b>Zone 8</b>	95,80	42,24	207,05	25
<b>Zone 9</b>	13,80	1,60	30,00	25
<b>Zone 10</b>	17,90	10,48	29,94	20
<b>Zone 11</b>	17,80	9,10	31,50	20
<b>Zone 12</b>	8,10	0,70	23,06	20
<b>Zone 13</b>	102,26	48,25	215,33	25
<b>Zone 14</b>	115,36	55,06	141,15	25
<b>Zone 15</b>	112,65	84,06	135,24	25
<b>Zone 16</b>	123,47	73,52	172,48	30
<b>Zone 17</b>	235,81	177,90	340,59	30
<b>Zone 18</b>	257,79	189,38	338,15	30

-



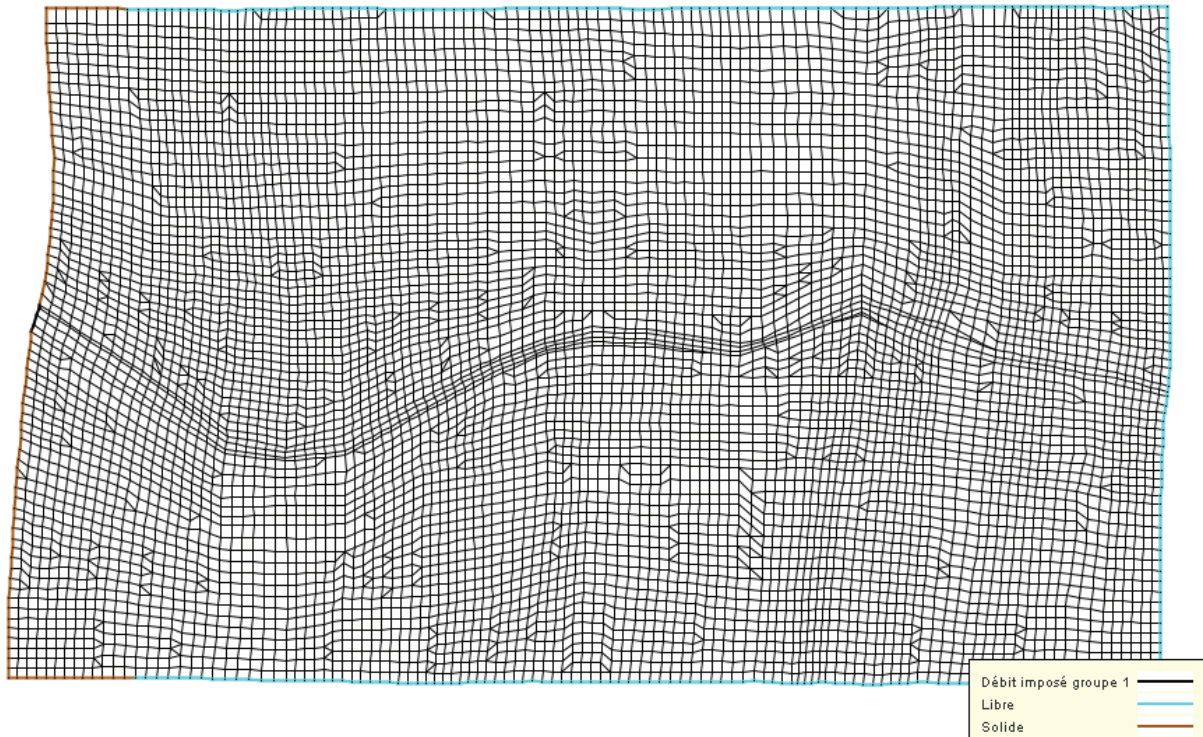


Figure V.6 : Maillage final du domaine de calcul

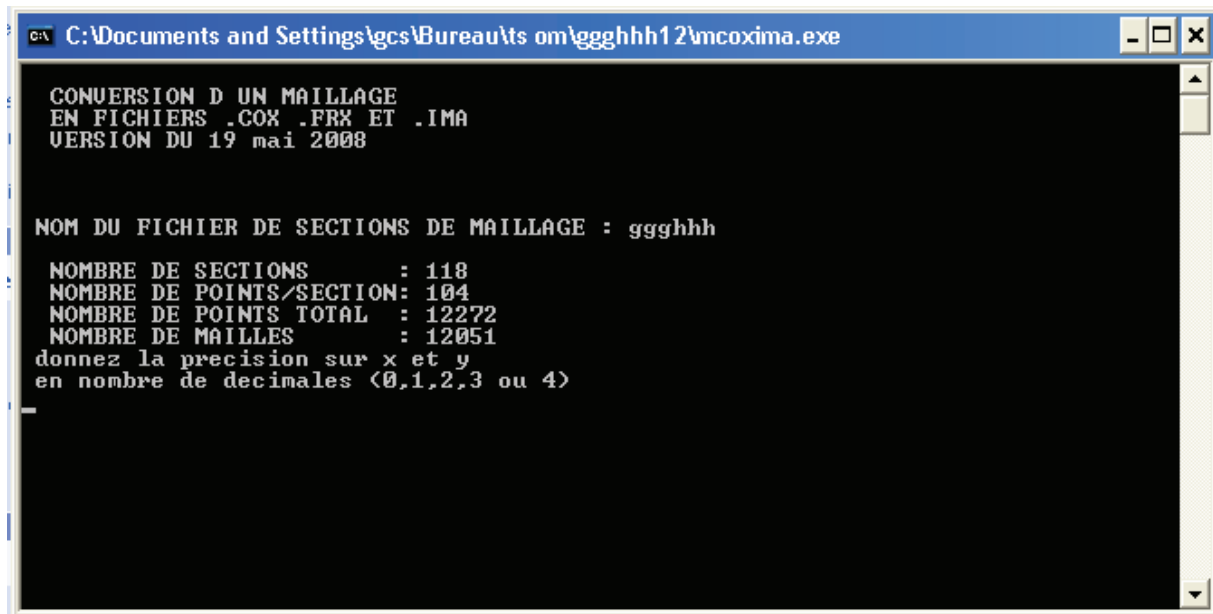


Figure V.7 : Fenêtre du sous programme Mcoxima

#### 4. CONDITIONS AUX LIMITES

Pour bien délimiter notre domaine de calcul, nous avons utilisé trois types de conditions aux limites, qui sont :

- **Les arêtes d'entrée :** définies par un groupe de débits liquide et solide. Cette condition a été associée à la section amont de l'oued (figure V.10), dont le groupe de

débits liquide est défini par l'hydrogramme de crue, et le groupe solide est défini par une concentration constante égale à 90g/l.

- **Les arêtes solides ou réflexion** : cette condition est associée aux limites de la partie amont du domaine de calcul, caractérisé par un flux nul sur les arêtes et elle ressemble à une paroi imperméable.
- **Les arêtes libres** : associée au reste des limites extérieures du domaine de calcul, dont la vitesse normale à l'arête est dirigée vers l'extérieur (flux sortant) sans qu'aucune condition particulière ne soit imposée, c'est la sortie à choisir pour un régime torrentiel.

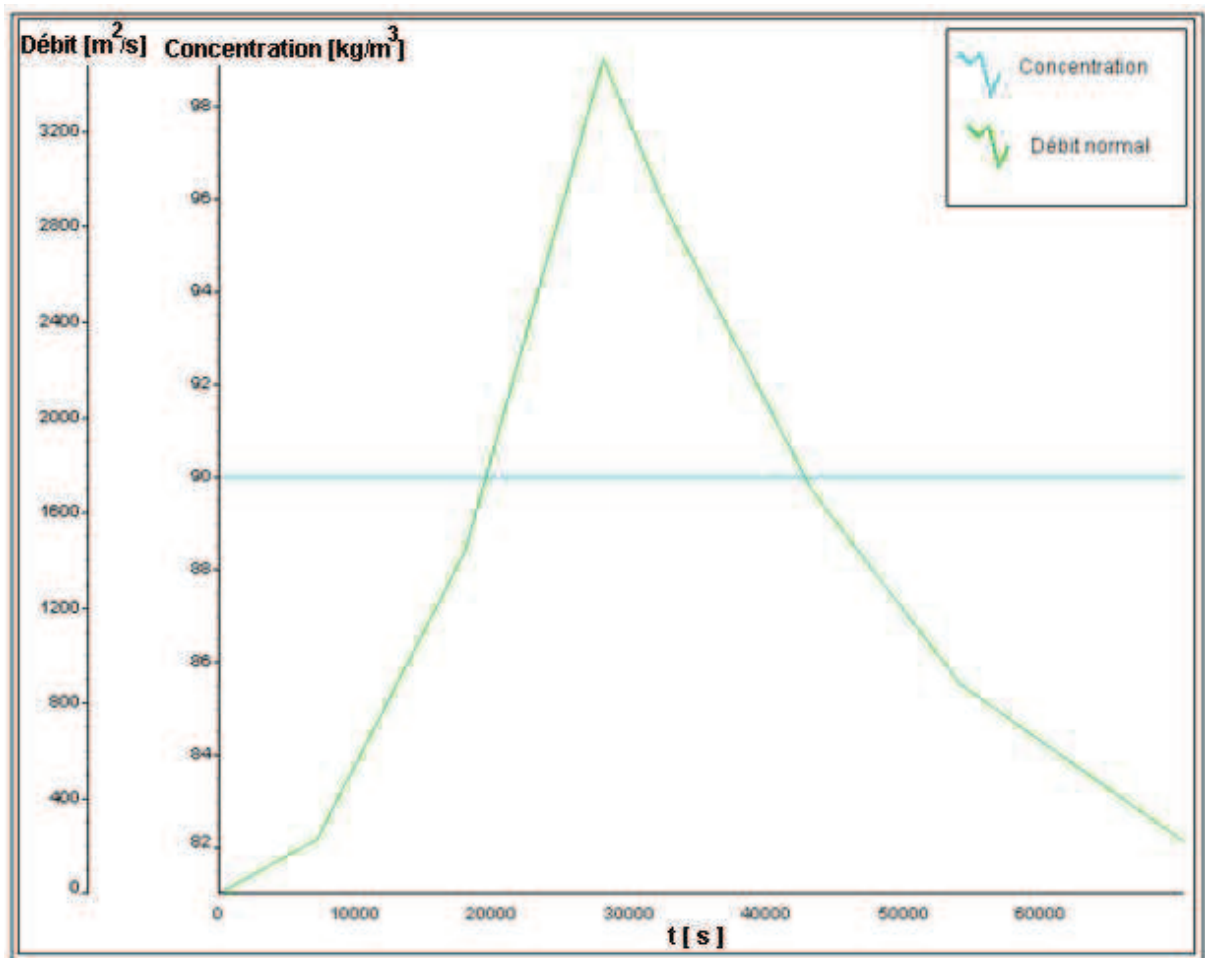
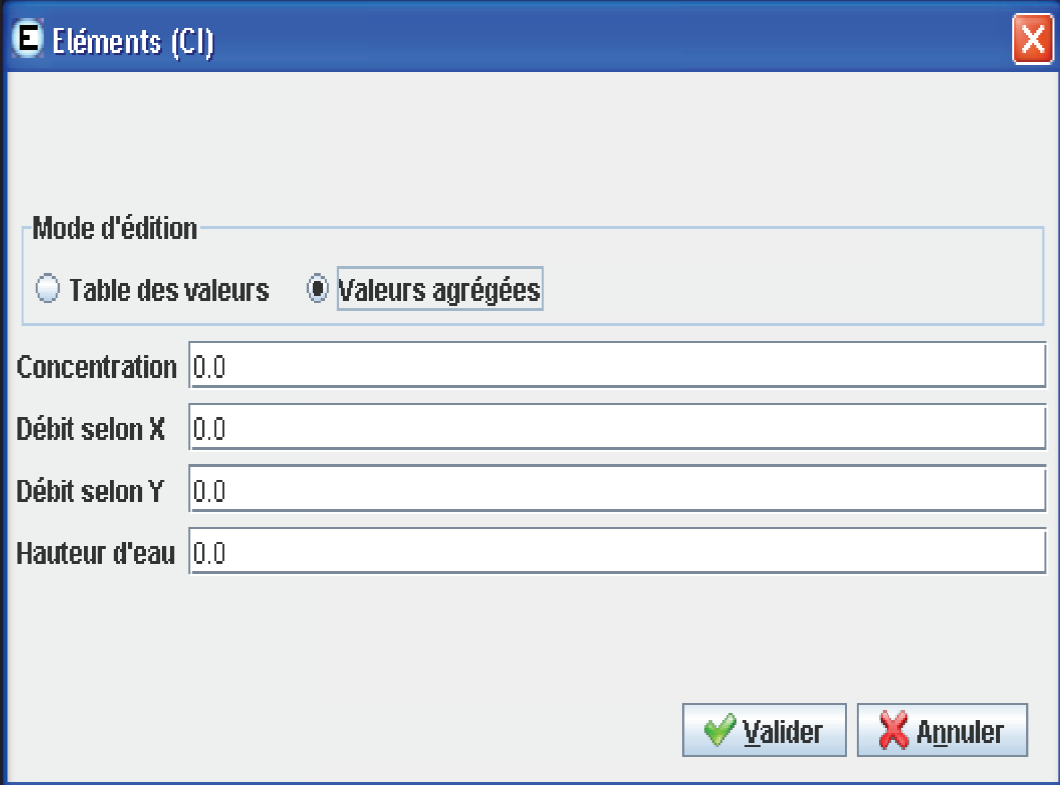


Figure V.8 : Données aux limites au niveau des sections d'entrées (Fudaa-Prepro).

## 5. CONDITIONS INITIALES

Comme pour le coefficient de frottement de fond, les conditions aux limites sont éditées aux centres des mailles. Le code nous offre la possibilité d'associer à chaque maille des conditions initiales spécifiques. Mais dans notre cas, nous avons choisi les mêmes conditions pour l'ensemble du domaine, et nous avons considéré que l'oued était à l'état sec avant la crue. Nous avons pris donc pour  $t = 0$  : un débit, une hauteur et une concentration nul pour tout le domaine (figure V.11).



**E** Eléments (CI)

Mode d'édition



Table des valeurs  Valeurs agrégées

Concentration 0.0

Débit selon X 0.0

Débit selon Y 0.0

Hauteur d'eau 0.0

 Valider  Annuler

*Figure V.9* : Fenêtre permettant la définition des conditions initiales (Fudaa-Prepro)

## 6. ZONES URBANISEES

La représentation des bâtiments peut se faire soit au niveau du maillage initial en utilisant les sections en travers pour les définir (Fudaa-modeleur), ou bien au niveau du maillage final en utilisant le logiciel Fudaa-Prepro (figure V.12).

Dans notre cas, nous avons opté pour le deuxième choix, et nous avons représenté les espaces bâtis par des blocs d'ouvrages déversoirs ; chaque déversoir a été défini par ses caractéristiques spécifiques : la référence, la longueur de déversement, la côte du seuil, la côte de mise en charge, le coefficient de débit...etc.

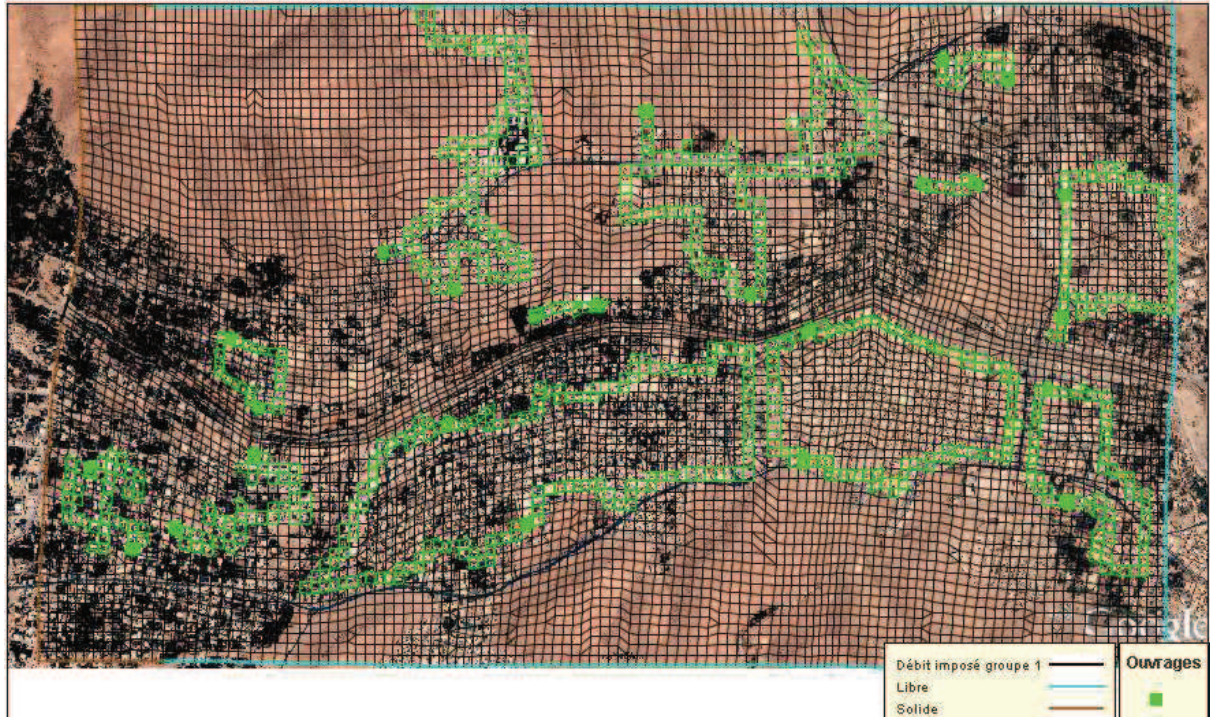


Figure V.10 : Délimitation et définition des zones urbanisées

## 7. PARAMETRES DE CALCUL

Les différents paramètres de calcul sont :

- Accélération de la pesanteur :  $9,81 \text{ m/s}^2$  ;
- Coefficient d'érosion :  $3,0 \cdot 10^{-6}$  ;
- Coefficient de Schmidt : 0,45 ;
- Coefficient de frottement à la paroi : 0 ;
- Coefficient de vitesse de dépôt : 0,2 ;
- Conditions aux limites variables dans le temps : oui ;
- Diamètre  $d_{50}$  : 2,5mm ;
- Contrainte critique adimensionnelle : 0,046. ;
- Diffusion selon x :  $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$  ;
- Diffusion selon y :  $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$  ;
- Densité de l'eau : 1 ;
- Densité des sédiments : 2,65 ;
- Pas de temps de sauvegarde : 15 s ;
- Porosité des sédiments : 0,4 ;
- Précision sur les hauteurs :  $10^{-4}$  ;
- Reprise de calcul : non ;
- Schéma de calcul : Van Leer ordre 2 ;
- Temps début de calcul : 0 ;
- Temps fin de calcul : 70200 s ;
- Valeur de nombre de courant : 0,5 ;
- Valeur pas de temps initial : 3 s ;

- Vitesse du vent selon x : 0 m/s ;
- Vitesse du vent selon y : 0 m/s.

Remarque :

La contrainte critique adimensionnelle est soit donnée par l'utilisateur, soit calculée automatique par le code, selon l'option de calcul choisi (tableau IV.1).

## 8. RESULTATS DE CALCUL

On procède au lancement du calcul soit en exécutant directement le sous-programme rubar20TS relatif au calcul, soit à partir du préprocesseur Fudaa-Prepro.

