

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherche des Sciences de l'EAU LRSEAU



Mémoire de Magister en Hydraulique

Préparé par
Mme. Amel Rahai

Ingénieur d'Etat en Hydraulique (ENP)

DELIMITATION DES ZONES INONDABLES
- APPLICATION A L'OUED ALLALAH-
Bassin Versant de Ténès

Membres de Jury :

Président : Mr. KETTAB Ahmed, *Professeur ENP*
Directeur : Mr. BENZIADA Salim, *Chargé de cours ENP*
Co-Directeur : Mr. MOULOUDI Yahia, *Chargé de cours ENP*
Examineurs : Mme. BENMAMAR Saadia, *Docteur ENP*
Mr. NAKIB Maamar, *Chargé de cours ENP*
Mme. HADJ RABIA Nassima, *Chargé de cours USTHB*

Année Universitaire
2006-2007

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du département d'Hydraulique de l'École Nationale Polytechnique d'Alger.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma reconnaissance à mon directeur de mémoire Mr Benziada, pour son suivi, son soutien et pour l'ensemble des moyens qu'il a mis à ma disposition.

Mes remerciements vont également à mon co-promoteur Mr Mouloudi, pour ses conseils et ses orientations précieuses.

A la même occasion, j'exprime mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à Melle Benmamar, pour son suivi et le temps qu'elle m'a consacré le long de ce cycle.

Je suis reconnaissante à Monsieur le professeur A.Kettab, directeur du laboratoire de Recherche des sciences de l'eau LRS-Eau, pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur Nakib Maamar, chargé de cours à l'école nationale polytechnique et Madame Hadj Rabia Nassima, chargée de cours à l'USTHB, d'avoir répondu favorablement pour faire partie du jury.

Enfin, mes remerciements les plus sincères s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du département d'hydraulique et à tout ceux qui ont contribué de près et de loin à ma formation et à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- A mes chers parents que j'aime et que dieu me les garde : ma mère qui a tant sacrifiée pour ma réussite et mon père qui m'a tellement soutenu.

- A mes sœurs adorées Amina et Karima, que je leur souhaite tout le bonheur du monde, avec beaucoup de succès et de réussite pour Fouad, mon frère.

- A la personne que j'admire le plus au monde, à celui qui m'a ouvert la porte de son cœur, Saïd.

Table des matières

Introduction Générale	1
CHAPITRE I : CONCEPTS DE BASE SUR LES SIG ET SUR LES MNT	2
<i>A. CONCEPTS DE BASE SUR LES SIG</i>	2
I. Présentation du SIG	2
I.1 Introduction	2
I.2 Rappel historique du SIG	2
II. Les Systèmes d'Informations Géographiques	3
III. Principe général	5
IV. Fonctions d'un Système d'Information Géographique	7
V. Les Composantes d'un SIG	9
V.1 Une boîte à outils	9
V.2 Base de données géographiques.....	9
V.3 Interface utilisateur.....	9
V.4 Les aspects organisationnels.....	9
V.5 Le personnel.....	11
VI. Avantages et Inconvénients des SIG	12
VII. Mode de représentation de l'information géographique	12
VII.1 Mode Vecteur.....	12
VII.2 Mode Raster.....	13
VIII. Quelques exemples de SIG	14
VIII.1 Mapinfo.....	14
VIII.2 Le SIG ArcView.....	15
VIII.3 Autocad Map.....	15
<i>B. LES MNT</i>	17
I. Définitions	17
II. Acquisition des données	17
III. Les différents types de MNT	17
III.1 Les M.N.T sous forme de grilles régulières (Raster)	18
III.2 M.N.T sous forme de T.I.N (vecteur)	19
III.3 Contours.....	20
III.4 Grille triangulée.....	20
IV. Choix du modèle numérique de terrain	20
V. Production du modèle numérique de terrain	21
VI. Les utilisations et les représentations fréquentes des MNTS	21
VII. Précision d'un MNT	22
VIII. Conclusion	23
CHAPITRE II : PRESENTATION DU B.V DE TENES ET ETUDE DES CRUES	24
<i>A. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE TENES</i>	24
I. Présentation Générale	24
I.1 Situation géographique.....	24
I.2 Description générale du bassin.....	25

I.3 Caractères physiques généraux.....	25
II. Caractéristiques générales du bassin versant.....	27
II.1 Caractéristiques physiographiques.....	27
II.2 Caractéristiques du réseau de drainage.....	29
III. Temps de concentration.....	31
B. ETUDE DES CRUES.....	33
I. Introduction.....	33
I.1 Définitions et généralités.....	33
I.2 Genèse et propagation des crues.....	33
II. Pluviométrie.....	35
II.1 Acquisition des données.....	35
II.2 Pluie annuelle.....	35
II.3. Pluie mensuelle.....	36
II.4 Pluie journalière.....	37
II.5 Pluies de courtes durées.....	38
III. Crues.....	39
III.1 Régime hydrographique de l'oued et ressources en eau du bassin.....	39
III.2 Le réseau d'observation hydrométrique	40
III.3 Hydrogramme des crues.....	40
III.4 Analyse de la crue de Novembre 2001.....	41
III.5 Débits Max. Bassin versant de l'oued Allalah.....	42
V. Conclusion.....	46
CHAPITRE III : MODELE MATHEMATIQUE DES ECOULEMENT A SURFACE LIBRE – MODELE NUMERIQUE FESWMS.....	47
A. LE MODELE MATHEMATIQUE DES ECOULEMENT A SURFACE LIBRE.....	47
I. Introduction.....	47
II. Equation de NAVIER STOKES.....	47
II.1 Equation de continuité.....	47
II.2 Equation de la dynamique.....	48
III. Equation de Reynolds.....	49
III.1 Equation de base.....	49
III.2 Approximation des écoulements quasi horizontaux.....	51
V. Equation de Saint Venant.....	51
V.1 Les conditions cinématiques.....	51
V.2 Règle d'intégration de LEIBNITZ.....	52
B. LE MODELE NUMERIQUE FESWMS.....	58
I. Introduction.....	58
II. Modèle mathématique.....	58
II.1 Modèle de turbulence.....	59
II.2 Termes correctifs du mouvement.....	60
II.3 La signification physique des termes.....	61
III. La méthode des éléments finis.....	61
III.1 Introduction.....	61

III.2 L'interpolation en éléments finis.....	61
III.3 Formulation variationnelle.....	63
III.4 Linéarisation du système.....	64
III.5 Intégration numérique.....	68
IV. Conclusion.....	68
CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE FESWMS SUR UN TRONÇON DE L'OUED ALLALAH.....	69
<i>A. ELABORATION DU MNA D'UN TRONÇON DE L'OUED ALLALAH.....</i>	<i>69</i>
<i>B. LE MAILLAGE.....</i>	<i>70</i>
I. Construction du maillage plan 2D.....	70
II. Construction du maillage de surface 3D.....	71
III. Utilisation de YAMS.....	71
IV. Génération de maillage P^2	72
<i>C. APPLICATION DU MODELE FESWMS.....</i>	<i>72</i>
I. Les conditions initiales.....	72
II. Les conditions aux limites.....	73
III. Exécution du logiciel FESWMS.....	73
IV. Calibrage du modèle.....	74
V. Visualisation des résultats.....	74
VI. Interprétation des résultats.....	79
VII. Présentation en 3D.....	79
Conclusion Générale.....	82

Liste des figures

<i>Figure I.1 : Base de données géographique=ensemble de couches superposables.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.2 : SIG, un ensemble de données.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.3 : Un exemple : organisation du SIG en trois couches d'information:les villages, les routes et les cultures.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.4 : Exemple de représentation des données.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.5 : Fiches attributaires du village A, de la route entre A et B et d'une culture.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.6 : La structure générale d'un SIG.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.7 : Base de données géographiques BDG.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.8 : Les composantes d'un SIG.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.9 : Fenêtre principale du logiciel MapInfo.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.10 : Fenêtre principale du logiciel ArcView.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.11 : Fenêtre principale du logiciel Autocad Map.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.12 : Un MNT sous forme de grille régulière.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I.13 : Un MNT sous forme de réseau de TIN.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I.14 : Surface représentée par des courbes isohypses.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I.15 : Surface représentée par une grille triangulée.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I.16 : Sources d'informations d'un M.N.T.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II.1 : Carte de situation de la région d'étude.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure II.2 : Carte de situation du bassin de Oued Allalah.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure II.3 : Ajustement des pluies annuelles de la station de Sidi Akacha à la loi normale.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure II.4 : Répartitions mensuelles des pluies de la station de Sidi Akacha.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure II.5 : Ajustement des pluies journalières de la station de Sidi Akacha à la loi de Log –normal.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II.6 : Bassin versant de Sidi Akacha.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure II.7 : Les diverses caractéristiques de l'hydrogramme – type.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II.9 : Hydrogramme de la crue du 11 au 12 novembre 2001.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure II.8 : Ajustement à la loi Log –normal.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure II.9 : Hydrogramme de crues pour différentes fréquences.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III.1 Elément triangulaire à six nœuds.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure V.1 : Modèle numérique d'Altitude du tronçon étudié de l'oued ALLALAH... </i>	<i>69</i>
<i>Figure V.2 : Maillage EMC2 du tronçon de notre étude.....</i>	<i>71</i>
<i>Figure V.3 : Génération d'un élément triangulaire à 6 nœuds.....</i>	<i>72</i>

<i>Figure V.4 : Hauteur du fond par rapport au niveau de la mer.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure V.5: Variation de la vitesse en m/s.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure V.6 : Champs de vitesse en m/s.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure V.7: Variation de la vitesse en m/s.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure V.8 : Champs de vitesse en m/s.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure V.9: Variation de la vitesse en m/s.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure V.10 : Champs de vitesse en m/s.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure V.11: Variation de la vitesse en m/s.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure V.12 : Champs de vitesse en m/s.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure V.13: Hauteur d'élévation d'eau.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure V.14 : Hauteur d'élévation d'eau.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure V.15: Hauteur d'élévation d'eau.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure V.16 : Hauteur d'élévation d'eau.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure V.17 : fenêtre principale du logiciel TOPOCAD.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure V.18 : fenêtre principale du logiciel 3Dmax.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure V.19 : Présentation en 3D du phénomène étudiée.....</i>	<i>81</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau II.1 La forme du bassin versant.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau II.2 Caractéristiques générales du bassin versant de Ténès.....</i>	<i>31</i>
<i>Tableau II.3 : Caractéristiques de la station étudiée.....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau II.4 : Pluies Maximales annuelles pour différentes périodes de retour.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau II.5 : répartition des pluies mensuelle station de Sidi Akacha.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau II.6 : Pluies Maximale journalières en mm.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau II.7 : Débits des crues de l'oued ALLALAH.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau V.1 Les conditions aux limites.....</i>	<i>74</i>

Notations

C	Coefficient de Chézy
c_f	Coefficient de frottement
C_μ	Coefficient semi-empirique
e	Energie spécifique interne
f	Coefficient de frottement adimensionnel de Weishbach Darcy
f_g	Force de gravité
f_c	Force de Coriolis
g	Accélération de la pesanteur
H	Hauteur d'eau
h	Cote de la surface libre
I	Pente du fond
J	Pente hydraulique
K	Debitance
k	Energie cinétique turbulente
n	Coefficient de Manning
\vec{n}	Vecteur normal
Q	Débit
R_h	Rayon hydraulique
R_e	Nombre de Reynolds
Δt	Pas de temps
t	Variable de temps
T	Tolérance
R_{ij}	Tenseur des contraintes de Reynolds
u, v, w	Vitesses ponctuelles
U, V, W	Vitesses moyennes en espace
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	Vitesses moyennes en temps
u', v', w'	Vitesses de fluctuation
u_*	Vitesse de frottement
x, y, z	Composantes cartésiennes
α	Facteur pour l'intégration en temps
$\beta_{uu}, \beta_{uv}, \beta_{vv}$	Coefficient de correction du mouvement
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	Facteurs pour l'intégration en temps
ε	Taux de dissipation de l'énergie
κ	Constante de Von Karman
μ	Viscosité dynamique du fluide
μ_t	Viscosité dynamique turbulente
ν, ν_0	Viscosité cinématique du fluide
ν_t	Viscosité cinématique turbulente
θ	Facteur d'intégration en temps
ρ	Masse volumique
$\tilde{\nu}$	Viscosité artificielle de l'écoulement
τ^F	Tenseur de contraintes au fond

τ^s	Tenseur de contraintes à la surface
ω	Facteur de relaxation
$\underline{\omega}, \Omega$	Vitesse angulaire de la terre
φ	La latitude

ملخص

إن الظهور المستمر للفيضانات التي تشكل خطرا على الحياة و البيئة تتطلب معرفة المجال الفيزيائي للأنهار.

المحاكاة هي أفضل الطرق التي تسمح لنا بفهم ظاهرة الفيضانات من أجل المساهمة في حل المشاكل المترتبة عنها.

في مذكرة الماجستير هذه، نقدم نموذج رياضي باستعمال طريقة العناصر المنتهية التي تقوم بحل جملة معادلات سان فونان للحصول على ارتفاع سطح المياه مع حقل السرعات.

لهذا اخترنا مقطعا من واد التنس، بعد استعادة نموذج الارتفاع الرقمي قمنا بالتجزئة السطحية عن طريق EMC² برنامج Extractccoor، Yams و كذا بعض البرامج الجزئية لمكتبة Modulef.

إن استعمال الشفرة FESWMS يعطينا عند كل عقدة من سطح التجزئة ارتفاع الماء و السرعات.

من أجل تمثيل النتائج، برنامج SMS يسمح لنا بإظهار المعلومات على كل العقد، أما برنامج 3Dsmax فانه يسمح لنا بمشاهدة النتائج في البعد الثلاثي.

الكلمات الأساسية : المحاكاة- العناصر المنتهية - سان فونان- تنس- نموذج الارتفاع الرقمي-
- EMC² - YAMS – FESWMS - SMS-3Ds max

RESUME

La présence de plus en plus fréquente des inondations qui constituent un danger potentiel pour la vie et l'environnement nécessite la connaissance du comportement physique des cours d'eau

La simulation est un outil essentiel qui nous permette de mieux comprendre le phénomène des crues afin d'apporter une contribution aux problèmes de gestion des risques d'inondations

Dans ce mémoire, on présente un modèle numérique d'éléments finis, qui résout les équations de Saint Venant pour obtenir l'évolution de la surface d'eau et les champs de vitesse.

Pour cela, on a choisi un tronçon de l'oued de Ténès, après avoir récupéré le MNT, on a procédé au maillage à l'aide du logiciel EMC², le programme EXTRACTCOR, le logiciel de remaillage YAMS et les sous programmes de la bibliothèque MODULEF

Le FESWMS donne comme résultats de calcul, en chaque nœud du maillage une hauteur d'eau ainsi que les deux composantes (U, V) de la vitesse.

Pour l'exploitation des résultats finaux, le logiciel SMS, nous a permis de représenter l'information sur chaque nœud du maillage et le logiciel 3Ds max, nous a permis une meilleure visualisation dans un univers tridimensionnel.

MOTS CLEF : Simulation -Eléments finis- Saint Venant- Ténès- MNT- EMC², YAMS- FESWMS- SMS-3Ds max

SUMMARY

The more and more frequent presence of the flood presents a potential danger to life and environment. It requires the knowledge of streams physical behavior.

A simulation is an essential tool that allows us a better understanding of rises phenomenon to contribute to the management problems of the flood risk

In this master memory, we present a finite element model that solves the 2D Saint Venant equations to obtain the evolution of the free surface and velocity fields.

For this, we have chosen the Tenes Oued. After recuperating a digital elevation model

(DEM), we have realized the grid by using the EMC², EXTRACTCCOOR program, software YAMS and some under library programs MODULEF.

The code FESWMS gives the height of water and the speed composant (U, V).

For the exploitation of the final results, SMS allowed us to represent the information of all the nodes of the grid and software 3Ds max allowed us a better visualization in tree dimensional univers.

KEYWORDS : Simulation - finite element - Saint Venant- Ténès- DEM - EMC², YAMS- FESWMS- SMS-3Ds max

Introduction Générale

Les phénomènes météorologiques et climatiques constituent un danger potentiel pour la vie et l'environnement. Ils le sont particulièrement lorsqu'ils revêtent une intensité extrême, inhabituelle ou un caractère persistant (orage, inondation ou sécheresse).

L'homme a éprouvé le besoin d'une certaine maîtrise des ressources en eau, dont les cours d'eau font partie intégrante.

La connaissance du comportement hydrologique du bassin versant et l'étude du comportement physique des cours d'eau révèle donc d'une importance majeure et devient une nécessité d'actualité qui permet aux services concernés de mieux contribuer à assurer la sécurité, des biens et des personnes et de mieux maîtriser les apports de ces cours d'eau qui engendrent une meilleure planification du développement.

Le travail présenté a pour objectif la détermination des zones inondables dans un tronçon d'un cours d'eau – application à l'oued Ténès. Pour ce faire, nous avons mis en œuvre un modèle de simulation numérique appelée FESWMS qui évalue les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement (vitesses, hauteurs d'eau, trajectoires), par la résolution des équations de Saint-Venant à l'aide de la méthode des éléments finis.

Le cheminement de notre travail c'est effectué comme suit :

- ✘ Un premier chapitre consacré a une présentation générale des concepts de base des systèmes d'information géographique, suivi d'un aperçu sur les modèles numériques de terrain.
- ✘ Dans un deuxième chapitre, est présenté le bassin versant de Ténès ainsi que ses principales caractéristiques générales, par la suite nous avons procédé à l'étude hydrologique et hydrométrique.
- ✘ Au troisième chapitre, sont données les équations mathématiques de Saint Venant qui régissent l'écoulement dans les cours d'eau, suivi du modèle numérique de simulation FESWMS.
- ✘ Le dernier chapitre concerne l'application du modèle numérique sur un tronçon de l'oued ALLALAH, les résultats des différentes simulations obtenues sont présentées et discutées pour différents débits de crues.

Et pour conclure ce mémoire, une conclusion générale est donnée en fin de thèse.

Chapitre I :

*Concepts de Base sur les Systèmes
d'Informations Géographiques (SIG) et sur les
Modèles Numériques du Terrain (MNT)*

CHAPITRE I : CONCEPTS DE BASE SUR LES SIG ET SUR LES MNT

Avec le développement récent des technologies de l'information, sont apparues de nouvelles techniques de conception et de gestion de l'information géographique parmi lesquelles les systèmes d'informations géographiques, qui permet une meilleure structuration de donnée.

Les enjeux majeurs auxquels nous avons à faire face aujourd'hui (environnement, hydrologie, aménagement des territoires...), ont tous un lien étroit avec la géographie. Il apparaît donc nécessaire que pour une meilleure compréhension des phénomènes liés à la nature ou à l'activité humaine de disposer un ensemble d'information avec les attributs qui les caractérisent. Pour cela, on fera recours aux technologies modernes à savoir les systèmes d'informations géographiques.

A. CONCEPTS DE BASE SUR LES SIG

I. Présentation du SIG

I.1 Introduction

L'information géographique désigne toute information relative à un point ou un ensemble de points spatialement référencés à la terre. Elle est d'importance primordiale pour tous ceux qui ont à gérer un espace ou des objets dispersés dans un espace donné. On rassemble sous la dénomination d'informations spatiales des données aussi diverses que la distribution de ressources naturelles (Sols, eaux, végétations), les limites administratives et politiques. Même les données statistiques relatives à la population, à l'emploi ou à la criminalité entrent dans cette définition, dès lors qu'elles ont une extension spatiale. [Behraier, 2002]

I.2 Rappel historique du SIG

La collecte de l'information sur les propriétés importantes du milieu et de leurs distributions spatiales sur la surface de la terre a toujours été l'une des préoccupations majeures des environnementalistes.

Avant l'avènement de l'outil informatique, la seule manière de confronter des informations issues de cartes distinctes consistait à tracer des calques et par ce biais essayer d'identifier les zones les plus favorables, en tenant compte de l'ensemble des informations de base.

Cette technique a été alors adaptée au système informatique encore à ses débuts. Des cartes statistiques, volontairement simplifiées ont été reportées sur des feuilles blanches quadrillées. Les valeurs de cette grille ont été utilisées par superposition de caractères pour obtenir un effet visuel de nuance de gris représentant les valeurs statistiques de chaque cellule. Cette méthode n'a jamais été adoptée par les cartographes, compte tenu de la grossièreté des représentations cartographiques qui en découlent. [Benlameur, 2004]

C'est seulement au XVIIIème siècle que la civilisation occidentale a atteint certain niveau d'organisation et que les décideurs réalisent l'importance et la valeur d'une cartographie systématique de leurs terres. Des institutions gouvernementales ont été créées pour réaliser des cartes topographiques.

Ces institutions performantes telle que l'INC¹ en Algérie, l'IGN² en France, l'USGS³ en Amérique continuent jusqu'à présent à produire des produits cartographiques qui décrivent avec une précision de plus en plus grandes la distribution et la localisation des entités géographiques ou topographiques.

Durant les deux derniers siècles, beaucoup de types de cartes ont été développés. La continuité de ce travail de production cartographique, de norme, de style et de méthodes a non seulement progressé, mais aussi s'est améliorée.

Au fur et à mesure que l'étude scientifique du globe progresse ; les besoins cartographiques des objets terrestres se fait sentir.

Le développement dans la compréhension et de recensement des ressources naturelles comme la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie, l'écologie et d'autres innombrables ressources qui ont émergé au XIX^{ème} siècle a donné un essor important à la cartographie et à la méthodologie de représentation spatiale des éléments terrestres. Ce développement des sciences de l'environnement a engendré un besoin qui a été vite comblé par les méthodes cartographiques. [Becheraier, 2002]

C'est ainsi que naissait un nouveau domaine, celui des systèmes d'informations géographiques, universellement utilisé de nos jours.

Avec l'essor de l'information, est apparue la possibilité de numériser l'information géographique et d'en confier la gestion à l'ordinateur. Celui –ci devint un auxiliaire précieux du géographe : l'assistant pour la production cartographique et l'analyse spatiale. Ainsi est né dans les années 60, le concept du système d'information géographique.

Les premiers SIG opérationnels sont apparus dans les années 60, au Canada et aux Etats–Unis. Le pionnier est indiscutablement le Canadien Géographic Information System (1964), qui a rassemblé des informations relatives à l'usage du sol, et des données concernant l'environnement. Sur une grande partie du territoire canadien, le logiciel a été développé pour ces besoins spécifiques. Deux autres réalisations précoces méritent d'être mentionnées : Le New York Land Information System (1967) et le Minnesota Land Ménagement Information System (1969). Depuis cette époque, les coûts et les difficultés techniques ont considérablement diminué, et de nombreux logiciels commerciaux sont aujourd'hui disponibles comme par exemples : *APIC, ARC/ INFO, ARG1 4GE, DEMETER, ILWIS, GRASS, IDRISI, SPANS, SYNERGIS*. [Becheraier, 2002]

II. Les Systèmes d'Informations Géographiques

Un SIG a pour but d'informer sur la géographie d'un espace donné.

Il s'appuie donc sur un certain nombre de bases de données géographiques, qu'il permet d'intégrer, de gérer, de traiter et de représenter sous forme de cartes, (figure I.1). [www.Seig.ensg.ign.fr]

¹ : *Institut National de Cartographie*

² : *Institut Géographique National*

³ : *United States Geological Survey*

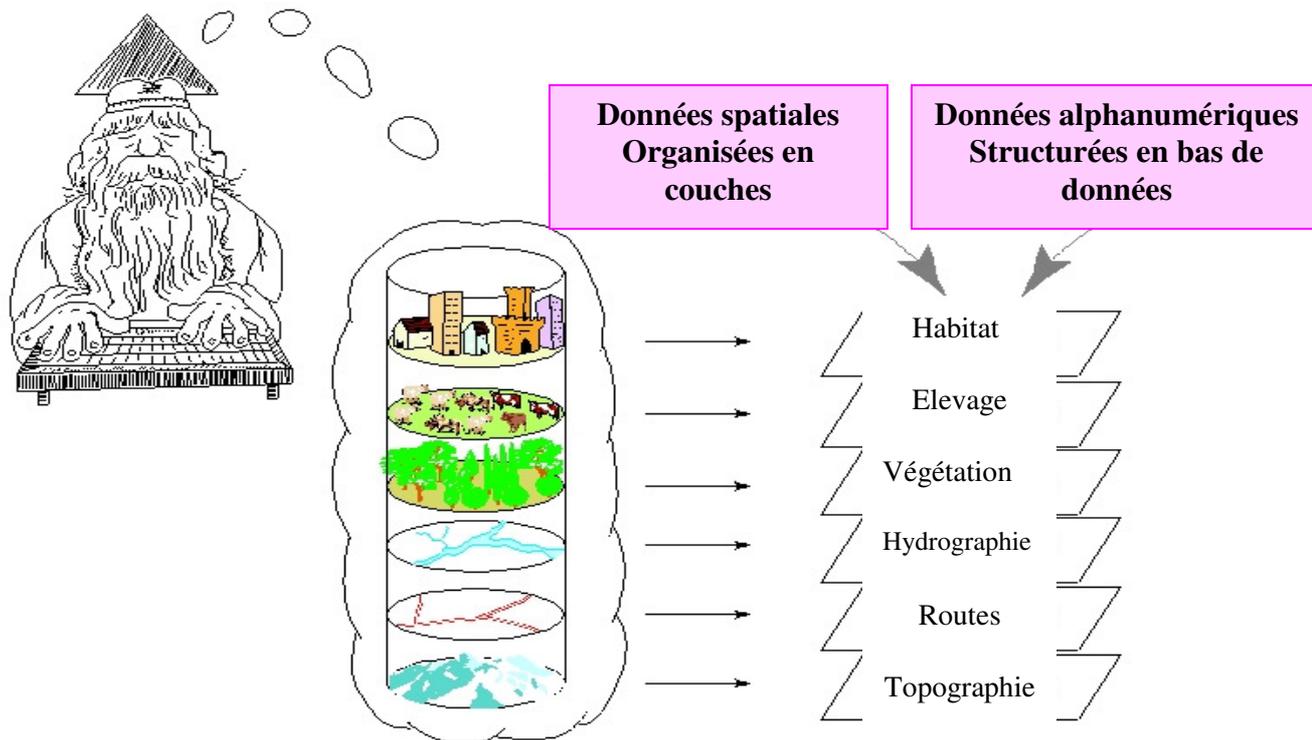


Figure I.1 : Base de données géographique=ensemble de couches superposables

[www.Seig.ensg.ign.fr]

Plusieurs définitions des SIG existent mais toutes incluent l'ensemble de ces différentes fonctions :

✘ SIG : un système informatique

La définition américaine émane du comité fédéral de coordination inter -agences pour la cartographie numérique (FICCDC, 1988) : "un système d'information géographique est un système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion".