La simulation se fait pour un temps de calcul de 70200 s (qui représente la durée de la crue), avec un pas de temps égal à 3 s, et à la fin du calcul une fenêtre du sous-programme rubar20Ts l'indique et quelques résultats généraux (figure V.13) sont donnés, tels que :

Le volume d'eau initial : 0 m<sup>3</sup>.  
 Le volume d'eau sorti : 94509598 m<sup>3</sup>.  
 Le volume d'eau entré : 96085952 m<sup>3</sup>.  
 Le volume d'eau final : 1622656 m<sup>3</sup>.  
 La quantité initiale des sédiments : 0 m<sup>3</sup>.  
 La quantité sortie des sédiments : 3668719 m<sup>3</sup>.  
 La quantité entrée des sédiments : 3263296 m<sup>3</sup>.  
 La quantité de particules arrachées : 435057 m<sup>3</sup>.  
 La quantité finale des sédiments : 51083 m<sup>3</sup>.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
CALCUL AU TEMPS: 70065.09375
CALCUL AU TEMPS: 70077.5625
CALCUL AU TEMPS: 70090.125
CALCUL AU TEMPS: 70102.59375
CALCUL AU TEMPS: 70115.0625
CALCUL AU TEMPS: 70127.625
CALCUL AU TEMPS: 70140.09375
CALCUL AU TEMPS: 70152.5625
CALCUL AU TEMPS: 70165.125
CALCUL AU TEMPS: 70177.59375
CALCUL AU TEMPS: 70190.0625
FIN CALCULS SCHEMA DE UANLEER2
VOLUME INITIAL = 0. VOLUME SORTI = 9.45095985612423E+7
VOLUME ENTRE = 9.608595299999999E+7 VOLUME FINAL = 1622656.9774875503
VOLUME UI+UE-US = 1576354.4387576878 A COMPARER A UF
LES QUANTITES DE SEDIMENTS SONT EXPRIMEES EN M3
QUANTITE INIT. SED. = 0. SED. SORTIES = 3668719.0181673113
SED. ENTREES = 3263296.5169811347 DEPOTS = -435057.2196009521
QUANTITE I+E-S-D = 29634.718414775445 A COMPARER A QF
QUANTITE FINALE SED. = 51083.574691173795 DIF. de ZF = -736483.3835166756
COND.INI. DANS ggghhh.eci
COND.LIM. DANS ggghhh.ecl
FROTTEMENTS DANS ggghhh.efr
C:\Documents and Settings\gcs\Bureau\ts om\ggghhh12>

```

Figure V.11 : Fenêtre du sous programme Rubar20TS indiquant la fin de calcul.

### 8.1. Partie hydrodynamique

#### 8.1.1. Résultats sur les hauteurs d'eau

L'observation de l'évolution de la hauteur de l'eau pendant la crue, nous a permis de la partager en quatre étapes en fonction du temps :

**De  $t = 0$  s à  $t = 11000$  s**

L'écoulement se fait pratiquement dans le lit mineur avec une hauteur d'eau qui varie entre 1 et 3 m.

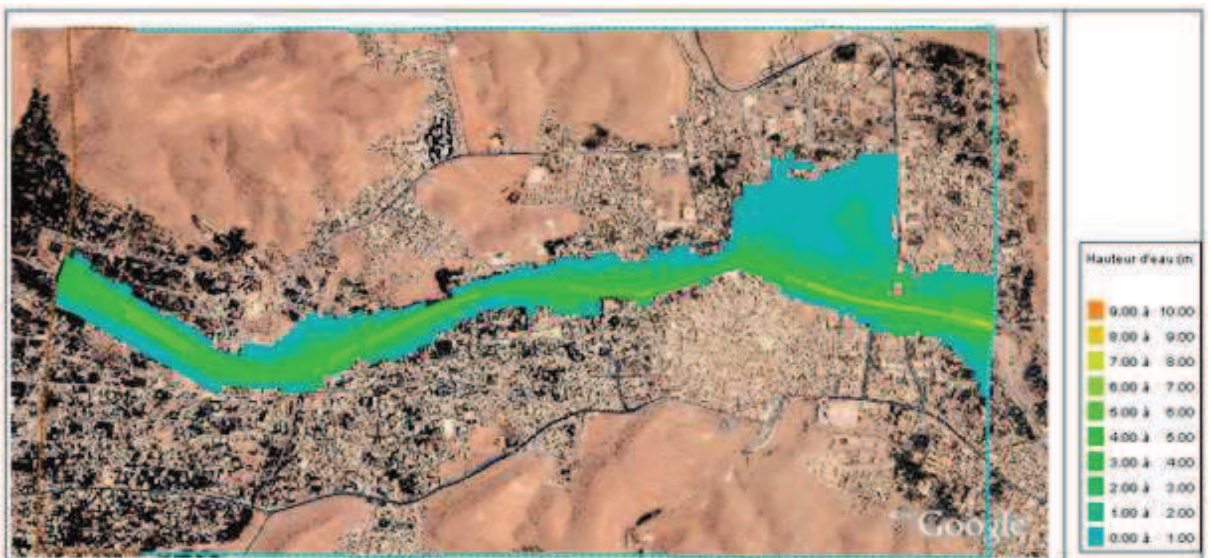
Dans cette étape, nous observons l'apparition de quelques petits débordements de l'eau dans certains endroits de l'oued et ceci à partir d'un temps égal à 4875 s (figure V.14).



**Figure V.12 :** Hauteur d'eau pour  $t = 4875$ s.

**De  $t = 11000$  s à  $t = 15000$  s**

L'écoulement s'étend jusqu'au lit majeur, avec une hauteur d'eau variant entre 5 et 6 m, ce qui a entraîné le débordement de l'oued dans certains endroits, en particulier en aval sur la rive droite (figure V.15), où l'inondation dans cette partie de la ville était exceptionnelle. Cette zone (la rive droite en aval) a reçu la majeure partie de la crue et où la hauteur d'eau était d'environ 1 à 2m.

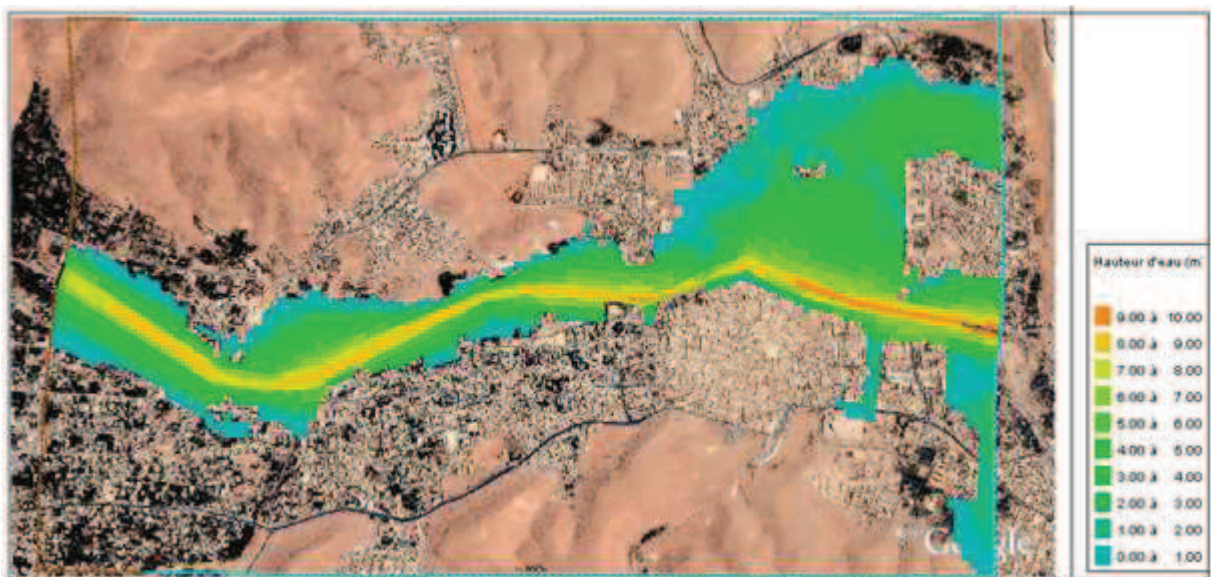


**Figure V.13 :** Hauteur d'eau pour  $t = 13185.2$ s.

**De  $t = 15000$  s à  $t = 60000$  s**

L'écoulement est devenu très agressif et le niveau d'eau a atteint les 9 m de hauteur au niveau du lit de l'oued, alors que l'eau s'est carrément débordée sur plusieurs endroits de la ville en provoquant des inondations :

- la partie aval de la rive droite a été la cible d'une importante inondation, de telle sorte que l'oued a formé un second bras d'écoulement, dont la hauteur a atteint les 5m.
- La rive gauche a connu aussi des inondations dans certains endroits (globalement elles sont moins importantes que celles de la rive droite), surtout en aval avec une hauteur de 1 à 2m. (Figure V.16).



**Figure V.14 :** Hauteur d'eau pour  $t = 32280$ s.

**De  $t = 60000$  à  $t = 70200$  s**

Cette étape est caractérisée d'une façon générale par l'abaissement du niveau d'eau :

- Au niveau du lit, la hauteur d'eau varie entre 2 et 4 m en amont alors qu'en aval le niveau d'eau reste élevé (hauteur de 9 à 7 m).
- Au niveau des rives inondées : la majeure partie de ces zones a connu un abaissement considérable du niveau d'eau où la hauteur est limitée entre 1 et 2m. (Figure V.17).



*Figure V.15* : Hauteur d'eau pour  $t = 68160s$

### 8.1.2. Résultats sur le débit unitaire d'eau

L'analyse de l'évolution du débit, peut se faire de différentes manières : soit en exploitant les animations visualisées par le Fudaa-Prepro ce qui donne une idée globale sur l'évolution, ou bien à partir des graphes de débit pour différentes sections de l'oued.

L'animation du débit d'eau décrit bien sa variation dans le temps et sa répartition dans l'espace. Dans notre cas, elle montre bien que les plus forts débits se sont enregistrés au milieu de sections transversales de l'oued (où il atteint  $43m^2/s$ ) chose qui est évidente, alors que les faibles débits se sont localisés au niveau des berges.

Concernant le débit au niveau des zones inondées, il est relativement faible par rapport à celui du lit, il varie entre 1 et  $5 m^2/s$ .

### Variation temporelle du débit unitaire dans le lit

Pour bien couvrir la zone d'étude du point de vue analyse des débits dans le temps et dans l'espace, nous étudions l'évolution temporelle du débit pour différentes sections de l'oued. Pour cela, nous avons choisi trois sections à partir desquelles nous allons tracer des graphes qui expriment cette évolution. Ces sections ont été choisies de telle façon à montrer la variation du débit tout au long de l'oued sous l'effet de plusieurs paramètres tels que : la pente, la géométrie, le coefficient de frottement....etc.

Les graphes obtenus présentent les particularités suivantes :

**Section 1** : Le débit maximum a atteint  $30 m^2/s$ .

**Section 2** : Le débit maximum a atteint  $43 m^2/s$ , ce débit unitaire est important par rapport à celui de la section 1 et 3, on peut expliquer ceci par le fait que, la pente à ce niveau a augmenté provoquant ainsi une augmentation de la vitesse d'écoulement.



**Section 3** : Le débit maximum est d'environ 17 m<sup>2</sup>/s, ce débit est relativement faible par rapport aux débits des sections amont. On peut expliquer cette faiblesse par la présence d'un second bras d'écoulement et donc l'augmentation de la section de passage ce qui diminue automatiquement la vitesse et donc le débit.

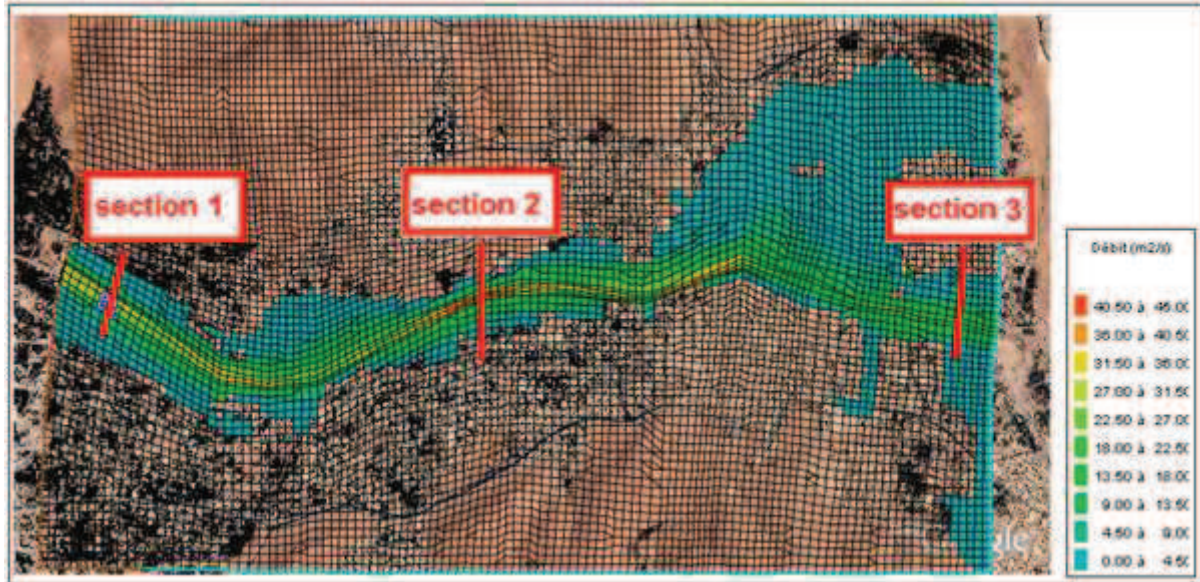


Figure V.16 : Débit unitaire,  $t = 32835s$

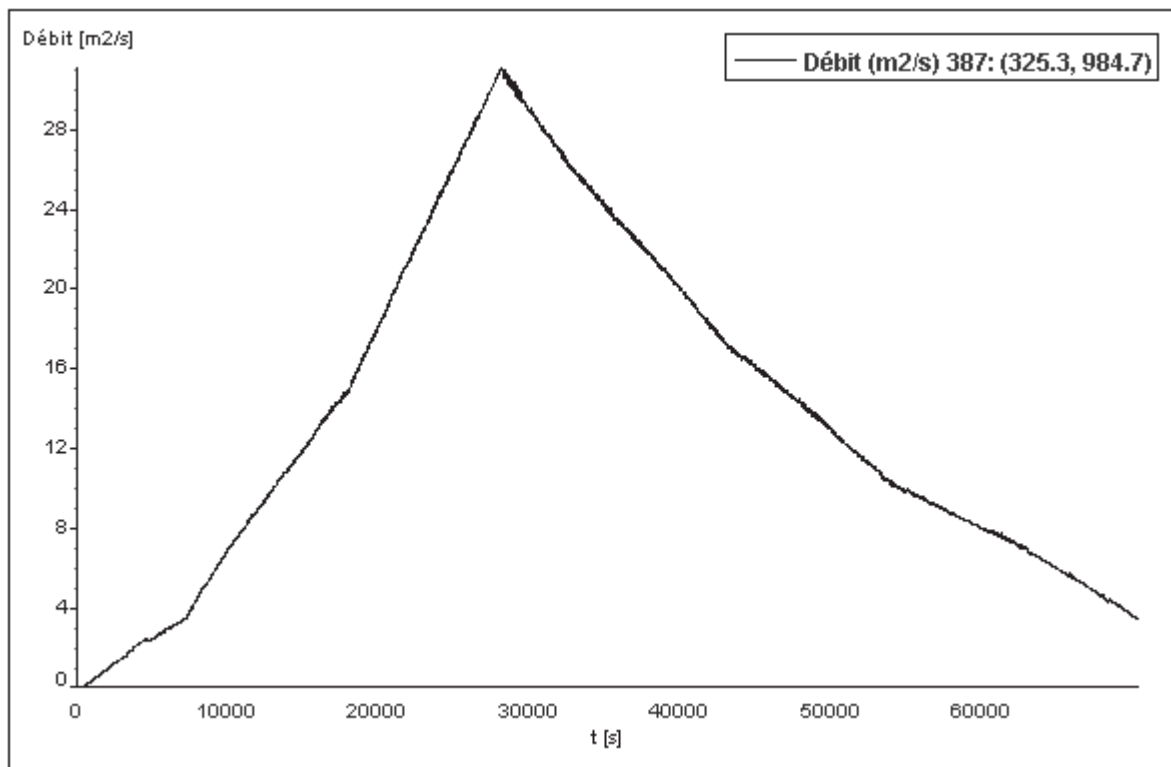


Figure V.17 : Evolution du débit unitaire au niveau de la section 1

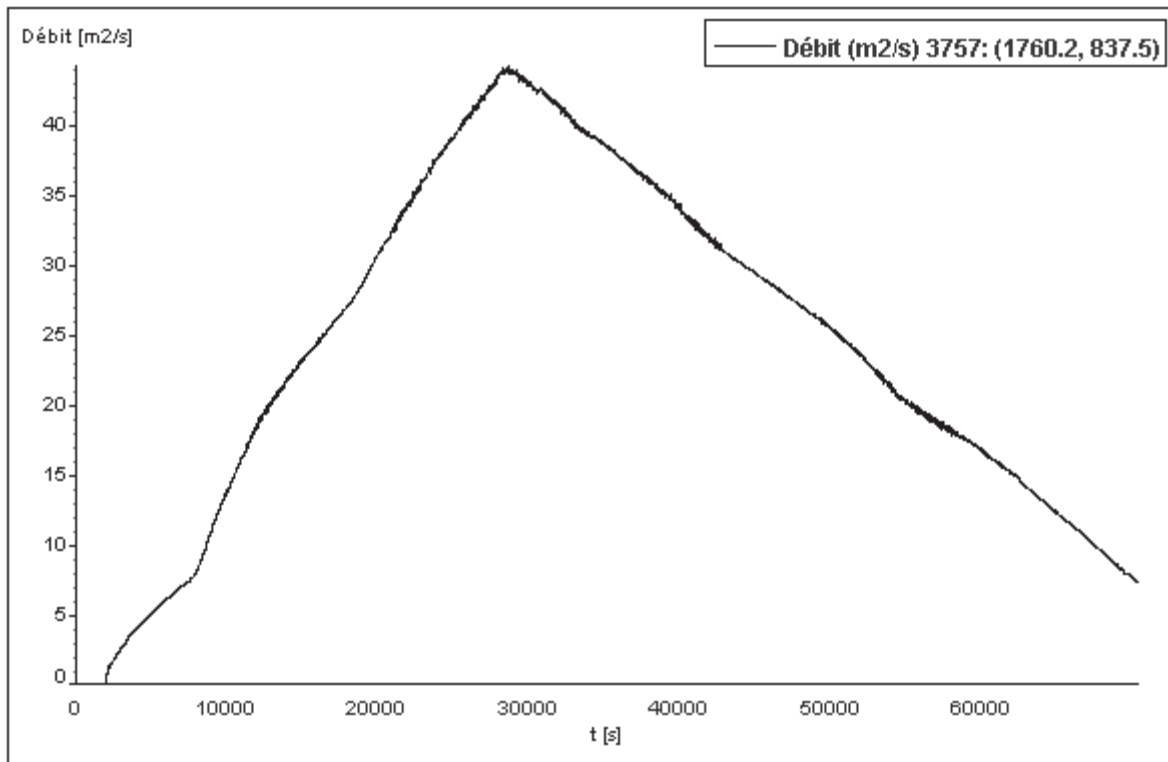


Figure V.18 : Evolution du débit unitaire au niveau de la section 2.

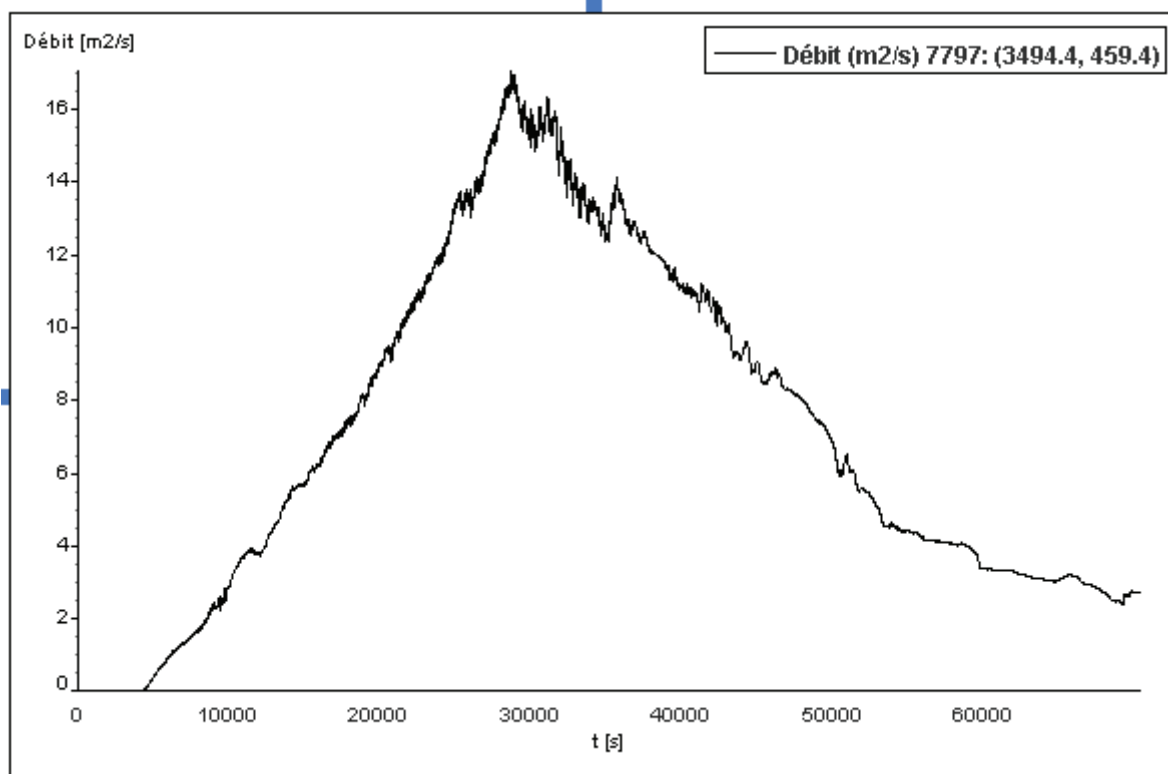


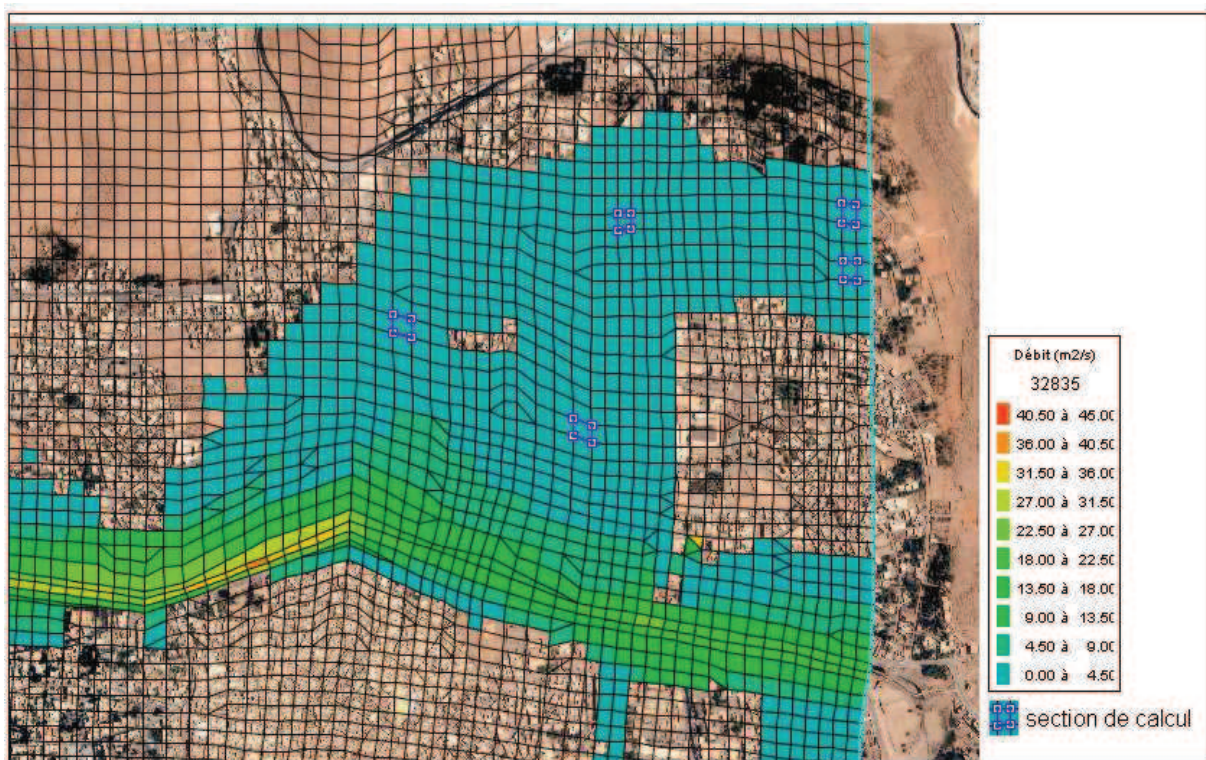
Figure V.19 : Evolution du débit unitaire au niveau de la section 3

### Variation temporelle de débit unitaire dans les zones inondées

Au niveau des zones inondées, nous avons tracé des graphes de débits pour différentes sections réparties de telle façon à bien représenter l'évolution du débit pour l'ensemble des zones émergées (figure V.20)

Des cinq graphes superposés (figure V.21), la première remarque qu'on peut faire est qu'ils présentent généralement la même forme. On remarque aussi la présence de deux pics pour l'ensemble des graphes. Le premier pic pour  $t = 30000s$ , puis la vitesse descend jusqu'à  $t = 50000s$  où elle remonte encore et pour  $t = 55000s$ , elle atteint son deuxième pic.

Cette Particularité (présence de deux maximums), peut être expliquée par le changement du sens d'écoulement qui est dû à la présence de deux courants d'eau (figures V.22 et V.23).



**Figure V.20 :** Répartition des sections de calcul au niveau de la rive droite

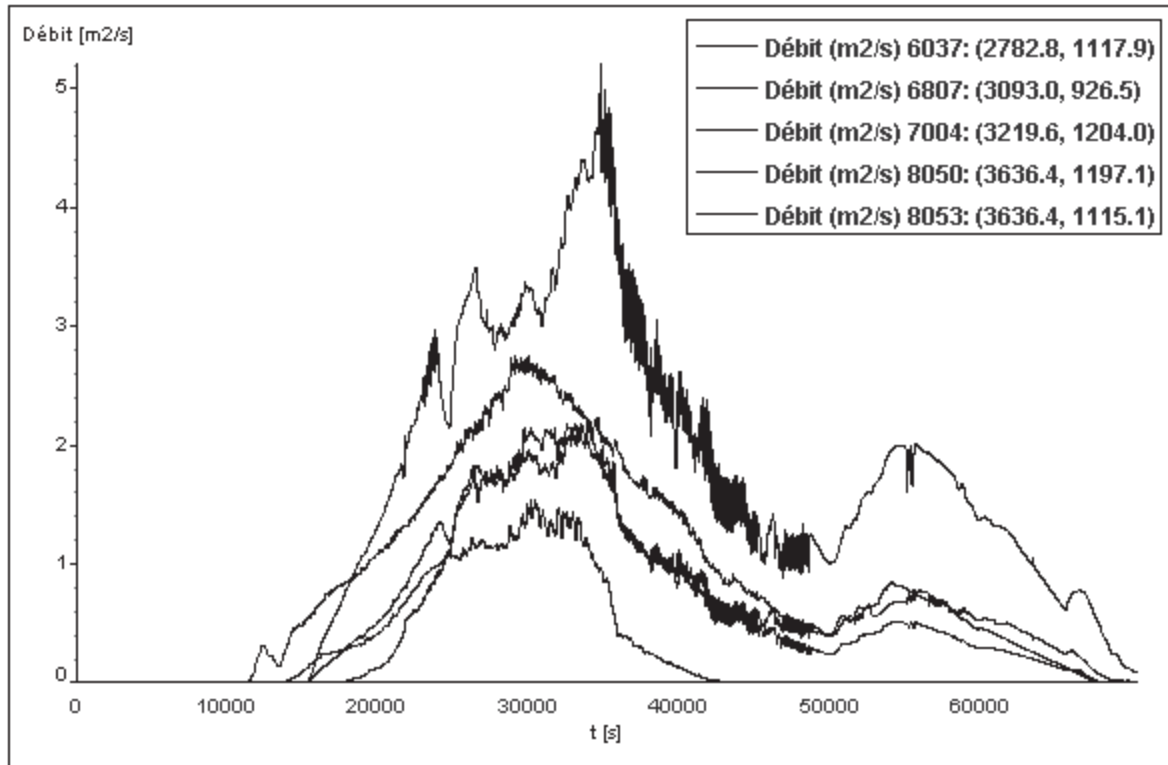


Figure V.21 : Courbes des débits au niveau de la rive droite

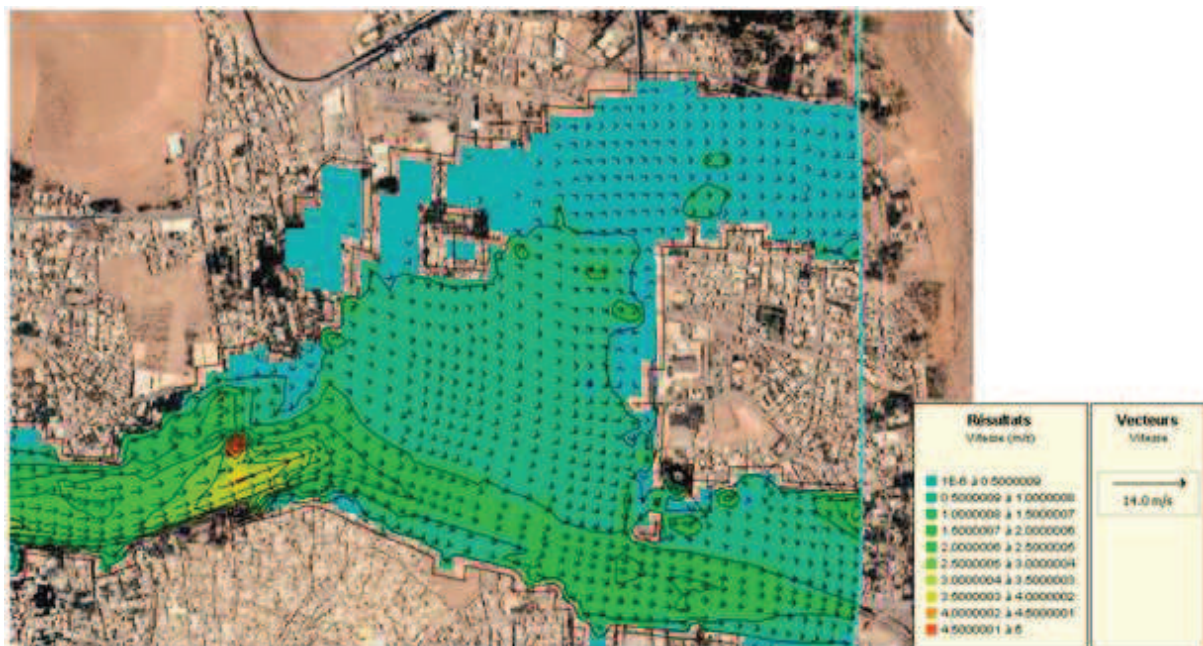
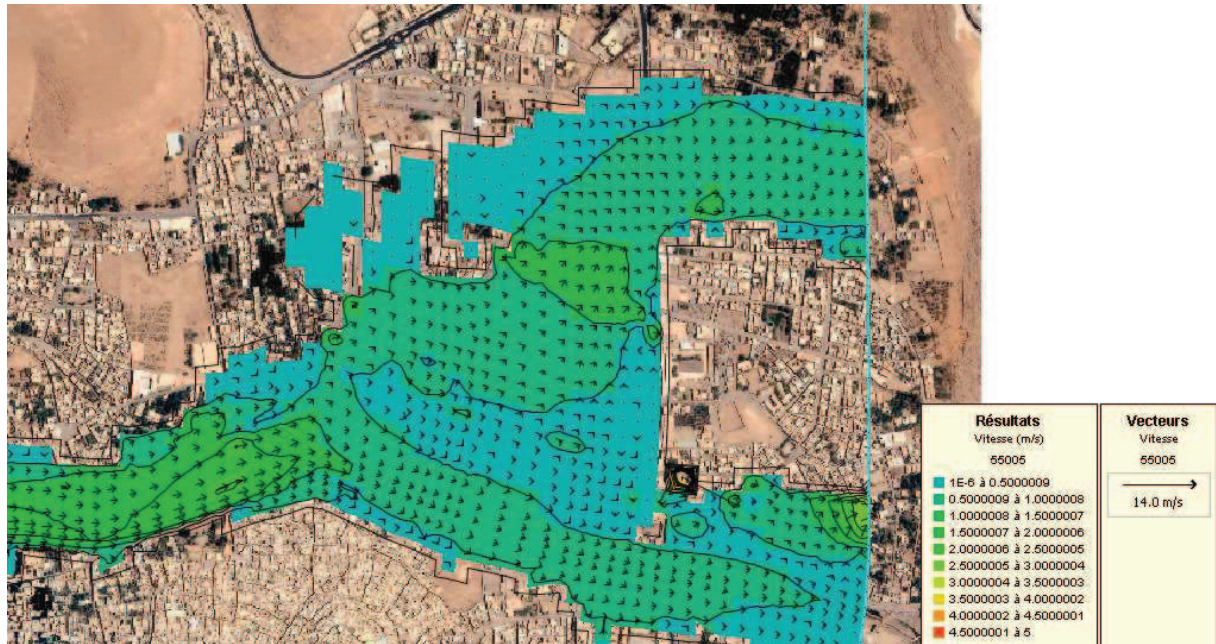


Figure V.22 : Sens et vitesse d'écoulement pour t = 47700s