✘ SIG : un ensemble de données

La définition française est due à l'économiste Michel Didier (1990), dans une étude réalisée à la demande du CNIG⁴ : "Un système d'information géographique est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision". (Figure I.2)

⁴ : Conseil National de l'Information Géographique

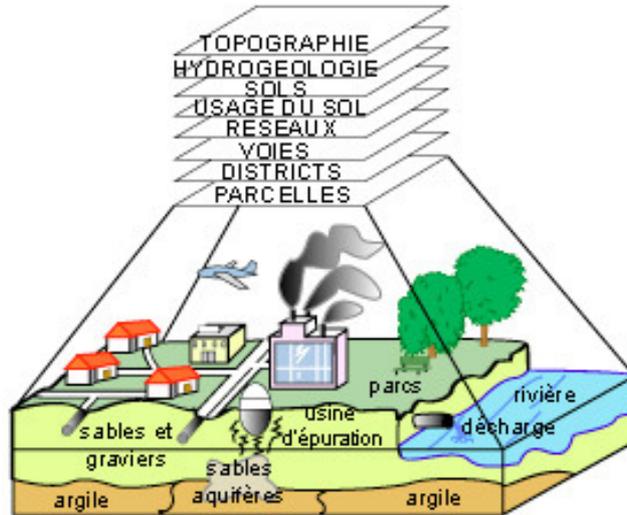


Figure I.2 : SIG, un ensemble de données

[www.Seig.ensg.ign.fr]

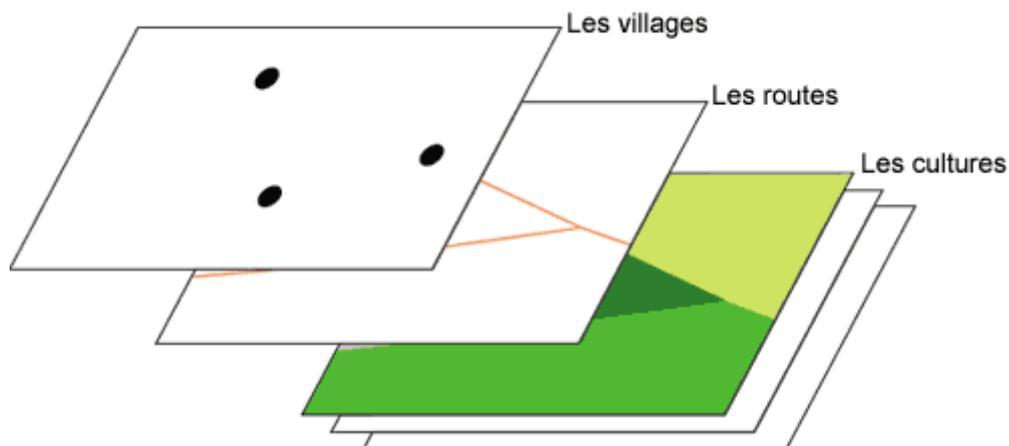
III. Principe général

Un SIG s'appuie sur un certain nombre de bases de données géographiques représentées sous forme de couches. [www.Seig.ensg.ign.fr]

✗ Affichage sous forme de couches d'information

Un SIG contient généralement plusieurs sortes d'objets géographiques qui sont organisés en thèmes que l'on affiche souvent sous forme de couches. Chaque couche contient des objets de même type (routes, bâtiments, cours d'eau, limites de communes, entreprises...).

Chaque objet est constitué d'une forme (géométrie de l'objet) et d'une description, appelé aussi sémantique. (Figure I.3)



*Figure I.3 : Un exemple : organisation du SIG en trois couches d'information:
les villages, les routes et les cultures*

[www.Seig.ensg.ign.fr]

✖ La géométrie des objets

Le niveau géométrique est la description de la position et de la forme des objets. La position peut s'exprimer par la latitude et la longitude des objets (ou des points qui composent ces objets) ou par des coordonnées x, y dans un système de projection. Les objets peuvent être identifiés sous forme de points (villes, entreprises, exploitations agricoles,...), d'arcs ou de lignes (routes, chemins de fer,...) et de polygones ou de surfaces (communes, occupation du sol,...). (Figure I.4)

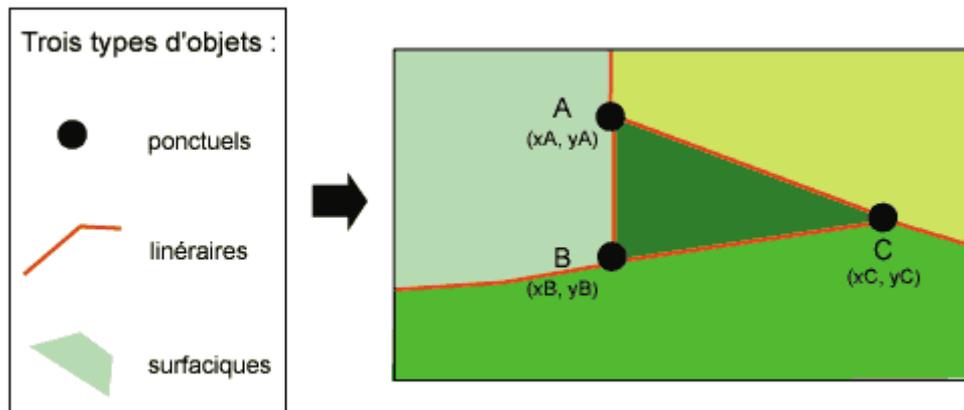


Figure I.4 : Exemple de représentation des données

[www.Seig.ensg.ign.fr]

✖ La description des objets sémantiques

A chaque objet est attribuée une fiche contenant des informations de type alphanumérique. Ces informations décrivent l'objet (nom de la ville, numéro de la commune, type de l'occupation du sol,...). Ces fiches permettent de stocker des informations qui décrivent les objets : le contenu dépend des besoins du projet. (Figure I.5)

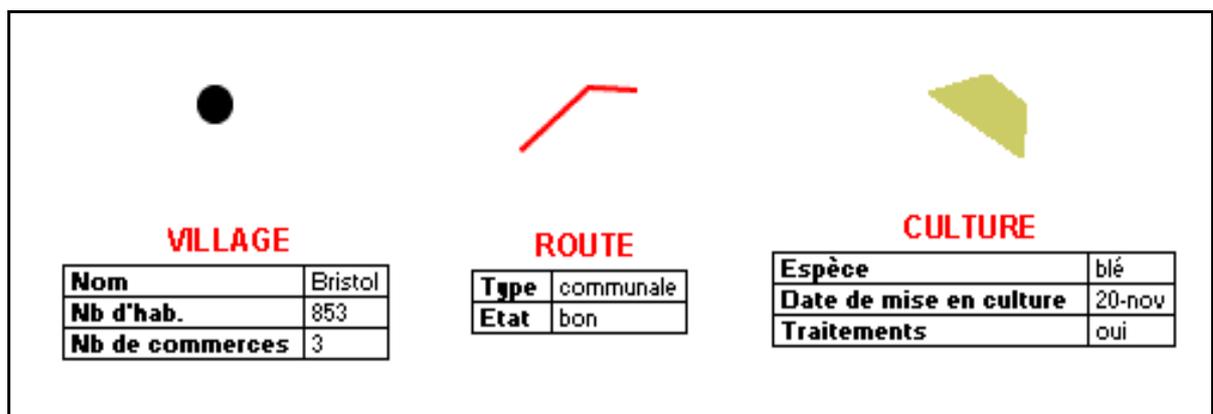


Figure I.5 : Fiches attributaires du village A, de la route entre A et B et d'une culture

[www.Seig.ensg.ign.fr]

IV. Fonctions d'un Système d'Information Géographique

Un SIG est habituellement composé de quatre modules : [*Bechaier, 2002*]

- Acquisition des données
- Gestion de données
- Manipulation et analyse de données
- Restitution des données

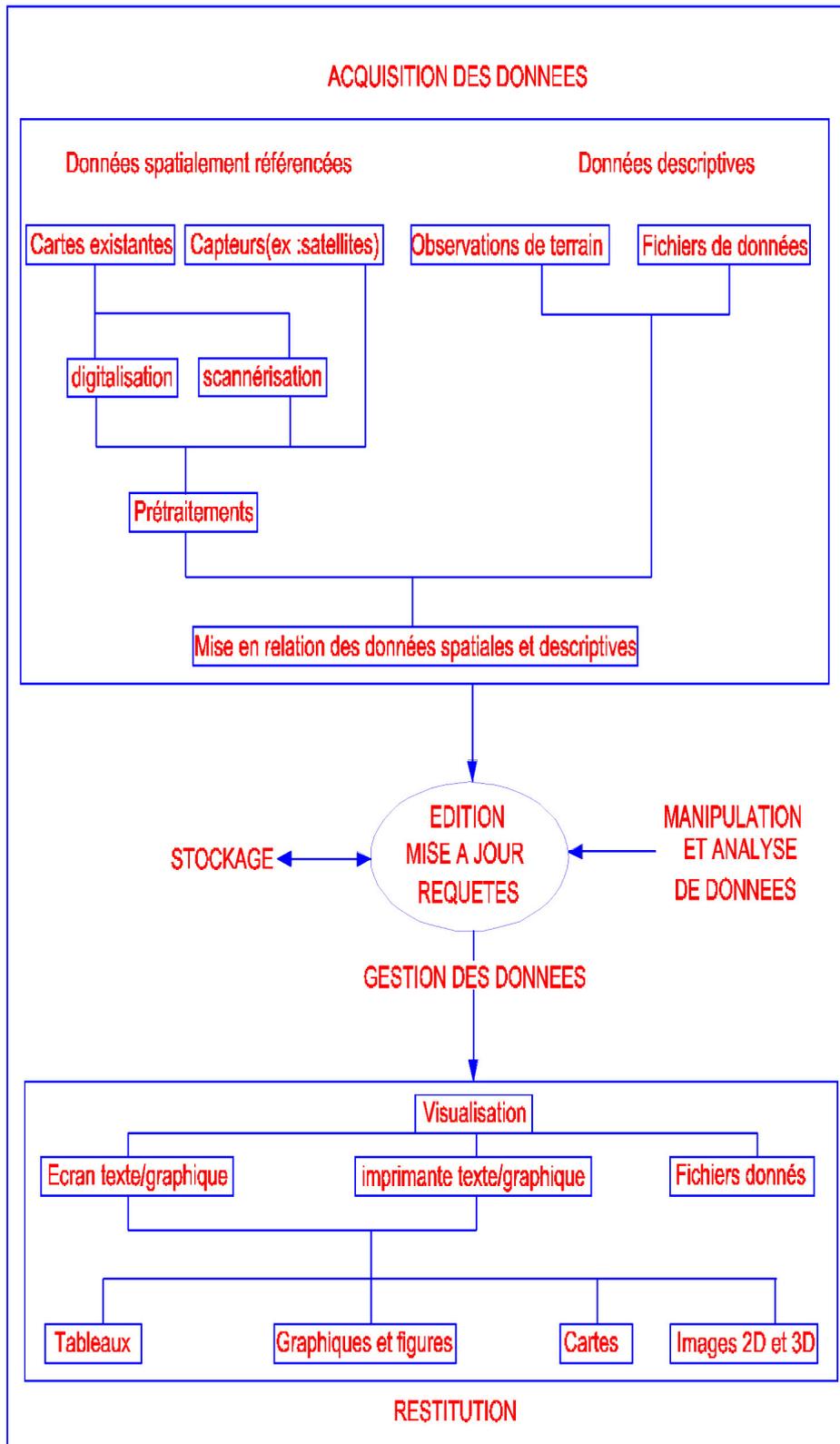


Figure I.6 : La structure générale d'un SIG

[Bechaier, 2002]

V. Les Composantes d'un SIG

Un SIG est un environnement conçu pour l'analyse et la modélisation de la distribution spatiale de phénomènes. Il se compose des éléments suivants:

[Collet, 1992], [Gaouas, 2001]

V.1 Une boîte à outils

- **D'outils de saisie** : leur rôle est d'apporter dans le système les éléments d'informations qui composeront la BDG (Base de Données Géographiques).
- **D'outils de mise en forme (logiciels)**
- **D'outils de gestion (logiciels)** : leur rôle est de gérer, de modifier et de manipuler la BDG.
- **D'outils d'analyse (logiciels)** : ils transforment l'information contenue dans la BDG en fonction des besoins de l'utilisateur. Ils produisent de nouvelles strates qui seront intégrées à leur tour dans la BDG de façon permanente ou temporaire selon l'intérêt de leur contenu.
- **D'outils de représentation** : ils fournissent à l'utilisateur d'un SIG les éléments d'informations numérique graphiques indispensables à la réalisation de l'analyse et à la production des résultats intermédiaires ou finaux.

V.2 Base de données géographiques

Une base de données géographique est un ensemble de couches superposables (figure I.7).

V.3 Interface utilisateur

Un SIG dispose d'une interface utilisateur très conviviale et très interactive conçue pour faciliter la création de projets.

V.4 Les aspects organisationnels

Pour être effectif, un SIG doit être placé dans un contexte organisationnel adéquat, il n'est pas suffisant qu'un établissement se procure de l'information, s'équipe et se dote de matériels informatiques, s'achète des logiciels, recrute du personnel qualifié si l'aspect organisationnel n'est pas mis au point et sérieusement réfléchi.

Donc, l'utilisation pertinente d'un SIG requiert un effort en matière de formation, de planification et surtout d'organisation et de suivi afin d'assurer une bonne qualité du produit final.

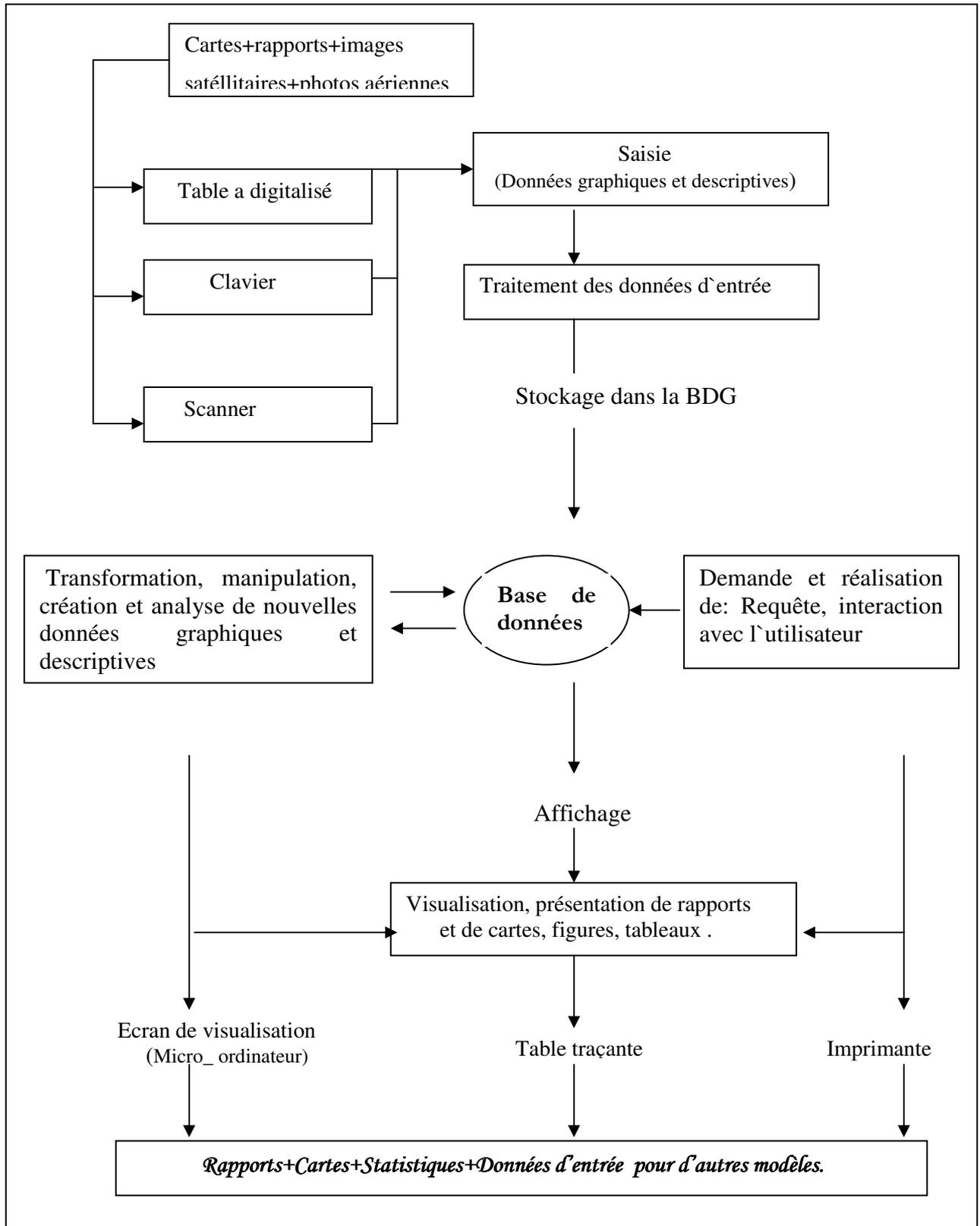


Figure I.7 : Base de données géographiques BDG.

[Ider, 2004]

V.5 Le personnel

Les SIG sont de valeur limitée sans les personnes qui dirigent le système et élaborent des plans pour l'appliquer à des problèmes réels. Les utilisateurs de SIG vont du technicien qui conçoit et maintient le système à ceux qui l'utilisent pour les aider à effectuer leur travail quotidien. La claire identification des rôles de chacun des acteurs est souvent signe de bonne mise en œuvre d'un SIG.

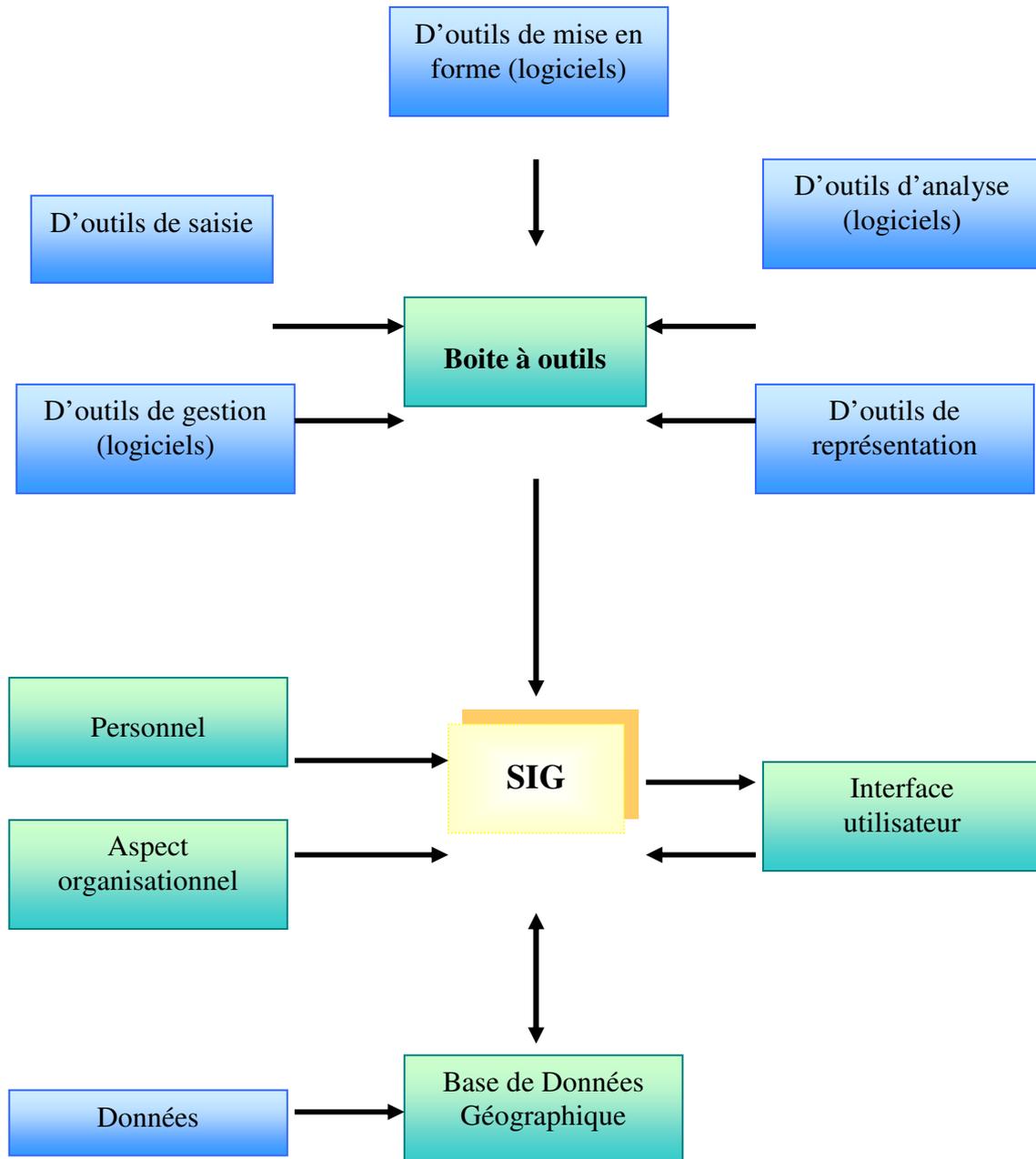


Figure I.8 : Les composantes d'un SIG

[Ider, 2004]

VI. Avantages et Inconvénients des SIG [Becheraier, 2002]

Les avantages du SIG sont généralement :

- Les données sont stockées sous forme informatique donc condensées, elles peuvent être extraites très rapidement et à faible coût.
- L'outil informatique permet d'améliorer la précision et la vitesse d'exécution de certaines opérations réalisables manuellement : certaines mesures de l'espace, les transformations géométriques, la production de cartes sur papier.
- Une mise à jour rapide, voire en temps réel, est possible : elle permet de faire du SIG un outil de suivi.
- Certaines analyses, difficiles voire impossibles à réaliser manuellement, peuvent être effectuées à faible coût : l'extraction des pentes, les valeurs d'ensoleillement, la limite de bassin versant à partir de modèles numériques de terrain (MNT)....
- Des modèles faisant intervenir de nombreuses variables d'applications.

Le principal inconvénient des SIG est leur coût :

- Le coût d'acquisition du matériel (ordinateur et périphériques) et du logiciel, même s'il peut paraître élevé, n'est pas le plus important, et il probable qu'il diminuera dans les années à venir.
- Bien plus conséquent est le coût d'acquisition des données sous forme numérique :
 - Transformation des données analogiques existantes (cartes)
 - Conversion de formats
 - Prétraitement des données déjà numérisées.
- Pour initier un projet faisant appel à un SIG, il faut également disposer d'un personnel spécialisé, compétent, pour lequel il faudra prévoir une formation.
- A l'investissement initial s'ajoutent les coûts de maintenance, d'administration et de mise à jour de la base de données.
- Enfin, dans certains cas, le bénéfice obtenu en ayant préféré un SIG à des outils traditionnels est tout à fait marginal. Ce bénéfice reste bien souvent difficile à évaluer, d'autant que les SIG offre des fonctionnalités nouvelles, absentes des outils manuels.

VII. Mode de représentation de l'information géographique

Les SIGs exploitent deux types de modèles géographiques: le mode Vecteur et le mode Raster. [Bouchaibi, 1998], [Cheikh, 1999], [www.FAO.org]

VII.1 Mode Vecteur

En mode vecteur, les objets géographiques se ramènent à trois classes d'entités :

- Les points (un point d'eau, une retenue d'eau...)

- Les lignes (cours d'eau, une route, courbe de niveau ...)
- Les surfaces (un bassin versant, un sous bassin versant, un périmètre d'irrigation...)

Le principe de la numérisation du modèle vecteur repose essentiellement sur l'utilisation de la digitalisation. Les points sont caractérisés par leurs coordonnées géographiques (longitude, latitude) ou bien dans un référentiel cartésien (X, Y). Une ligne est constituée d'un ensemble de points reliés par des segments de droites. Un polygone est défini comme un ensemble de lignes délimitant une surface fermée.

Les avantages du mode de représentation vecteur sont :

- De fournir une information plus compacte et plus facile à utiliser ;
- Représentation plus conforme au monde réel ;
- Précision des données graphiques ;
- Extraction et mise à jour généralement possible ;
- Modèles dynamiques ;
- Géométrie évolutive ;
- Beaucoup moins de mémoire pour le stockage des informations ;

Parmi les inconvénients du mode vecteur, nous pouvons citer :

- Sa structure complexe ;
- Ses fonctions d'analyses beaucoup plus complexes ;
- L'opération combinatoire longue et source d'erreurs ;
- Affichage et édition longs ;
- Technologie coûteuse ;
- Certaines données de variables continues (latitude, image satellite...) ne peuvent pas être représentées sans traitements préalables.

VII.2 Mode Raster

Dans ce cas, l'espace est découpé en cellules élémentaires. Le cas le plus courant correspond à une discrétisation du plan en carrés élémentaires ou pixels (maillage carré). Dans ce type d'espace appelé **Raster** ou encore **Maille**, un point est représenté par les coordonnées (l'adresse) des pixels.

Pour ce mode, nous pouvons énumérer un certain nombre d'avantages qui sont :

- Structure simple, car les données sont stockées sous forme de tableaux et de ce fait très faciles à exploiter ;
- L'acquisition automatique possible (télédétection, scanner,...) ;

- Croisement de données très facile à réaliser puisque toutes les grandeurs sont ramenées à la même unité de base (pixel, cellule) ;
- Simulation simple ;
- Technologie largement développée.

Les inconvénients de ce mode peuvent se résumer en :

- Un volume important d'informations et de ce fait nécessite une mémoire importante pour stocker les données ;
- Manque de précision de positionnement et des mesures de distances et de surfaces ;
- Impossibilité à réaliser certaines opérations topologiques (la recherche du plus court chemin du réseau) ;
- Une qualité médiocre des documents obtenus en sortie ;
- Nécessité de disposer d'un dispositif de conversion vecteur/ raster pour intégrer des données vecteurs (Base de données topographiques).

VIII. Quelques exemples de SIG [Ider, 2004]

Parmi les différents logiciels SIG couramment utilisés, nous pouvons citer :

VIII.1 Mapinfo

MapInfo est le leader mondial des systèmes d'informations géographiques sur PC. puissant et convivial, il permet de réaliser des analyses géographiques. Il est reconnu comme étant l'outil cartographique le plus puissant et le plus intuitif en environnement bureautique. Ses principales caractéristiques sont la cartographie 3D et les outils pour la création de graphiques, de rapports et de pages HTML. MapInfo peut être personnalisé et intégré d'autres applications.

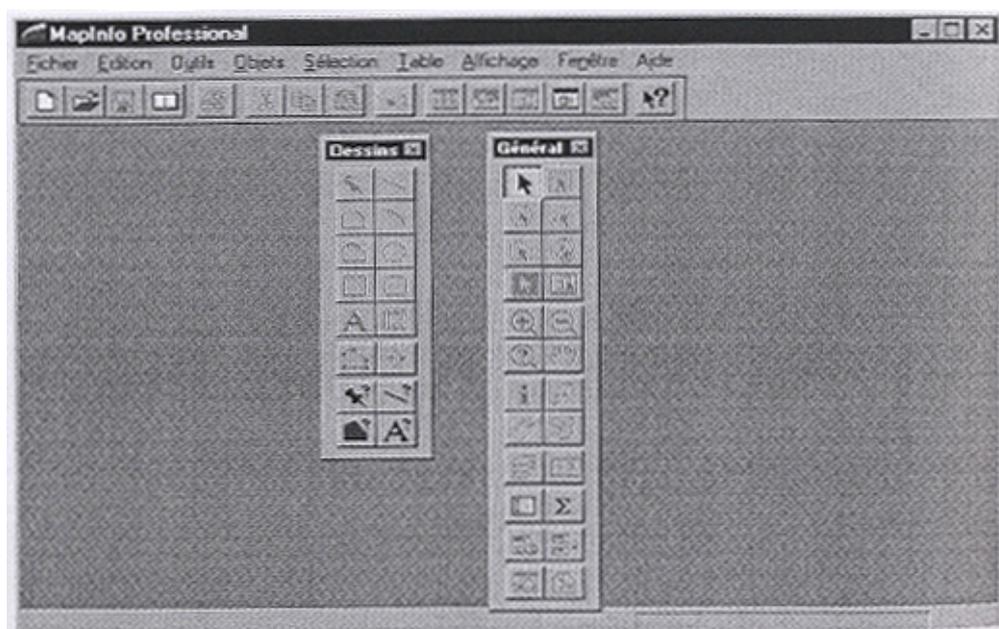


Figure I.9 : Fenêtre principale du logiciel MapInfo

VIII.2 Le SIG ArcView

ArcView est un puissant SIG, d'utilisation très simple qui permet d'accéder à des données géographiques. Avec ArcView, on peut visualiser, explorer, interroger et analyser spatialement les données. Il permet aussi de consulter simultanément une base de données ArcView qui est stockée dans des tables propres au logiciel, il permet aussi la consultation d'autres bases de données. ArcView est un produit de la société Environmental Systems Research Institute (ESRI).

On peut utiliser ArcView pour accéder aux données emmagasinées dans la base de données propre au logiciel, aux données de format Arc info, et d'autres bases de données de formats divers. On peut aussi l'utiliser pour créer ses propres données géographiques.

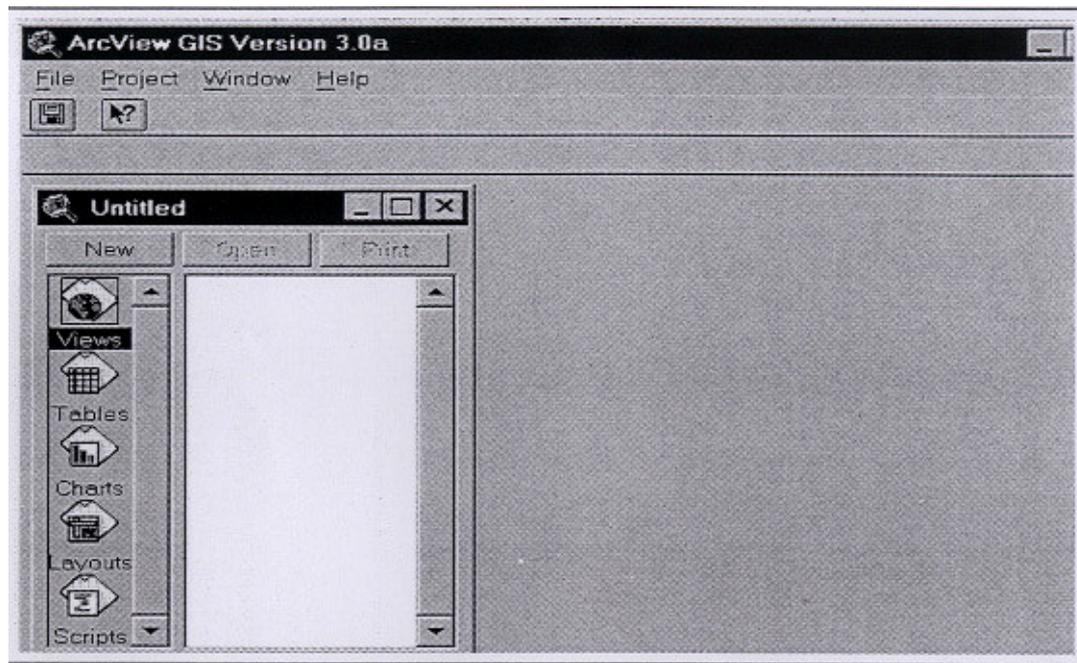


Figure I.10 : Fenêtre principale du logiciel ArcView

VIII.3 Autocad Map

Autocad n'est pas vraiment un SIG, mais c'est une solution complémentaire pour celui-ci grâce à un outil complémentaire de cartographie. En effet, L'Autocad est un logiciel de dessin architectural et de dessin industriel. [Kadir, 2006]

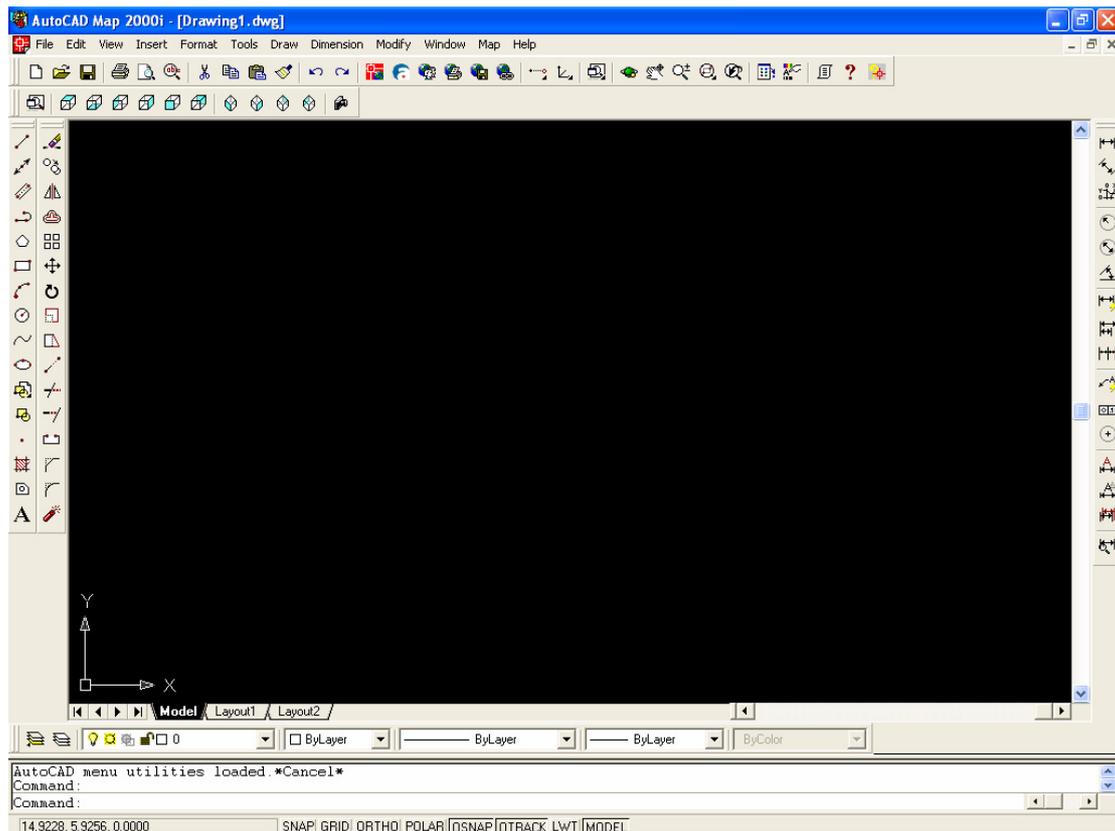


Figure I.11 : Fenêtre principale du logiciel Autocad Map

B. LES MNT

I. Définitions

Un modèle numérique de terrain (D.T.M ou Digital Elevation Model, D.E.M) est une représentation numérique des altitudes d'une surface. Il correspond à une grille régulière de points, localisés par leurs coordonnées géographiques (longitudes et latitudes, X et Y), les altitudes (mesures altimétriques, Z) ont été interpolées au départ de points cotés (nivellement, photogrammétrie, courbes de niveau).

Un M.N.T peut recevoir plusieurs couches d'informations sur la couche première (les altitudes). Par exemple, on peut y ajouter les contours des bassins versants et le réseau hydrographique (couche vecteur).

Selon **R. Laurini (1991)**, le modèle numérique de terrain est l'ensemble des procédures permettant de calculer l'élévation **Z** d'un point en fonction de celle des points voisins stockés dans une base de données. [**Abdelali, 1999**]

Pour **S. Aronoff (1989)**, un modèle numérique de terrain est défini comme étant un ensemble de mesures altimétriques localement distribuées au-dessus de la surface terrestre, utilisées pour l'analyse de la topographie. [**Abdelali, 1999**]

II. Acquisition des données

Les données nécessaires à la construction d'un modèle numérique de terrain peuvent être de sources très diverses. En effet, la base de données altimétriques peut être obtenue par de nombreux moyens et procédés et cela selon le but recherché: [**Floissac, 1997**]

- A partir de levés sur le terrain en procédant à des mesures topographiques à l'aide d'un appareil appelé théodolite. Cette méthode a l'inconvénient d'être très lente à réaliser mais représente l'avantage d'être très précise.
- A partir de la numérisation des courbes de niveau d'une carte topographique en utilisant la table à digitaliser. Cette méthode est extrêmement pratique lorsqu'on s'intéresse à une zone d'étude de taille relativement modeste.
- A partir des images satellites et radar : ce sont les méthodes les plus répandues de nos jours.

III. Les différents types de MNT

Il existe quatre (04) formes différentes de représentations d'un modèle numérique de terrain qui sont: [**Ider, 2004**]

- Grille régulière ;
- Contours (courbes de niveau) ;
- Grille triangulée ;
- Triangulated Irregular NetWork (T.I.N)

Les formes les plus utilisées sont les M.N.T sous forme de grilles régulières et le réseau irrégulier de triangulation (T.I.N).

III.1 Les M.N.T sous forme de grilles régulières (Raster)

Un M.N.T raster est une matrice d'altitude (figure I.12). Il s'agit d'un ensemble de valeurs numériques représentant des altitudes, espacées de manière régulière et ordonnée selon un balayage du terrain. Chaque valeur d'altitude représente la moyenne d'un élément de surface de terrain. Cette distribution de points définit alors un maillage de la surface de la terre. Les dimensions de la maille définissent la résolution spatiale planimétrique du M.N.T. Plus l'espacement des points est serré, plus la résolution est grande. Ainsi, le M.N.T est fin et riche en détails topographiques.

Les M.N.T raster peuvent être produit par différentes méthodes et à partir de source de données diverses :

6	9	7	5	12
13	6	27	18	22
23	6	9	7	14
5	13	26	22	6
19	24	12	32	18
20	17	28	35	9
32	10	21	14	17

Figure I.12 : Un MNT sous forme de grille régulière

[Ider, 2004]

- **A partir de courbes de niveau**

La numérisation des courbes de niveau d'une carte standard (topographique), donne un ensemble d'arcs. On détermine les intersections de ces arcs avec le maillage du M.N.T à produire. On obtient un ensemble de points cotés. Cet ensemble sert de point de départ à une interpolation des altitudes, à l'aide d'un logiciel, en chaque point de maillage afin de produire l'ensemble du M.N.T recherché. La précision obtenue est en moyenne égale à la demie- équidistance entre les courbes initiales (c'est à dire pour des courbes ayant une équidistance de 50m, on obtient un M.N.T précis à 25m). Néanmoins, on peut améliorer cette précision en numérisant en plus des courbes de niveau des points caractéristiques tels que les sommets, les lignes de crête, les fonds de vallée....

- **A partir de photographies aériennes**

Dans ce cas, il s'agit d'un long travail de photo-interprétation à l'aide de couples d'images stéréoscopiques et d'un stéréoréstituteurs.

- **A partir d'images numériques (satellitaires)**

Le calcul de l'altitude à partir d'un couple d'images stéréoscopiques numériques est dans ce cas réalisé à l'aide de méthodes automatiques de traitement d'images. Le principe repose sur la recherche automatique pour tout pixel de l'une des images de son homologue dans l'autre image du couple stéréoscopique.

Dans ce cas, la grille peut être carrée ou rectangulaire. Le MNT sous forme de grille régulière est largement utilisé pour les raisons suivantes :

- Sa simplicité ;
- Sa vitesse d'accès pour d'autres applications ;
- Disponibilité des données dans cette forme.

Néanmoins, il a comme inconvénient de ne pas s'adapter à la variabilité du terrain.

III.2 M.N.T sous forme de T.I.N (vecteur)

L'autre alternative au mode Raster est une représentation vecteur par une couverture polygonale. Dans le cas où le M.N.T serait sous forme TIN, les points qui sont irrégulièrement espacés sont connectés pour former un réseau de triangles selon le critère de triangulation de Delaunay (les points sont reliés de manière à minimiser la dimension du cercle inscrit entre les trois points du triangle). (Figure I.13).

Contrairement à la grille régulière, le T.I.N s'adapte mieux à la variabilité du terrain (un échantillonnage dense dans les zones à relief accidenté et moins dense dans les zones où le terrain est uniforme).

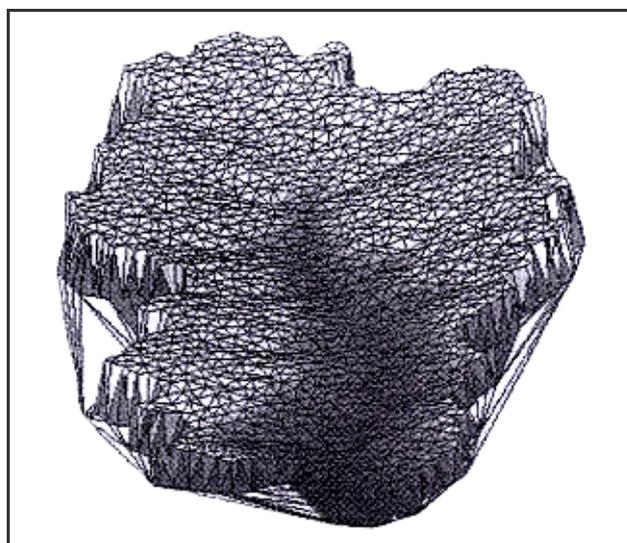


Figure I.13 : Un MNT sous forme de réseau de TIN

[Ider, 2004]

III.3 Contours

Les contours sont des polygones qui suivent la position d'une coordonnée Z donnée (figure I.14)

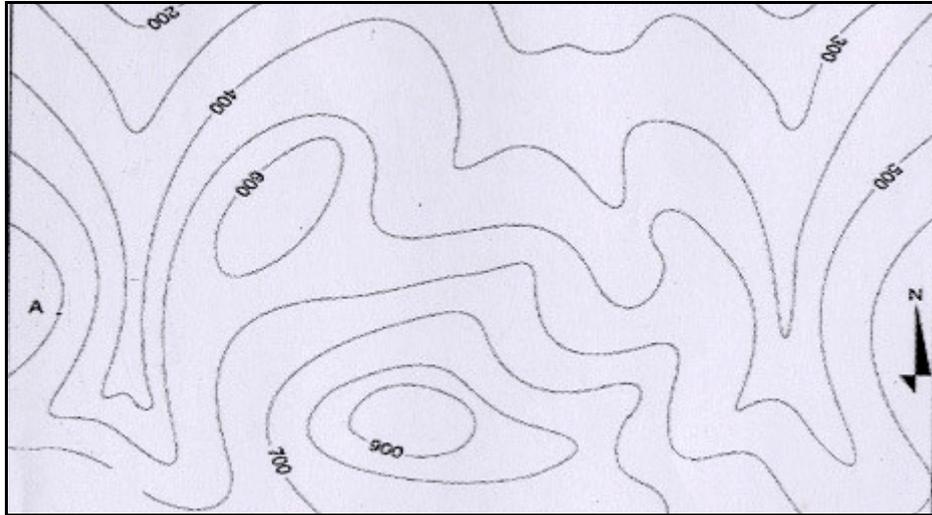


Figure I.14 : Surface représentée par des courbes isohypses

[Ider, 2004]

III.4 Grille triangulée

C'est un modèle qui combine à la fois les avantages des deux modèles cités antérieurement (modèle TIN et Grille). Il est souvent utilisé lorsqu'on s'intéresse à la modélisation des surfaces comportant des arêtes vives que le modèle grille ne respecte pas.

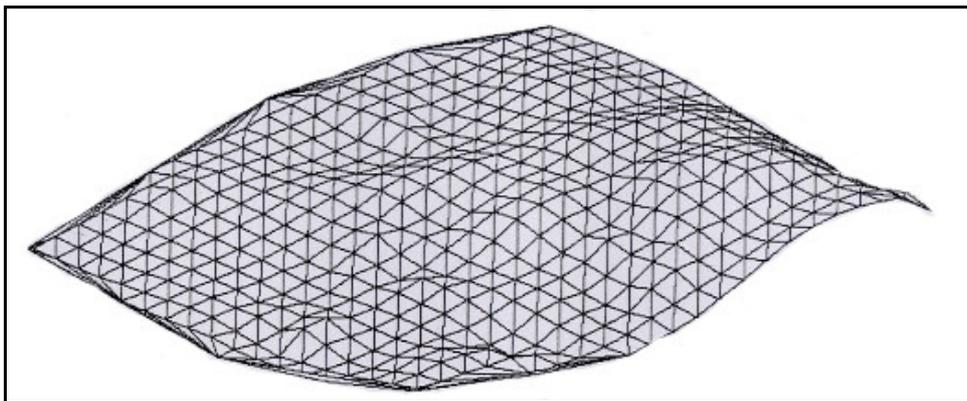


Figure I.15 : Surface représentée par une grille triangulée

[Ider, 2004]

IV. Choix du modèle numérique de terrain

Actuellement, les deux grandes classes de MNT les plus utilisées sont :

- Les grilles irrégulières triangulaires (en anglais TIN- Triangular irregular network) ;
- Les grilles régulières.

Le choix entre le MNT Raster et le MNT Vecteur dépend essentiellement des données dont on dispose et des possibilités du logiciel utilisé pour les différentes tâches à effectuer. Tous les logiciels ne permettent pas d'utiliser les T.I.N, tandis que la plupart peuvent lire des images, et donc afficher le M.N.T dans ce mode.

V. Production du modèle numérique de terrain

Deux étapes sont nécessaires pour créer un modèle numérique de terrain.

- **Obtention des coordonnées X, Y, Z**

- Nivellement par topométrie sur les lieux ;
- Numérisation à partir des courbes de niveau d'une carte ;
- Saisie des points ou des courbes de niveaux de terrain sur fond de plan scanné ;
- Mesures stéréoscopiques à partir d'images de satellite.

- **Interpolation des coordonnées X, Y, Z**

Pour rendre le modèle plus réaliste et plus conforme à la réalité du terrain, l'utilisateur doit inclure les lignes de crête et les thalwegs lors de la digitalisation.

VI. Les utilisations et les représentations fréquentes des MNTS [Floissac, 1996]

Les utilisations les plus fréquentes des MNTs conduisent à :

- L'établissement des cartes de pentes ;
- L'établissement des cartes d'exposition des versants ;
- La détermination automatique des écoulements dans un bassin versant. Cette dernière permet de retrouver l'essentiel des écoulements superficiels d'une région donnée grâce à des algorithmes de traitement bien spécifiques ;
- Extraction des rivières et détermination de leurs ordres.

A partir d'un MNT, il est possible de créer un certain nombre de fichiers dérivés qui seront utilisés dans de nombreuses analyses de terrain. Les informations dérivées peuvent être scindées en deux parties à savoir : [*Bouchaibi, 1998*]

- **Informations dérivées cartographiques**

- Pentés et orientations
- Extraction de points singuliers
- Cuvette
- Piton
- Cartes d'ensoleillement
- Zones hypsométriques
- Courbes de niveau

- **Informations dérivées autres**

Ces informations peuvent être linéaires, exemple : profils en long de l'oued ou coupes de terrain. Elles peuvent aussi être complexe : exemple : vue en perspective.

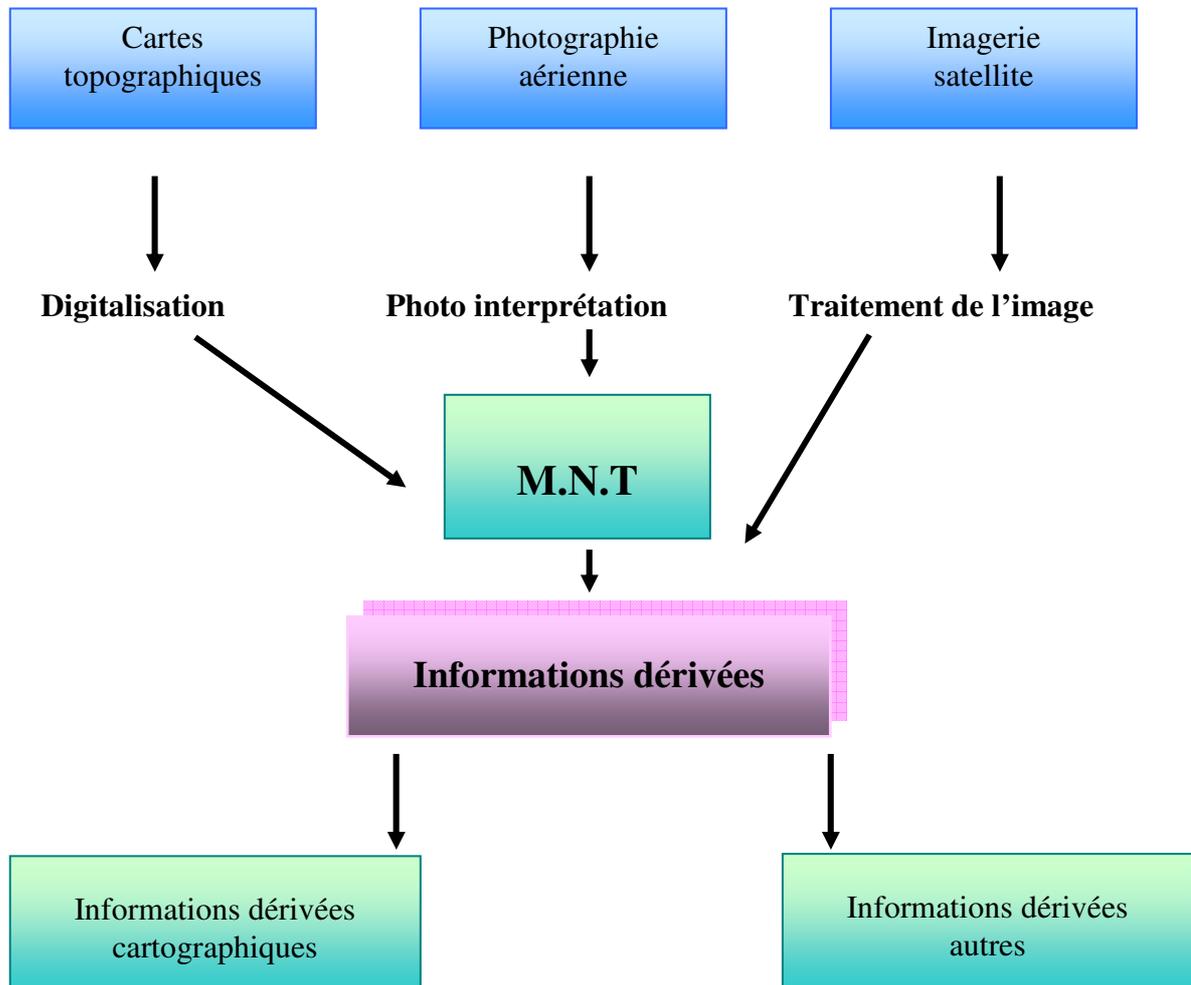


Figure I.16 : Sources d'informations d'un M.N.T

[Bouchaibi, 1998]

VII. Précision d'un MNT

La précision du modèle numérique de terrain, qui est impossible d'ailleurs à formaliser, est globalement évaluée en fonction de plusieurs paramètres en particulier : [Henry, Grussenmeyer; Mallet; Maquaire, 2001]

- L'échelle de la carte topographique (courbes de niveau) utilisée.
- Equidistance des courbes de niveau.
- L'échelle de la résolution des images (ou photographies) utilisées.
- La densité des points, réellement mesurés sur le terrain et la précision des levés.
- La répartition de ces points en fonction du caractère plus au moins accidenté du terrain en particulier pour les (T.I.N).

VIII. Conclusion

L'utilisation du SIG dans notre travail, nous permet la préparation des données nécessaires à la simulation numérique des crues de l'oued Allalah. Cette base de données des coordonnées planimétriques X,Y et altimétrique Z des points est utilisée pour construire le modèle numérique du terrain (MNA), qui est une modélisation du relief du cours d'eau.

Au chapitre suivant, nous présentons le bassin versant de Ténès et nous procéderons à l'étude hydrologique et hydrométrique de ce bassin.

Chapitre II :

*Présentation du Bassin Versant de Ténès
Et Etude des Crues*

CHAPITRE II : PRESENTATION DU B.V DE TENES ET ETUDE DES CRUES

Le comportement hydraulique des bassins versants est influencé par des paramètres physiques, géométriques et morphologiques qui jouent un rôle essentiel dans l'étude des différents termes constituant le bilan hydrologique.

Ainsi, les éléments hydrologiques constituent la plupart du temps le seul outil dont on dispose pour étudier et comprendre le comportement d'un phénomène naturel, il est donc important de connaître le maximum d'information et garantir la qualité des données du cours d'eau pour simuler autant que possible les conditions naturelles d'écoulement.

A. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE TENES

I. Présentation Générale [Demmak, 1982]

I.1 Situation géographique

Le bassin de l'oued ALLALAH appartient à l'ensemble des bassins « Côtiers Algérois » et plus particulièrement à la zone des « Côtiers Dahra » zone littorale relativement étroite qui s'étend sur une bande d'environ 200 Km de long et 20 Km de large entre l'embouchure du Cheliff et le massif du Zaccar .

Formant une unité géographique relativement homogène, cette chaîne de l'Atlas Tellien Littoral est constituée d'une succession de massifs collinaires du crétacé et du miocène, d'altitudes modérées, dépassant rarement 1000m, soumis à un climat méditerranéen tempéré.

Une succession d'oueds côtiers (dont les plus importants sont les oueds KRAMIS, ALLALAH, DAMOUS et HACHEM) drainent le flanc Nord de cette chaîne, tandis que le flanc Sud alimente les affluents rive droite de l'oued Chélif.

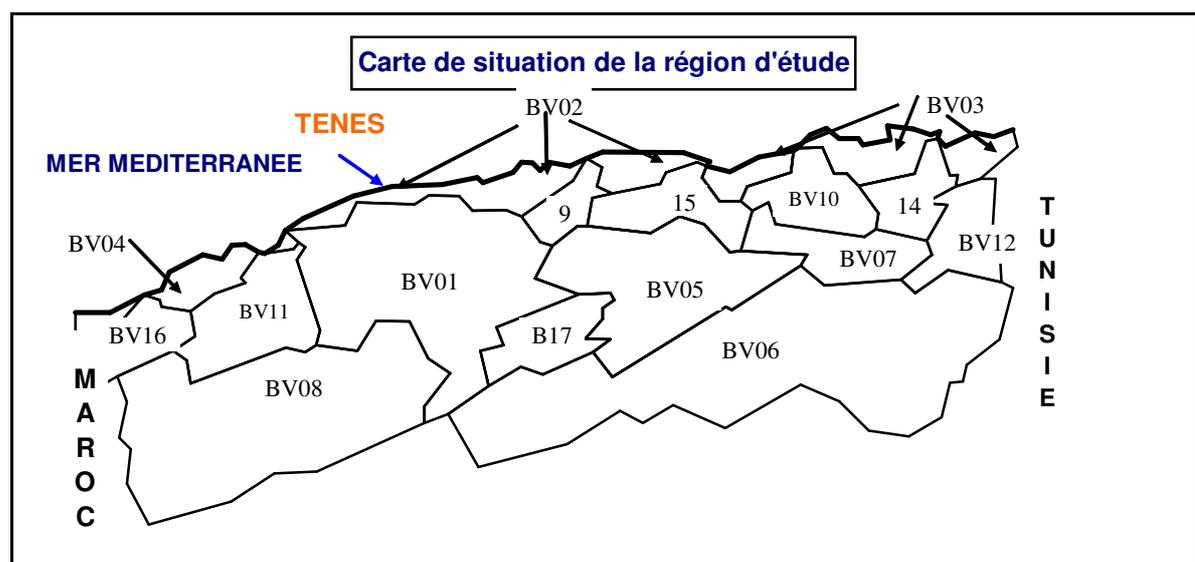


Figure II.1 : Carte de situation de la région d'étude

I.2 Description générale du bassin

Le bassin étudié présente sensiblement une forme trapézoïdale de base parallèle au littoral méditerranéen.

L'oued principal coule suivant une direction SUD- OUEST –NORD-EST et reçoit ses principaux affluents en rive droite.

La branche occidentale du bassin présente une forme allongée et une topographie d'ensemble caractérisée par des altitudes médiocres, des pentes faibles et un relief confus de mamelons et de croupes. Soumise presque exclusivement à des cultures annuelles, cette partie du bassin ne comporte aucun couvert végétal permanent.

La branche orientale du bassin qui draine les deux principaux affluents rive droite de l'oued ALLALAH (oued BOUHALLOU et BEN ALI) se distingue par une forme compacte, des pentes fortes et un couvert végétal permanent relativement important.