**Figure V.23 :** Sens et vitesse d'écoulement pour  $t= 55005s$

### 8.1.3. Résultats sur la vitesse d'écoulement

Les différents graphes montrent la variation de la vitesse d'écoulement dans le temps et dans l'espace. En effet, les courbes de débits relatifs aux sections 1 et 2 présentent une forme semblable : une seule montée, une seule descente, où la vitesse maximale pour la première section est de 3.6 m/s, alors que pour la seconde section la vitesse maximale a atteint les 5 m/s.

La courbe au niveau de la troisième section présente une forme un peu particulière, elle se diffère par la présence de plusieurs pics, ceci peut expliquer par la présence de deux bras d'écoulement, ce qui a un peu perturbé l'écoulement. La vitesse maximale est d'environ 2 m/s.

Au niveau des zones inondées (partie aval), la vitesse est relativement faible entre 1 et 2 m/s pour la rive droite, alors que pour la rive gauche elle ne dépasse pas 1 m/s.

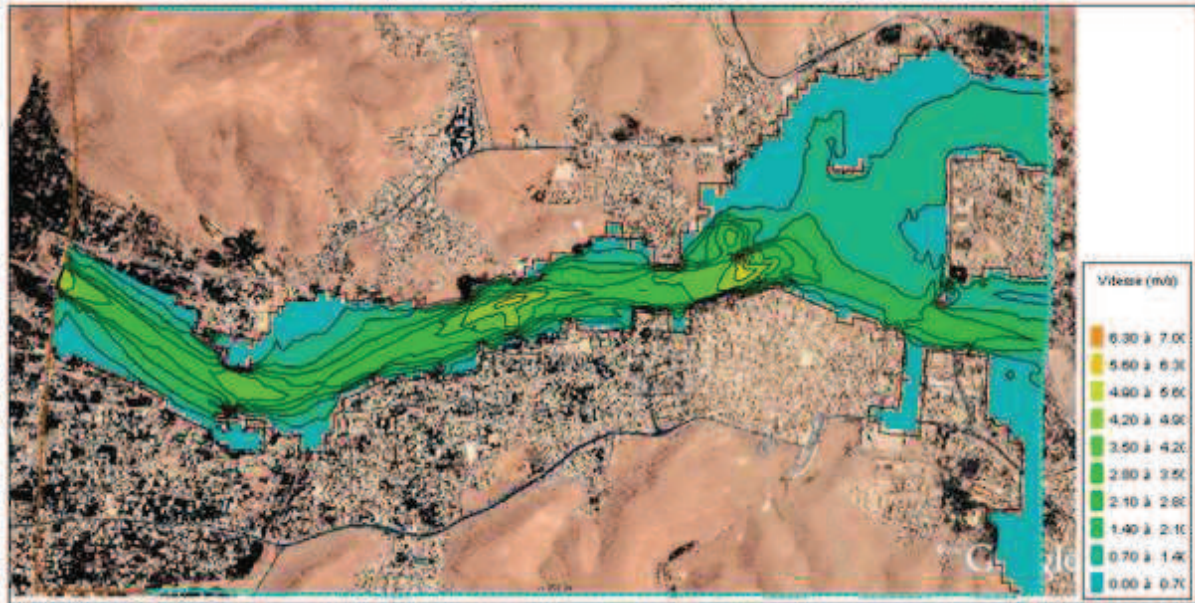


Figure V.24 : Vitesse d'écoulement t = 32835s

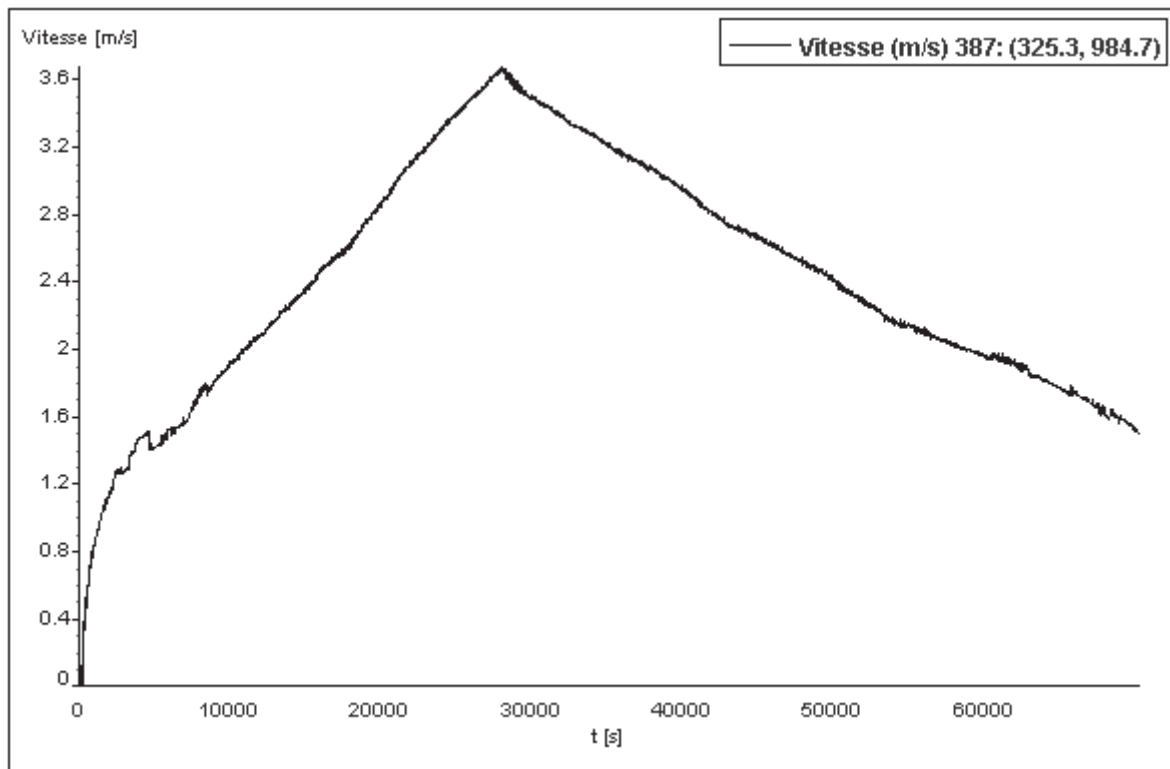
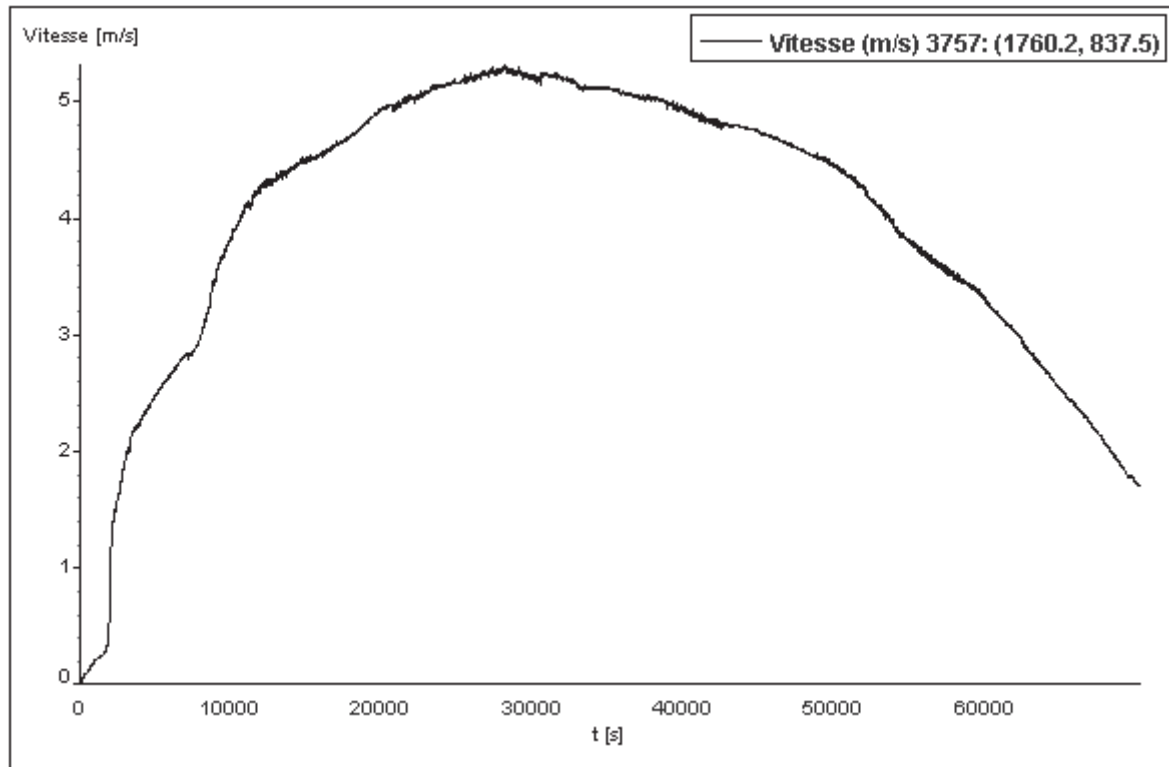
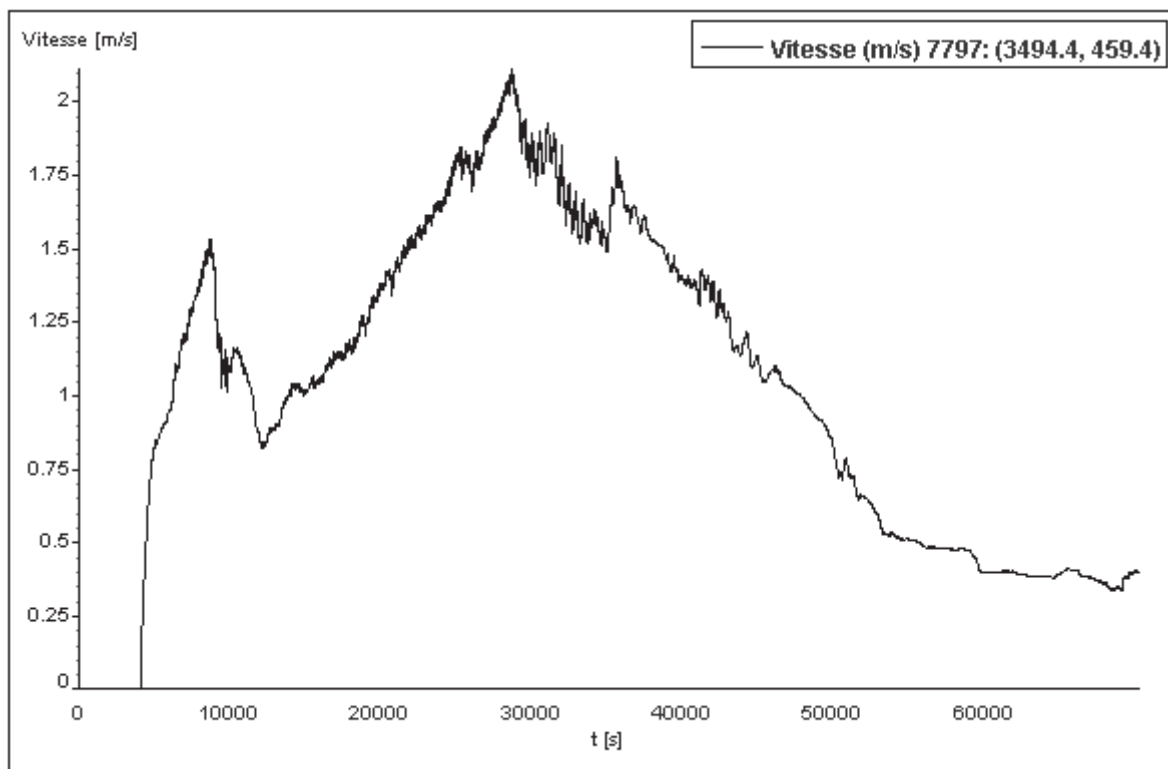


Figure V.25 : Evolution de la vitesse d'écoulement au niveau de la section I



*Figure V.26* : Evolution de la vitesse d'écoulement au niveau de la section 2



*Figure V.27* : Evolution de la vitesse d'écoulement au niveau de la section 3

## 8.2. Partie sédimentaire

### 8.2.1. Evolution du taux dépôt/érosion

L'évolution de taux d'érosion/dépôt passe par trois étapes :

#### De 0 à 15000s

L'érosion se localise tout au long du lit. Cette érosion est caractérisée par un taux de 162mm/h au milieu du fond, tandis que pour les côtés le taux diminue et varie entre 30 et 100mm/h (figure V.28).

Concernant le dépôt, on constate que les zones de dépôt se trouvent au niveau des berges avec un taux qui peut atteindre 1000 mm/h (figure V.29).

#### De 15000s à 50000s

Cette partie est caractérisée comme nous l'avons vu précédemment par la formation d'un second cours d'eau autour de la partie aval de la rive droite. Cette trajectoire secondaire provoque l'érosion d'une partie du sol avec un taux qui atteint 160mm/h (figure V.30).

Pour le dépôt, en plus des berges où les sédiments se déposent dans certains endroits, les matériaux solides transportés par l'écoulement se déposent localement aux alentours des zones inondées (figure V.31).

#### De 50000s à 70200s

A partir de 50000 s, Le taux d'érosion devient de plus en plus faible, l'érosion se fait pratiquement au niveau du lit de l'oued en amont. Alors que pour les zones de dépôt en plus de leur présence au niveau des rives inondées elles s'étendent jusqu'au lit de l'oued dans la partie aval avec un taux qui varie entre 100 et 900 mm/h (figure V.32 et V.33).



Figure V.28 : Taux d'érosion pour  $t = 11250$  s



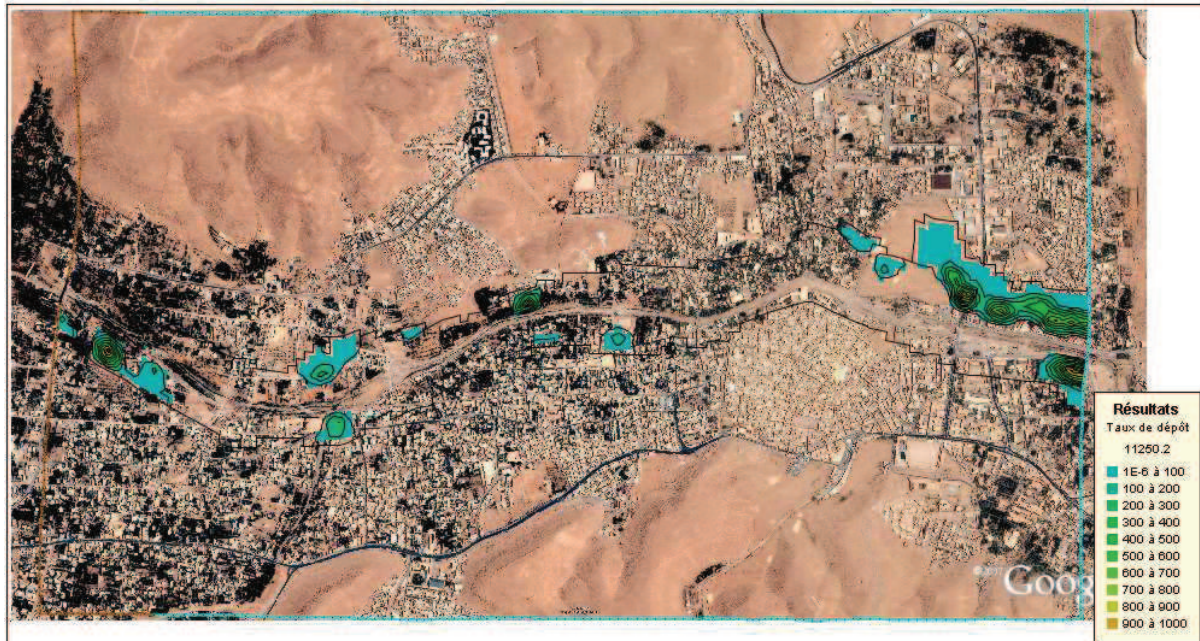


Figure V.29 : Taux de dépôt pour t = 11250 s

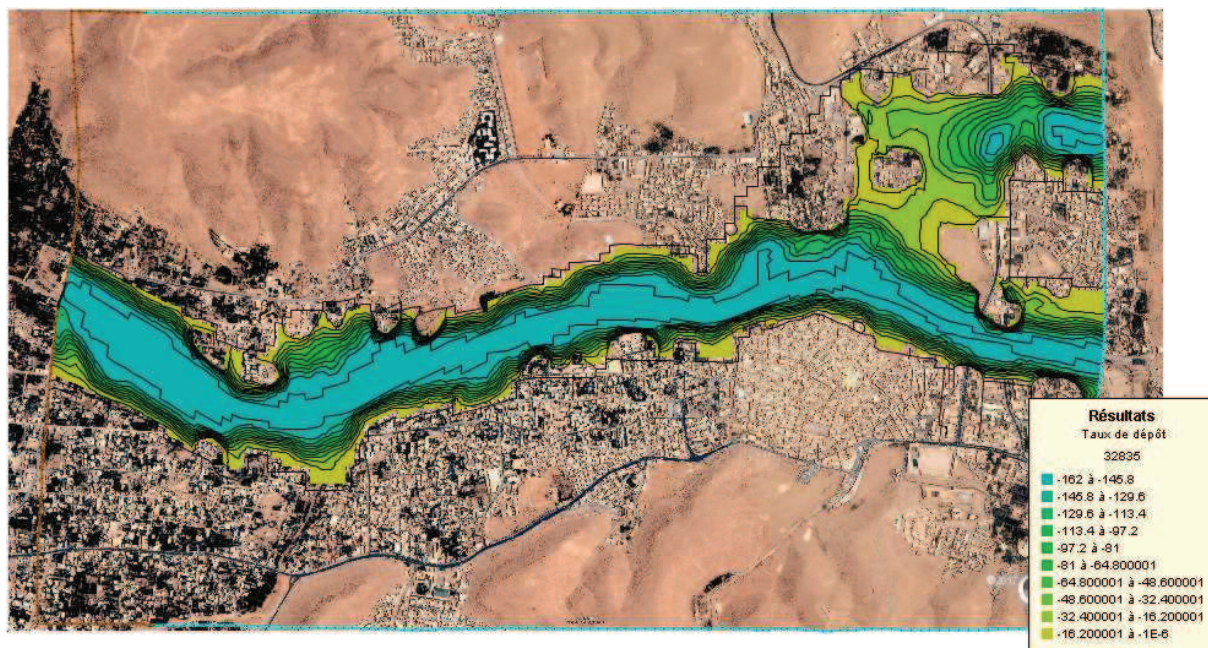


Figure V.30: Taux d'érosion pour t = 32835s

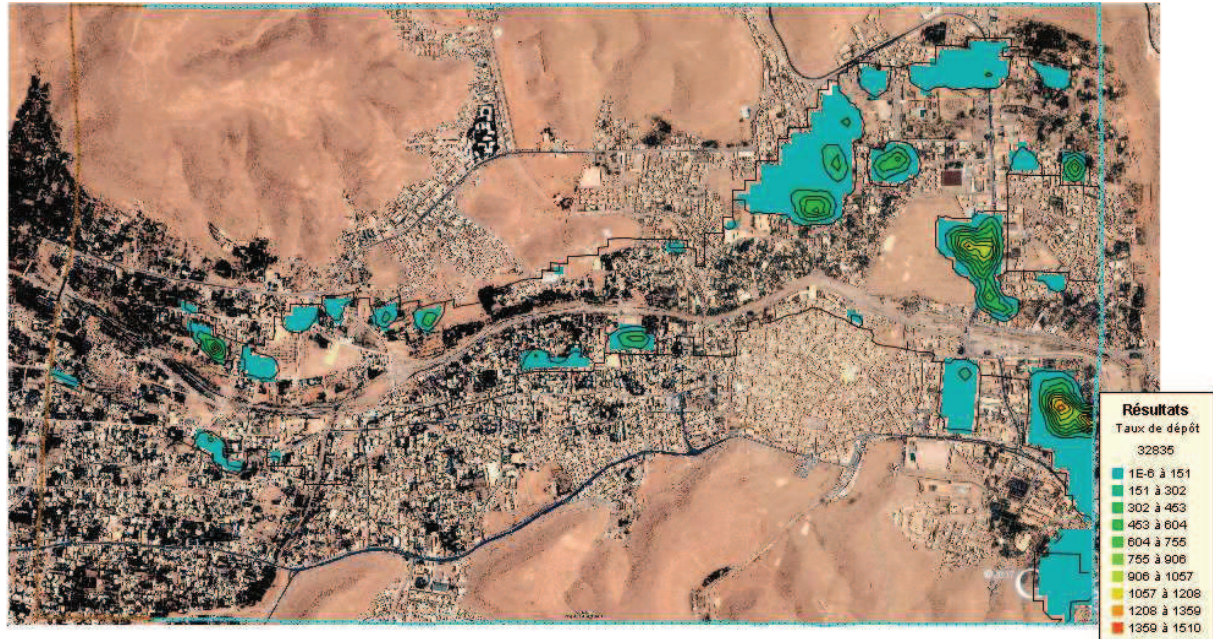


Figure V.31 : Taux de dépôt pour  $t = 32835$  s



Figure V.32 : Taux d'érosion pour  $t = 65895$ s

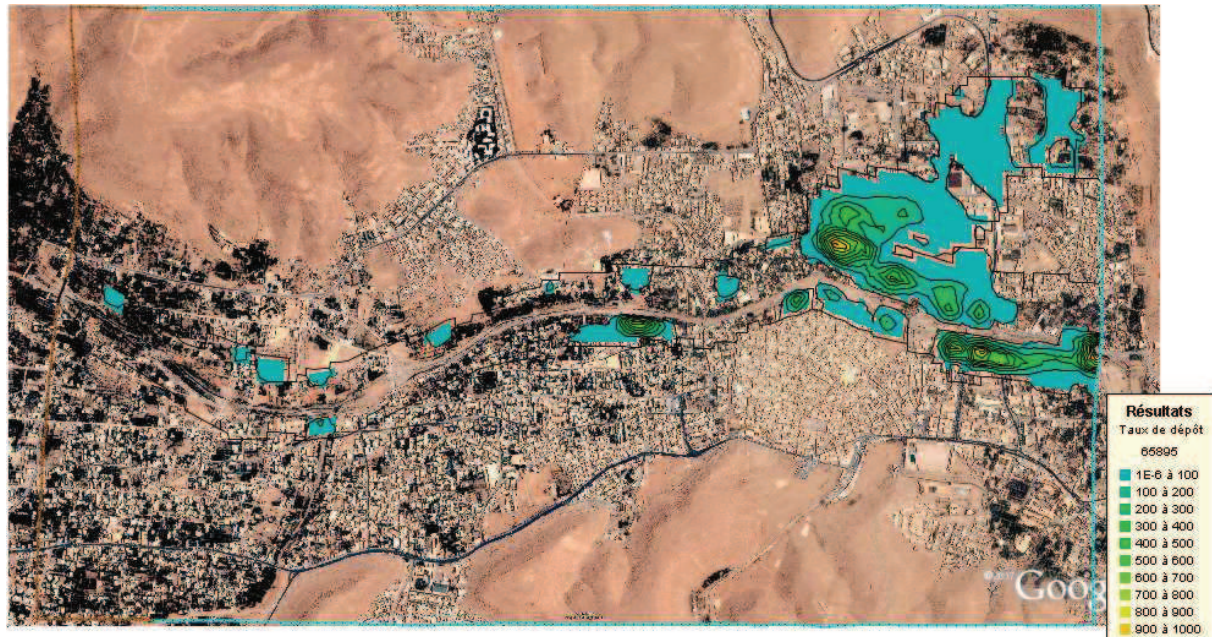


Figure V.33 : Taux de dépôt pour  $t = 65895s$

### 8.2.2. Evolution de la concentration

Dans une étude de transport solide et surtout pour la suspension, l'observation et l'analyse de l'évolution de la concentration est primordiale, car la concentration est un paramètre important de l'équation de la convection-diffusion utilisée pour le calcul. En effet, une faible concentration favorise l'érosion, de fait que dans ce cas la concentration d'équilibre n'est pas atteinte et l'eau présente une capacité de transport des sédiments. Par contre, dans le cas où la concentration est importante, l'eau sera saturée en matériaux en suspension ce qui provoque la sédimentation.

Dans notre cas, la concentration est pratiquement constante (figure V.35, V.36 et V.37), on a juste une augmentation brusque au début de l'écoulement, puis la concentration se stabilise. Concernant sa répartition, on constate qu'elle augmente un peu en allant de l'amont vers l'aval, car les sédiments arrachés en amont ont été transportés ce qui augmente leur concentration en aval (figure V.36).

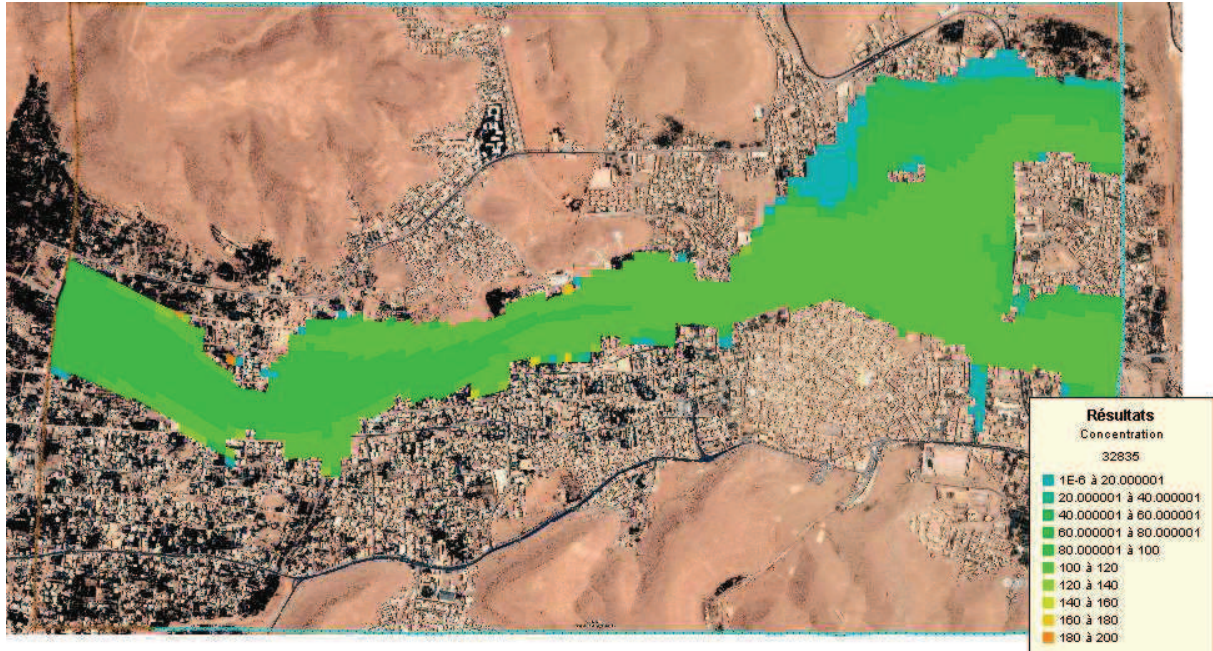


Figure V.34 : Concentration de l'eau pour t = 32835 s

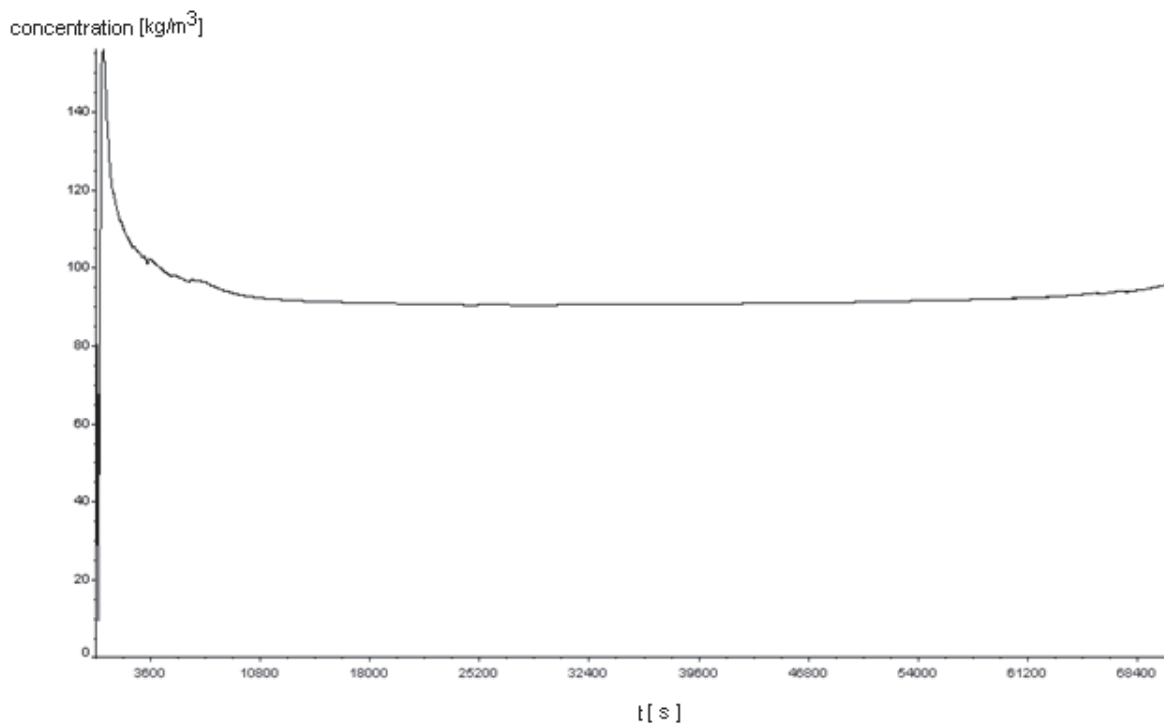
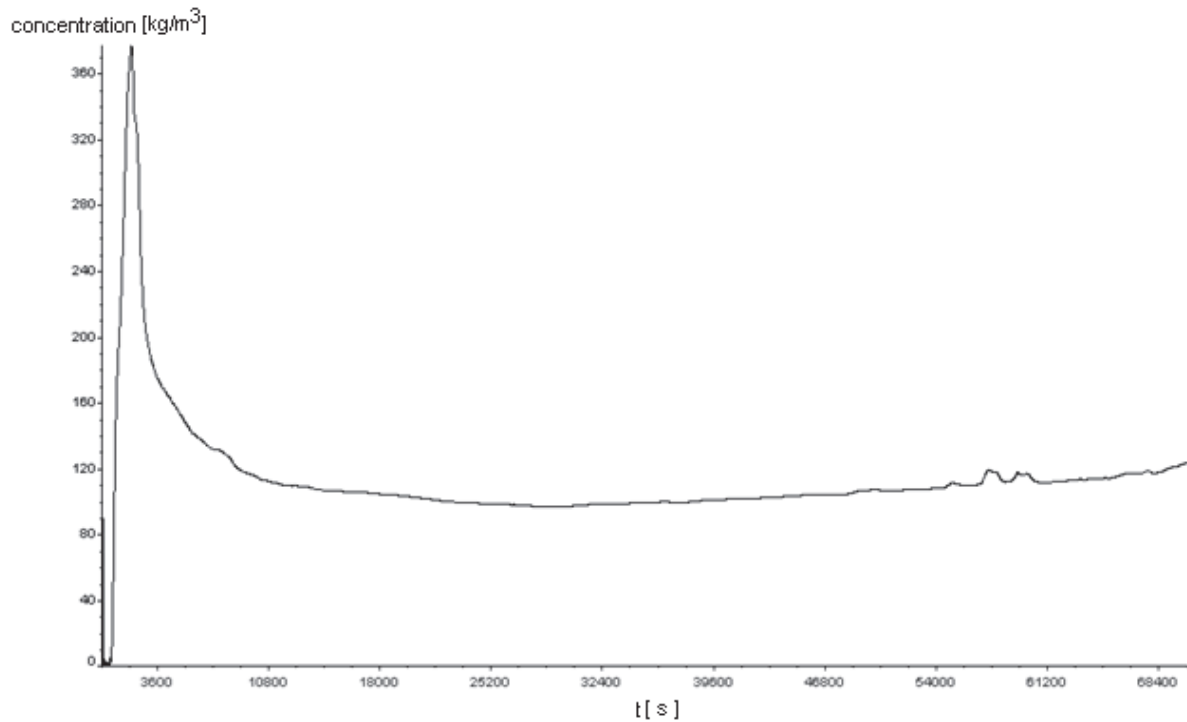
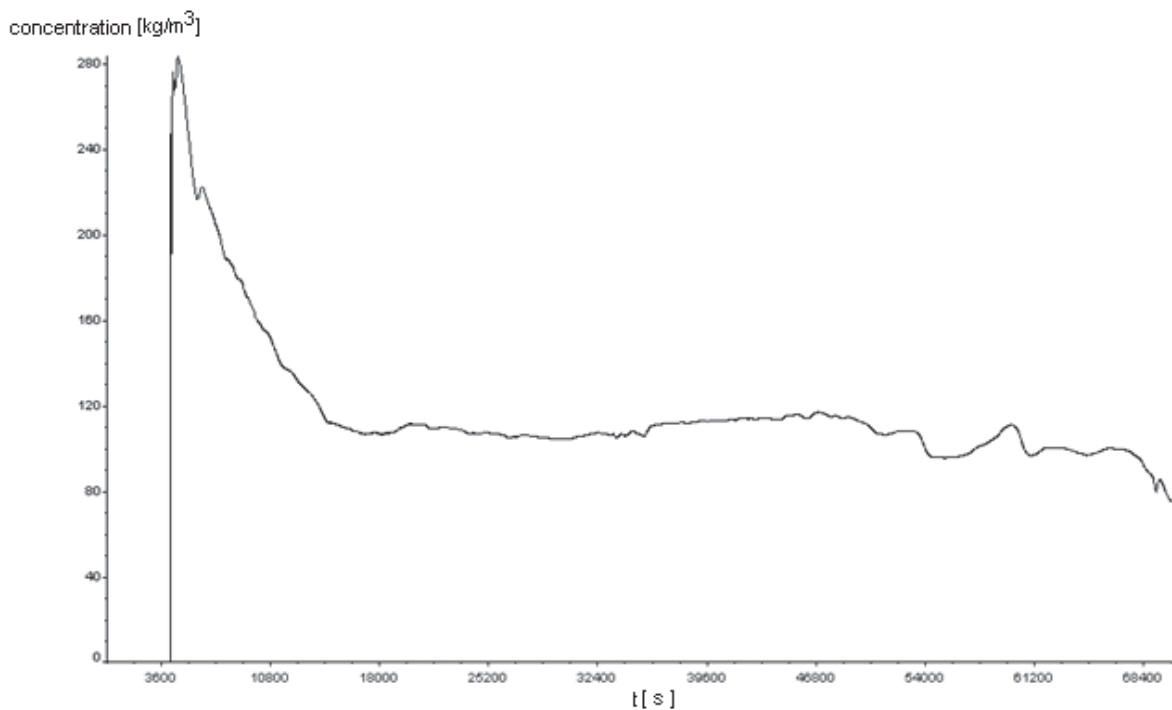


Figure V.35 : Evolution de la concentration en sédiments au niveau de la section 1



**Figure V.36 :** Evolution de la concentration en sédiments au niveau de la section 2



**Figure V.37 :** Evolution de la concentration en sédiments au niveau de la section 3

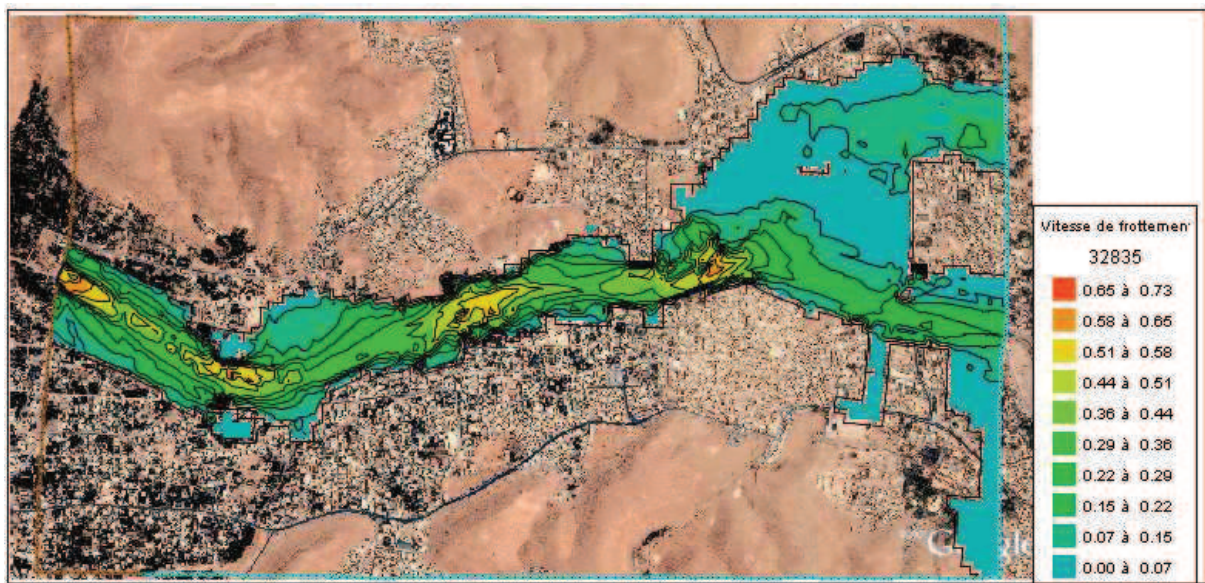
### 8.2.3. Vitesse de frottement de fond

La vitesse de frottement de fond c'est une autre manière d'exprimer les frottements de fond, elle intervient directement dans le calcul du taux d'érosion et de la sédimentation. De plus sa valeur nous permet d'évaluer le degré de l'érosion ainsi que le type de transport.

La répartition de la vitesse de frottement, montre qu'elle est importante dans certains endroits du lit de l'oued, et elle diminue en allant vers les bords de l'écoulement (figure V.38). En effet, la vitesse de frottement est proportionnelle à la vitesse d'écoulement et à la pente, donc dans les endroits où la pente et la vitesse sont grandes, la vitesse de frottement sera grande, c'est le cas du milieu du lit de l'oued où la vitesse est maximum.

L'évolution de la vitesse de frottement en fonction du temps est présentée par les graphes (figure V.39, V.40 et V.41), calculés au niveau des sections 1, 2 et 3 indiquées dans la figure (V.16). L'évolution est fortement liée à la vitesse d'écoulement (courbes de la vitesse d'écoulement).

La courbe de la vitesse de frottement au niveau de la section 3 diffère des autres courbes, à cause de la perturbation et de l'instabilité d'écoulement en aval.



**Figure V.38 :** Vitesse de frottement de fond en  $[m/s^{1/2}]$  pour  $t = 32835s$ .

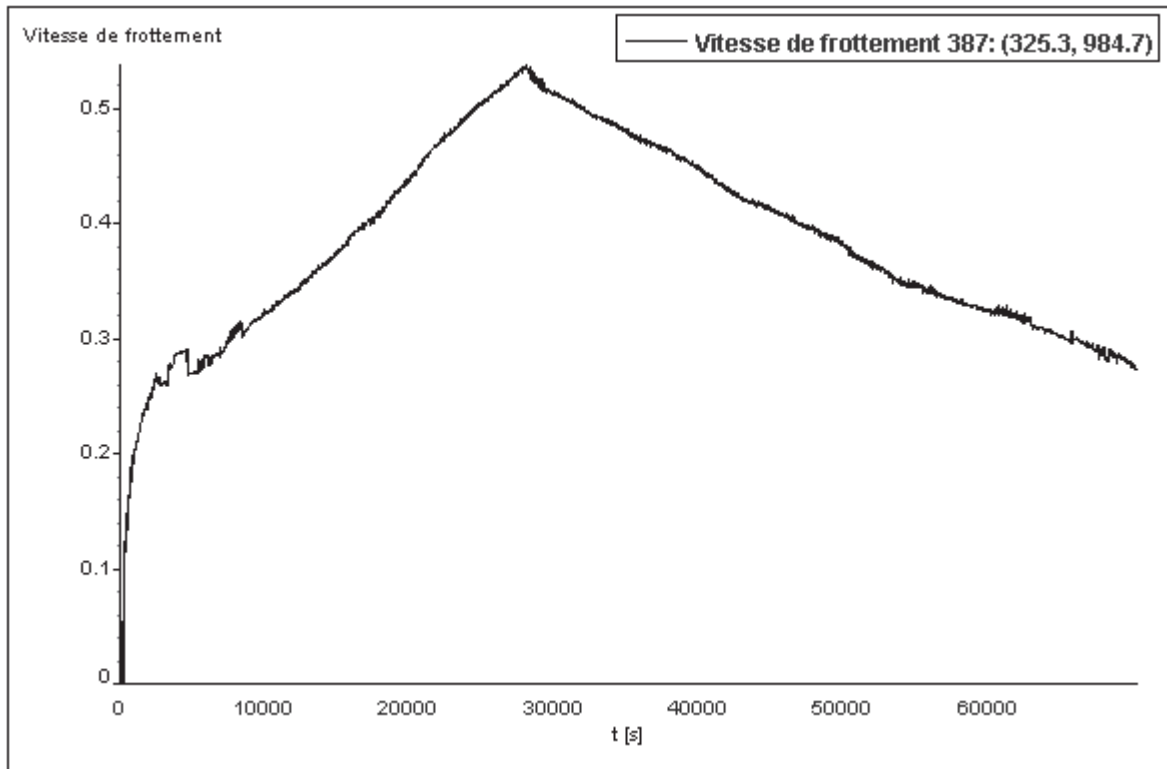


Figure V.39 : Evolution de la vitesse de frottement au niveau de la section 1

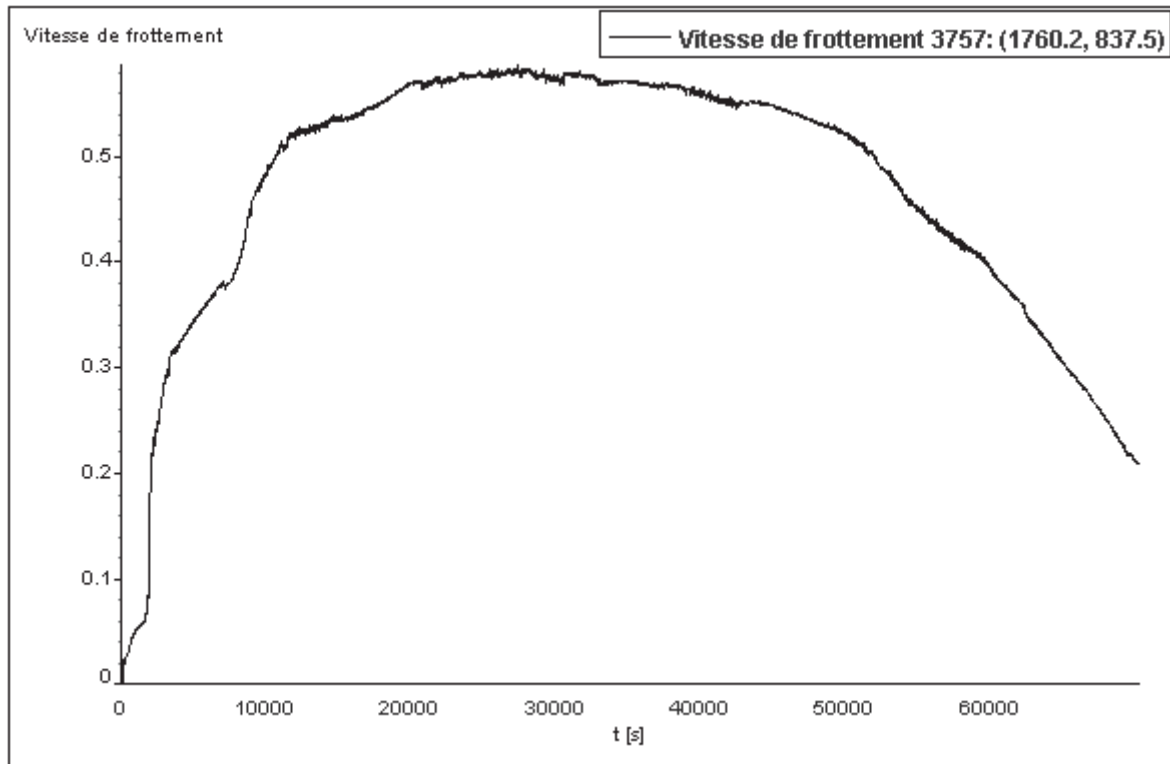
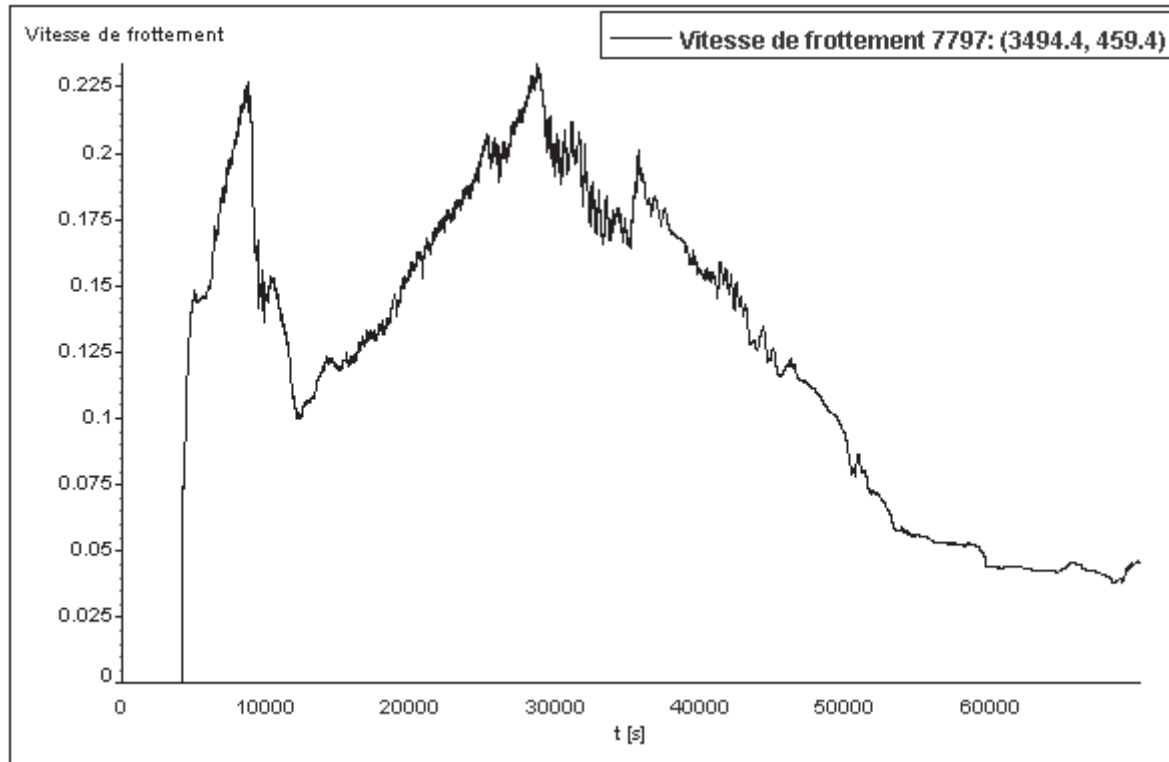


Figure V.40 : Evolution de la vitesse de frottement au niveau de la section 2



**Figure V.41 :** Evolution de la vitesse de frottement au niveau de la section 3

#### 8.2.4. Evolution de la bathymétrie

L'arrachement et la sédimentation des particules est bien sûr modifié la bathymétrie de l'oued et des zones inondées. À cet effet, nous présentons les deux cartes bathymétriques générées par le Rubar20TS au début et à la fin de la crue pour faire comparaison avant et après la crue, et montrer la modification de la bathymétrie engendrée par la crue.

La comparaison donc entre ces deux cartes nous permet de localiser les zones érodées et les zones ensablées (envasées) à la fin de la crue ; les graphes ci-dessous montrent l'évolution de la bathymétrie de ces zones en fonction du temps,

**Zones érodées :** se localisent au niveau du lit en particulier en amont (où le sol arraché a atteint 3 m d'épaisseur dans certains endroits), ainsi que dans les zones où le débit d'écoulement est important. Cette étude nous a permis aussi de délimiter les zones à risque par rapport à l'érosion, ces zones se trouvent généralement au niveau des berges, là où l'érosion du sol risque d'endommager les ouvrages implantés, tel que : les maisons, les ponts... etc. Aussi, on a pu définir les zones sensibles (figure V.46).

**Zones envasées :** se localisent au niveau de l'extrémité de la rive droite aval, où la quantité de vase a atteint 1,2 m d'épaisseur.



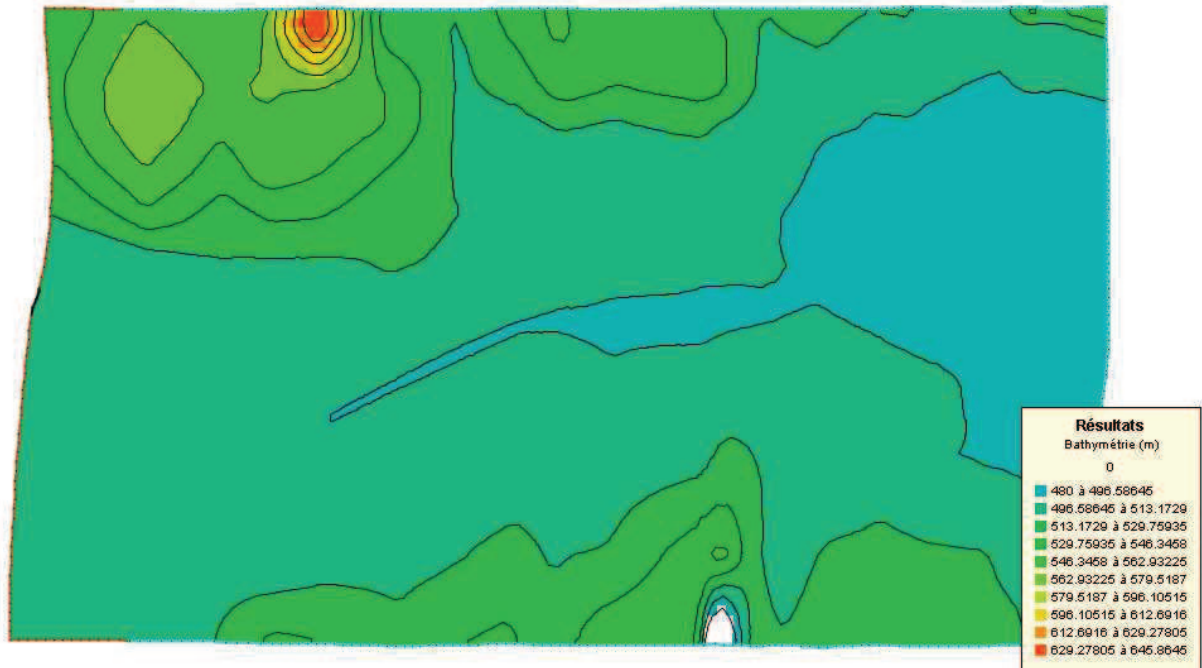


Figure V.42 : Bathymétrie avant la crue

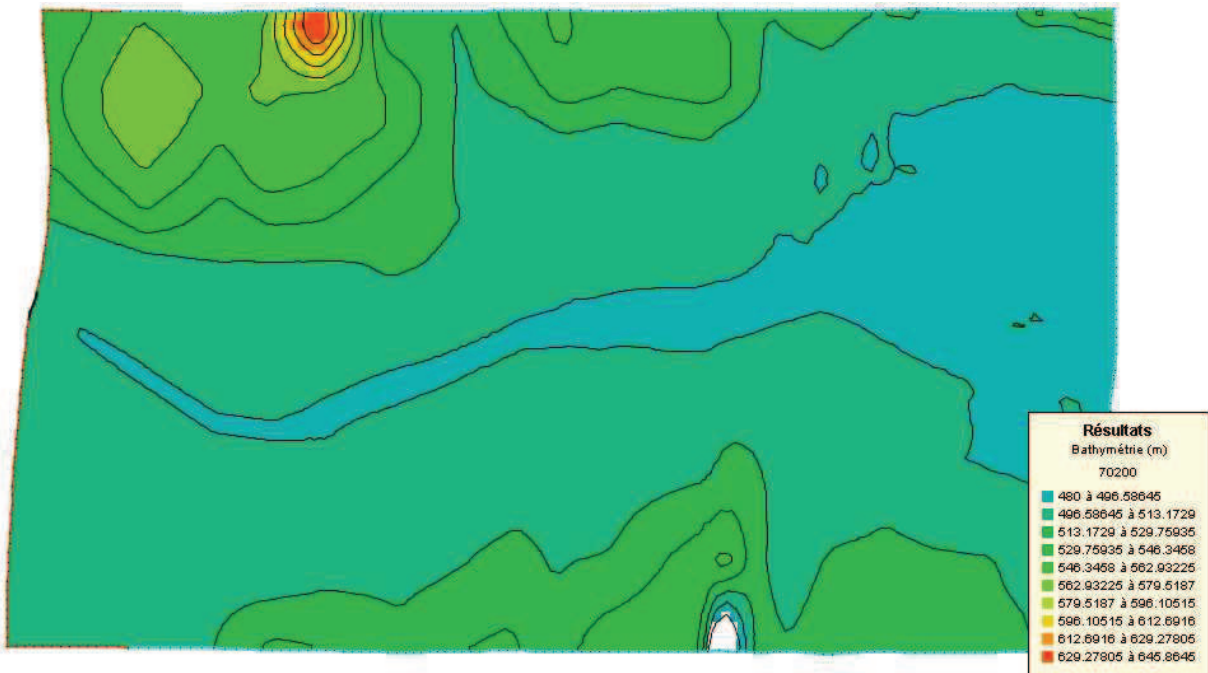
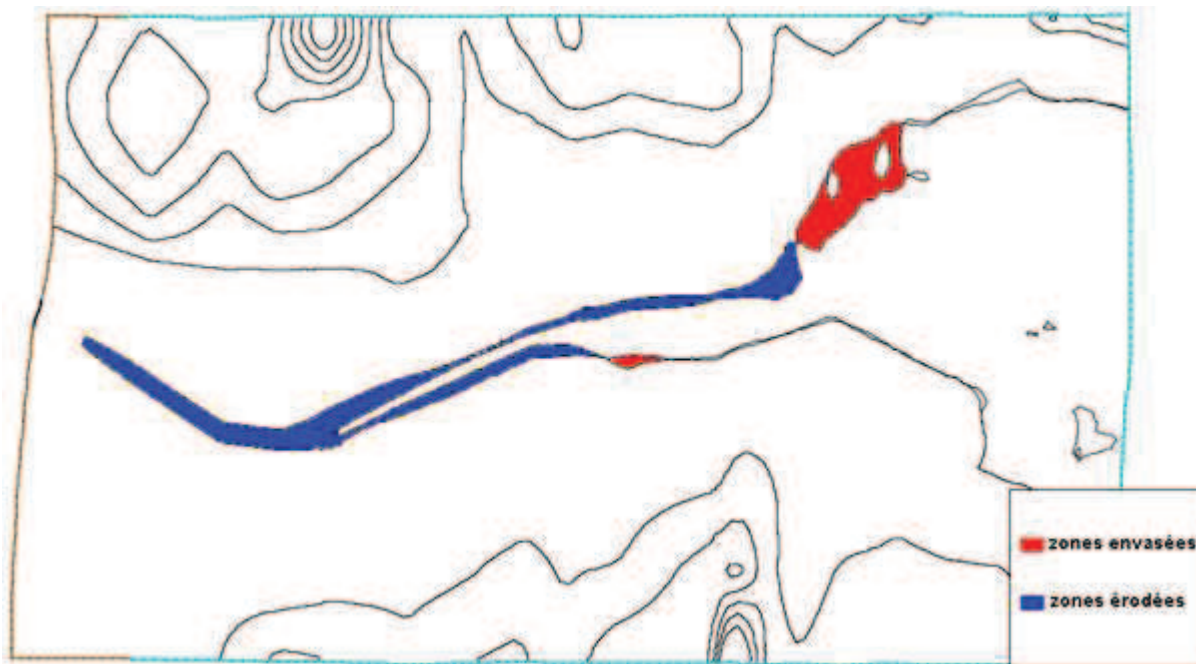


Figure V.43 : Bathymétrie après la crue



*Figure V.44* : Délimitation des zones sensibles à l'érosion et au dépôt



*Figure V.45* : Projection des zones sensibles sur la carte de la ville

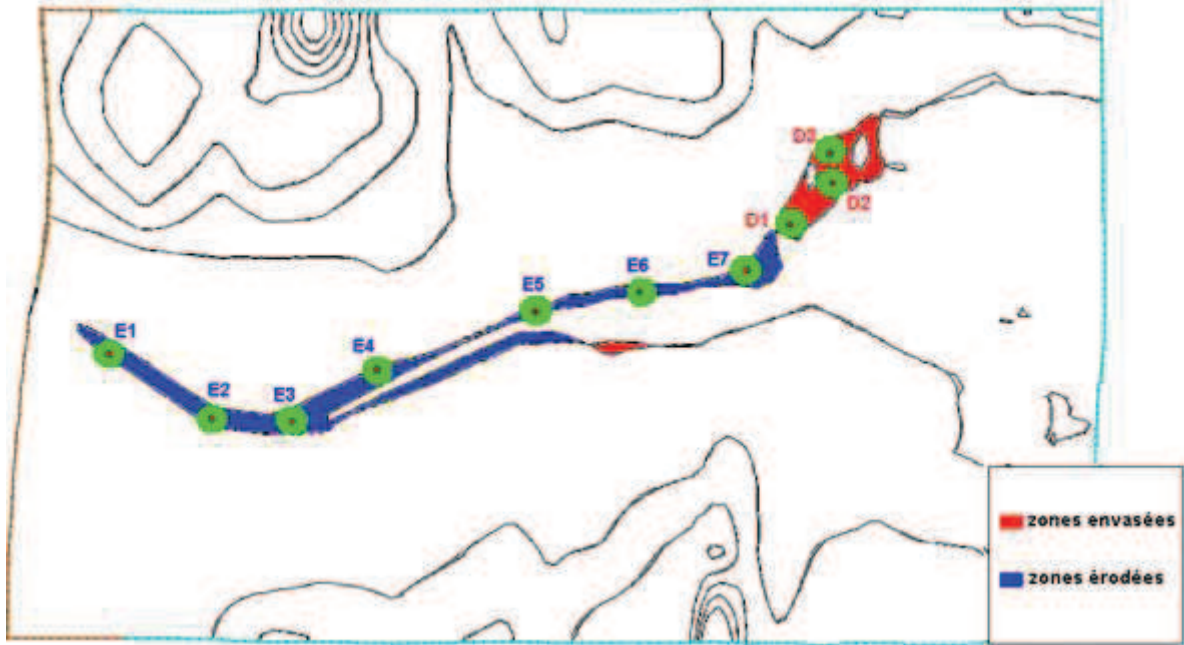


Figure V.46 : Répartition des points de calcul de l'évolution du fond pour les zones sensibles

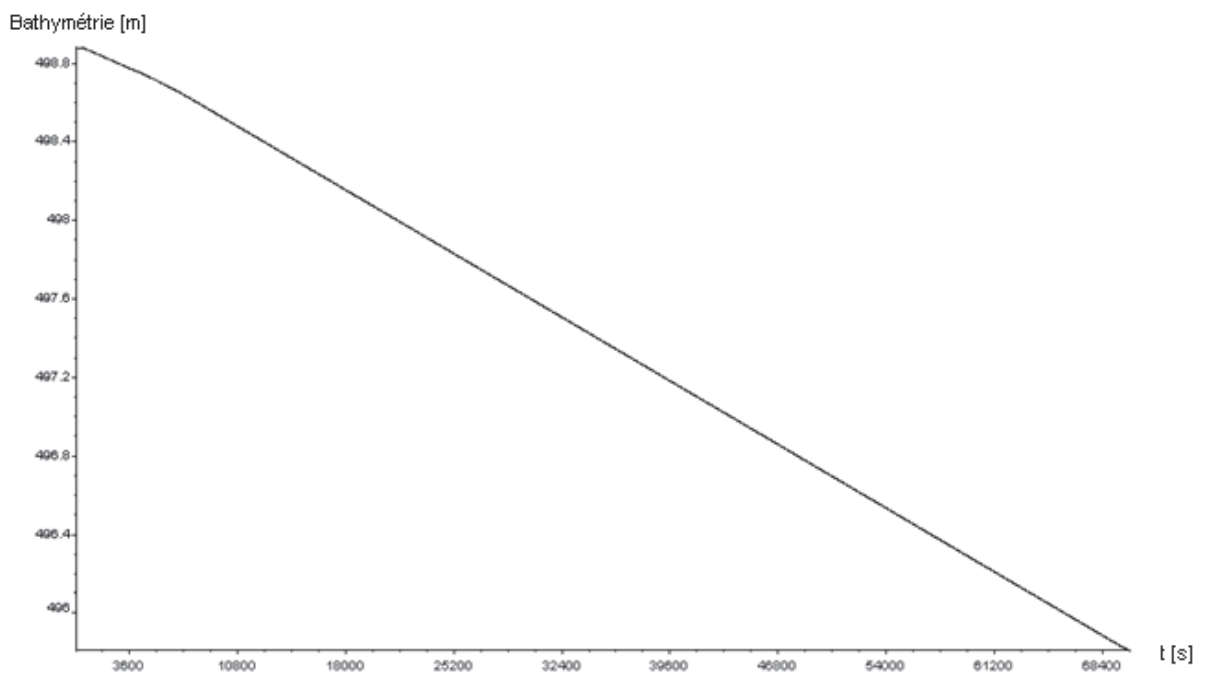


Figure V.47 : Évolution de la bathymétrie au niveau de E1

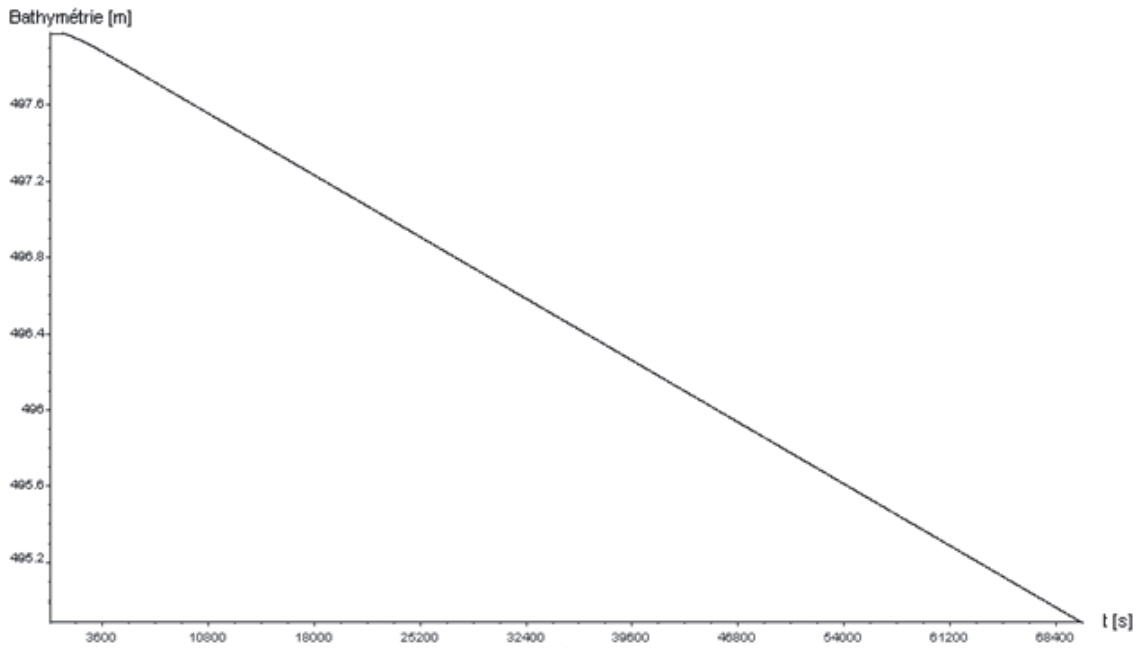


Figure V.48 : Évolution de la bathymétrie au niveau de E2

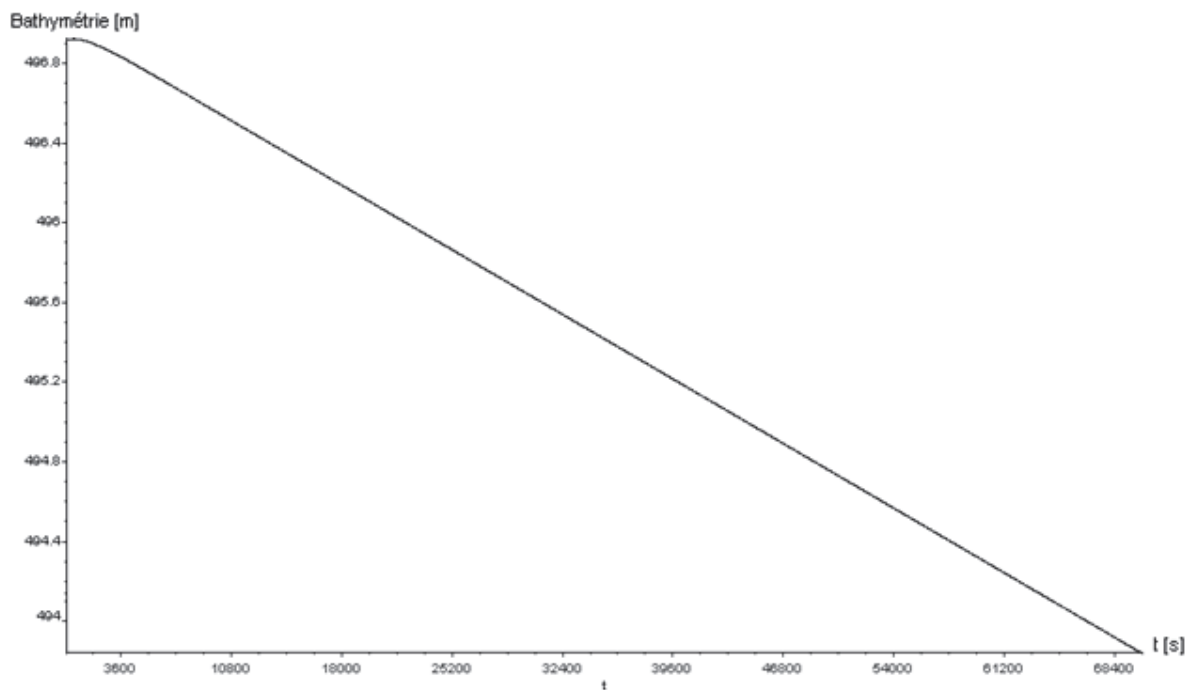


Figure V.49 : Évolution de la bathymétrie au niveau de E3

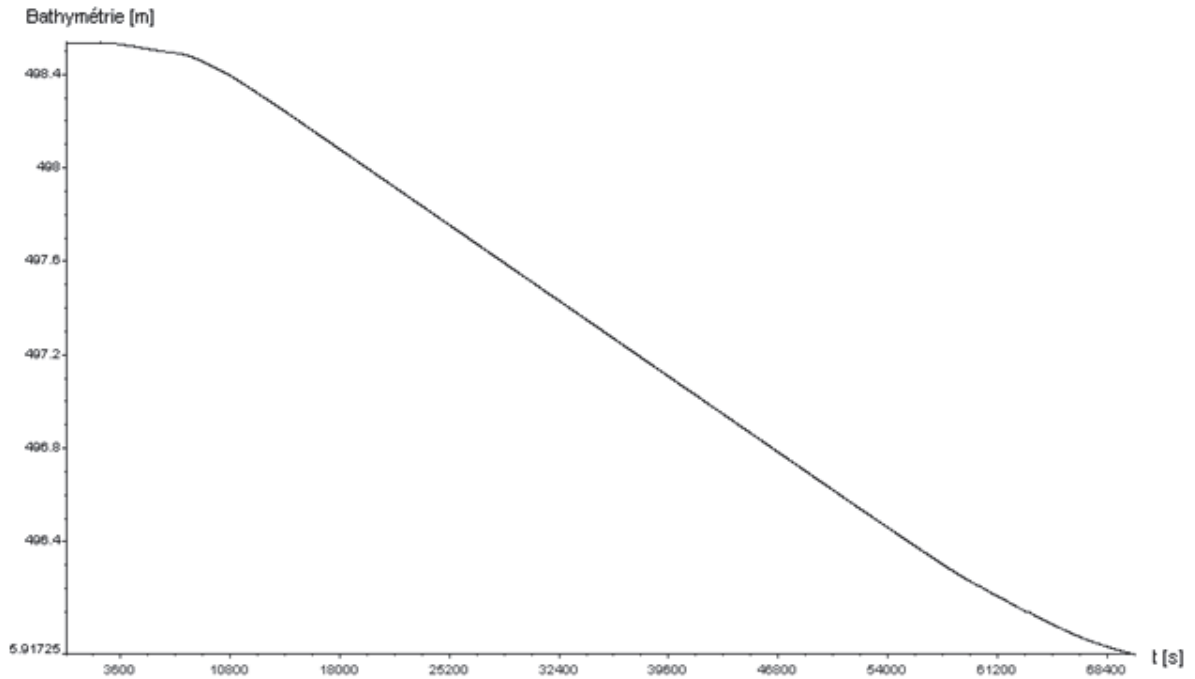


Figure V.50 : Évolution de la bathymétrie au niveau de E4

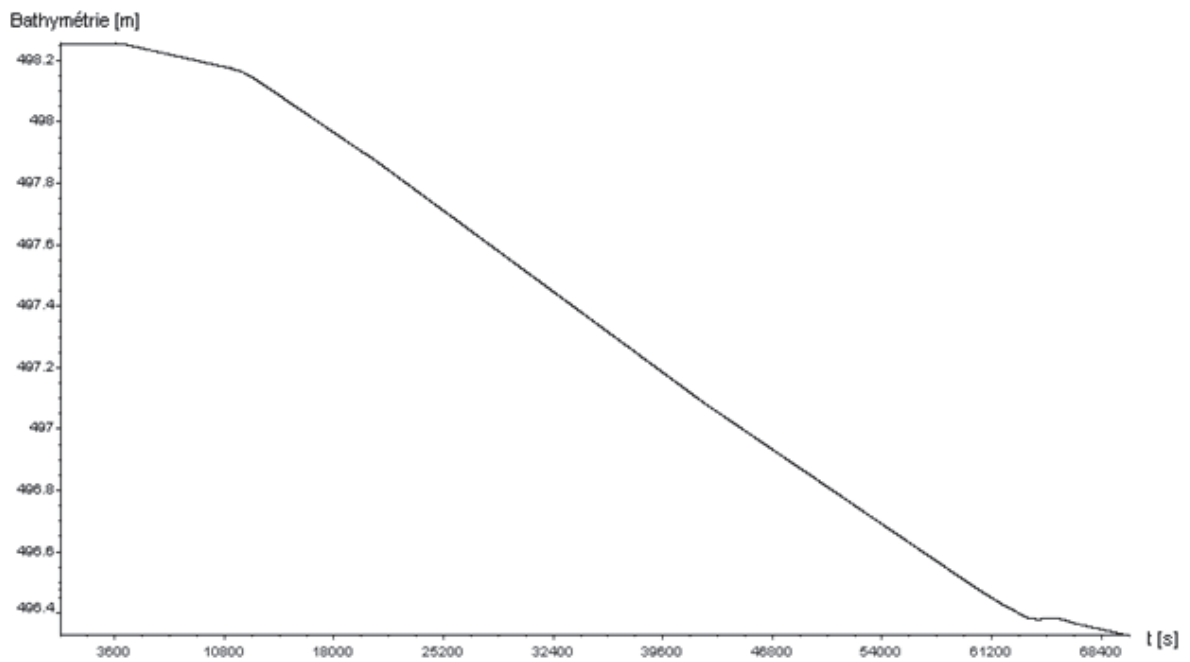
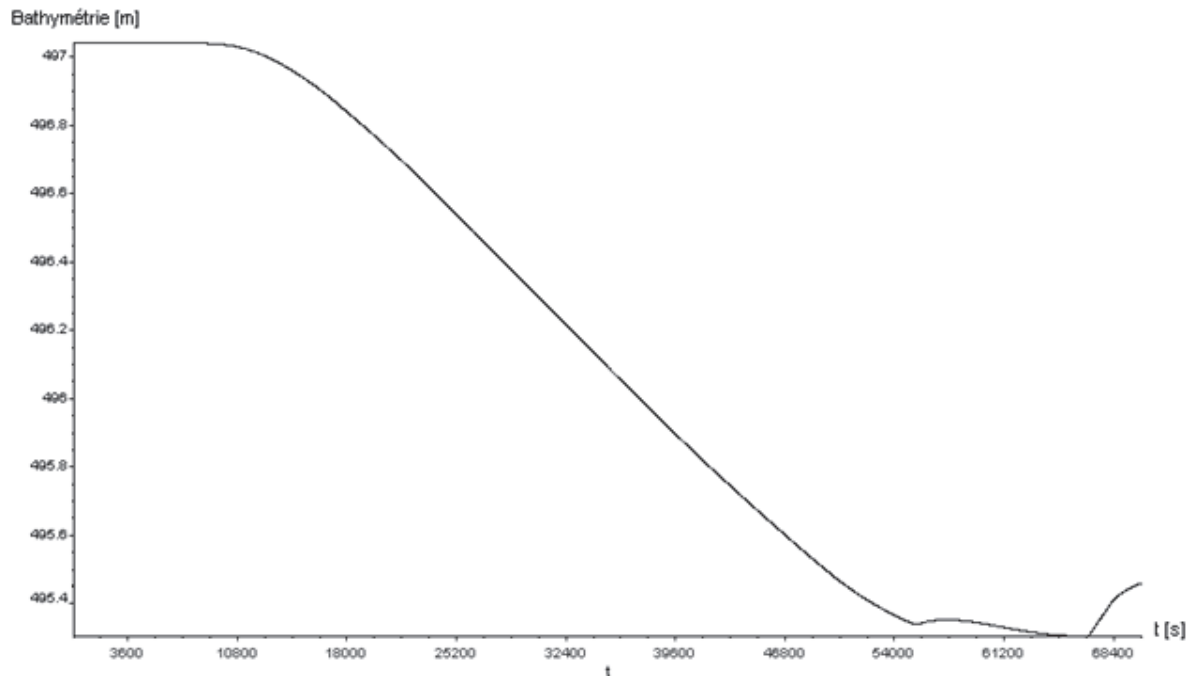
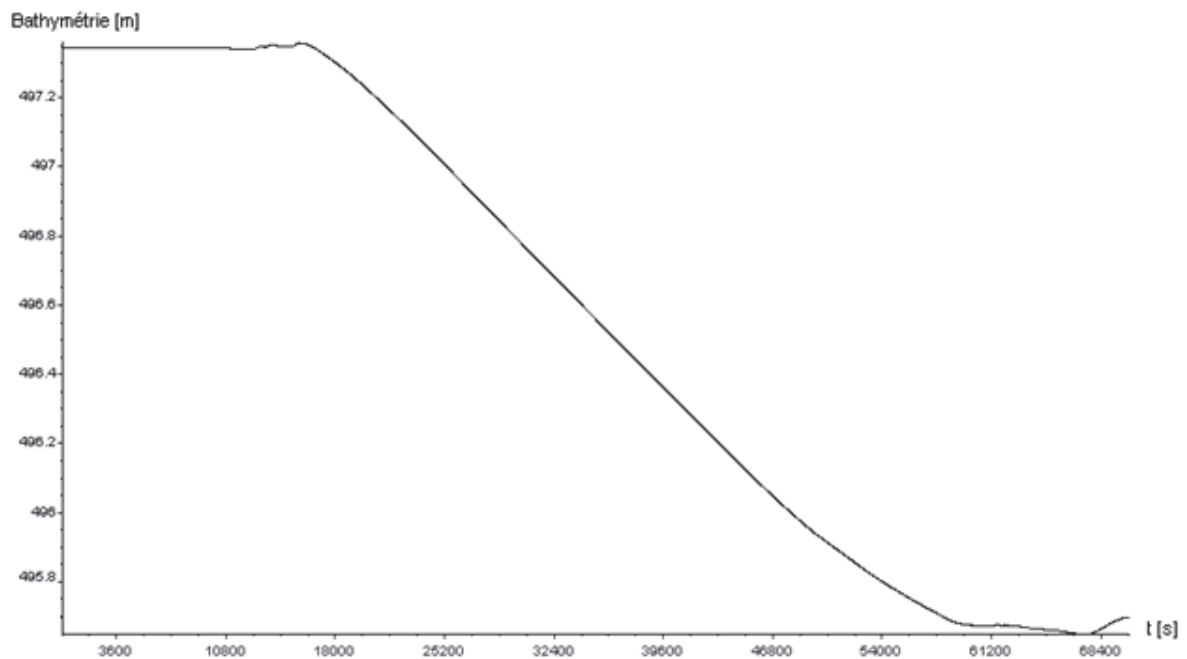


Figure V.51 : Évolution de la bathymétrie au niveau de E5



*Figure V.52 : Évolution de la bathymétrie au niveau de E6*



*Figure V.53 : Évolution de la bathymétrie au niveau de E7*

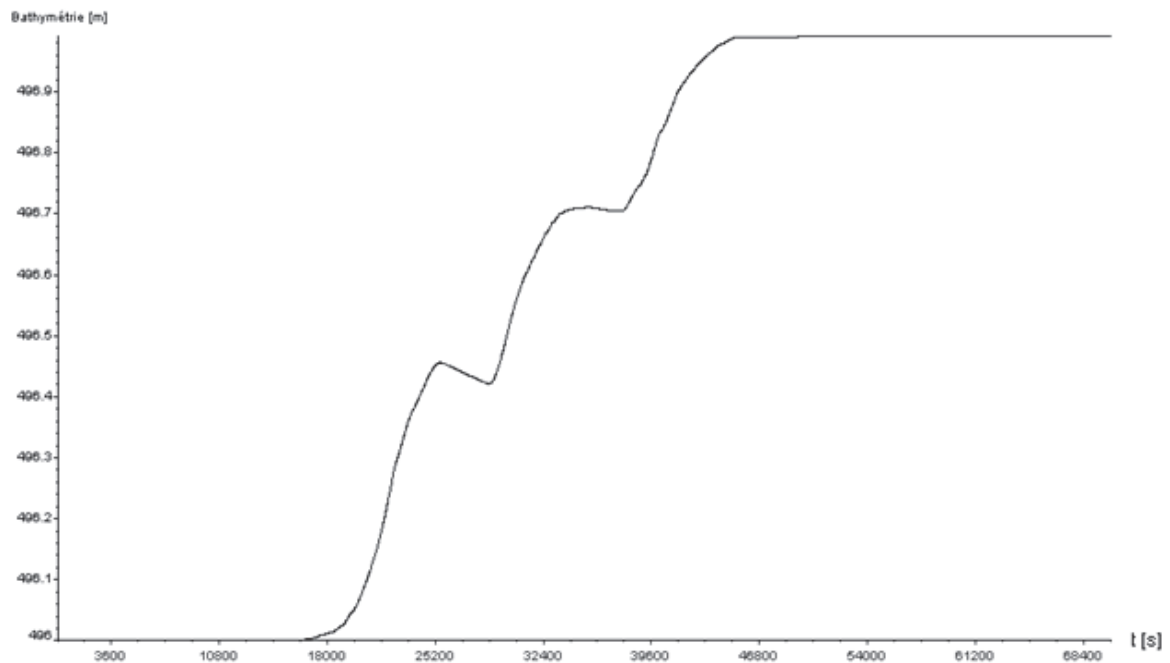


Figure V.54 : Evolution de la bathymétrie au niveau de D1

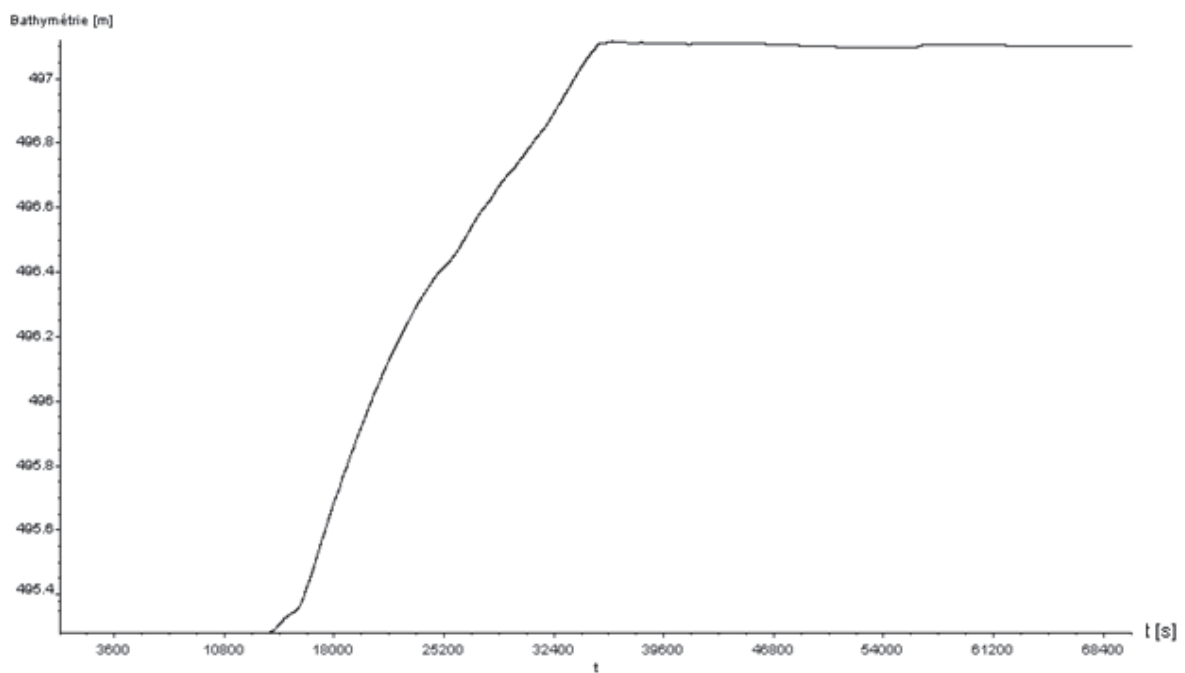
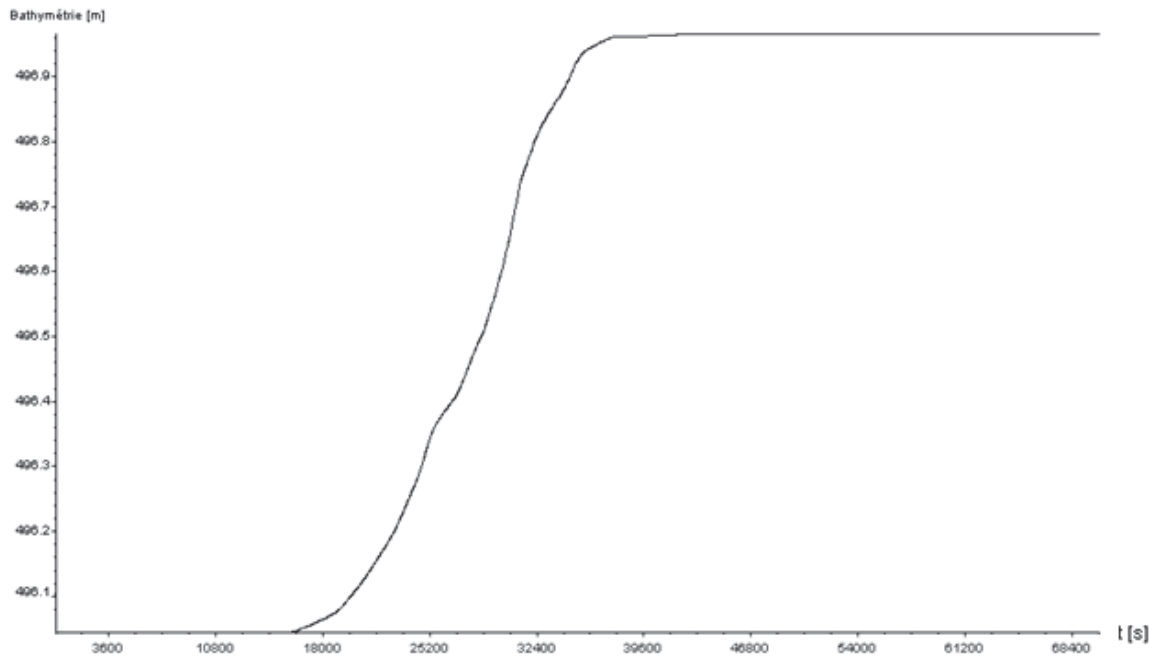


Figure V.55 : Evolution de la bathymétrie au niveau de D2



**Figure V. 56 :** Évolution de la bathymétrie au niveau de D3

## CONCLUSION

On constate à travers cette simulation, que la ville de Ghardaïa a connu de fortes manifestations de transport solide lors de la crue d'Octobre 2008, ceci est dû en premier lieu à la particularité de la région, de point de vue, climat, morphologie, nature de sol...etc.

En ce qui concerne la zone d'études précisément, l'érosion se localise au niveau du lit de l'oued M'zab, et elle a l'épaisseur de creusement est atteint des valeurs exceptionnelles, vue l'ampleur de la crue d'une part, et de la nature de sol d'autre part.

Par contre, l'envasement a touché les zones inondées, les bords de l'oued et les zones inondées de la ville, de faite que la charge solide contenue dans l'oued se déverse sur les bords et elle se dépose dès que la contrainte de cisaillement devient inférieure à la contrainte de sédimentation.

Ces résultats, nous donnent une idée sur l'évolution de transport des sédiments au cours du temps, et délimitent les zones sensibles de la ville par rapport à l'érosion et à la sédimentation, ce qui permet de mieux agir pour protéger ou renforcer ces zones en cas de pareilles crues, surtout que la région présentent une certaine fréquence de répétition, et d'après certains spécialistes ces crues ont tendance à se reproduire chaque décennie.



## **Conclusion Générale**

Nous constatons à travers cette étude que le transport solide se manifeste fortement lors des crues, en particulier pour les zones arides et semi arides où plusieurs facteurs sont réunis pour enclencher et amplifier le phénomène, on cite, par exemple les différentes caractéristiques du sol, la couverture végétale pauvre, qui font que l'eau soit chargée en sédiments lors d'une crue favorisant le dépôt. D'autre part, la morphologie et le régime des précipitations font que les crues soient exceptionnelles et caractérisées par un débit très important favorisant l'érosion. C'est le cas de l'oued M'zab, malgré qu'il se trouve à l'état sec durant la plupart du temps, ses crues fortes et catastrophiques peuvent atteindre les dix mètres de hauteur ; les habitants l'appelaient oued El-Ouahch –le monstre-.

Son caractère particulier favorise le ruissellement de l'eau, et ces crues provoquent d'immenses inondations caractérisées par de fortes charges solides.

La charge solide transportée est véhiculée tout au long de l'oued et dans des endroits de débordement ce qui provoque des déversements des charges solides dans le périmètre urbain.

Les résultats de ce travail montrent l'intérêt de la simulation numérique pour l'évaluation de la vulnérabilité par rapport à l'érosion/dépôts pour les villes exposées à ce risque.

Les deux mécanismes érosion/dépôt qui se présentent à la fois pendant la crue, ont fait le principal objectif de notre étude. Une telle étude de transport solide doit servir à délimiter la répartition des zones d'érosion/dépôt, ainsi que leur évolution dans le temps ce qui permet d'approfondir les connaissances et d'analyser le phénomène. La simulation numérique n'est qu'un moyen qui nous permet de faire cette étude, en reproduisant le scénario pour prévenir un cas dans l'avenir, ou pour étudier un cas déjà existant, et une telle simulation nous permet de tester l'efficacité de divers scénarii de protection, et de trouver un schéma technique cohérent d'aménagement minimisant le cout des travaux.

Enfin, et vue la vulnérabilité de la région de M'zab vis-à-vis les inondations, une protection fiable de la ville est nécessaire contre ce risque naturel majeur, pour cela nous proposons les solutions suivantes :

- L'utilisation de la technologie de prévision pour anticiper les risques liés aux précipitations, tel que les modèles de prévision pluies-débit et les réseaux de radars ;
- Un aménagement en amont du bassin afin de minimiser les risques d'inondation qui menacent la ville de M'zab ;
- l'aménagement de certains rétrécissements qui sont des obstacles d'écoulement ;
- le renforcement des berges par des digues de protection ;
- le reboisement des zones dénudées ;

- Avant chaque saison pluvieuse ; il faut effectuer certains travaux tel que : le curage des charges solides accumulées sur le lit des cours d'eau, le nettoyage des regards du réseau d'assainissement.

## **Perspectives**

La simulation numérique a beaucoup facilité énormément la tâche aux chercheurs hydrauliciens pour bien étudier les différents phénomènes hydrauliques, car elle nous permet d'obtenir des résultats difficile de les obtenir autrement.

Avant de valider l'exploitation d'un code de calcul, il faut d'abord juger sa fiabilité sur le terrain, ce qui nous pousse à avoir des données réelles pour qu'on puisse les comparer avec celles obtenues numériquement, et c'est là d'où vient la difficulté d'une telle simulation vue le manque de données. Pour cela, nous espérons que les services concernés qui s'occupent des différentes mesures feront plus d'efforts pour pouvoir couvrir toutes les régions du pays en quantité et en qualité nécessaire ; cette étape est indispensable pour les études hydrauliques d'une manière générale.

La qualité des données utilisées joue aussi un rôle important dans le calcul numérique, dans notre cas par exemple, pour introduire la topographie de la zone d'études, nous nous sommes basés sur le Google Earth, or l'utilisation d'une carte numérique de terrain donne plus de précision.

Les méthodes utilisées pour combler le manque de données doivent être développées et améliorées, pour avoir des données proches des données réelles, car souvent ces méthodes d'un part exigent certaines conditions d'utilisation, et d'autre part elles sont destinées à des régions qui ne ressemblent pas à notre région d'étude. À cet effet, nous devons développer et employer des méthodes qui correspondent parfaitement à notre zone d'études.

En ce qui concerne le code numérique, outre les données nécessaires, la simulation a besoin d'un matériel numérique performant et puissant pour le bon déroulement du calcul, et pour minimiser le temps de calcul. Une machine numérique puissante est très recommandée dans ce genre de calcul intensif.

Le code Rubar20TS est présenté sous forme d'un ensemble de sous programmes exécutables, nécessitant l'utilisation de certains utilitaires. Ce caractère fait que la manipulation du code soit un peu difficile, chose qui doit obliger le Cemagref à travailler sur cet aspect pour l'améliorer dans les versions à venir.