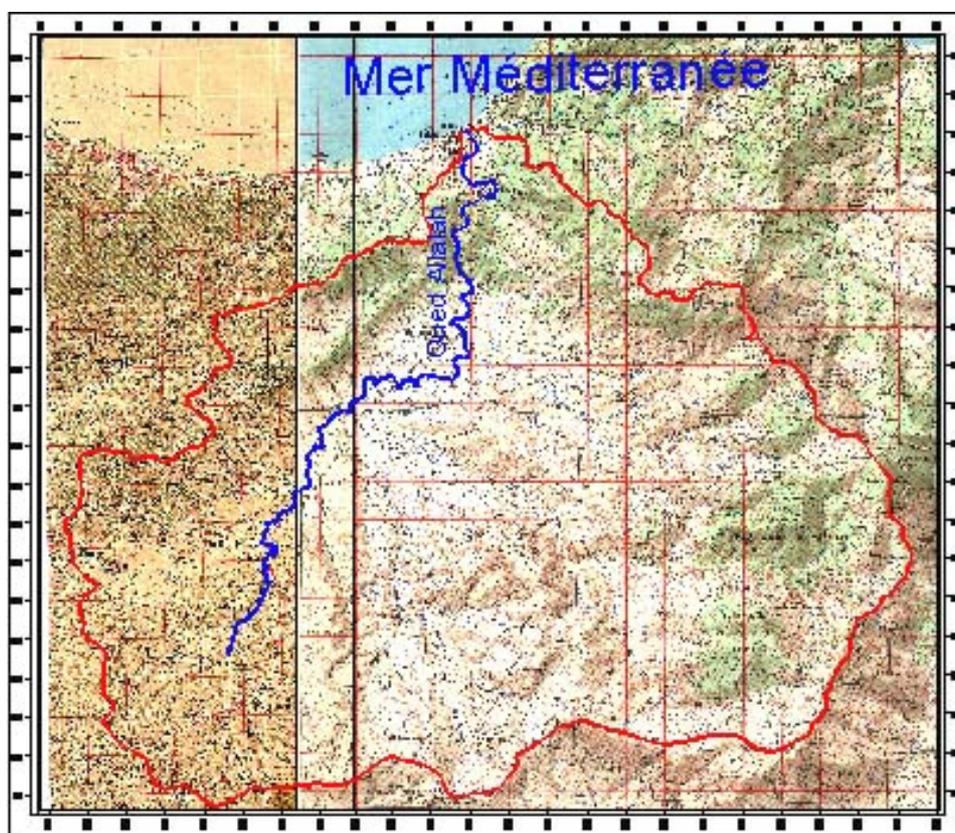


Figure II.2 : Carte de situation du bassin de Oued Allalah

I.3 Caractères physiques généraux

✘ La lithologie

L'étude lithologique a été menée à partir des cartes et notices géologiques au 1/50.000 de Ténès et ABOU EL HASSEN (Ex. Cavaignac)

La lithologie explique en grande partie la différence observée sur les deux branches du bassin du point de vue structure morphologique et occupation du sol.

La branche occidentale du bassin est constituée essentiellement :

- Au Sud de la plaine alluviale de l'oued ALLALAH de formations argileuses helvétiques épaisses (> 200m), profondément ravinées par les affluents rive droite de l'oued formant des collines arrondies et dénudées.
- Au nord de la plaine alluviale d'une étroite bande marneuse miocène dominée par des formations gréseuses miocène et éocène.

La partie orientale du bassin peut être subdivisée en deux zones :

- Une zone amont, montagneuse, constituée de formations relativement résistantes à prédominance gréseuse de l'éocène et du crétacé supérieur (grès quartziteux Médjanien, marnes calcaires sénonien).
- Une zone aval, collinaire constituée de marnes miocène blanchâtres (carténien) ou marnes schisteuses crétacé bleuâtres (sénonien).

73% de la superficie totale du bassin sont à composantes marneuses et argileuses imperméables, très peu résistantes à l'érosion, ce qui explique l'importance du taux de sédiments transportés.

✘ Les pentes

- Les fortes pentes (>25°) apparaissent dans la zone des formations relativement résistantes à prédominance gréseuse.
- Les collines disséquées et abruptes (>19°, < 25°) apparaissent sur les marnes carteniennes et contrastent par leur rigidité avec les pentes relativement douces (>12°, < 19°) des argiles helvétiques qu'on observe sur la partie Sud- Ouest du bassin.
- Les faibles pentes (>6°, < 12°) apparaissent dans les piémonts.
- La zone alluviale représente les plus faibles pentes (<5°)

✘ Le couvert végétal et l'occupation du sol

Il y a une liaison étroite entre la nature des terrains et le type d'occupation du sol : 80% du bassin est soumis à des cultures annuelles (céréales) et des parcours.

- Les zones de culture s'étendent sur les terrains marneux et argileux du miocène et sur la plaine alluviale de SIDI AKACHA.
- Les zones de forêts et de maquis relativement limitées en superficie se sont développées exclusivement sur la partie montagneuse de la branche occidentale du bassin où les grès quartziteux médjaniens constituent un sol forestier

✘ Caractéristiques climatiques

Avec une pluviométrie moyenne annuelle de 550mm (selon la carte des pluies de l'Algérie du nord de l'ANRH5), une température moyenne annuelle de 17° à 18° et

⁵ : Agence Nationale des Ressources Hydraulique

une humidité relative de 70%. Le bassin de l'oued ALLALAH est à climat méditerranéen tempéré.

✘ **Conditions socio - économiques**

La céréaliculture et l'élevage constituent les principales branches d'activité de ce bassin.

II. Caractéristiques générales du bassin versant

II.1 Caractéristiques physiographiques

✘ **Paramètres géométriques**

Les bassins ont des propriétés géométriques variées qui dépendent du contexte géologique, géomorphologique et climatique de la région étudiée. Ceci inclut les héritages paléo-climatique et tectoniques. [Liamas, 1992]

- **Périmètre** : son calcul dépend de l'échelle de la carte et de la densité du réseau hydrométrique. Il est mesuré à l'aide du curvimètre et n'est généralement pas utilisé directement, mais à travers des valeurs qui en dérive. Il est donné par la formule : $P=2(L+1)$

avec; **L** : longueur du rectangle équivalent et **1** : largeur du rectangle équivalent

Le périmètre du bassin versant de Ténès est de : **78 Km**

Surface : elle est mesurée à l'aide du planimètre à partir du tracé du bassin versant. Pour le bassin versant considéré, on a : $S= 295 \text{ Km}^2$

La nature des surfaces des bassins a un rôle primordial sur le comportement hydrologique de ceux-ci. Les paramètres qui interviennent sont la pente, la lithologie, la pédologie et la couverture végétale. Ces paramètres influencent grandement la perméabilité et la rugosité de la surface, qui conditionnent à leur tour la vitesse du ruissellement.

✘ **Les paramètres de forme [Liamas, 1992]**

L'étude de la forme des bassins est importante car elle permet de mieux comprendre le comportement hydrologique. Un bassin compact, de forme quasi-circulaire a une réponse hydrologique beaucoup plus rapide pour une même averse qu'un bassin allongé, parce que la plupart des points du bassin sont à peu près à la même distance de l'exutoire.

Comme il est difficile d'exprimer réellement la forme d'un bassin versant, on fait appel à deux indices qui sont : **l'indice de compacité** et le **rectangle équivalent**.

- **Indice de compacité ou de Gravelius (K_c)**

L'indice de compacité caractérise la forme du bassin versant, et renseigne sur la vitesse de concentration des débits et la puissance des crues ainsi que sur l'érosion. C'est le rapport entre le périmètre du bassin versant.

Les différentes formes du bassin versant sont résumées dans le tableau II.1.

Tableau II.1 La forme du bassin versant

Forme du bassin	Valeur de K_c
Parfaitement rond	=1
allongée	>1
carré	=1.12

L'indice de compacité est donné par la formule :

$$K_c = \frac{P}{2(\pi S)^{0.5}}$$

avec; **S** : surface du bassin versant ;

P : périmètre du bassin versant.

Pour le bassin de Ténès : **$K_c = 1.28$**

Ce qui signifié que le bassin de Ténès a une forme allongée.

- **Le rectangle équivalent**

C'est une notion introduite pour pouvoir comparer deux bassins entre eux du point de vue de l'influence des caractéristiques et de la forme sur les écoulements.

Il se défini comme étant le rectangle de longueur « L » et de largeur « l », qui a le même indice de compacité (K_c) et même hypsométrie que le bassin versant étudié.

Les dimensions de ce rectangle se calculent à l'aide des relations suivantes :

$$L = \frac{K_c (S)^{0.5}}{1.12} [1 + (1 - (1.12 / K_c)^2)^{0.5}]$$

$$l = \frac{K_c (S)^{0.5}}{1.12} [1 - (1 - (1.12 / K_c)^2)^{0.5}]$$

où : $K_c \geq 1.12$

Dans le cas du bassin de Ténès, les dimensions du rectangle équivalent sont :

L = 29.1 Km

l = 10.1 Km

- ✘ **Paramètres du relief**

La caractéristique fondamentale du relief de ce bassin versant se reflète dans sa plasticité bien accentuée. De nombreux cours d'eau et leurs affluents, le plus

fréquemment aux pentes raides, ont creusé leur lits profondément dans la couche géologique peu solide.

Les altitudes minimale et maximale du bassin versant de Ténès sont lues directement à partir de la carte. L'altitude minimale est celle qui correspond à l'exutoire près de la mer, tandis que l'altitude maximale se trouve sur les massifs :

Hmin = 80 m

Hmax = 996 m

II.2 Caractéristiques du réseau de drainage

Le réseau de drainage est l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporels qui participe à l'écoulement.

✘ Classification du chevelu hydrographique (ordre du bassin)

On définit habituellement l'ordre d'un cours d'eau à partir d'une carte topographique. Il y a trois méthodes pour définir ces ordres : la méthode de Strahler, la méthode de Horton et la méthode de Gravélius.

Dans la méthode de Strahler, les cours d'eau du premier ordre sont à l'amont. Deux cours d'eau du premier ordre qui confluent, donnent un cours d'eau du deuxième ordre. Deux cours d'eau du deuxième ordre qui confluent, donnent un cours d'eau du troisième ordre, et ainsi de suite. Si un cours d'eau d'un ordre donné rencontre un cours d'eau d'un ordre inférieur, il ne change pas d'ordre. La méthode de Gravélius numérote les ordres dans le sens contraire de Strahler, c'est à dire de l'aval vers l'amont. Celle de Horton fonctionne comme celle de Strahler, sauf qu'elle attribue l'ordre le plus élevé au cours d'eau principal depuis sa source.

✘ Longueurs des affluents

La longueur du cours d'eau du bassin versant de Ténès est : **35m**

✘ Densité de drainage

La densité de drainage est définie pour un bassin de surface « S » comme la somme des longueurs totales cumulées des rivières de l'ordre « i » sur la surface drainée.

Elle est donnée par :

$$D_p = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{A}$$

avec ;

L_i : longueur totale cumulée des cours d'eau d'ordre i (déterminée au curvimètre sur la carte du chevelu hydrographique) [Km];

D_p : densité de drainage [Km / Km^2];

i : numéro le plus élevé;

S : surface du bassin versant (Km^2).

La densité de drainage sera donc : $D_p = 4.7 Km/Km^2$ [Demmak, 1982]

La densité de drainage est un indicateur révélateur de la géologie et du climat .Un bassin formé de matériaux très perméables et muni d'une couverture végétale continue aura en général une densité de drainage faible. Par contre, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles va souvent présenter une densité de drainage élevée. Celle-ci est accentuée par la présence de pentes élevées et par un climat où les précipitations sont intenses mais courtes en durée.

✖ Coefficient de torrentialité

Le coefficient de torrentialité est le produit entre la densité de drainage et la densité de thalweg, il est donné par :

$$C_t = D_d * \frac{N_1}{S}$$

avec ;

D_d : densité de drainage ;

S : surface du bassin versant ;

N_1 : nombre du thalweg d'ordre 1;

N_1/S : densité du thalweg.

Le coefficient de torrentialité pour le bassin versant de Ténès est: $C_t = 44.8$ [Demmak, 1982]

Tableau II.2 Caractéristiques générales du bassin versant de Ténès

Caractéristiques	Symbole	Unité	Valeur
Périmètre	P	Km	78
Surface	S	Km ²	295
Indice de compacité	K _c		1.28
longueur du rectangle équivalent	L	Km	29.1
largeur du rectangle équivalent	l	Km	10.1
Altitude minimale	H _{min}	m	80
Altitude maximale	H _{max}	m	996
La longueur du cours d'eau	L	m	35
Densité de drainage	D _p	Km/Km ²	4.7
Coefficient de torrentialité	C _t		44.8

III. Temps de concentration [Charef, 1998]

Le temps de concentration est le temps que met la goutte de pluie la plus éloignée hydrauliquement à s'écouler pour arriver à l'exutoire. N'ayant pas d'observations directes faites en ce sens, ce paramètre sera déterminé en se passant sur l'utilisation des formules empiriques.

Le temps de concentration du bassin versant de Ténès sera déterminé en se basant sur l'utilisation des formules empiriques.

- Formule de Giandotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

S : surface du bassin versant ;

L : longueur du thalweg principal;

H_{moy} : Altitude moyenne;

H_{min} : Altitude minimale

T _c = 7.08 heures

- Formule de Ventura

$$T_c = 0.1272 * \left(\frac{S}{I_0} \right)^{1/2}$$

I_0 : pente moyenne

$$T_c = 6.3 \text{ heures}$$

- Formule de Passini

$$T_c = 0.108 * \left[\frac{(S * L)^{1/3}}{I_0^{1/2}} \right]$$

$$T_c = 2.90 \text{ heures}$$

- Formule de synthétique

$$T_c = 0.6615 * L^{0.77} * I_0^{-0.385}$$

$$T_c = 23.12 \text{ heures}$$

- Formule de Turraza

$$T_c = 0.10813 * \sqrt[3]{\frac{S * L}{\sqrt{L}}}$$

$$T_c = 1.3 \text{ heures}$$

- Formule SCS (Soil Conservation Service)

$$T_c = \left[\frac{0.87 * L^3}{H_{\max} - H_{\min}} \right]^{0.385}$$

H_{\max} : Altitude maximale.

$$T_c = 4.17 \text{ heures}$$

Le bassin versant est de forme arrondi d'une manière générale avec un léger allongement dans le coté nord, très bien drainé avec une forte densité du chevelu hydrologique. La géologie du sol est de nature argileuse sur l'ensemble du bassin versant avec une végétation très pauvre et clairsemé sur une superficie de 295 Km², ce qui explique le choix d'un temps de concentration égale à **4.17 heure**.

B. ETUDE DES CRUES

I. Introduction

L'intérêt de la détermination du débit maximum d'un cours d'eau est évident en raison des effets destructeurs bien connus de ces événements hydrologiques. Lorsqu'on projette la protection d'une ville contre les inondations, on doit déterminer le maximum probable de la crue auquel on devra faire face.

La crue max. est caractérisée par :

- Le débit max.
- La durée de la crue
- Le volume écoulé durant la crue
- L'hydrogramme de la crue

I.1 Définitions et généralités [Bennani, 2003]

Une crue est un phénomène hydrologique qui s'exprime par une pulsation brutale dans le niveau des eaux d'un cours d'eau. Elle produit des débits exceptionnels dépassant largement les normes habituelles. Autrement dit, un cours d'eau considéré en crue lorsque son débit dépasse une valeur de faible probabilité d'apparition.

On distingue les crues simples ou mono géniques, et les crues complexes ou polygéniques.

- Une crue simple est caractérisée par une seule montée du niveau d'eau suivie d'une descente de ce niveau
- Une crue complexe est caractérisée par plusieurs hausses et plusieurs baisses des niveaux d'eau, qui témoignent de la pluralité des facteurs responsables de la crue.

I.2 Genèse et propagation des crues [Réménieras, 2003]

Sur un bassin versant, la fraction de pluie qui n'a pas été évaporée ou infiltrée ruisselle sur le terrain. Cette eau de ruissellement rejoint le réseau hydrographique par des filets d'eau qui se regroupent et parviennent à un collecteur plus important.

Au cours de ce parcours, chaque mouvement d'eau dépend des conditions de l'averse et de la nature physique du bassin (principalement la capacité d'infiltration, la pente et la couverture végétale).

Quand l'intensité de la pluie est importante, les sols sont rapidement saturés et imperméabilisés. Les temps de réponses et de montée deviennent courts, et on assiste à des crues soudaines et brèves, surtout sur des bassins montagneux.

Les crues peuvent être groupées en trois classes :

- Les crues d'averse.
- Les crues de fonte de neige.
- ***Les crues d'embâcle et de débâcle de glace.***

✘ Crues d'averses

Les grandes crues ont surtout pour origine des averses exceptionnelles, par leur intensité leur extension, leur durée ou leur succession rapprochée.

Les averses orageuses, courtes, violentes et très localisées, produisent sur les bassins versants, notamment en montagne des crues très pointues, dont les débits maxima peuvent provoquer de grands dégâts.

Ainsi à une même hauteur totale de pluie, peuvent correspondre des débit de pointe très différent, suivant :

- La topographie et la forme du bassin qui conditionnent le temps de concentration.
- L'état du sol (la perméabilité, la végétation ...)
- L'intensité et la distribution spatiale et temporelle des précipitations qui agissent sur la forme de l'hydrogramme.

L'étude des averses et des précipitations journalières maximum est donc d'une grande importance pratique pour certaines études de protection contre les crues.

Cette étude exige la connaissance de l'intensité maximum de la pluie calculée sur des intervalles de temps assez faibles (de 5 minutes à une heure, et exceptionnellement quelques heures). Le calcul de cette intensité se fait à partir de diagrammes tracés par des pluviographes (appelés aussi pluviogrammes).

Les intensités journalières varient considérablement d'une zone à une autre.

✘ Crues de fonte de neige

Certains bassins montagneux de hautes altitudes sont couverts de neige dès le début de l'automne. Si la température subit une élévation, il peut en résulter une fusion rapide des neiges et production de grandes crues. Les facteurs prépondérants dans ce processus de fonte sont, la température, l'insolation, les vents chauds et l'action mécanique de la pluie et du ruissellement superficiel, qui déchiquette le manteau de neige.

Par ailleurs, la couverture neigeuse d'un sol saturé augmente le coefficient de ruissellement de certaines averses par la réduction de la capacité d'infiltration du sol.

✘ Crue d'embâcle et de débâcle de glace

Dans les régions froides où les cours d'eau gèlent en hiver, le dégel printanier produit des crues qui emportent avec elles les blocs de glaces. Ceux-ci peuvent être arrêtés par divers obstacles, s'accumulent le forment des barrages, qui peuvent être brusquement emportés par le flot. Il en résulte des crues brutales qui s'étalent rapidement mais n'intéressant que des secteurs assez courts : exemple ; Rhin à Cologne, Danube à Vienne, Sibérie, Canada...

Propagation des crues : Une crue peut être considérée comme une onde se propageant dans le cours d'eau. Comme toute onde, elle sera caractérisée par une vitesse de propagation, une amplitude, une longueur et un taux d'amortissement. La vitesse de propagation de l'onde de crue est très variable. Pour un même secteur, elle

varie d'une crue à l'autre en fonction de la pente, du rayon hydraulique, des sinuosités du lit, de la rugosité des berges ou des ouvrages humains.

Pour obtenir la vitesse de propagation des crues, on divise la distance entre deux stations hydrométriques successives sur un cours d'eau (en suivant le lit de l'oued avec ses sinuosités) par la durée séparant les moments des pointes de crue dans les deux situations.

II. Pluviométrie

II.1 Acquisition des données

Les données utilisées nous ont été aimablement fournies par l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH) et l'Office National de la Météorologie (ONM). Il s'agit d'un fichier des précipitations de la station de Sidi Akacha s'étalant sur 30 ans (1972-2001), au pas du temps mensuel ainsi qu'un fichier des pluies journalières maximales annuelles.

Les caractéristiques de la station étudiée sont présentées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Caractéristiques de la station étudiée.

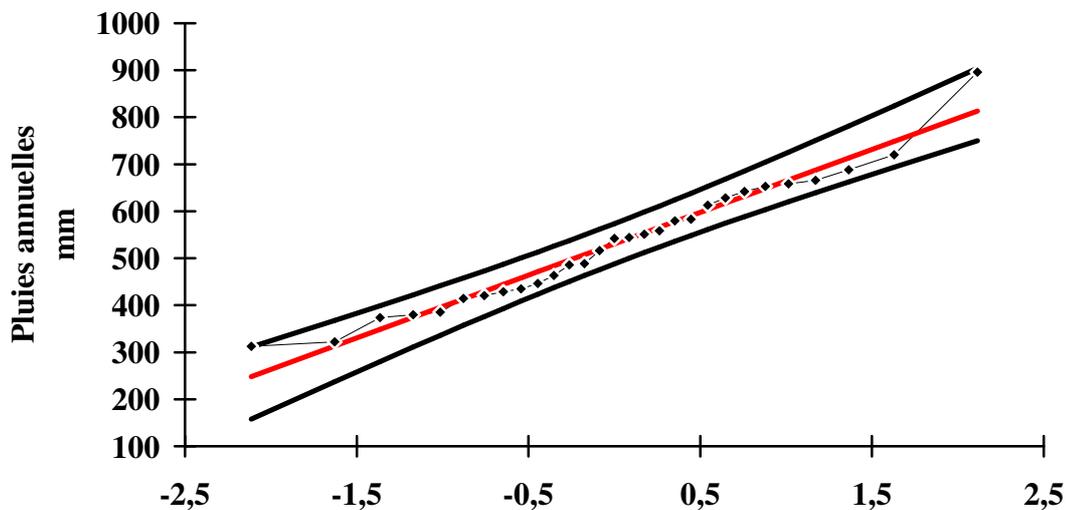
Station	Code	X	Y	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Sidi Akacha	02-02-11	373.55	351.20	01 17' 19''E	36 27' 11''	130

II.2 Pluie annuelle

Les pluies annuelles de la région s'ajustent bien à la loi normale (Figure II.3).

On présente les pluies maximales annuelles de la station de Sidi Akacha pour différentes fréquences dans le tableau II.4

**Ajustement à une loi Normale
des pluies annuelles de la station de Sidi Akacha**



*Figure II.3 : Ajustement des pluies annuelles de la station de Sidi Akacha
à la loi normale*

Tableau II.4 : Pluies Maximales annuelles pour différentes périodes de retour.

Période de retour	Fréquence	U.Gauss	Pluie (mm)
10 ans	0.9	1.282	702.08
20 ans	0.95	1.645	750.64
50 ans	0.98	2.054	805.27
100 ans	0.99	2.327	841.69

II.3. Pluie mensuelle

Les pluies moyennes mensuelles représentées par le tableau II.5 traduisent clairement les variations saisonnières et leur distribution à l'échelle annuelle. La station prise en considération dans la région d'étude, fait ressortir deux périodes distinctes, une saison sèche et une autre humide.

Tableau II.5 : répartition des pluies mensuelle station de Sidi Akacha

Mois	sept	oct	nov	déc	Jan	fév	mars	Avr	mai	juin	juil	août
P en mm	22.6	45.8	58.2	66.5	59.1	71.2	57.0	47.2	31.2	5.9	1.0	3.4

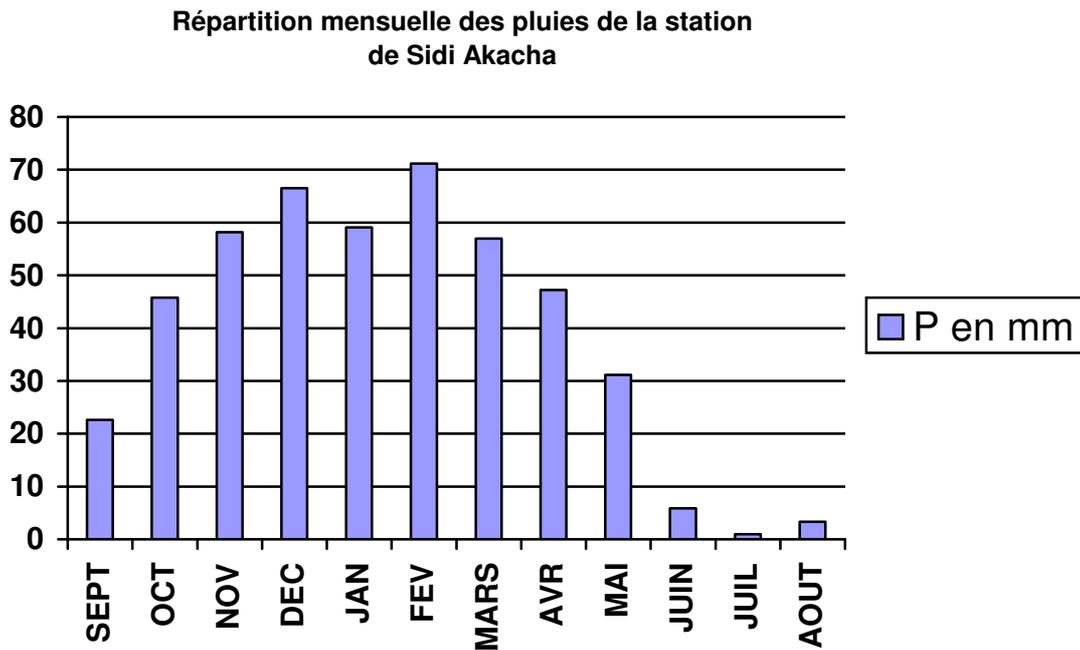


Figure II.4 : Répartitions mensuelles des pluies de la station de Sidi Akacha

On remarque l'existence d'une saison sèche qui correspond aux mois de juin à août, avec des pluies moyennes mensuelles inférieures à 6 mm et une saison humide qui correspond aux autres mois.

II.4 Pluie journalière

La protection contre les dégâts des eaux nécessite de s'intéresser aux pluies journalières maximales annuelles.

Il est vérifié que les pluies journalières maximales s'ajustent à une loi Log-normal (Figure II.5). Dans le tableau II.6, nous présentons les pluies max journalières de Sidi Akacha pour différentes fréquences

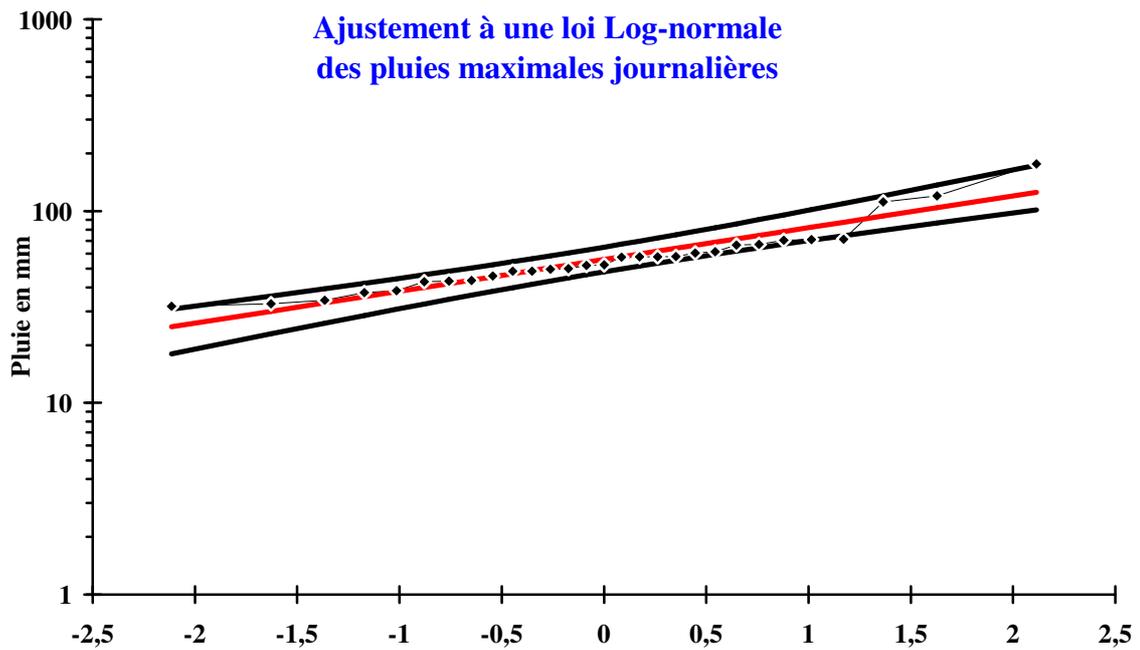


Figure II.5 : Ajustement des pluies journalières de la station de Sidi Akacha à la loi de Log -normal

Tableau II.6 : Pluies Maximale journalières en mm.