Pour les paramètres et les données de calculs, que ce soit physiques ou numériques, nous espérons que dans le futur, le code tient compte d'autre facteurs comme par exemple les

différentes classes granulométriques, pour augmenter la précision des résultats obtenus. Concernant les résultats obtenus à la fin de calcul, ça sera bien d'améliorer leurs présentations.

## Références bibliographiques

**Abadie, M. (2000).** « Contribution a l'étude de la pollution particulaire : rôle des parois, rôle de la ventilation ». Thèse de doctorat. Université de la Rochelle, France, 186 pages.

**Abdallah, M. (2005).** « Sur les méthodes de discrétisation numérique de problèmes hyperboliques non linéaires appliquées aux équations de Barré de Saint-Venant pour la modélisation de l'hydraulique en réseau d'assainissement ». Thèse de doctorat. École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur, ULP – ENGEES – SHU, 196 pages.

**Absi, R. & Marchandon, S. (2004).** « Longueur de mélange et diffusion turbulente de sédiments ». VIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, pp 279-287.

**Achite, M. & Meddi, M. (2004).** « Estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest algérien) ». Note méthodologique. Sécheresse n° 4, vol. 15, pp 367-373.

**Afzalimehr, H. & Anctil, F. (2001).** « Vitesse de frottement associée à un écoulement non uniforme et une rugosité relative intermédiaire ». Journal de recherches hydrauliques, vol. 39. pp 181-186.

**Alaoui-M'hammedi, I. (2006-2007).** «La simulation de la propagation des rejets des zones industrielles dans le littoral d'El Jadida ». Exposé. Université Chouaib Doukkali, El Jadida, 50 pages.

**Albergel, J. & Boufaroua, M. & Pepin, Y. (2004).** «Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires en climat semi-aride tunisien ». Institut de recherche pour le développement, 67-75 p.

**Ancey, C. (2009).** « Hydraulique à surface libre. Phénomènes de propagation : ondes et ruptures de barrage. Bases mathématiques, outils de simulations, applications ». Notes de cours. École polytechnique fédérale de Lausanne, 250 pages.

**Antonelli, C. (2004).** « Représentativité des flux de radioactivité mesurés par la station-observatoire du Rhône (Station d'Arles – réseau OPERA) ». Rapport DEI/SESURE n° 2004-15. Institut de Radioprotection et de Sûreté nucléaire, France. 23 pages.

**Araud, Q. & Champredonde, R. (2006-2007)** « Modélisation des Equations de Saint-Venant ». Revue d'hydrodynamique de l'environnement. INP, ENSEEIHT. 26 pages.

**Atelier du Patrimoine du M'Zab (2001).** « Vallée du M'Zab ». Architecture traditionnelle méditerranéenne. 3 pages.

**Bachaoui, B. & Bachaoui, M. & El-harti, A. & Bannari, A. & El-ghmari, A., (2007).** Utilisation de la télédétection et des SIG pour la cartographie des zones à risques d'érosion hydrique dans l'Atlas de la ville de Béni Mellal (centre du Maroc). Revue Télédétection, vol. 7, N°. 1-2-3-4, pp. 393-404.

**Beaume, M-G., (2008).** « Modélisation et simulation numérique directe de l'écoulement d'un fluide complexe ». Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 182pages.

**Baillet, S. (2007).** « Optimisation de forme d'une pompe g'énerique de fond de puits ». Thèse de doctorat. Faculté des sciences et techniques université Henri Poincaré Nancy I, France. 145 pages.

- Balayn, P. (2001).** « Contribution à la modélisation numérique de l'évolution morphologique des cours d'eau aménagés lors des crues ». Thèse de doctorat. Université Claude Bernard-Lyon 1, France. 137 pages.
- Behlouli, L. (2008).** « Crues et inondations en Algérie ». Présentation -ANRH- ministère des ressources en eau. 43 pages.
- Bélangier, E. (2002).** « Assimilation de données variationnelle quadridimensionnelle pour les écoulements turbulents biphasiques en eaux peu profondes ». Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en physique. Université de Montréal. 69 pages.
- Belleudy, Ph., (2001).** « Le transport solide en rivière : lacunes de connaissance et besoins méthodologiques ». Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, l'Institut Polytechnique de Grenoble-France, 75pages.
- Bellier, S. (2008).** « Calibration d'un modèle de routage hydrologique dans le bassin de la Seine ». Rapport de stage. Université Pierre et Marie Curie. 34 pages.
- Benabdesselam, T. & Hammar, Y. (2009).** « Estimation De La Réponse Hydrologique D'un Bassin Versant Urbanisé ». European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.29 No.3 (2009), pp.334-348.
- Benkhaled, A. & Remini, B. (2003).** « Variabilité temporelle de la concentration en sédiments et phénomène d'hystérésis dans le bassin de l'Oued Wahrane (Algérie) », Journal des Sciences Hydrologiques, 48 :2, 243-255 pages.
- Berterreche, L. & Champredonde, R., (2008).** « Dépôt sédimentaire dans la retenue de Luzzone ». INP ENSEEIHT. 20 pages.
- Bessenasse, M. (2004).** « Dépôt des sédiments fins a l'amont d'une retenue ». thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie. 209 pages
- Bessenasse, M. & Kettab, A. & Paquier, A. & Ramez, P. & Galea, G. (2002).** « Simulation numérique de la sédimentation dans les retenues de barrages : cas de la retenue de Zardezas, Algérie ». Revue des sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau 16/(2003) 103-122 p.
- Bigillon, F. (2001).** « Etude du mouvement bidimensionnel d'une particule dans un courant d'eau sur forte pente ». Thèse de doctorat. Université Grenoble 1 – Joseph Fourier, France. 213 pages.
- Blanchet, C. & Morin, E. (1990).** « Les affouillements et la protection des berges dans les cours des rivières à fond mobile ». SOGREAH. Grenoble – France. 30pages.
- Boillat, J-L. & Martinerie, R. & Garcia, J. & De cesare, G., (2008).** « La gestion sédimentaire en milieu alpin ». Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. La houille blanche/n° 04-2008. 122-129 pages.
- Bonneton, P. & Marche, F.** « Modélisation des processus associés à la transformation des vagues en milieu peu profond ». Séminaire Modélisation et Analyse Mathématique et Numérique en Océanographie. 23 pages.
- Bordas, M-P. & Borges, O. (1988).** « Puissance hydraulique et dépôt de sédiments en eaux courantes ». Sediment Budgets (Proceedings of the Porto Alegre Symposium. IAHS Publ. no. 174. 21-33 p.
- Bouanani, A. (2004).** « Hydrologie, transport solide et modélisation étude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie) ». Thèse de doctorat. Université abou bekr Belkaid Tlemcen, Algérie. 246 pages.

**Bouheniche, S-E. (2005).** « Contribution en une approche numérique de la modélisation du système barrage-cours d'eau, transport solide-déposition, cas du barrage de Sidi Mohamed Ben Aouda sur l'Oued Mina. W, Relizane ». Mémoire de magistère. Ecole Nationale Polytechnique, Algérie. 88 pages.

**Boukheir, R. & Girard, M-C. & Khawlie, M. & Abadallah, C. (2001).** « Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens: une revue bibliographique ». Etude et Gestion des sols, Volume 8, 4. 231-245 p.

**Bousdira, K. (2007).** « Contribution à la connaissance de la biodiversité du palmier dattier pour une meilleure gestion et une valorisation de la biomasse : caractérisation morphologique et biochimique des dattes des cultivars les plus connus de la région du Mzab, classification et évaluation de la qualité ». Mémoire de magistère. Université de boumerdes, département de Technologie Alimentaire. 146 pages.

**Bresch, D. & Gisclon, M. & Lin, C.-K. (2008).** « Autour des équations de Saint Venant et équations des lacs ». Exposé. Université de Savoie. 41 pages.

**Brochot, S. (1998).** « Approches globales pour l'estimation de l'érosion torrentielle. Apports des versants et production de sédiments ». Ingénieries – EAT – N° 15. p 61 à 78.

**Buffard, T. & Gallouet, T. & Hérard, J-L. (1998).** « Un schéma simple pour les équations de Saint-Venant ». Revue C.R. Académie des. Sciences, Paris, t. 326, Série I, p. 385-390.

**Caliot, C. (2006).** « Modélisation et simulation de l'émission énergétique et spectrale d'un jet réactif composé de gaz et de particules à haute température issus de la combustion d'un objet pyrotechnique ». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse-France. 183 pages.

**Cambon, J-P. (1990).** « Mesures des débits solides et liquides sur des bassins versants expérimentaux de montagne ». Hydrology in Mountainous Regions. I - Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990). IAHS Publ. no. 193, 1990. 231-238 p.

**Camenen, B. & Pedreros, R. & Dupuis, H. & Howa, H. & Larroudé, P. (2000).** « Modélisation numérique du transport sédimentaire sur une plage sableuse ». v/mes Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Caen, France. 219-228 pages.

**Cemagref. (2009).** « logiciel rubar 20, notice d'emploi ». Département Eaux

Unité de Recherche Hydrologie – Hydraulique. Groupement de Lyon, France. 59 pages.

**Chauchat, J. (2007).** « Contribution à la modélisation diphasique du transport sédimentaire en milieux côtiers et estuariens ». Thèse de doctorat, université de Caen/Basse-Normandie. 211 pages.

**Chauchat, J. & Guillou, S. & Phan, N-V. & Barbry, N. & Nguyen, K-D. (2004).** « Simulation numérique du transport sédimentaire dans l'estuaire de la Seine avec un modèle diphasique 2-DV ». V<sup>IIIèmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne. 419-425 p.

**Conrad, G. & Roche, M-A. (1965).** « Étude stratigraphique et hydrogéologique de l'extrémité méridionale de la Hamada du Guir ». Bull. Soc. géol. de France (7), VII, 1966, p. 695-712.

**Degoutte, G. (2004).** « Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale ». Cours rédigé à l'attention des étudiants de 2ème année du master sciences et technologies de Paris VI, ENGREF, France. 93 pages.

- Delestre, O. (2008).** « Ecriture d'un code C++ pour la simulation en hydrologie ». Stage à l'INRA Orléans. 33 pages.
- Denot, T. & Lang, P. (2000).** « Apports de la modélisation numérique à l'étude de la dynamique hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Rance ». VI<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Caen, France, 147-154 p.
- Despeyroux, A. & Ambari, A. & Ben Richou, A. (2007).** « Interactions hydrodynamiques en fluide non newtonien et conséquences sur le transport de particules sphériques ». 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble- France. 6 pages.
- Djellouli-Tabet, Y. & Sioussiou, R.** « Le bassin versant du M'zab, région méditerranéenne hyperaride (Algérie) : ressources en eau, risques et gestion ». Exposé.
- Doutriaux, E. & Storck, F., (2003).** « La confluence Rhône Isère : exemple d'utilisation d'un modèle physique pour optimiser la gestion d'un aménagement fluvial à buts multiples ». Congrès SHF « Quels modèles physiques pour le XXIème siècle ? », Lyon.
- Dubois, J. & Piroton, M. (2002).** « Génération et transfert des crues extrêmes Le logiciel Faitou ». Communication. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 157 pages.
- Dufresne, M-F-D., (2005).** « Etude expérimentale du transport de particules solides par charriage à forte pente ». Mémoire de DEA, Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg, 97 pages.
- Dufresne, M-F-D. (2008).** « La modélisation 3d du transport solide dans les bassins en assainissement : du pilote expérimental à l'ouvrage réel ». Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur, Strasbourg 1. 223 pages.
- Dupuy, J. (2006).** « Simulation numérique de l'écoulement de pesticide dans un modèle de vigne ». Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.). Québec. 91 pages.
- De-Linares, M., (2007).** « Modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale : validation sur deux sites en Loire et sur l'Arc ». Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble.
- Du-Gardin, B. (2004).** « Simulation numérique de l'impact d'une souille de matériaux marins sur la stabilité du littoral, en suivant les mesures en bassin de Migniot et Viguier (1979) ». VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, France. 323-331 p.
- Eiff, O. (2005).** « Groupe ondes, turbulence et environnement (OTE) ». Rapport scientifique période octobre 2001-octobre 2005. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. 32 pages.
- Elahcene, O. & Remini, B. (2009).** « Corrélation Entre la Concentration en Matières en Suspension et le Débit Liquide Dans le Bassin Versant de Oued Bellah (Algérie) ». European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.26 No.1 (2009), pp.139-146.
- El-Dabaghi, F. & El-Kacimi, A. & Nakhle, B. (2006).** « Simulation de l'onde de crue via un modèle numérique d'eau peu profonde basé sur la méthode des caractéristiques ». Revue scientifique. ARIMA. Volume 5 - 2006, pages 361 à 379.
- FAO. (1992).** « Foresterie en zones arides – Guide à l'intention des techniciens de terrain ». Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. Département de forêts.
- Faure, J-B. (2005).** « Évaluation des incertitudes sur l'estimation d'une surface inondée ». Séminaire Modélisation. Cemagref – HHL Y, France. 14 pages.

- Faure, J-B. (2006).** « Note de présentation du programme MAGE ». CEMAGREF, Groupement de LYON. 5 pages.
- Fournier, F. (1977).** « Estimation des paramètres de l'érosion et des quantités de sédiments dans les bassins fluviaux ou les données sont insuffisantes-relations entre l'érosion et les quantités de sédiments et leurs facteurs climatiques et les caractéristiques du bassin versant et du lit lui-même ». Communication-Bulletin-des Sciences Hydrologiques, XXII, 521-525 p.
- Fournier, F. (1960).** « Débit solide des cours d'eau. Essai d'estimation de la perte en terre subie par l'ensemble du globe terrestre ». Revue scientifique. 19-22 pages.
- Gagliardini, O. (2004).** « Simulation numérique d'un écoulement bidimensionnel de glace polaire présentant une anisotropie induite évolutive ». Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier – Grenoble, France. 184 pages.
- Galea, G. & Ramez, P.** « Bassin de l'Arges : Modélisation 2D des inondations aux confluences de 4 sous-bassins ». Rapport d'avancement. Collaboration avec l'INMH de Bucarest, Projet Européen MOSYM (contrat LIFE). Département gestion des milieux aquatiques. Division Hydrologie – Hydraulique Groupement de Lyon. 60 pages.
- Galea, G. & Ramez, P. & Adler, M-J. & Rotaru, E. (2004).** « Modélisation statistique des apports de MES associés au régime des crues d'un sous-bassin du Timis-Béga (Roumanie) ». Revue des sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau 17/4(2004) 471-488 p.
- Gayraud, S. & Hérouin, E. & Philippe, M. (2001).** « Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : revue bibliographique des mécanismes et des conséquences sur les habitats et les peuplements de macroinvertébrés ». Bull. Fr. Pêche Piscic. (2002) **365/366** : 339-355 p.
- G.E.D.A.T. (2007).** « étude sur le mécanisme de l'ensablement dans la vallée du fleuve Niger ». Rapport final. République du Mali, programme environnemental d'appui à la lutte contre la désertification (projet 8ème acp.mli/021). 144 pages.
- Girard, A. (2006-2007).** « Modélisation et Modification de la vague du Bras de la Loge à Toulouse ». Rapport de Projet de Fin d'Etude. INSA, Toulouse-France. 22 pages.
- Gomi, P. & Sergent, P. & Zhang, B (2004)** « Evolution morphodynamique des souilles d'extraction marines » VIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne. 211-222 pages.
- Hadji, S. (2004).** « Méthode Newton-asymptotique pour la résolution des équations de saint-venant ». VIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne. 401-410 pages.
- Hadjrabia-Melboucy, N. & Bouhadef, M. (2007).** « Carte de prévision des zones de dépôts dans une retenue de barrage ». 18ème Congrès Français de Mécanique. 6 pages.