Période de retour	Fréquence	U.Gauss	Pluie (mm)
10 ans	0.9	1.282	91
20ans	0.95	1.645	105
50ans	0.98	2.054	122
100ans	0.99	2.327	136

II.5 Pluies de courtes durées

La relation Intensité – durée – fréquence est de la forme :

$$\frac{P_t}{P_{j\max}} = a * t^b$$

P_t : pluie correspondant à un pas de temps t

$P_{j\max}$: pluie journalière maximale.

a et b : paramètres climatiques

La relation obtenue est la suivante :

$$\frac{P_t}{P_{j\max}} = 0.15 * t^{0.44}$$

III. Crues

III.1 Régime hydrographique de l'oued et ressources en eau du bassin

✗ Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de l'oued est constitué d'une artère principale : l'oued ALLALAH d'orientation Sud-Ouest, Nord-Est qui draine la partie occidentale du bassin, il reçoit en rive droite une série de petits affluents, les plus importants étant les oueds BOUHALLOU et BENALI qui drainent la partie orientale du bassin (voir Figure II.6).

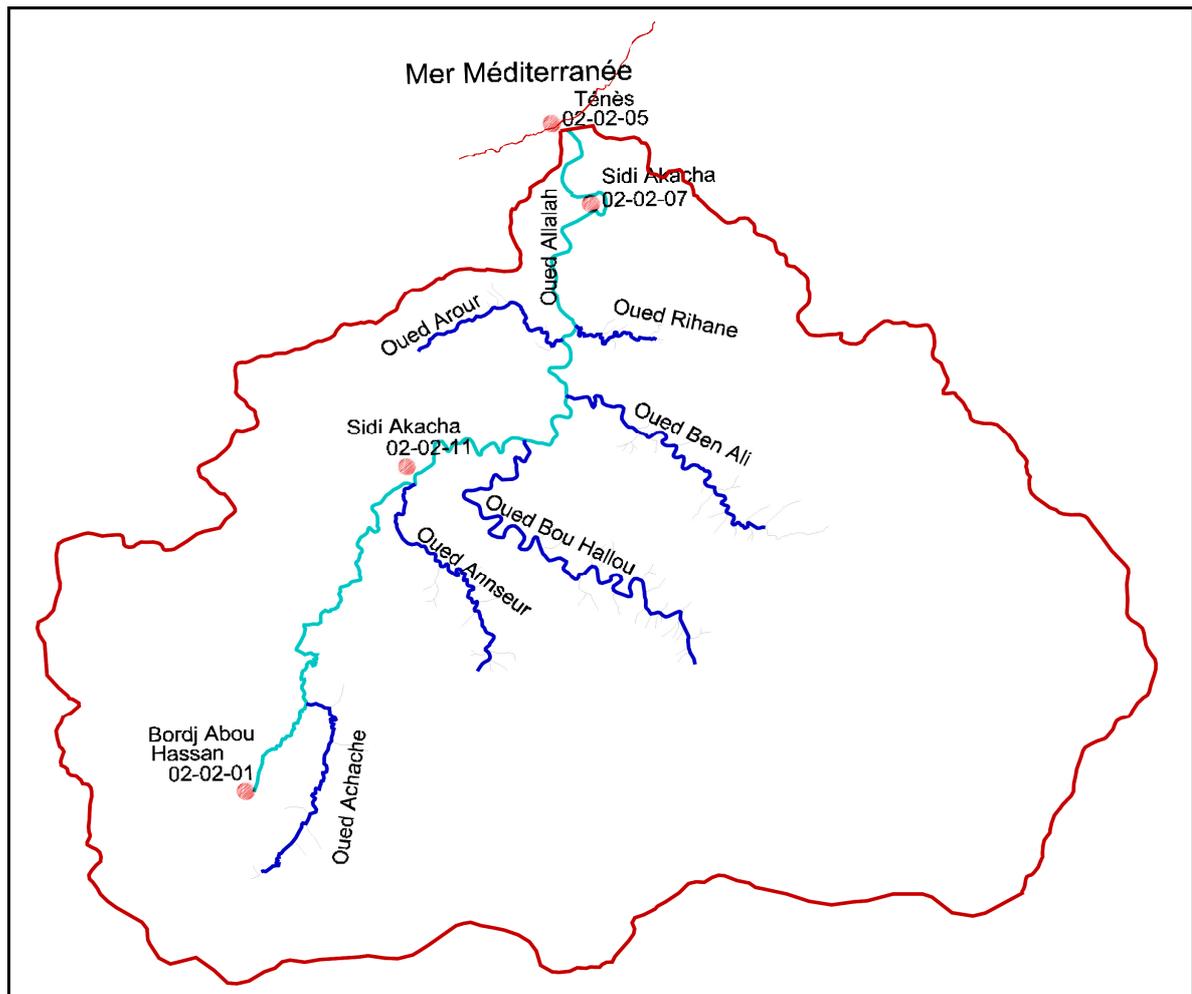


Figure II.6 : Bassin versant de Sidi Akacha

✗ Le régime hydrologique de l'oued ALLALAH

La conjugaison des crues des trois principaux affluents lors des précipitations généralisées sur le bassin se traduit par des crues violentes et brutales provoquant des inondations catastrophiques dans la ville de Ténès et les villages voisins.

✗ Les ressources superficielles [Demmak, 1982]

Les apports de l'oued ALLALAH sont essentiellement des apports de crues. Les réserves régulatrices de la nappe alluviales, ainsi que les aquifères des reliefs sont très limités.

III.2 Le réseau d'observation hydrométrique

L'importance des dégâts causés par les inondations ont mené dès 1959 l'ingénieur d'arrondissement à demander la contribution du service hydrologique pour étudier ce bassin. [Demmak, 1982]

Trois stations hydrométriques ont été mises en service en 1960. Ce réseau d'observation a été conçu dans l'objectif de contrôler les crues au niveau du bassin. Les deux premières stations ont très peu fonctionné (Figure II.6).

- La station hydrométrique de Bordj Abou El Hassan (020201) : cette station qui contrôle une superficie de 60 Km² a mal fonctionné, elle a été abandonnée en 1962.
- La station hydrométrique de Ténès (020205) : cette station a été détruite par la forte crue du 13 au 15 janvier 1961 qui a provoqué un effondrement du talus amont de la culée du pont de la RN11.
- La station hydrométrique de Sidi Akacha (020207) : cette station contrôle presque l'ensemble du bassin, a été installée en 1972 dans le but d'observer les crues , nous disposons d'une série de données hydrométriques sur une période de 30 ans (1972 à 2001).

III.3 Hydrogramme des crues

✘ Définition

L'hydrogramme, c'est à dire la courbe $Q(t)$ des débits en fonction du temps dans une section d'un cours d'eau, présente de nombreuses fluctuations d'amplitude, de période et de forme très diverses. Si la rivière ne comporte aucun ouvrage de dérivation ou de régularisation artificielle, chacune de ces fluctuations est le reflet d'une variation des facteurs hydrométéorologiques agissant sur son bassin versant ; en particulier, toute montée notable des eaux est la conséquence de précipitations ou de fontes de neige survenues antérieurement sur tout ou partie de son aire d'alimentation. [Réménieras, 1980]

L'étude de l'hydrogramme de crue est nécessaire dans la mesure où elle sert d'outil de base dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

A partir de l'hydrogramme, on peut évaluer les autres caractéristiques de la crue à savoir :

- La forme
- Le volume
- Le temps de montée et celui de la décrue.

✘ Forme de l'hydrogramme

L'allure du débit à l'exutoire du bassin versant en fonction du temps est représentée par une courbe appelée **hydrogramme**, que l'on divise comme suit :

[Réménieras, 1980]

- La partie correspondant à la montée de la crue est appelée *courbe de concentration*.
- La zone entourant le maximum est dite la « *pointe* ».
- La zone afférente à la diminution progressive du débit est désignée sous le nom de *courbe de décrue*.

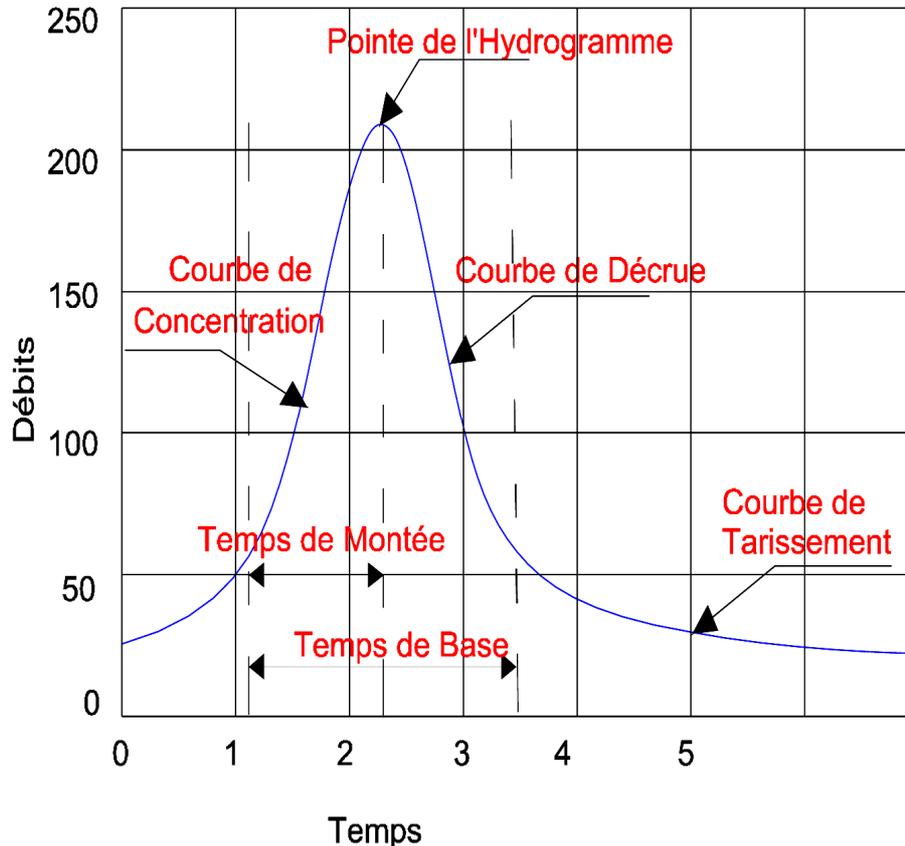


Figure II.7 : Les diverses caractéristiques de l'hydrogramme - type.

III.4 Analyse de la crue de Novembre 2001

Après une longue période de sécheresse, la région de Ténès a connu au cours du mois de Novembre 2001 un évènement pluviométrique important.

De par la quantité de pluie précipitée et les intensités élevées et répétées, il revêt un caractère exceptionnel, engendrant une crue brusque et violente causant d'énormes dégâts.

En effet, il a été enregistré au niveau du poste de Sid Akacha une pluie max. journalière de **176,2 mm** durant l'épisode pluvieux du mois de Novembre 2001. Cette quantité correspond à la valeur de pluie max journalière la plus forte observée sur la station.

L'ajustement des pluies max journalières à une loi de Log-normal fait ressortir une période de retour exceptionnelle de cette valeur qui est de **647 ans**. Les autres stations de la région ont également enregistré des pluies max journalières record.

- La station de Benaria (012211) : Pmax = 147,7 mm

- La station de Bordj Abou El Hassen (020201) : $P_{max} = 166,5$ mm.

Cet événement pluvieux reste exceptionnel tant par la quantité de pluie enregistrée que par les dégâts occasionnés.

Il s'agit d'une crue d'automne, qui se produit sur un sol sec, généré par une pluie généralisée sur l'ensemble du bassin.

Le débit de pointe de la crue au niveau de la station hydrométrique de Sidi Akacha est estimé à $291\text{m}^3/\text{s}$.

Il s'agit d'une **crue complexe et désorganisée** qui peut s'expliquer par les différences de comportement hydrologique des deux principales branches du bassin versant, les pluies sont tombées quelques heures auparavant sur la partie ouest de l'oued Allalah avant d'arriver sur la branche Est (bassins de BouHallou et BenAli). Ceci se traduit sur l'hydrogramme de crue par la présence de plusieurs sommets à $161\text{m}^3/\text{s}$, $223\text{m}^3/\text{s}$ et $291\text{m}^3/\text{s}$.

Bien que les débits de pointe ne soient pas exceptionnels, il faut retenir que la durée de la crue est élevée (plus de 03 jours) entraînant de grands volumes d'eau ruisselé.

Cet événement hydrologique s'est produit en automne, les sols n'étant pas saturés, ce qui laisse supposer que survenant en hivers ou au printemps les dégâts seraient plus importants car survenant quand les sols sont saturés.

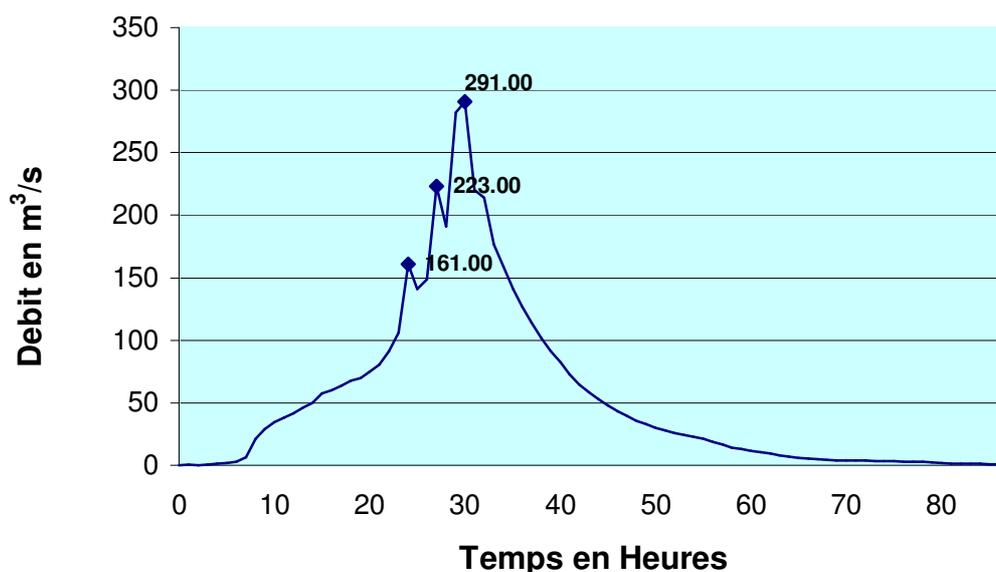


Figure II.9 : Hydrogramme de la crue du 11 au 12 novembre 2001

III.5 Débits Max. Bassin versant de l'oued Allalah

✘ Ajustement des débits max. de la station de Sidi Akacha

Les données des débits max. instantanés de la station de Sidi Akacha sont ajustées à la distribution de Log -normal qui est adoptée à l'ajustement des valeurs extrêmes des débits.

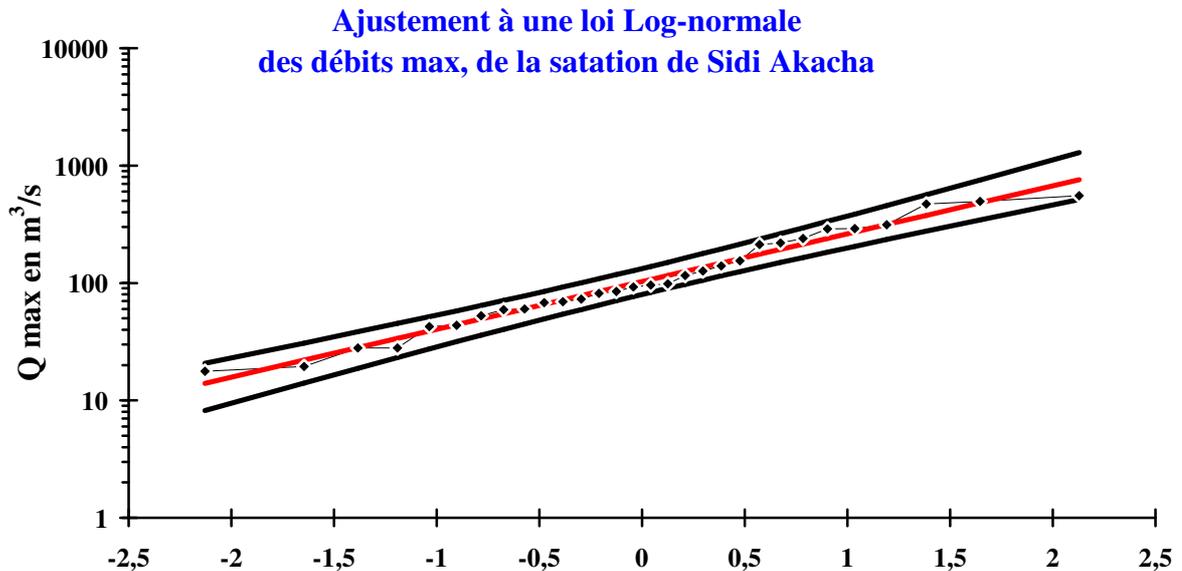


Figure II.8 : Ajustement à la loi Log -normal

Bien que la crue du mois de Novembre 2001 a entraîné des dégâts considérables à l'exutoire, la période de retour du débit de pointe au niveau de la station hydrométrique de Sidi Akacha **291m³/s** reste relativement faible (égale à 7 ans).

✘ Calcul des débits max. à partir des formules empiriques

Bien que ces formules sont adaptées pour des régions bien déterminées, mais leur usage est assez fréquent en Algérie. On calcule les débits max. pour différentes fréquences à partir de quelques unes qui sont élaborées en fonction de la pluie et des caractéristiques physiques du bassin versant.

- **Formule de SOGREAH-ANRH (1989) :** $Q_t = C_q \times (P_t - P_1)$

avec;

Q_t : débit de pointe (en m³/s) de période de retour t;

P_t : pluie journalière max. de période de retour t;

P₁ = 20mm en Algérie du nord;

C_q : coefficient de ruissellement statistique;

$$C_q = \frac{S}{6} \times T_b^{-0.77}$$

S : superficie du BV en Km²

T_b : temps de base en heures

$$T_b = T_{b0} + \left(\frac{L^{1.7} \times (P_a \times V_i)^{0.57}}{1000} \right)$$

où;

$T_{b0}=2.33$ pour les stations du nord Algérie;

L : longueur du talweg principal;

P_a : pluie annuelle en mm;

V_i : pente brute du bassin en % donnée par;

$$V_i = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L_r}$$

avec;

H_{\max}, H_{\min} : altitudes max. et min.

L_r : longueur du rectangle équivalent

- **Formule de TURRAZA :**

$$Q_{\max} \% = \frac{P_{t_c} \% \times S \times C}{3.6 \times t_c}$$

avec;

$Q_{\max} \%$: débit de pointe (en m³/s) de période de retour voulue

$P_{t_c} \%$: pluie de durée t_c et de période de retour voulue

C : coefficient de ruissellement du bassin versant de Ténès.

On donne : C (10ans) = 0.5, C (50ans) = 0.7, C (100 et 1000) = 0.8

t_c : temps de concentration du bassin

Nous adoptons les coefficients généralement admis en Algérie en supposant que l'averse est généralisée sur l'ensemble du bassin versant et que l'intensité est constante.

- **Formule de MALLET et GAUTHIER :**

$$Q_{\max} = 2 \times K \times \log(1 + A \times P) \times \frac{S}{L^{0.5}} \times (1 + 4 \times \log t - \log S)^{0.5}$$

avec;

Q_{\max} : débit de crue de période de retour voulue (en m³/s);

K : coefficient variant avec la pente du bassin de 0.5 à 5;

A : coefficient égal à 20 pour l'Algérie;

P : pluie moyenne annuelle (en m);

S : superficie du BV en Km²;

L : longueur du talweg principal;

t : période de retour t.

Tableau II.7 : Débits des crues de l'oued ALLALAH

	Sogreah	Turraza	Mallet-Gauthier	Log -normal
Q_{10} (m ³ /s)	289.17	278.18	256.79	342
Q_{20} (m ³ /s)	350.09	390.17	311.96	481
Q_{50} (m ³ /s)	423.92	540.30	372.56	707
Q_{100} (m ³ /s)	488.05	690.40	412.54	912

Les résultats de débits max. retenus pour la suite de l'étude sont ceux de la loi Log -normal qui sont issus des données observées.

✘ L'hydrogramme de crue du Bassin versant de l'oued Allalah

On utilise la méthode analytique de Sokolovsky qui assimile l'Hydrogramme de crue à deux équations paraboliques :

- L'une pour la montée de crue : $Q_t = Q_{\max} \times \left(\frac{t}{t_m}\right)^m$
- Et la seconde pour la décrue : $Q_t = Q_{\max} \times \left(t_d - \frac{t}{t_d}\right)^n$

avec;

Q_t : débit instantané au temps t;

Q_{\max} : débit de crue de période de retour voulue (en m³/s);

t_m : temps de montée de crue (égal au temps de concentration);

t_d : temps de la décrue donné par : $t_d = c \times t_m$ ($c = 3$)

où; **m et n**: coefficients (m, n = 2)

Pour le bassin de Ténès, les équations s'écrivent ainsi :

- Montée de crue : $Q_t = Q_{\max} \times \left(\frac{t}{4.17}\right)^2$
- Décrue de crue : $Q_t = Q_{\max} \times \left(12.51 - \frac{t}{12.51}\right)^2$

Les débits max. pour différents périodes de retour sont ceux obtenus à partir de la loi de Log -normal

- Q_{\max} (10 ans) = 342 m³/s
- Q_{\max} (20 ans) = 481 m³/s
- Q_{\max} (50 ans) = 707 m³/s
- Q_{\max} (100 ans) = 912 m³/s

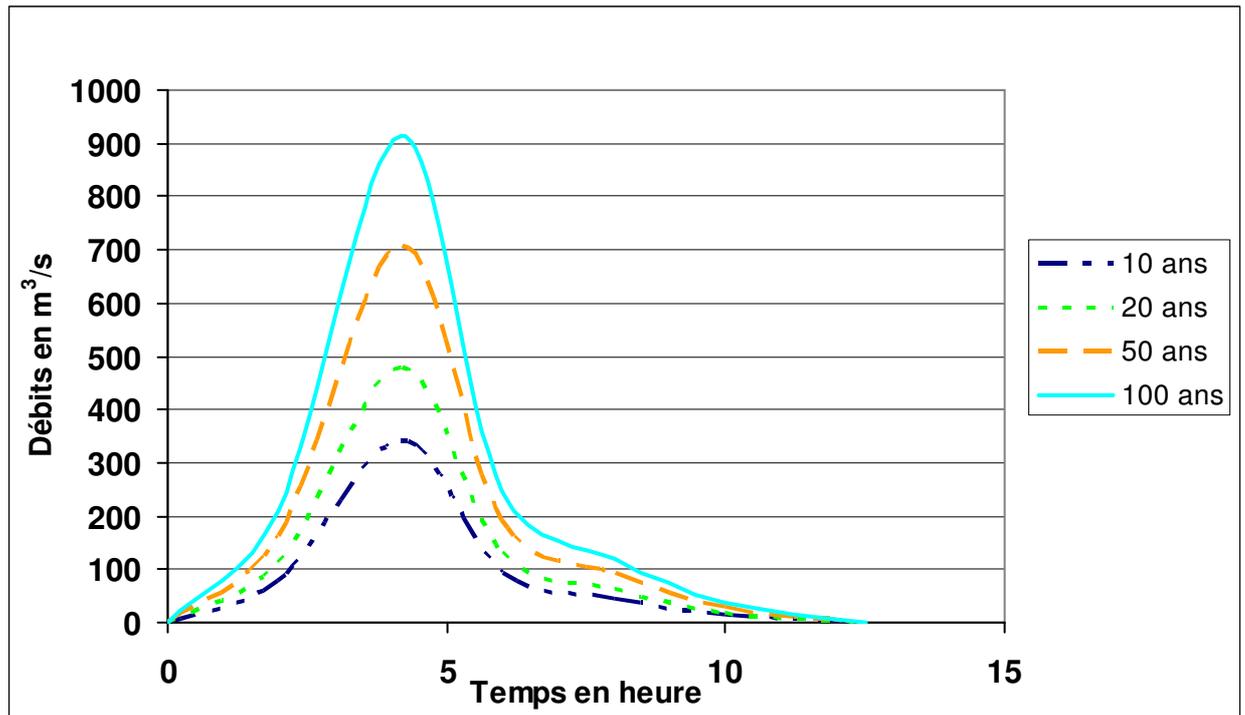


Figure II.9 : Hydrogramme de crues pour différentes fréquences

IV. Conclusion

Cette étude, nous a permis de fournir les éléments hydrologiques et de quantifier les débits des crues à l'exutoire nécessaires à la simulation numérique des crues de l'oued Allalah.

Sur ce qui va suivre, nous présentons un rappel théorique sur les modèles mathématiques qui régissent les écoulements à surface libre et nous accorderons une importance particulière au développement du modèle de Saint venant.

Chapitre III :

*Modèle Mathématique des écoulement à
Surface Libre – Modèle Numérique FESWMS*

CHAPITRE III : MODELE MATHEMATIQUE DES ECOULEMENT A SURFACE LIBRE – MODELE NUMERIQUE FESWMS

Les équations fondamentales qui décrivent les écoulements de fluides sont dans leur formulation générale très complexe et non linéaire, malgré la restriction à l'étude des seuls écoulements de type Newtonien.

Le modèle mathématique de Saint-Venant à deux dimensions (2D) dans le plan horizontal découle de l'intégration verticale des équations de Navier-Stokes à trois dimensions (3D) qui régissent le mouvement des fluides newtoniens. Le modèle de Saint-Venant est également appelé " modèle des eaux peu profondes ", "

Devant l'amélioration des performances des calculateurs, tant en espace mémoire qu'en vitesse de calcul, la mécanique des fluides numériques s'est développée grâce à de nombreux codes de calcul. Parmi lesquels, on cite : PHOENICS, FLUENT, TELEMAT, HEC-2D,.....

Pour atteindre notre objectif, et puisque le code FESWMS (Finite Element Surface Water Modeling System) est du domaine public, il a été choisi parmi plusieurs codes numériques commerciaux. De la, il a été utile de l'analyser, de l'adapter en fonction de nos besoins, ainsi qu'en fonction des outils de maillage et de visualisation dont nous disposons.

A. LE MODELE MATHEMATIQUE DES ECOULEMENT A SURFACE LIBRE

Cette partie s'inspire des travaux ayant la référence [*Kherbache, 2004*],

[*Hammouche, 2004*], [*Talamali, 2002*].

I. Introduction

La modélisation de l'hydrodynamique peut être répartie sur plusieurs volets en fonction des hypothèses formulées, de la complexité et surtout de la dimension du problème. La modélisation 1D ou filaire bien que très limitée est adaptée à des cas spécifiques. Elle restitue le débit et le niveau d'eau le long d'une courbe. Les modélisations 2D et 3D sont les plus recherchées puisqu'elles permettent l'accès à un champ d'application beaucoup plus étendu.

Aujourd'hui, il existe un certain nombre de codes numériques unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel conviviaux, permettant la prédiction d'écoulements des fluides par la résolution des équations de Saint – Venant ou de Navier – Stokes. Et cela grâce aux méthodes des volumes finis, des différences finis ou des éléments finis.

II. Equation de NAVIER STOKES

II.1 Equation de continuité

L'équation de continuité exprime le principe de conservation de la masse :

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot u) = 0 \quad (\text{Pas d'apport latéral})$$

Dans le cas d'un écoulement où ρ est constant dans l'espace et dans le temps, on a :

$$\begin{aligned} \nabla u &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

II.2 Equation de la dynamique

Ces équations sont basées sur le théorème d'Euler qui exprime que la variation de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces agissantes sur l'élément fluide. Ces équations sont celles de Navier – Stokes.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + F_x + \nu \Delta u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + F_y + \nu \Delta v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + F_z + \nu \Delta w \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Les écoulements turbulents présentent un caractère aléatoire. Pour cette raison, leur étude se rapproche de celle des gaz de particules en mécanique statistique.

On ne cherche pas à décrire la vitesse en tout point M de coordonnées (X, Y, Z) et à tout instant t, on s'intéresse à la probabilité d'obtenir certaines vitesses en un certain nombre de point bien choisis.

Pour déterminer les valeurs moyennes, il faudrait produire un grand nombre de réalisations du même écoulement pour des conditions initiales et des géométries identiques, et effectuer une moyenne d'ensemble sur des valeurs obtenues sur toutes ces réalisations, on suppose donc souvent que la turbulence vérifiée l'hypothèse d'ergodicité : si on attend un temps assez long, l'écoulement passe par tous ses états possibles, et le temps passé dans chacun d'eux est proportionnel à sa probabilité.

On en déduit la définition suivante des composantes de la vitesse moyenne de la vitesse d'écoulement en un point M donné :

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt, \quad \bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt, \quad \bar{w} = \frac{1}{T} \int_0^T w dt \quad (\text{III.3})$$

avec; T : la durée d'observation

La vitesse est une fonction aléatoire de l'espace et du temps, dont on décompose les valeurs instantanées en :

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w' \quad (\text{III.4})$$

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$: Moyennes temporelles ;

u', v', w' : Vitesses fluctuantes.

Par définition, les fluctuations sont centrées de sorte que l'on a :

$$\bar{u}' = \frac{1}{T} \int_0^T u' dt = 0, \quad \bar{v}' = \frac{1}{T} \int_0^T v' dt = 0, \quad \bar{w}' = \frac{1}{T} \int_0^T w' dt = 0 \quad (\text{III.5})$$

III. Equation de Reynolds

III.1 Equation de base

Elles sont établies après moyennage des équations de Navier -Stokes pour faire apparaître les grandeurs moyennes et lisser les fluctuations turbulentes. Elles sont données par :

- **Equation de continuité**

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.6})$$

- **Equations de quantité de mouvement**

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xx} - \rho R_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{xy} - \rho R_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{xz} - \rho R_{xz}) + \rho F_x \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xy} - \rho R_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yy} - \rho R_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{yz} - \rho R_{yz}) + \rho F_y \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xz} - \rho R_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yz} - \rho R_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zz} - \rho R_{zz}) + \rho F_z \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

R_{ij} est appelé le tenseur des contraintes de Reynolds

$$R_{ij} = - \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

τ : représente la moyenne de la partie visqueuse du tenseur des contraintes.

$$\tau = \mu \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \\ \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) \\ \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) & \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) & \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \end{bmatrix}$$

avec; μ : la viscosité dynamique du fluide,

On désigne par F les forces extérieures y compris les forces gravitationnelles et les forces de Coriolis.

Les forces qui agissent sur le continuum fluide situé à l'intérieur d'un volume quelconque et limité par une surface fermée, sont de deux types :

- **Les forces de volume**

Ce sont les forces de pesanteur et les forces d'inertie traduisant l'action à distance du milieu extérieur sur le système. Ces forces sont constituées généralement par la force de gravité et la force de Coriolis qui s'écrivent :

- La force de gravité :

$$f_g = g \quad \text{(III.8)}$$

- La force de Coriolis due à la rotation de la terre :

$$f_c = -2\gamma AV \quad \text{(III.9)}$$

où; γ : Le vecteur de rotation de la terre et qui a pour composantes : $\gamma \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \cdot \cos \lambda \\ \omega \cdot \sin \lambda \end{pmatrix}$

λ : La latitude de l'aire à modéliser.

ω : La vitesse angulaire de rotation de la terre ($\omega = 7.27 \cdot 10^{-5}$ rad/sec).

Dans un système de coordonnées cartésiennes (x, y, z), tel que les directions des vecteurs x, y, z les trois axes coïncident respectivement avec l'Est, le Nord et la verticale radiale. Ces deux densités volumiques de forces s'expriment :

$$f_g = g \cdot z$$

$$\vec{F}_c = 2\omega \left[(v \cdot \sin \lambda - w \cdot \cos \lambda) \vec{i} - u \cdot \sin \lambda \vec{j} + u \cdot \cos \lambda \vec{k} \right]$$

Ce qui conduit, en négligeant l'accélération de Coriolis suivant Z devant celle de la pesanteur (ce qui est généralement le cas), à :

$$\vec{F} = 2\omega (v \cdot \sin \lambda - w \cdot \cos \lambda) \vec{i} - 2\omega u \cdot \sin \lambda \vec{j} - g \vec{k} \quad \text{(III.10)}$$

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulements à surface libre-modèle numérique FESWMS

• Les forces de surface

En hydrodynamique des liquides parfaits, les forces de surface sont les forces dues à la pression (tensions normales), auxquelles s'ajoutent en hydrodynamique des liquides réels les forces dues au frottement (tensions tangentielles). Ces forces sont très complexes à modéliser.

L'importance relative des différentes forces agissant sur un liquide est paramétrée par des nombres adimensionnels représentant le rapport entre ces forces (nombre de Reynolds, nombre de Froude....).

III.2 Approximation des écoulements quasi horizontaux

Le modèle général, excepté à échelle très locale, les écoulements sont généralement marqués par une prédominance nette des composantes horizontales de vitesse vis-à-vis de la composante verticale. Les pentes des reliefs naturels sont en général peu prononcées, l'accélération verticale est faible.

La projection selon la verticale de l'équation de Reynolds se ramène simplement à l'équilibre hydrostatique :

$$\frac{-1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - g = 0 \quad (\text{III.11})$$

Les projections selon x et y de l'équation de Reynolds se ramènent de leur côté au système suivant :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_{xx}}{\rho} - R_{xx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{xy}}{\rho} - R_{xy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{xz}}{\rho} - R_{xz} \right) + F_x \\ (\text{III.12}) \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_{xy}}{\rho} - R_{xy} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yy}}{\rho} - R_{yy} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\tau_{yz}}{\rho} - R_{yz} \right) + F_y \end{aligned}$$

V. Equation de Saint Venant

Pour établir les équations de Saint Venant, il y a lieu de moyenner les équations de Reynolds sur la verticale, par intégration du fond jusqu'à la surface libre

V.1 Les conditions cinématiques

Les conditions cinématiques sont comme suit :

En notant z_s la coordonnée verticale d'un point M appartenant à la surface libre, celui-ci est définie, à l'instant t, par le point M de coordonnées (x, y, z) vérifiant l'équation :

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$$w(z_s) = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u \frac{\partial z_s}{\partial x} + v \frac{\partial z_s}{\partial y} \quad (\text{III.13})$$

Cette équation représente l'équation de la surface libre.

De même, en notant z_f la coordonnée verticale d'un point N appartenant à la surface du fond, celui-ci est défini, à l'instant t par :

$$w(z_f) = \frac{\partial z_f}{\partial t} + u \frac{\partial z_f}{\partial x} + v \frac{\partial z_f}{\partial y} \quad (\text{III.14})$$

Cette équation représente l'équation du fond.

On suppose que la surface du fond est indépendante du temps : $\frac{\partial z_f}{\partial t} = 0$

Ceci implique que : $\frac{\partial z_s}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial z_f}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial t}$ (III.15)

Et : $w(z_f) = u \frac{\partial z_f}{\partial x} + v \frac{\partial z_f}{\partial y}$ (III.16)

V.2 Règle d'intégration de LEIBNITZ

Pour faire intégrer ces équations aux dérivées partielles, on utilise la règle de Leibnitz :

$$H \int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial f}{\partial t} dz = H \frac{\partial \bar{f}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_f}^{z_s} f dz + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial t} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial t} = \frac{\partial H \bar{f}}{\partial t} + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial t} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial t} \quad (\text{III.17})$$

$$H \int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial f}{\partial x} dz = H \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_f}^{z_s} f dz + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial x} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial x} = \frac{\partial H \bar{f}}{\partial x} + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial x} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial x} \quad (\text{III.18})$$

$$H \int_{z_f}^{z_s} \frac{\partial f}{\partial y} dz = H \frac{\partial \bar{f}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_f}^{z_s} f dz + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial y} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial y} = \frac{\partial H \bar{f}}{\partial y} + f(x, y, z_f) \frac{\partial z_f}{\partial y} - f(x, y, z_s) \frac{\partial z_s}{\partial y} \quad (\text{III.19})$$

$$H \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} = f(x, y, z_s) - f(x, y, z_f) \quad (\text{III.20})$$

✘ Intégration de l'équation de continuité sur la profondeur

L'intégration sur la verticale de l'équation de la continuité (III.6) pondéré par H , donne :

$$H \int_{z_f}^{z_s} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) dz = 0 \quad (\text{III.21})$$

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

En notant U , V , et W les valeurs moyennes des composantes \bar{u} , \bar{v} , et \bar{w} de la vitesse :

$$U = \frac{1}{H} \int_{Z_F}^{Z_S} \bar{u} dz \quad (\text{III.22})$$

$$V = \frac{1}{H} \int_{Z_F}^{Z_S} \bar{v} dz \quad (\text{III.23})$$

$$W = \frac{1}{H} \int_{Z_F}^{Z_S} \bar{w} dz \quad (\text{III.24})$$

En utilisant la règle de Leibnitz et en tenant compte des conditions cinématique à la surface libre (III.13) et sur le fond (III.16), l'équation de continuité moyenne s'exprime finalement sous la forme :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.25})$$

✘ Equations dynamiques

Le même traitement doit être appliqué aux deux équations du mouvement pour les dérivées horizontales. Pour ce faire, procédons par groupe de termes :

Le nombre gauche de l'équation de quantité de mouvement donne après réarrangement :

$$H \int_{Z_F}^{Z_S} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) dz = \frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial HU^2}{\partial x} + \frac{\partial HUV}{\partial y} \quad (\text{III.26})$$

$$H \int_{Z_F}^{Z_S} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) dz = \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial HUV}{\partial x} + \frac{\partial HV^2}{\partial y} \quad (\text{III.27})$$

Les équations s'écrivent encore :

$$H \int_{Z_F}^{Z_S} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) dz = \frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{uu} HU^2) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{uv} HUV) \quad (\text{III.28})$$

$$H \int_{Z_F}^{Z_S} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) dz = \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{uv} HUV) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{vv} HV^2) \quad (\text{III.29})$$

avec;

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$$\begin{cases} \beta_{uu} = \frac{1}{HU^2} \int_{z_f}^{z_s} \bar{u}^2 . dz \\ \beta_{uv} = \frac{1}{HUV} \int \bar{u.v} . dz \\ \beta_{vv} = \frac{1}{HV^2} \int \bar{v}^2 . dz \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

$\beta_{uu}, \beta_{uv}, \beta_{vu}$ et β_{vv} sont des termes correctifs qui résultent de l'intégration verticale des équations de conservation de la quantité de mouvement ; ils traduisent les variations verticales de U et V et ils sont utilisés pour corriger les termes du flux advectif de la vitesse verticalement intégrée. Ces coefficients de la correction du flux de la vitesse dépendent de la distribution verticale de la vitesse, et souvent sont supposés égaux à l'unité.

• Termes de pression

L'expression de la pression fournie par l'équation du mouvement suivant z , les dérivées partielles par rapport à x et y donnent :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho . g \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{et} \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \rho . g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{III.31})$$

Les deux équations sont indépendantes de z , d'où elles ne seront pas modifiées par l'opérateur moyen :

$$H \left(\frac{1}{\rho} \overline{\frac{\partial p}{\partial x}} \right) = H . g \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{et} \quad H \left(\frac{1}{\rho} \overline{\frac{\partial p}{\partial y}} \right) = H . g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{III.32})$$

• Force de Coriolis

Dans la direction x , on a :

$$H \left(\frac{1}{\rho} \overline{F_{cx}} \right) = 2 . H \underline{\omega} (V . \sin \lambda - W . \cos \lambda) \quad (\text{III.33})$$

Expression dans laquelle la valeur moyenne \overline{W} de la vitesse \overline{w} peut être négligée devant la valeur moyenne V de la vitesse horizontale \overline{v} :

$$H \left(\frac{1}{\rho} \overline{F_{cx}} \right) = 2 . H \underline{\omega} . V . \sin \lambda = \Omega H V \quad (\text{III.34})$$

Dans la direction y , on a :

$$H \left(\frac{1}{\rho} \overline{F_{cy}} \right) = -2 . H \underline{\omega} U . \sin \lambda = -\Omega H U \quad (\text{III.35})$$

avec; $\Omega = 2 \omega . \sin \lambda$

• Termes de frottement

On a :

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$$\frac{H}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{\tau_{xx}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\tau_{xy}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\tau_{xz}}}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial H \overline{\tau_{xx}}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H \overline{\tau_{xy}}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H \overline{\tau_{xz}}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \tau_{xx}(x, y, z, t) \frac{\partial Z_Z}{\partial x} \quad (\text{III.36})$$

$$- \frac{1}{\rho} \tau_{xx}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \tau_{xy}(x, y, z, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{xy}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \tau_{xz}(x, y, h, t) - \frac{1}{\rho} \tau_{xz}(x, y, z, t)$$

On désigne par $\vec{F}=(F_x, F_y)$ le vecteur contrainte défini par : $\vec{F}=\vec{\tau n}$, n étant un vecteur normal unitaire.

- Frottement de surface

Pour un point de la surface libre, les composantes horizontales de F en ce point sont données par :

$$F_x^S(x, y, h, t) = \frac{1}{\rho} \left(\tau_{xx}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_{xy}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial y} - \tau_{xz}(x, y, h, t) \right) \quad (\text{III.37})$$

$$F_y^S(x, y, h, t) = \frac{1}{\rho} \left(\tau_{yx}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_{yy}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial y} - \tau_{yz}(x, y, h, t) \right) \quad (\text{III.38})$$

$$F_x^S = -\frac{N_f}{\rho} \tau_{ij}(x, y, Z_s, t) \eta_j \quad (\text{III.39})$$

où;

$$F_y^S = -\frac{N_f}{\rho} \tau_{ij}(x, y, Z_s, t) \eta_j$$

qui représentent les forces dues au frottement du vent. Elles sont généralement négligeables.

- Frottement au fond

Pour un point appartenant au fond, les composantes horizontales de F en ce point sont données par :

$$F_x^F(x, y, Z_F, t) = \frac{1}{\rho} \left(\tau_{xx}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \tau_{xy}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} - \tau_{xz}(x, y, Z_F, t) \right) \quad (\text{III.40})$$

$$F_y^F(x, y, Z_F, t) = \frac{1}{\rho} \left(\tau_{yx}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \tau_{yy}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} - \tau_{yz}(x, y, Z_F, t) \right) \quad (\text{III.41})$$

$$F_x^F = -\frac{N_f}{\rho} \tau_{ij}(x, y, Z_F, t) \eta_j \quad (\text{III.42})$$

où :

$$F_y^F = -\frac{N_f}{\rho} \tau_{ij}(x, y, Z_F, t) \eta_j$$

En général, le frottement au fond est supposé proportionnel au carré de la vitesse, ainsi qu'il découle de la loi de paroi pour un écoulement turbulent (section III.2.2.2). Comme il s'exerce dans la direction opposée à celle de la vitesse, on peut donc l'exprimer sous la forme :

$$\tau(x, y, Z_F, t) = -\rho \cdot u_*^2 \quad (\text{III.43})$$

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

Dans le cas d'un écoulement en canal ou en rivière :

$$u^* = \sqrt{\frac{\lambda_c}{8}} |V| \quad (\text{III.44})$$

λ_c : est le coefficient de perte de charge linéaire.

On peut donc écrire :

$$F(x, y, Z_F, t) = N_f \frac{\lambda_c}{8} \left\| \vec{V}(x, y, Z_F, t) \right\| \vec{V} \quad (\text{III.45})$$

Le coefficient de frottement λ_c peut s'exprimer en fonction du coefficient de Chezy C ou de Manning n sous la forme :

$$\lambda_c = \frac{8g.n^2}{H^{\frac{1}{3}}} = \frac{8g}{C^2} \quad (\text{III.46})$$

D'où on peut écrire :

$$\vec{F}(x, y, Z_F, t) = -\rho \frac{g}{C^2} \left\| \vec{V}(x, y, Z_F, t) \right\| \vec{V} \quad (\text{III.47})$$

Donc, les termes traduisant le frottement du fond dans les équations du mouvement peuvent se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned} F_x^F &= N_f \cdot \frac{g}{C^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \\ F_y^F &= N_f \cdot \frac{g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned} \quad (\text{III.48})$$

• Les contraintes de Reynolds

Le moyennage de ces contraintes donne :

$$\begin{aligned} H \left(\frac{\partial \overline{R_{xx}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{R_{xy}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{R_{xz}}}{\partial z} \right) &= \frac{\partial H \overline{R_{xx}}}{\partial x} + \frac{\partial H \overline{R_{xy}}}{\partial y} + \frac{\partial H \overline{R_{xz}}}{\partial z} \\ H \left(\frac{\partial \overline{R_{xy}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{R_{yy}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{R_{yz}}}{\partial z} \right) &= \frac{\partial H \overline{R_{xy}}}{\partial x} + \frac{\partial H \overline{R_{yy}}}{\partial y} + \frac{\partial H \overline{R_{yz}}}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{III.49})$$

Dans ces équations ne figurent pas les termes aux interfaces, fond et surface libre, car au travers elles, il n'y a pas de flux des contraintes de Reynolds.

Après avoir intégré tous les termes des équations de continuité et de quantité de mouvement, on obtient un système qu'on peut écrire sous la forme suivante dans le cas où les forces dues au vent sont négligeables :

- Equation de continuité

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.50})$$

- Quantité de mouvement

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{uu}HUU) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{uv}HUV) + gH \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \frac{1}{2}g \frac{\partial H^2}{\partial x} - \Omega HV \\ & + \left(N_f \cdot \frac{g}{C^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{H}{\rho} \overline{\tau_{xx}} - H \overline{R_{xx}} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{H}{\rho} \overline{\tau_{xy}} - H \overline{R_{xy}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.51})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{vu}HVU) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{vv}HVV) + gH \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \frac{1}{2}g \frac{\partial H^2}{\partial x} + \Omega HU \\ & + \left(N_f \cdot \frac{g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{H}{\rho} \overline{\tau_{yx}} - H \overline{R_{yx}} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{H}{\rho} \overline{\tau_{yy}} - H \overline{R_{yy}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.52})$$

Ces équations constituent le modèle mathématique de Saint-Venant à deux dimensions (2D) dans le plan horizontal. Le modèle de Saint-Venant est également appelé « modèle des eaux peu profondes », « équations des ondes longues » et en anglais « Shallow Water Equations ». La résolution de ces équations, et qui se fait généralement par des méthodes numériques, nous donne les vitesses moyennes horizontales U, V et la hauteur d'eau H en chaque point du domaine d'écoulement.

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulements à surface libre-modèle numérique FESWMS

B. LE MODELE NUMERIQUE FESWMS

Cette partie s'inspire des travaux ayant la référence [Hammouche, 2004], [Talamali, 2002], [Touzot, 1984].

I. Introduction

FESWMS est un code de calcul qui simule les écoulements surfaciques dans différents systèmes hydrauliques et notamment dans les rivières naturelles et les lacs.

Il est constitué de trois modules : [U.S Department of transportation FESWMS-2DH, (1989)], [U.S Department of transportation FESWMS-2DH, (1991)]

- Pré-processeur pour la préparation du maillage
- Un noyau de calcul,
- Post-processeur pour la présentation des résultats.

Le noyau de calcul, est le module principal. Il résout les équations de Saint – Venant 2D en formulation (U,V,H) par la discrétisation en éléments finis. Il permet en particulier de :

1. Simuler les écoulements permanents et non permanents;
2. Tenir compte des effets de frottements à la paroi et des contraintes turbulentes;
3. Prise en compte optionnelle des contraintes de surface libre dues au vent et à la force de Coriolis;
4. Etudier des écoulements à surface libre en présence de piles de pont, barrages ou les écoulements en charge en présence des conduites créant des conditions aux limites plus complexes;
5. Simuler les écoulements à frontière libre en utilisant un maillage fixe et des conditions aux limites mobiles (un modèle couvrant découvrant);
6. Calculer le débit à travers une section transversale spécifiée dans le canal.

II. Modèle mathématique

Le modèle mathématique de FESWMS est basé sur les équations de Saint - Venant 2D donné par le système d'équations :

✘ Equation de continuité

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.50})$$

✘ Quantité de mouvement

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{uv} HUU) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{uv} HUV) + gH \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} - \Omega HV \\ & + \left(N_f \cdot \frac{g}{C^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{H}{\rho} \tau_{xx} - HR_{xx} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{H}{\rho} \tau_{xy} - HR_{xy} \right) = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.51})$$

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$$\begin{aligned} & \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{vu} HVU) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{vw} HVV) + gH \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} + \Omega HU \\ & + \left(N_f \cdot \frac{g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{H}{\rho} \tau_{xy} - HR_{xy} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{H}{\rho} \tau_{yy} - HR_{yy} \right) = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.52})$$

II.1 Modèle de turbulence

Pour pouvoir résoudre les équations de Barré de Saint Venant, il faut fermer le problème, c'est-à-dire exprimer le tenseur inconnu R_{ij} en fonction des grandeurs physiques moyennes à l'aide d'un modèle de turbulence qui peut être une relation algébrique (modèle à zéro équation), une combinaison d'une relation algébrique et d'une équation (modèle à une équation) ou deux équations de transport. Dans tous les cas, il ne s'agira que d'une modélisation, fondée sur des considérations de dimension, sur l'empirisme ou sur une interprétation de phénomènes physiques en jeu et leur importance respective.

Les contraintes moyennes sur la verticale des tensions de Reynolds sont calculées dans FESWMS, en utilisant le concept de la viscosité turbulente dû à Boussinesq, où les contraintes turbulentes sont proportionnelles au gradient de la vitesse moyenne intégrée sur la verticale. Ces contraintes sont données par :

$$\begin{aligned} R_{xx} &= \rho \nu^t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ R_{xy} = R_{yx} &= \rho \nu^t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ R_{yy} &= \rho \nu^t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.53})$$

où ; ν^t : viscosité cinématique turbulente moyenne sur la verticale dans la direction considérée.

Dans FESWMS, cette viscosité, est isotrope ($\nu_{xx}^t = \nu_{xy}^t = \nu_{yx}^t = \nu_{yy}^t = \nu_t$). Pour les cours d'eau naturels, elle est donnée par : $\nu_t = C_\mu U_* H$

avec ;

C_μ : Coefficient semi empirique, il est égal à 0.6 pour les cours d'eau.

U_* : Vitesse de frottement.

La vitesse de frottement U_* s'exprime en fonction de la vitesse longitudinale moyenne sur la verticale par :

$$U_* = \sqrt{c_f} \cdot U_{moy} \quad (\text{III.54})$$

U_{moy} : Vitesse longitudinale moyenne de l'écoulement.

$$U_{moy} = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (\text{III.55})$$

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

La viscosité turbulente s'écrit donc :

$$\nu_t = C_\mu \cdot H \cdot \sqrt{c_f} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (\text{III.56})$$

Finalement, on obtient le tenseur de Reynolds suivant :

$$R = C_\mu \cdot H \cdot \sqrt{c_f} \sqrt{U^2 + V^2} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) & \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \\ \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.57})$$

L'écriture des contraintes de Reynolds sous cette forme, nous permet de définir la viscosité totale de l'écoulement $\tilde{\nu}$ qui est égale à :

$$\tilde{\nu} = \nu_0 + \nu_t \quad (\text{III.58})$$

ν_0 : La viscosité cinématique de l'eau donnée en fonction de la température.

II.2 Termes correctifs du mouvement

Les coefficients de correction du moment β_{uu} , β_{uv} , β_{vu} et β_{vv} résultent de l'intégration sur la verticale de l'équation de transport. Ils tiennent compte de la variation suivant la verticale des deux composantes de vitesse U et V .

Si le profil de vitesse suivant x est donné par la formule suivante :

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \log\left(\frac{Z - Z_b}{K}\right)$$
$$u_* = \sqrt{c_f} \cdot u$$

avec ;

u_* : Vitesse de frottement ;

c_f : Coefficient de frottement ;

κ : Constante de Von Karman ;

K : Rugosité.

Les coefficients de correction de moment sont donnés par :

$$\beta = 1 + \frac{c_f}{k^2} \quad (\text{III.59})$$

Dans FESWMS, ces coefficients sont calculés en utilisant l'expression :

$$\beta = \beta_0 + c_\beta \cdot c_f \quad (\text{III.60})$$

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

Les équations (III.59) et (III.60) sont équivalentes, lorsque $\beta_0 = 1$ et $c_\beta = \frac{1}{k^2}$. Des coefficients de correction du moment constants peuvent être spécifiés en posant β_0 égal à la valeur désirée, et c_β égal à zéro.

II.3 La signification physique des termes

Le tableau suivant présente la signification physique de l'ensemble des termes figurant dans les équations de l'écoulement moyen suivant x :

TERMES	SIGNIFICATION
$\frac{\partial(HU)}{\partial t}$	Terme de variation en temps
$\frac{\partial}{\partial x}(\beta_{uu}HUU) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{uv}HUV)$	Terme de transport convectif
$gH \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \frac{1}{2}g \frac{\partial H^2}{\partial x}$	Terme de pression
$-\Omega HV$	Force de Coriolis
$\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y}$	Terme de frottement visqueux
τ_{bx}	Terme de frottement au fond
τ_{sx}	Terme de frottement à la surface (action du vent)

III. La méthode des éléments finis

III.1 Introduction

Dans la MFE (méthode des éléments finis), on subdivise le continuum (domaine) en sous domaine de forme relativement simple appelés « éléments finis ». On a alors à définir une approximation de la solution non pas pour l'ensemble du domaine mais pour chacun de ses éléments constitutifs.

La méthode des éléments finis est fondée sur deux idées principales : Une méthode d'interpolation et une méthode variationnelle dite « des résidus pondérés ». Chacune de ces méthodes vise en fait un but similaire : passer d'un problème continu à un problème discret.

III.2 L'interpolation en éléments finis

L'idée générale est de remplacer une fonction inconnue u , qui appartient à un espace de dimension infinie, par une approximation u_h définie sur un espace Ω de

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

dimension finie N . Il s'agit d'une approximation et l'on ne pourra pas toujours assurer que $L(u_h) = f$. On cherchera simplement à minimiser $L(u_h) - f$ et ce sera le rôle de la méthode variationnelle.

En éléments finis, une fonction u sera représentée par des nombres réels qui seront les valeurs exactes de u en des points privilégiés du domaine, appelés degrés de liberté. Pour les autres points, on se contente d'une interpolation. Définir une unique fonction d'interpolation, par exemple polynomiale, qui passe par les valeurs exactes de u pour les N degrés de liberté serait très complexe ou au moins de degré élevé. L'idée des éléments finis est de choisir une fonction d'interpolation localement simple (par exemple constante, linéaire ou quadratique). On réalise une tessellation de l'espace en segments, triangles, quadrilatères, prismes, etc. Les degrés de liberté sont disposés sur ces éléments, par exemple sur les sommets, au centre de gravité, au milieu des faces, etc. Chaque élément est donc défini par les coordonnées de ses nœuds géométriques d'une part, et par les coordonnées de ses nœuds d'interpolation d'autre part. On définit à l'intérieur de chaque élément une approximation, cette approximation de la fonction choisie pour l'élément s'appelle « interpolation » et on exprime cette interpolation en fonction des inconnues aux nœuds.

$$U(x,y) = \sum_{i=1}^n N_i(x,y) \cdot U_i$$

U_i : Variables nodales

$N_i(x,y)$: Fonction d'interpolation nodale.