- Haider, S. (2001).** « Contribution à la modélisation d'une inondation en zone urbanisée. Approche bidimensionnelle par les équations de Saint Venant ». Thèse de doctorat. L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France. 179 pages.
- Halilat, M-T. & Tessier, D. (2000).** « Effet de la salinité et la sodicité sur le comportement hydrique de mélanges sable-argile ». Etude et Gestion des Sols, 7, 2, 2A00. 155-167 p.
- Hassane, M. & Benhafid, M-S. & Ayadi, A. (2006).** « Détermination du coefficient de frottement du fond pour l'action combinée de la houle et du courant d'écoulement ». IX<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest. 61-71 p.



- Henine, H. (2005).** « Interfaçage entre un modèle hydrologique et un modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluant les SIG ». Mémoire de magistère. Ecole Nationale polytechnique, Algérie. 102 pages.
- Hervouet, J-M. & Villaret, C., (2004).** « Simulation numérique des évolutions sédimentaires, importance d'une approche intégrée ». VIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne. 185-193 pages.
- Honorat, M. (2007).** « Assimilation de données lagrangiennes pour la simulation numérique en hydraulique fluviale ». Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Grenoble, France. 138 pages.
- Honorat, M. & Le-Dimet, F-X. & Loukili, Y. & Monnier, J. (2005).** « Dassflow : Un modèle direct et inverse d'écoulements Saint-Venant 2D ». rapport de recherche. Institut national de recherche en informatique et en automatique, France. 19 pages.
- Igouzal, M. & Maslouhi, A., (Avril 2003).** « Contribution à la gestion de la retenue d'un barrage réservoir sur la rivière Sebou (Maroc) à l'aide d'un modèle hydraulique ». Revue des sciences de l'eau- Marco.
- Ildfonse, B. & Allain, C. & Coussot, P. (1997).** « Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable : introduction aux suspensions en géologie et physique ». Cemagref. 254 page.
- Jodeau, M., (2004).** « Etude expérimentale des mécanismes de transport solide par charriage torrentiel ». Mémoire de DEA CEMAGREF Grenoble, division ETNA . 49 pages.
- Kassoul, M. & Abdelgader, A. & Belorgey, M. (1997).** « Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie ». Revue des sciences de l'eau. Rev. Sci. Eau 3(1997) 339-358 p.
- Khentouche, A. (2005).** « Contribution à l'étude quantitative et qualitative de l'érosion dans le bassin versant de oued Nafla (W. de Batna) ». Thèse de magistère. Université El-Hadj-Lakhdar, Batna-Algérie. 113 pages.
- Kim, S-E. & Mathey, F. & Collonge, L., (2001),** « Simulation RANS d'écoulements turbulents en géométries complexes a l'aide des modèles de fermeture au second ordre ».Fluent France Nancy. XV<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique. 7 pages.
- Kouamé, K-F. & Bernier, M. & Gone, D-L. & Saley, M-B. & Lefèbvre, R. & Soro, N. & Koudou, A. (2007).** « Intégration de données géospatiales dans un modèle hydrologique distribué pour la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide de côte d'ivoire (Afrique de l'ouest) ». Revue Télédétection, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 217-235.
- Labiod, C. (2005).** « Écoulement a surface libre sur fond de rugosité inhomogène ». Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Toulouse, France. 131 pages.
- Laborde, J-P., (2000).** « Éléments d'hydrologie de surface ». Université de Nice - Sophia Antipolis. 191 pages.
- Lachouette, D. & Bonelli, S. & Brivois, O. (2007).** « Modélisation de l'érosion par renard hydraulique ». 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux, France. 8 pages.
- Larfi, B. & Remini, B. (2006).** « Le transport solide dans le bassin versant de l'oued Isser impact sur l'envasement du barrage de Beni-Amrane (Algérie) ». Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05, Juin 2006, pp.63-73.
- Laugier, F. & Guyot, G. & Valette, E. & Blancher, B. & Oguic, A. & Lincker, L. (2009).** « Utilisation industrielle de la modélisation hydrodynamique 3d pour l'évaluation de la

débitance d'un évacuateur ». Colloque CFBR-SHF: «Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues», Paris – Laugier et al. – Flow3D. 12 pages.

**Lavelli, A. (2001).** « Modélisation des courants de turbidité dans le lac de Lugano ». Rapport de synthèse. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 17 pages.

**Lipeme-Kouyi, G. (2004).** « Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage ». Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur – Strasbourg I, France. 239 pages.

**Leclerc, M. & Boudreault, P. (1993).** « Méthodologie d'analyse détaillée de la contamination par tronçon du fleuve Saint-Laurent par modélisation numérique : le cas du lac Saint-Pierre ». Revue des sciences de l'eau, 6(1993). 427-452 p.

**Le-dissez, A. (2006).** « Modélisation numérique des écoulements tidaux en milieux peu profonds. Application à l'étude de l'hydrodynamique du bassin d'Arcachon ». Thèse de doctorat. L'université Bordeaux I, France. 195 pages.

**Le fief du tourisme et de l'investissement.** « Wilaya de Ghardaïa ». Agence nationale de développement de l'investissement. Guichet unique décentralisé d'Ouargla.

**Malavoi, J-R. & Souchon, Y. (2001).** « Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques ». Bull. Fr. Pêche Piscic. (2002) 365/366 : 357-372 p.

**Mauriet, S. & Abadie, S. & Mory, M & Lubin, P. (2008).** « Simulation numérique du jet de rive généré par un front d'onde turbulent ». X<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. Sophia Antipolis. 125-134 pages.

**Medejerab, A. (2009).** « Les inondations catastrophiques du mois d'octobre 2008 à Ghardaïa- Algérie ». Geographia Technica. Numéro spécial, 2009. 331-316 p.

**Meguenni, k. & Remini, B. (2008).** « Évaluation du débit solide dans le bassin versant de Harreza (Algérie) ». Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, pp. 7-19.

**Michaud, A. & Beaudin, I. & Deslandes, J. & Bonn, F. & Madramootoo, C-A. (2006).** « Variabilité spatio-temporelle des flux de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets, au sud du Québec ; Partie II : Evaluation de l'effet de scénarios agroenvironnementaux alternatifs à l'aide de SWAT ». AGROSOLUTIONS, VOL 17, N°1, 22-32 p.

**Monnier, J. (2007).** « Modèles numériques directs et inverses d'écoulements de fluides ». Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université de Grenoble, INP - Ensimag, Laboratoire LJK, France. 112 pages.

**Musy, A. (2004).** « Hydrologie générale ». Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. HYDRAM. Laboratoire d'hydrologie et aménagements. Suisse. Chapitre 11. 08 pages.

**Moreil, M. & Danard, P. & Dugas, F., (1991).** « Etude du transport solide du bras David ». Pointe-à- Pitre,

**Noble, P. (2003).** « Méthode de variétés invariantes pour les équations de Saint Venant ». Thèse de doctorat. Université de Paul Sabatier de Toulouse, France. 236 pages.

**Nord, G. (2006).** « Modélisation a base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle ». Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier - Grenoble 1, France. 305 pages.

- Ondulami, M. & Studer, L. (2003).** « Travaux pratiques de méthodes numériques ». INSA, Toulouse, Département de génie mathématique et modélisation. 8 pages.
- Ouarit, H. (2004).** « Réduction des systèmes à paramètres distribués application à la commande optimale robuste des canaux d'irrigation ». Thèse de Doctorat. Institut national polytechnique de Grenoble, France. 198 pages.
- Paquier, A. (2002).** « Modélisation des écoulements en rivière en crue : pour une utilisation adaptée des équations de Saint Venant » Document de synthèse en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches, Partie 1 : Synthèse des activités scientifiques. Université Claude Bernard Lyon 1, France. 34 pages.
- Paquier, A. (2003).** « Ecoulements de surface lors des fortes inondations en ville ». Revue. La houille blanche/n° 6-2003. 5 pages.
- Paquier, A. (2004).** « Estimation des écoulements de surface pour une crue extrême en milieu urbanisé ». Rapport de synthèse. Cemagref, Unité de Recherches Hydrologie – Hydraulique, Lyon-France. 25 pages.
- Paquier, A. & El-Kadi, K. (2005).** « Etude test sur les possibilités d'utilisation de modèles numériques de transport de sédiments sur le secteur d'Ingrandes ». Cemagref, Unité de recherche Hydrologie Hydraulique, Lyon-France. 21 pages.
- Paquier, A. & Riviere, N. & Proust, S. & Champagne, J-Y. & Haider, S. & Morel, R. & Gay, B. (2000).** « Ecoulement autour d'un obstacle. Expérimentation en canal et modélisation bidimensionnelle ». Colloque PNRH 2000, Toulouse, France. 379-383 p.
- Paquier, A. & Tanguy, J-M. & Haider, S. & Zhang, B. (2002).** « Estimation des niveaux d'inondation pour une crue éclair en milieu urbain : comparaison de deux modèles hydrodynamiques sur la crue de Nîmes d'octobre 1988 ». Revue des sciences de l'eau. Rev. Sci. Eau 16/(2003) 79-102 p.
- Patiño-palacios, G. (2007).** « Modélisation numérique eulérienne des écoulements gaz-solide avec plusieurs espèces de particules ». Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de, Toulouse –France. 182 pages.
- Petit, F. (1989).** « L'influence de la forme des cailloux en tant que facteur de résistance à l'érosion ». Revue de Géographie de Lyon-France. Vol. 64/N°4/1989/p.231 à 239.
- Recking, A. (2006).** « Etude expérimentale de l'influence du tri granulométrique sur le transport solide par charriage ». Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Lyon, France. 221 pages.
- Remini, B. (2002).** « Évolution de la sédimentation dans les retenues de barrage et le soutirage des particules fines ». Courrier du Savoir – N°02, Juin 2002, pp. 29-34.
- Remini, B. (2005).** « L'évaporation des lacs de barrages dans les régions arides et semi arides : exemples algériens ». Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 04, Juin 2005, pp.81-89.
- Rollet, A.-J. & Mac-Vicar, B. & Piégay, H. & Roy, A. (2007).** « Une nouvelle technique de traçage des sédiments en cours d'eau : les PIT tags premiers retours d'expérience ». Exposé. CEREGE CNRS UMR 6635 - EVS CNRS UMR 5600 - Université de Montréal. 18 pages.
- Rerboudj, A. (2005).** « Essai de quantification de l'érosion et perspective de la protection du barrage de fontaine des Gazelles contre l'envasement (approche numérique) ». Thèse de magistère. Université Colonel El-Lakhdar – Batna, Algérie. 125 pages.
- Rosales-Sierra, V. & Levacher, D. (2004).** « Simulation numérique de l'Estuaire de la Loire ». VIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne. 39-46 p.

- Sanchez, M. & Delanoë, Y. (2002).** « Mesure de la vitesse de chute des sédiments fins en laboratoire et in situ ». VII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Anglet, France. 231-238 p.
- Ruffié, J. & Ducos, J. & Larrouy, G. (1962).** « Étude hémotypologique des populations de la région du M'Zab ». Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris, XI<sup>o</sup> Série. Tome 3 fascicule 4, 1962. pp. 354-371.
- Sahara. (1995).** « Le M'zab ». Série monographie n°16. Document Algérien. 16 pages.
- Semcha, A. (2006).** « Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug ». Thèse de doctorat. Université de Reims Champagne-Ardenne, France. 166 pages.
- Sergent, P. & Zhang, B. (2002).** « Evolution du dépôt de clapage du Kannick ». VII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Anglet, France. 195-204 p.
- Shi, Y. (2006).** « Résolution numérique des équations de Saint-Venant par la technique de projection en utilisant une méthode des volumes finis dans un maillage non structuré ». Exposé de thèse. Université de Caen. 63 pages.
- Staub, M. (2007).** « Amélioration de la compréhension des phénomènes hydrologiques dans un bassin versant du Sud-Est asiatique sous régime de mousson ». Mémoire d'ingénieur. École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg. 64 pages.
- Thais, L. (2007).** « Modélisation des écoulements complexes. Application aux géo-fluides et aux viscoélastiques ». Habilitation à Diriger des recherches. Université des Sciences et Technologie de Lille, France. 131 pages.
- Torres, A. (2008).** « Décantation des eaux pluviales dans un ouvrage réel de grande taille : éléments de réflexion pour le suivi et la modélisation » ; thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Lyon, France. 368 pages.
- Torres A. & Lipeme Kouyi G. & Bertrand-Krajewski J.-L. & Guilloux J. & Barraud S. & Paquier A., (2008)** « Modélisation 2D du transport solide dans un bassin de retenue-décantation d'eau pluviale ». XXVI<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. 4 au 6 juin, Nancy, 08 pages.
- Torres A. & Lipeme Kouyi G.k & Bertrand-Krajewski J.-L. & Guilloux J., Barraud S. & Paquier A. (2008).** « Modelling of hydrodynamics and solid transport in a large stormwater detention and settling basin ». Proceedings of the 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK, 31 Aug.-5 Septembre, 10 pages.
- Torres, A & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2005).** « Décantation des rejets pluviaux urbains en bassin de retenue : métrologie, modélisation, évolution physico-chimique des sédiments » rapport d'avancement année 1 (2005). Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France. 27 pages.
- Touazi, M. & Laborde, J-P. (2004).** « Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du Nord ». Revue des sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau 17/4(2004) 503-516 p.
- Vali-Khodjeini, A. & Mohamed, A. (1974).** « Etude du débit solide et de la sédimentation du barrage de Shah-Banou Farah ». Bulletin-des Siences Hydrologiques, XX, 2 6/1975. 223-231 p.
- Vidal, J-P. (2005).** « Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale. Apports de l'intelligence artificielle ». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, France. 276 pages.

- Villaret, C. (2004).** « Modélisation du transport littoral ». VIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne. France. 251-260 pages.
- Villaret, C. (2003).** « Intercomparaison des formules de transport solide : Programme Biparti 2001 ». EDF R& D, France. 47 pages.
- Villaret, C. (2003).** « Modélisation du transport sédimentaire en granulométrie étendue: étude bibliographique. Programme Biparti 2001 ». Rapport de recherche. EDF R&D, France. 51 pages.
- Villaret, C. & Hervouet, J-M. (2006).** « Comparaison croisée de différentes approches pour le transport sédimentaire par charriage et suspension ». IX<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Brest. 463-470 p.
- Viollet, P-L. & Chabard J-P. & Esposito, P. & Laurence, D. (1998)** « Mécanique des fluides appliquée : Écoulements incompressibles dans les circuits, canaux et rivières, autour des structures et dans l'environnement ». Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France. 364 pages.
- Vukmirovic, V. & Vukotic, R. (1981).** « Mesure des sédiments charriés par les rivières ». Erosion and Sediment Transport Measurement (Proceedings of the Florence Symposium, June 1981). IAHS Publ. no. 133. 47-52 p.
- Waeles, B. & Le-Hir, P. (2004).** « Modélisation du transport de sédiments mixtes (vase et sable fin) ». VIII<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, France. 241-249 p.
- Wango, T-E. & Moussa, M. & Monde, S. (2008).** « Modèle Bi-Dimensionnel de la Lagune Ebrié (Côte d'Ivoire) ». European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.24 No.3 (2008), pp.229-243.
- Wertel, J. (2006).** «Modélisation 3D des écoulements turbulents à surface libre en canal rectangulaire ». Rapport en vue de l'obtention des diplômes d'ingénieur. École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg & université louis pasteur de Strasbourg. 72 pages.
- Zemljic, M. (1971).** « Calcul du débit solide - Évaluation de la végétation comme un des facteurs antiérosifs ». INTERPRAEVENT. Internationale Forschungsgesellschaft. 359-371 p.