Les éléments utilisés dans FESWMS sont des éléments triangulaires à six nœuds (figure III.1)

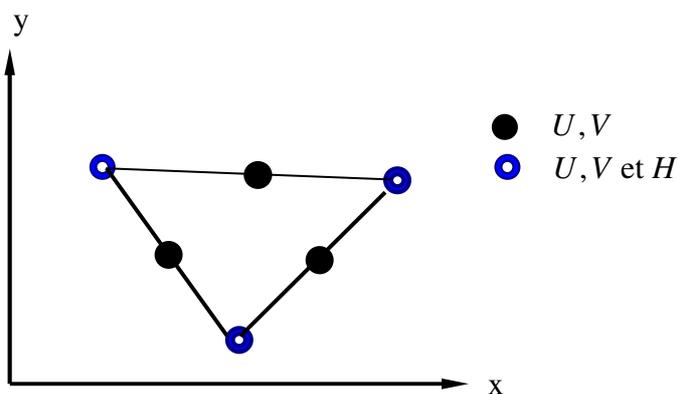


Figure III.1 Élément triangulaire à six nœuds

Les valeurs nodales des composantes de la vitesse seront localisées aux différents nœuds de l'élément. Cependant, pour la position de la surface libre, ne sera localisées qu'aux trois nœuds sommets. Les fonctions d'approximations nodales sont basées sur une fonction polynomiale du second degré pour les vitesses (P^2) et elles sont linéaires pour les hauteurs d'eau (P^1).

III.3 Formulation variationnelle

Ayant restreint notre fonction u , sous la forme u_h , à une représentation fondée sur un nombre discret d'inconnues u_i , nous voulons maintenant minimiser $L(u)-f$. La méthode variationnelle consiste à imposer que le produit scalaire :

$$\int_{\Omega} (L(u_h) - f) \varphi_i d\Omega \quad (\text{III.61})$$

soit nul pour un certain nombre de fonctions φ appelées fonctions tests. Le choix des fonctions tests définit diverses variantes de la méthode des éléments finis. La technique la plus classique, dite de Galerkin, consiste à choisir des fonctions tests égales aux fonctions d'interpolation nodale :

$$\varphi_i = N_i \text{ Pour les vitesses } U \text{ et } V .$$

$$\varphi_i = M_i \text{ Pour les hauteurs } H .$$

La forme intégrale (III.61), appliquée aux équations de base (III.50, III.51, III.52) donne :

$$\int_A M_i \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} \right\} dA = 0 \quad (\text{III.62})$$

$$\int_A N_i \left\{ \frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{uu} HUU) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{uv} HUV) + gH \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} - \Omega HV \right. \\ \left. + N_f \frac{g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2} - \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) - \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right\} dA = 0 \quad (\text{III.63})$$

$$\int_A N_i \left\{ \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{vu} HVU) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{vv} HVV) + gH \frac{\partial Z_f}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial y} + \Omega HU \right. \\ \left. + N_f \frac{g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2} - \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{yx}) - \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) \right\} dA = 0 \quad (\text{III.64})$$

Les termes de l'intégrale contenant des opérateurs du second ordre sont intégrés par partie afin de pouvoir reproduire le degré de la fonction d'interpolation, en utilisant les formules de Green suivantes :

$$\int_A \psi \frac{\partial u}{\partial x} dx dy = - \int_A \frac{\partial \psi}{\partial x} u dx dy + \oint_S \psi u l dS$$

$$\int_A \psi \frac{\partial u}{\partial y} dx dy = - \int_A \frac{\partial \psi}{\partial y} u dx dy + \oint_S \psi u m dS$$

avec; l et m , les cosinus directeurs de la normale sortante.

Les équations ci-dessus deviennent :

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$$\begin{aligned}
 f_{U_i} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i \left[H \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial t} + g H \frac{\partial Z_F}{\partial x} - \Omega H V + F_x^F \right] \right. \\
 \left. + \frac{\partial N_i}{\partial x} \left[-\beta H U^2 - \frac{1}{2} g H^2 + 2 \tilde{\nu} H \frac{\partial U}{\partial x} \right] \right. \\
 \left. + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left[-\beta H U V + 2 \tilde{\nu} H \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \right\} dA_e
 \end{aligned} \tag{III.65}$$

$$\begin{aligned}
 + \sum_e \int_{S_e} N_i \left\{ \left[\left(\beta H U^2 + \frac{1}{2} g H^2 \right) \eta_x + \beta H U V \eta_y \right] - \left[2 \tilde{\nu} H \frac{\partial U}{\partial x} \eta_x + \tilde{\nu} H \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \eta_y \right] \right\} dS_e \\
 f_{V_i} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i \left[H \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial t} + g H \frac{\partial Z_F}{\partial y} - \Omega H U + F_y^F \right] \right. \\
 \left. + \frac{\partial N_i}{\partial x} \left[-\beta H U V + \tilde{\nu} H \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left[-\beta H V^2 - \frac{1}{2} g H^2 + 2 \tilde{\nu} H \frac{\partial V}{\partial y} \right] \right\} dA_e
 \end{aligned} \tag{III.66}$$

$$\begin{aligned}
 + \sum_e \int_{S_e} N_i \left\{ \left[\left(\beta H V^2 + \frac{1}{2} g H^2 \right) \eta_y + \beta H U V \eta_x \right] - \left[2 \tilde{\nu} H \frac{\partial V}{\partial y} \eta_y + \tilde{\nu} H \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \eta_x \right] \right\} dS_e \\
 f_{H_i} = \sum_e \int_{A_e} M_i \left[\frac{\partial H}{\partial t} + H \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial H}{\partial y} \right] dA_e - Q_i
 \end{aligned} \tag{III.67}$$

III.4 Linéarisation du système

La discrétisation de FESWMS est basée sur la méthode des éléments finis type Galerkin, conduit à un système non linéaire. La majorité des algorithmes utilisés conduit à un système non linéaire à chaque itération. Dans notre cas, le système non linéaire obtenu est du type :

$$[K(A)](A) = F \tag{III.68}$$

Il est linéarisé par la méthode de Newton.

La méthode Newton peut s'appliquer à la résolution d'un système de plusieurs équations non linéaires.

$$\begin{cases} F_{U_i}(U, V, H) = 0 \\ F_{V_i}(U, V, H) = 0 \\ F_{H_i}(U, V, H) = 0 \end{cases}$$

où ; l'on a posé :

F_{U_i} : Equation de quantité de mouvement suivant x ;

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

F_{V_i} : Equation de quantité de mouvement suivant y ;

F_{H_i} : Equation de continuité.

Dans la suite, les expressions de F_{U_i} , F_{V_i} et F_{H_i} sont appelées, les expressions résiduelles.

A partir d'un couple de valeurs approchées (U_1, V_1, H_1) d'une solution du système, on peut déterminer trois accroissements h, k et l donner à U, V et H de manière à ce que :

$$\begin{aligned}F_{U_i}(U+h, V+k, H+l) &= 0 \\F_{V_i}(U+h, V+k, H+l) &= 0 \\F_{H_i}(U+h, V+k, H+l) &= 0\end{aligned}$$

En développant en 1er ordre, il vient :

$$\begin{aligned}F_{U_i}(U+h, V+k, H+l) &= F_{U_i}(U_1, V_1, H_1) + hF'_{U_i}(U_1) + kF'_{U_i}(V_1) + lF'_{U_i}(H_1) = 0 \\F_{V_i}(U+h, V+k, H+l) &= F_{V_i}(U_1, V_1, H_1) + hF'_{V_i}(U_1) + kF'_{V_i}(V_1) + lF'_{V_i}(H_1) = 0 \\F_{H_i}(U+h, V+k, H+l) &= F_{H_i}(U_1, V_1, H_1) + hF'_{H_i}(U_1) + kF'_{H_i}(V_1) + lF'_{H_i}(H_1) = 0\end{aligned}$$

où ; l'on a posé :

$$\begin{aligned}F'_{U_i}(U_1) &= \frac{\partial F_{U_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial U_i} & F'_{V_i}(U_1) &= \frac{\partial F_{V_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial U_i} \\F'_{U_i}(V_1) &= \frac{\partial F_{U_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial V_i} & F'_{V_i}(V_1) &= \frac{\partial F_{V_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial V_i} \\F'_{U_i}(H_1) &= \frac{\partial F_{U_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial H_i} & F'_{V_i}(H_1) &= \frac{\partial F_{V_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial H_i} \\F'_{H_i}(U_1) &= \frac{\partial F_{H_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial U_i} \\F'_{H_i}(V_1) &= \frac{\partial F_{H_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial V_i} \\F'_{H_i}(H_1) &= \frac{\partial F_{H_i}(U_1, V_1, H_1)}{\partial H_i}\end{aligned}$$

Les quantités h, k et l s'obtiennent donc, en résolvant le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} hF'_{U_i}(U_1) + kF'_{U_i}(V_1) + lF'_{U_i}(H_1) = -F_{U_i}(U_1, V_1, H_1) \\ hF'_{V_i}(U_1) + kF'_{V_i}(V_1) + lF'_{V_i}(H_1) = -F_{V_i}(U_1, V_1, H_1) \\ hF'_{H_i}(U_1) + kF'_{H_i}(V_1) + lF'_{H_i}(H_1) = -F_{H_i}(U_1, V_1, H_1) \end{cases} \quad \text{Avec,} \quad \begin{cases} h = U_i^{j+1} - U_i^j \\ k = V_i^{j+1} - V_i^j \\ l = H_i^{j+1} - H_i^j \end{cases}$$

Le calcul est alors relancé jusqu'à ce que h, k et l deviennent inférieures à une valeur \mathcal{E} que l'on se donne (selon la précision voulue pour le calcul).

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

Calculons les dérivées : F'_{U_i} , F'_{V_i} , F'_{H_i}

Suivant x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{U_i}}{\partial U_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i N_j \left[\alpha \left[H + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\tau_{N_f c_f}}{\rho} \frac{2U^2 + V^2}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right] - 2\beta \right. \right. \\ \left. \left. + 2\tilde{v} \left[H \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} - \beta \left[HV \frac{\partial N_i}{\partial y} N_j + \tilde{v} H \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] \right] \right\} dA_e \\ + \sum_e \int_{S_e} \left\{ N_i N_j \left[2\beta \left[HU \eta_x + \beta \left[HV \eta_y \right] \right] - 2\tilde{v} \left[HN_i \frac{\partial N_j}{\partial x} \eta_x - \tilde{v} \left[HN_i \frac{\partial N_j}{\partial y} \eta_x \right] \right] \right\} dS_e \end{aligned} \quad (III.69)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{U_i}}{\partial V_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i N_j \left[-\Omega \left[H + N_{f c_f} \frac{UV}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right] - \beta \left[HU \frac{\partial N_i}{\partial y} N_j + \tilde{v} H \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial x} \right] \right\} dA_e \\ + \sum_e \int_{S_e} \left\{ \beta \left[HU \eta_x N_i N_j - \tilde{v} H \eta_y N_i \frac{\partial N_j}{\partial x} \right] \right\} dS_e \end{aligned} \quad (III.70)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{U_i}}{\partial H_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i M_j \left[\alpha \left[U + \frac{\partial U}{\partial x} + \Omega V + g \frac{\partial z_f}{\partial x} + N_{f c_f} \frac{\partial c_f}{\partial H} \right] \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\partial N_i}{\partial x} M_j \left[2\tilde{v} \frac{\partial U}{\partial x} - \beta U^2 - gH \right] + \frac{\partial N_i}{\partial y} M_j \left[\tilde{v} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \beta UV \right] \right\} dA_e \\ + \sum_e \int_{S_e} N_i M_j \left\{ \beta \left[U^2 + gH + 2\tilde{v} \frac{\partial U}{\partial x} \right] \eta_x - \left[\beta UV - \tilde{v} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \eta_y \right\} dS_e \end{aligned} \quad (III.71)$$

Suivant y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{V_i}}{\partial U_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i N_j \left[\Omega H + N_{f c_f} \frac{U}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right] - \beta HV \frac{\partial N_i}{\partial x} N_j + \tilde{v} H \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial x} \right\} dA_e \\ + \sum_e \int_{S_e} \left\{ \beta HV \eta_y N_i N_j - \tilde{v} H \eta_y N_i \frac{\partial N_j}{\partial x} \right\} dS_e \end{aligned} \quad (III.72)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{V_i}}{\partial V_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i N_j \left[\alpha H + \frac{\partial H}{\partial t} + N_{f c_f} \frac{U^2 + 2V^2}{U^2 + V^2} \right] - \beta \left[HU \frac{\partial N_i}{\partial x} N_j \right. \right. \\ \left. \left. + \tilde{v} H \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} - 2\beta HV \frac{\partial N_i}{\partial y} N_j + \tilde{v} H \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] \right\} dA_e \\ + \sum_e \int_{S_e} \left\{ N_i N_j \left[\beta HU \eta_x + 2\beta HV \eta_y \right] - 2\tilde{v} HN_i \frac{\partial N_j}{\partial x} \eta_x - \tilde{v} HN_i \frac{\partial N_j}{\partial y} \eta_x \right\} dS_e \end{aligned} \quad (III.73)$$

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

$$\begin{aligned} \frac{\partial FV_i}{\partial H_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i M_j \left[\alpha V + \frac{\partial V}{\partial t} + \Omega U + g \frac{\partial Z f}{\partial y} + N f c f \frac{\partial c f}{\partial H} \right] \right. \\ \left. - \frac{\partial N_i}{\partial x} M_j \left[\tilde{v} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \beta UV \right] + \frac{\partial N_i}{\partial y} M_j \left[2 \tilde{v} \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right) - \beta V^2 - gH \right] \right\} dA_e \quad (III.74) \\ + \sum_e \int_{S_e} N_i M_j \left\{ \beta UV \eta_x + \left[gH + 2 \tilde{v} \frac{\partial U}{\partial x} \right] \eta_y + \left[\beta V^2 - \tilde{v} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \eta_y \right\} dS_e \end{aligned}$$

De même pour l'équation de continuité :

$$\frac{\partial fH_i}{\partial U_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ M_i \frac{\partial N_j}{\partial x} [H] + M_i N_j \left[\frac{\partial H}{\partial x} \right] \right\} dA_e - \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} \quad (III.75)$$

$$\frac{\partial fH_i}{\partial V_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ M_i \frac{\partial N_j}{\partial y} [H] + M_i N_j \left[\frac{\partial H}{\partial y} \right] \right\} dA_e - \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \quad (III.76)$$

$$\frac{\partial fH_i}{\partial H_j} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ M_i \frac{\partial M_j}{\partial x} \left[\alpha + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right] + M_i \frac{\partial M_j}{\partial x} [U] + M_i \frac{\partial M_j}{\partial y} [V] \right\} dA_e - \frac{\partial Q_i}{\partial H_j} \quad (III.77)$$

Le système final à résoudre est de la forme : $[M]X = -[N]$

avec ;

$[M]$: Matrice des valeurs des dérivées F'

$[N]$: Matrice des valeurs des fonctions F

X : Vecteur des gradients $(\delta U, \delta V, \delta H)$

Toutes les inconnues du problème (U, V, H) , après avoir déterminé les gradients $(\delta U, \delta V, \delta H)$ par résolution du système, peuvent être mises à jour sous la forme générale suivante :

$$U^{i+1} = U^i + \omega \cdot \delta U$$

$$V^{i+1} = V^i + \omega \cdot \delta V$$

$$H^{i+1} = H^i + \omega \cdot \delta H$$

$i + 1, i$ Indiquent respectivement l'itération $i + 1$ et i .

ω : Facteur de relaxation.

L'introduction du facteur de relaxation ω permet l'amortissement des variations des différentes variables du problème. Il peut s'étendre de la valeur 0 jusqu'à 2. Plus il est faible, plus la relaxation est forte et plus la convergence est lente. Mais plus, il est fort, plus la relaxation est faible est plus il y a de chance de faire intervenir des instabilités dans le processus itératif.

Chapitre III

Modèle mathématique des écoulement à surface libre-modèle numérique FESWMS

III.5 Intégration numérique

Pour calculer numériquement les différentes intégrales apparaissant dans la formulation variationnelle discrétisée, on utilise la formule d'intégration de Gauss suivante :

$$\int_{A_e} f(x, y) dx dy \approx A_e \sum_{i=1}^k w_i f(x_i, y_i) \quad (\text{III.78})$$

A_e : étant la surface de l'élément d'intégration ;

f : La fonction à intégrer ;

k : Nombre de points d'intégration numérique ;

w_i : Facteur de pondération associé au i ème point d'intégration de coordonnées (x_i, y_i) .

IV. Conclusion

Avant de procéder à l'application du modèle numériques dénommé FESWMS sur un tronçon de l'oued Allalah, il était nécessaire de présenter le système d'équation de Saint venant, sur lequel est basé le noyau de calcul du FESWMS, ainsi que leur résolution par le biais de la méthode des éléments finis.

Chapitre IV :

*Application du Modèle FESWMS sur
un Tronçon de l'Oued ALLALAH*

CHAPITRE IV : APPLICATION DU MODELE FESWMS SUR UN TRONCON DE L'OUED ALLALAH

La description précise des caractéristiques d'une rivière et de sa plaine inondable est essentielle pour toute simulation hydrodynamique. En effet, elle nous permet de décrire de manière fidèle le domaine géométrique dans lequel s'effectue l'écoulement, cette description est rendue possible grâce à un fichier altimétrique appelé modèle numérique d'altitudes.

Les variables décrivant le terrain sont regroupées dans une grille régulière qui forme le modèle numérique de terrain (MNT). Chaque nœud de la grille est défini par ces coordonnées planimétriques x, y et altimétriques z. Le fichier définitif servira pour exécuter le code FESWMS.

A. ELABORATION DU MNA D'UN TRONÇON DE L'OUED ALLALAH

Un levé topographique en bande a été réalisé au niveau d'un tronçon du cours d'eau de l'oued Allalah. (Figure V.1)

Pour des raisons liées purement au code de calcul, nous avons pris un petit tronçon de 790 m approximativement, le code de simulation FESWMS va être appliqué pour des débits différents de l'oued.

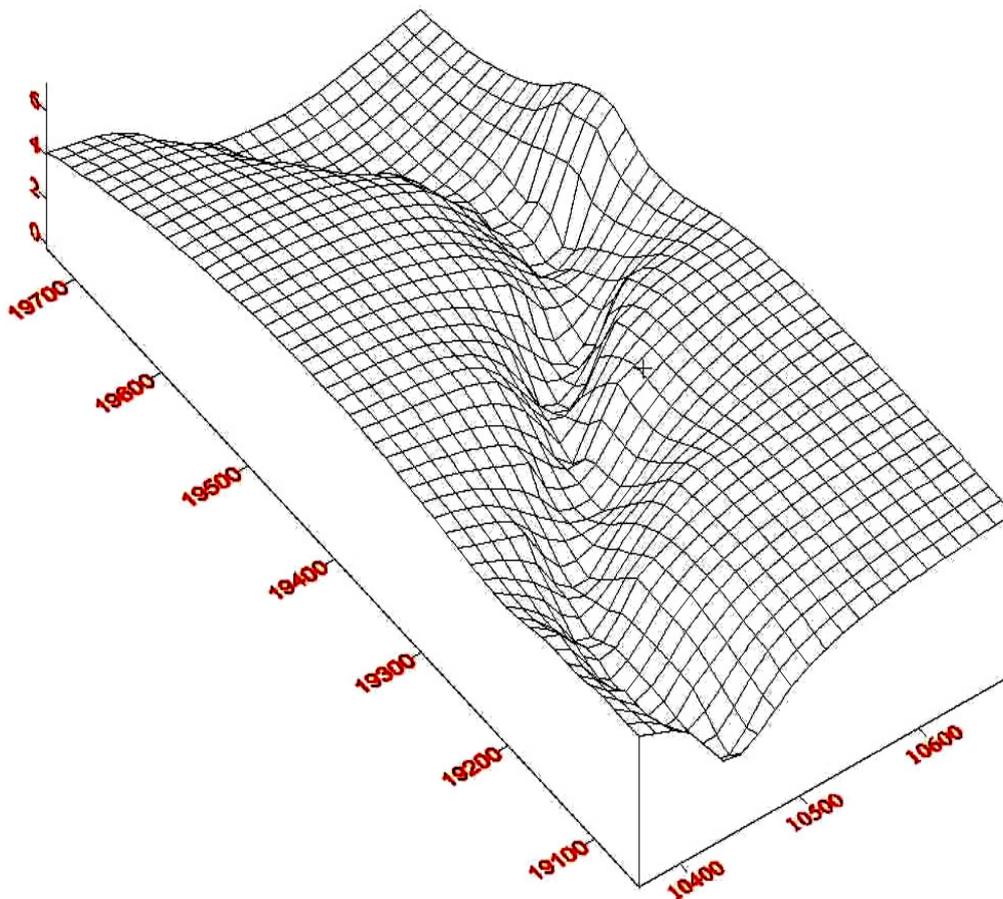


Figure V.1 : Modèle numérique d'Altitude du tronçon étudié de l'oued ALLALAH

La première étape consiste à définir le contour du domaine où peut s'effectuer l'écoulement à l'aide du SIG.

Ensuite, nous avons élaboré le maillage de ce domaine grâce au logiciel EMC², qui donnerait dans un premier temps un maillage pauvre. Il servirait à préparer le maillage définitif sur lequel s'effectueraient les calculs.

B. LE MAILLAGE

I. Construction du maillage plan 2D

Le maillage sera réalisé avec le logiciel EMC² qui est un logiciel portable, graphique et interactif d'édition de maillages et de contours en deux dimensions. Il permet de générer interactivement les maillages bidimensionnels par la méthode des éléments finis en définissant la géométrie, la discrétisation des contours, les sous domaines et les numéros de référence (prise en compte des conditions aux limites, définition des propriétés des sous-domaines). Ces maillages, formés de triangles ou quadrangles, sont de type réglé (grille déformée) ou de type DELAUNAY VORONOI (maillage automatique). Il est possible d'éditer un maillage en ajoutant, supprimant, déplaçant des sommets, ou le régularisant, en lui appliquant des transformations affines (symétrie, rotation....). [*Hecht ; Saltel, 1990*]

Le logiciel est divisé en trois applications principales : [*Hecht ; Saltel, 1990*]

1. l'application **CONSTRUCTION** : édition et création de la géométrie.
2. l'application **PREP- MESH** : édition et définition du maillage des contours des références des lignes, points, et sous domaines.
3. l'application **EDIT- MESH** : création et édition d'un maillage triangulaire ou quadrangulaire.

Le maillage réalisé par EMC² est constitué de 115 sommets et 184 éléments triangulaires (figures V.2).

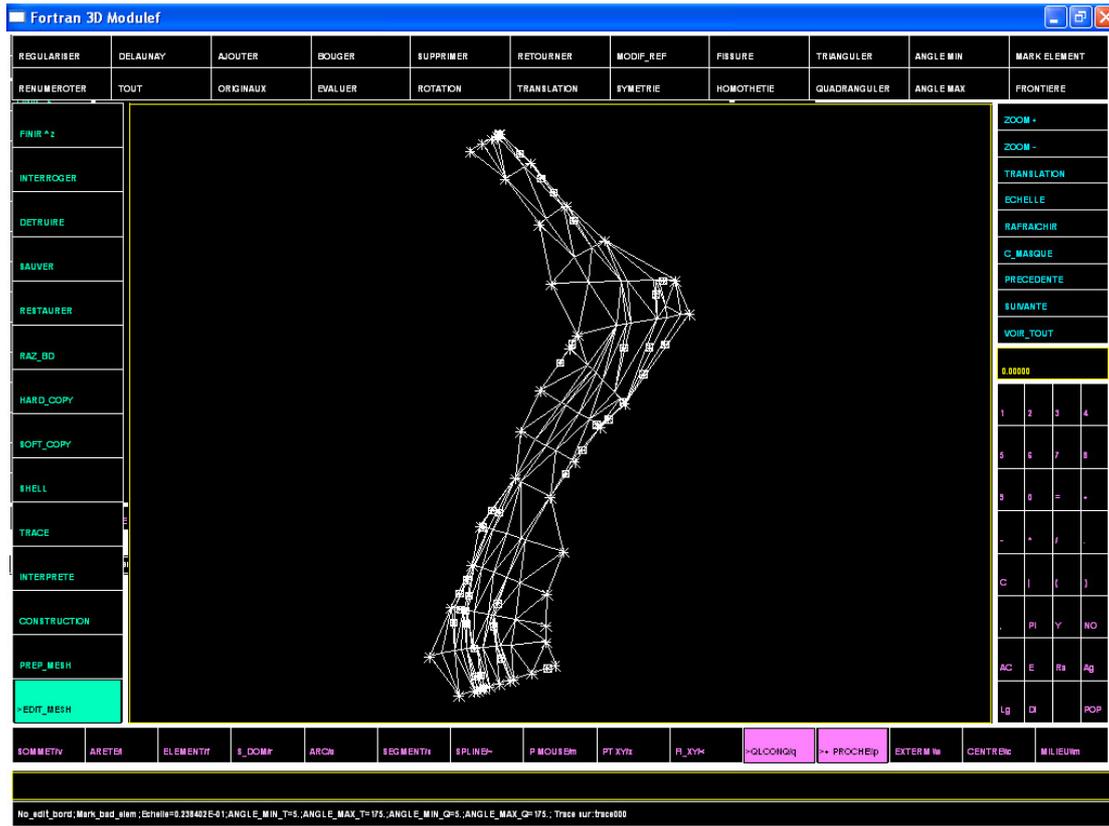


Figure V.2 : Maillage EMC² du tronçon de notre étude

II. Construction du maillage de surface 3D

Comme il a été mentionné, EMC² est un éditeur de maillage et de contour en 2D. Les problèmes traités par le code FESWMS sont de nature 2,5D ; c'est pourquoi, partant d'un maillage plan généré par EMC², on affecte la composante Z appropriée à chaque nœud grâce au programme EXTRACTCCOR

III. Utilisation de YAMS [Henine, 2002]

Le YAMS est un logiciel de remaillage de surface.

Pour exécuter le YAMS en lui précisant le fichier à traiter (exemple : xxx-E.mesh), on utilise la commande suivante :

Yams xxx-E [-h][...][prefix file output]

Où ;

[-h] : est spécifié par la commande [-O n], où le paramètre n indique :

0 : pour l'optimisation ;

1 : pour l'enrichissement du maillage ;

-1 : pour simplifier le maillage.

[préfix file output] : spécifier le format de fichier ;

[...] : d'autres options peuvent être spécifiées sur la ligne de commande :

-v : pour avoir plus d'informations durant le traitement ;

- b : enregistre la métrique dans un fichier d'extension « .bb » ;
- e : enregistre les normales, les tangentes, etc.... à la fin du fichiers d'entrée ;
- f : enregistre sous le format ASCII le fichier de sortie ;
- m : indique la capacité de la mémoire en MegaBytes ;
- nm : crée les points sur les bords ;
- no : pour ne pas enregistrer le résultat ;

Le maillage final généré par le YAMS est de type P^1 .

Chaque élément est représenté uniquement par les points sommets et ne contient aucune information sur les nœuds milieu.

IV. Génération de maillage P^2 [Hammouche, 2004]

L'étape suivante, consiste à générer à partir du maillage P^1 un maillage P^2 suivant un format adapté au code FESWMS, à ce niveau on aura recours aux sousroutines de la bibliothèque modulef⁶ pour créer un maillage P^1 iso P^2 , c'est à dire chaque triangle sera divisé en 4 triangles, à la fin on récupère les nœuds sommets du 1^{er} triangle P^1 , et les nœuds sommets du triangle intérieur qui constituent les nœuds P^2 .

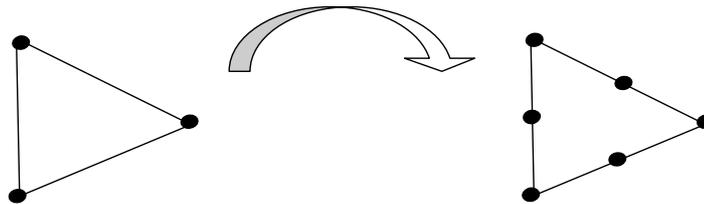


Figure V.3 : Génération d'un élément triangulaire à 6 nœuds

Une fois le maillage P^2 est généré à partir du maillage P^1 , on procède à la préparation du fichier de données et les différents paramètres du modèle, afin de lancer l'exécution du code FESWMS.

C. APPLICATION DU MODELE FESWMS

I. Les conditions initiales [Hamouche, 2004]

C'est les conditions qui représentent l'état $t=t_0$, c'est à dire l'état initial le plus proche possible de la réalité et portent sur U, V et H qui représente respectivement la vitesse et la profondeur.

⁶ : Une bibliothèque modulaire d'éléments finis

Dans le cas général, on ne connaît pas ces conditions surtout en bidimensionnel. Ces variables sont souvent inconnues, à priori. L'expérience est donc nécessaire pour spécifier physiquement les valeurs réelles. Dans notre cas nous considérons que l'état initial correspond à un état hydrostatique c'est-à-dire :

$$U_i^0(x,y,0)=0$$

$$V_i^0(x,y,0)=0$$

$$H_i^0(x,y,0)=C$$

C : est une valeur arbitraire positive constante pour tout le domaine de calcul.

II. Les conditions aux limites

On distingue essentiellement deux types de frontières : fermées et ouvertes.

✘ Frontières fermées

Il s'agit des frontières telles que rives ou murs auxquels sont imposées les conditions suivantes :

- La condition de non adhérence pour la composante tangentielle (glissement).
- La condition d'imperméabilité pour la composante normale : $U_n=0$

✘ Frontières ouvertes

On considère ici les entrées et les sorties du tronçon. Le régime d'écoulement est le critère principal pour le choix des conditions à imposer. Celles-ci portent sur les paramètres de vitesse, de hauteur ou bien de débit. Dans notre cas, les conditions aux frontières ouvertes sont le débit Q à l'entrée et l'élévation d'eau H à la sortie. Cette hauteur est égale à la hauteur normale de l'écoulement. Elle est calculée par la formule de Manning, c'est-à-dire, que l'on considère le régime est uniforme à la section aval [*Graf, Altinakar, 1993*].

III. Exécution du logiciel FESWMS

Le code du calcul FESWMS nécessite un choix judicieux de certains paramètres. En effet, il s'appuie sur des données à caractère physique et hydraulique telles que les coefficients de frottement, de viscosité turbulente, et d'autres à caractère numérique telles que le facteur de relaxation, la taille des maillages éléments finis, et la tolérance pour mouiller les éléments.

Notre souhait a été de faire une simulation d'une crue dont on connaît la courbe de tarage et les vitesses d'écoulement enregistrées à l'aval de la section. Vu que nous ne disposons pas de ces informations, la simulation a été faite pour les débits max. calculés pour différentes fréquences.

Les données que nous utilisons sont représentées dans le tableau V.1.

Tableau V.1 Les conditions aux limites

Périodes de retour	Débit Q (m³/s) amont	Hauteur H (m) aval
10 ans	342	3.92
20 ans	481	4.81
50 ans	707	6.06
100 ans	912	7.06

IV. Calibrage du modèle

Le modèle élément finis est une représentation simplifiée, discrète, d'un phénomène physique continu et complexe, dont l'écoulement est régit par des équations différentielles ou les paramètres empiriques apparaissent. Pour cela, quand le modèle donne des résultats erronés, il doit être calibré, avec les données du terrain disponibles par ajustement des dimensions des éléments géométriques, et des coefficients empiriques de telle façon que les résultats obtenus par le modèle soient égaux aux valeurs mesurées.

Le pouvoir du modèle de reproduire et prédire les valeurs expérimentales, dépend de la qualité du MNT, et des données hydrauliques collectées. Plusieurs paramètres du modèle peuvent être ajustés afin d'obtenir un faible écart entre les valeurs mesurées et calculées, un ajustement d'un paramètre ne doit pas dépasser trop la valeur estimée au départ. Le but du calibrage est d'obtenir une représentation mathématique correcte de la réalité, non pas de forcer un modèle à donner les résultats mesurés.

Dans le calibrage du modèle, on procède par ajustement systématique des paramètres. Les valeurs mesurées de l'élévation de la surface de l'eau, et des vitesses, peuvent être utilisés pour calibrer le modèle.

Les coefficients de rugosité sont des coefficients empiriques qui affectent de plus la solution. Les coefficients de rugosité estimés pendant la construction du maillage ne doivent pas être trop modifiés si des données topographiques suffisantes et précises ont été collectées. Changer les coefficients de rugosité doit être fait soigneusement, tel que les valeurs nouvelles correspondent au matériau du lit du cours d'eau, à la pente du canal, et du couvert végétal existant dans l'aire de l'élément triangulaire.

Le coefficient de viscosité turbulente, souvent affecte la solution moins que les coefficients de rugosité. Son influence est grande dans les régions où le gradient de vitesse est important. Augmenter ce coefficient, fait réduire le gradient de vitesse, donc une distribution uniforme de la vitesse horizontale.

Si un compromis entre les valeurs mesurées et calculées de l'élévation d'eau, et de la vitesse ne peut pas être obtenu par l'ajustement des coefficients de rugosité et de viscosité turbulente dans les limites raisonnables, la discrétisation du modèle, la précision des données topographiques et hydrauliques doivent être examinées.

V. Visualisation des résultats

Les résultats finaux de simulation peuvent être exploités sous les différents logiciels suivant : Arcview, Médit, Visu et SMS. Avec Arcview nous visualisons les résultats sous forme de thèmes associés au maillage de visualisation ou par des courbes

temporelles et spatiales. Nous pouvons aussi superposer la solution sur la carte géographique de la région, ce qui nous permettrait de déterminer les zones touchées par l'inondation. Médit, Visu et SMS offrent d'autres possibilités pour explorer les résultats en fusionnant la solution sur le maillage de calcul, ce qui permet d'avoir une vue globale sur la solution (localisation des extremums par exemple) [Henine, 2005]

Le FESWMS résout les équations simplifiées de Saint-Venant,

On obtient en sortie de ce code, les vitesses moyennes sur les profondeurs (U , V) et la hauteur moyenne H .

Pour la visualisation graphique, on a utilisé le logiciel SMS qui s'adapte au code utilisé FESWMS, contrairement au logiciel (MEDIT et VISU) qui présente l'inconvénient d'être du type P^1 , le SMS permet donc de représenter l'information globale sur chaque nœud de maillage.

L'élévation du fond Z le long du tronçon est représentée par la figure V.4

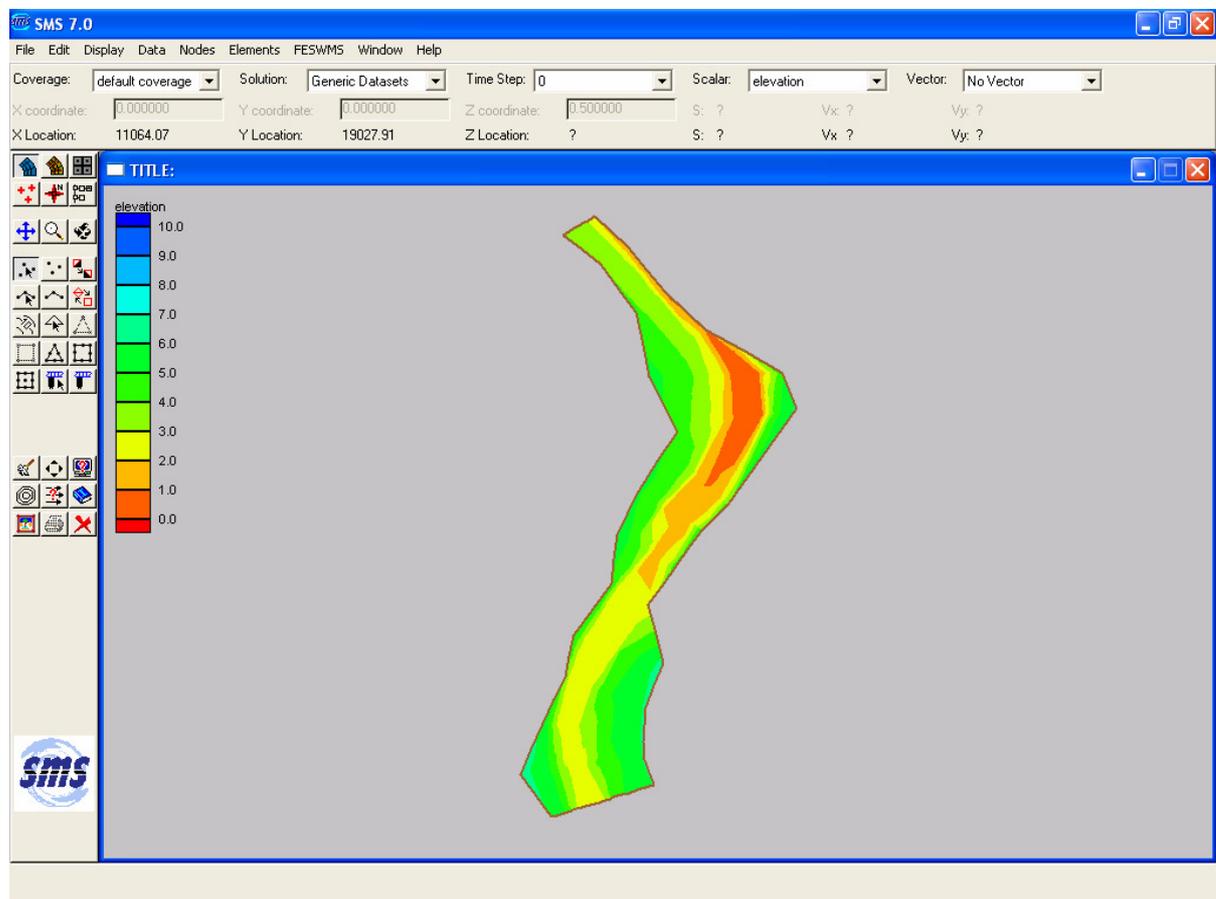


Figure V.4 : Hauteur du fond par rapport au niveau de la mer

Les variations des vitesses pour les scénarios de quatre périodes de retours sont représentées par les figures (V.5, V.7, V.9, V.11).

Les champs des vitesses sont donnés par les figures (V.6, V.8, V.10, V.12).

Les figures (V.13... V.16) présentent l'élévation de la surface d'eau par rapport au niveau de la mer pour chaque période de retour.

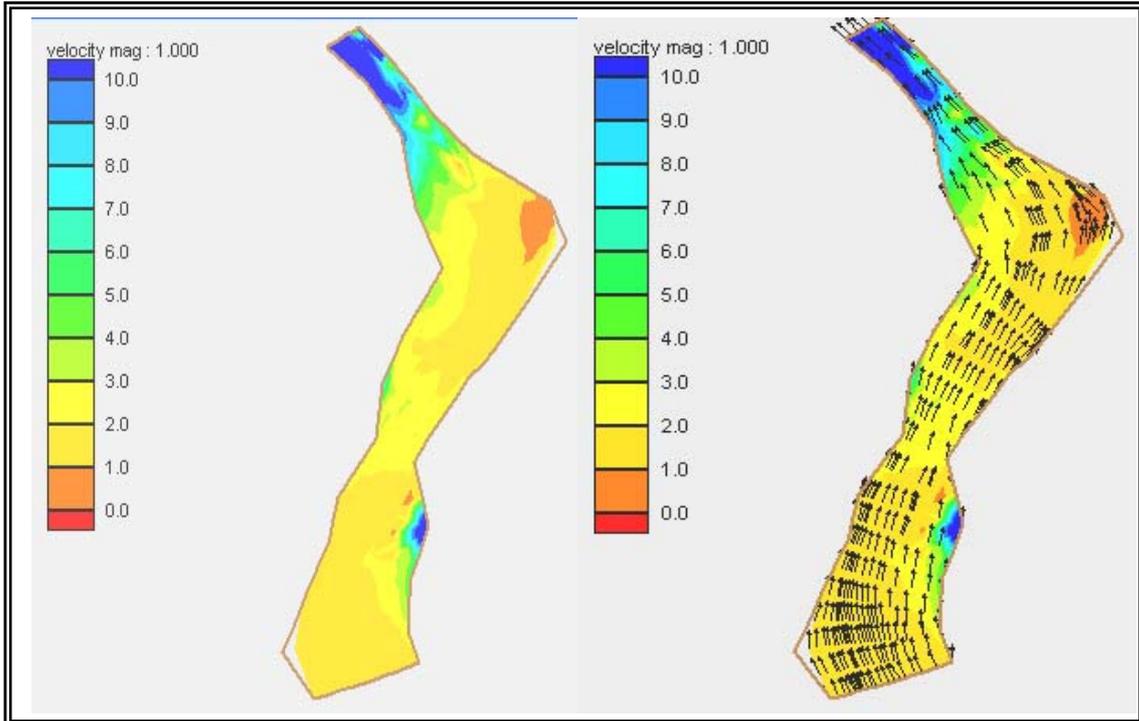


Figure V.5: Variation de la vitesse en m/s **Figure V.6 :** Champs de vitesse en m/s

Période de retour 10 ans

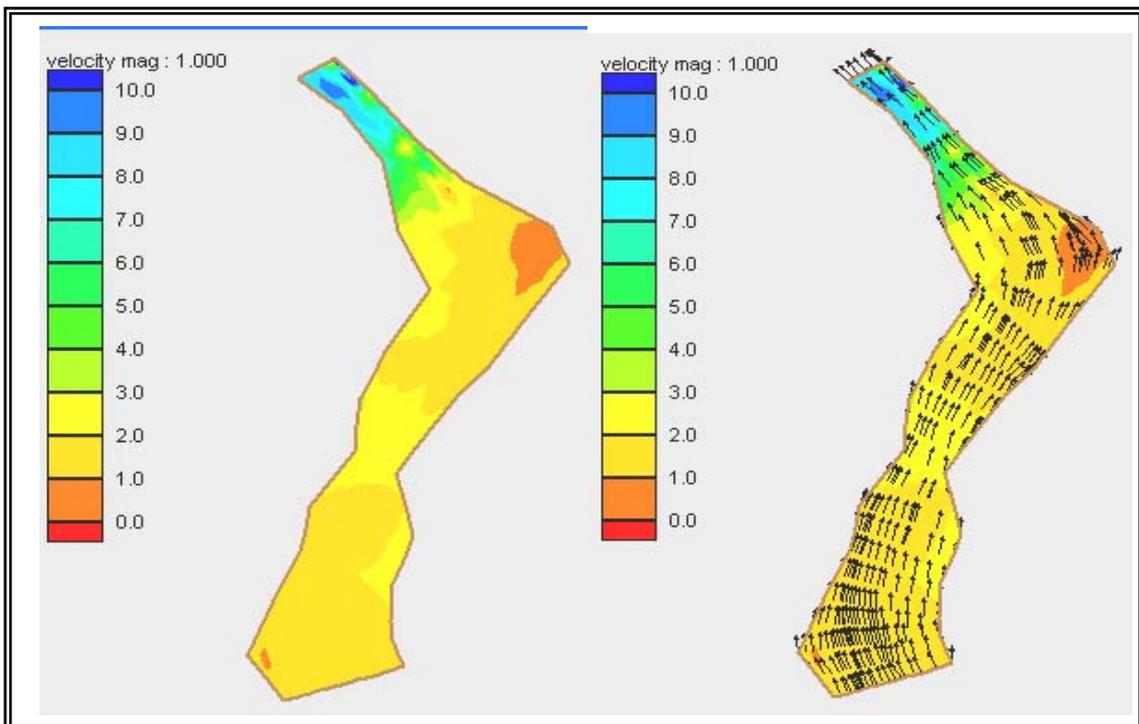


Figure V.7: Variation de la vitesse en m/s **Figure V.8 :** Champs de vitesse en m/s

Période de retour 20 ans

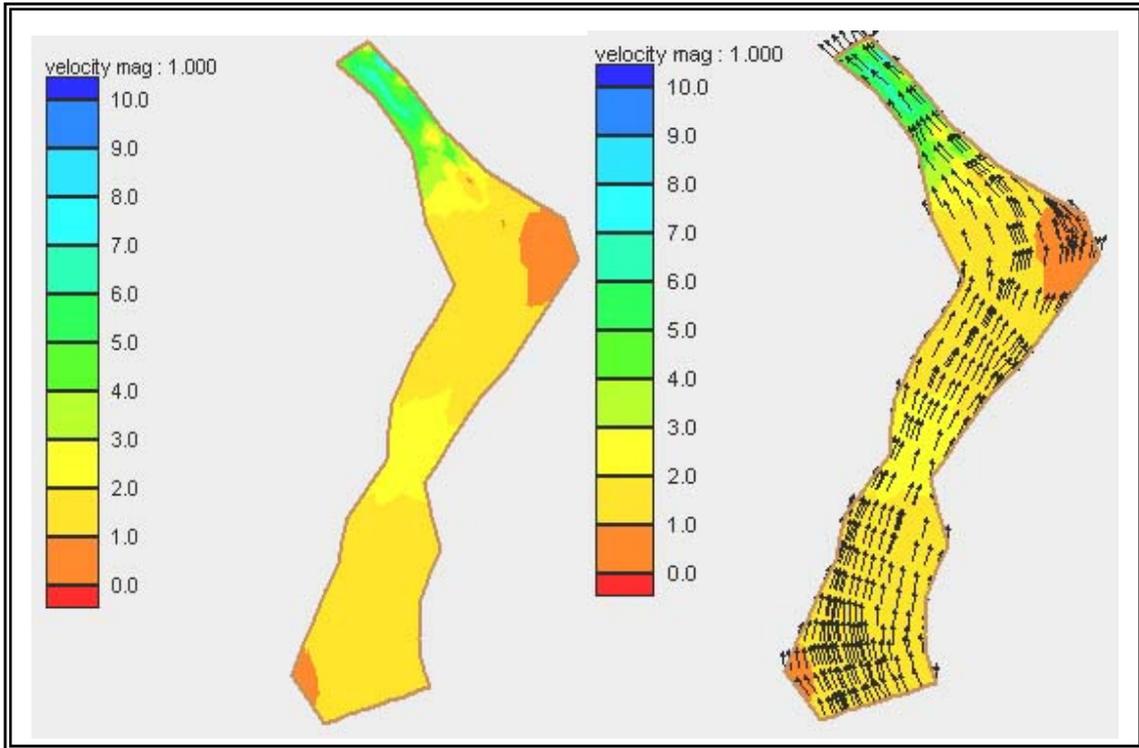


Figure V.9: Variation de la vitesse en m/s **Figure V.10 :** Champs de vitesse en m/s
Période de retour 50 ans

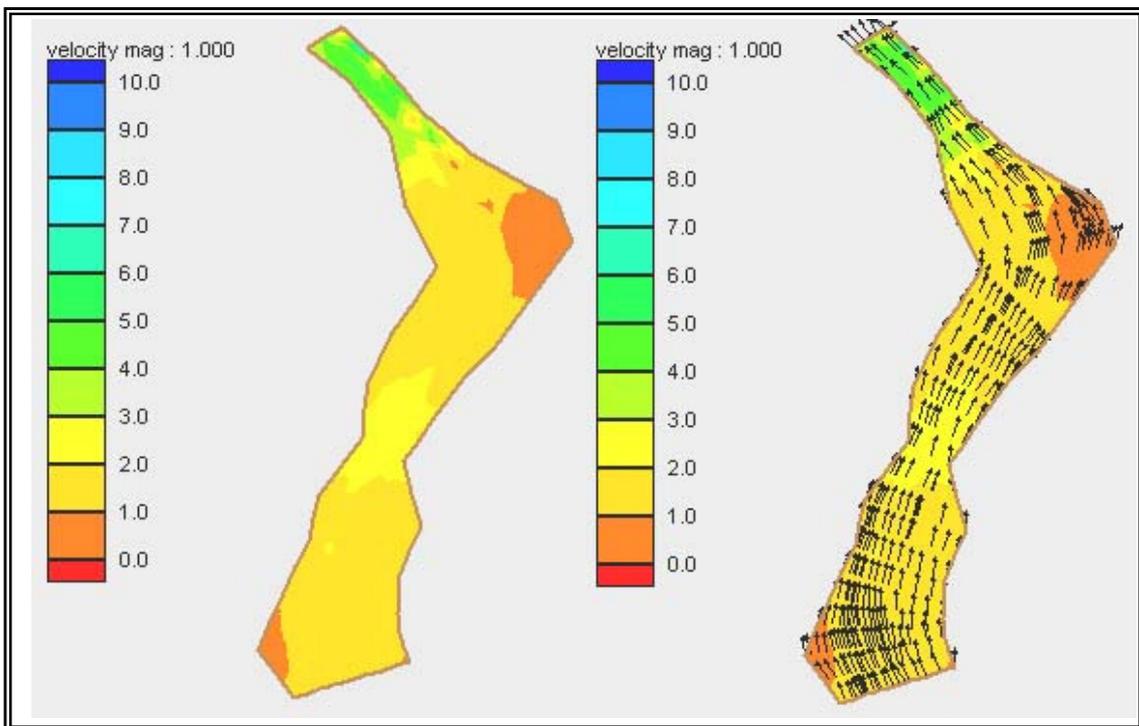


Figure V.11: Variation de la vitesse en m/s **Figure V.12 :** Champs de vitesse en m/s
Période de retour 100 ans

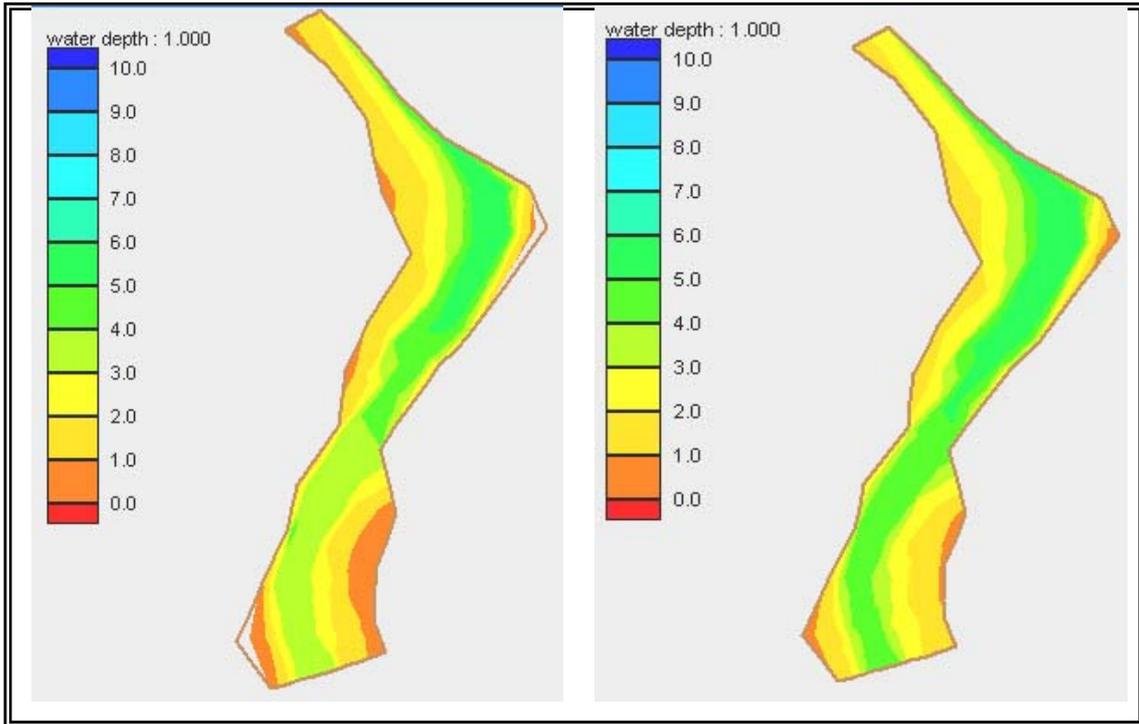


Figure V.13: Hauteur d'élévation d'eau
Période de retour 10 ans

Figure V.14 : Hauteur d'élévation d'eau
Période de retour 20 ans

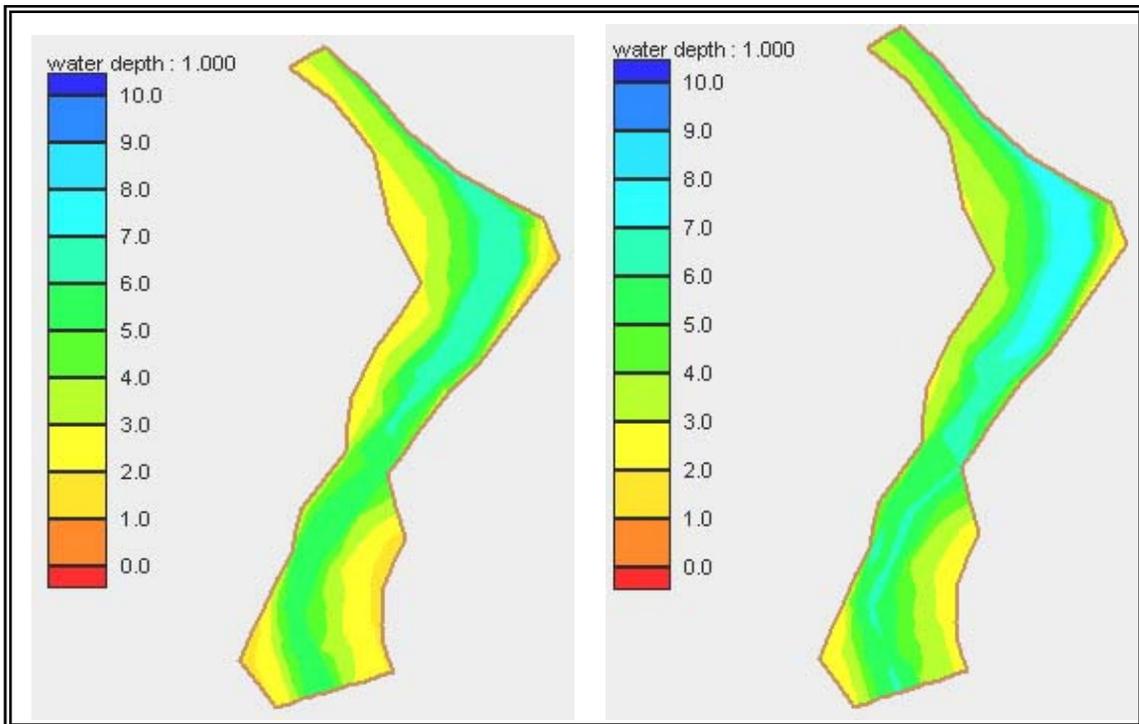


Figure V.15: Hauteur d'élévation d'eau
Période de retour 50 ans

Figure V.16 : Hauteur d'élévation d'eau
Période de retour 100 ans

VI. Interprétation des résultats

Les vitesses sont très importantes à la sortie du tronçon et là où les sections sont étroites

La répartition de la vitesse sera beaucoup plus précise si le maillage est très dense. La difficulté d'étudier un tel cas est l'incapacité de la machine à résoudre le nombre important d'équations qu'engendrerait le raffinement du maillage

Les vecteurs sont représentés aux nœuds sommets de chaque élément triangulaire. Nous remarquons que les vitesses aux frontières solides ne sont pas nulles. Ces vitesses sont des vitesses tangentielles. Cela provient des conditions aux limites imposées à ces frontières et qui sont :

- Glissement de la composante tangentielle ;
- La composante normale égale à zéro.

L'élévation d'eau augmente au fur à mesure que le débit d'eau évalue et la hauteur en tout point du maillage est proportionnelle à l'élévation du fond. Elle décroît toute en remontant par rapport à l'axe d'écoulement.

L'une des difficultés de la modélisation des écoulements dans la nature est la détermination des paramètres physiques, à savoir, le coefficient de rugosité et de la viscosité turbulente, dont le code FESWMS intimement compte.

VII. Présentation en 3D

L'application du FESWMS, nous a permis de récupérer les fichiers d'extension TXT qui donne les coordonnées (X, Y, Z) des points représentant les couches d'eau pour différents scénarios et le terrain naturel du tronçon étudié.

Ces fichiers sont exportés vers le logiciel TOPOCAD qui se présente sous forme de CDROM ainsi que d'une clé électronique. Son fonctionnement nécessite le chargement de ces menus dans l'AUTOCAD.

Le TOPOCAD, nous permet donc de lire les fichiers de coordonnées XYZ et les points seront reportés directement sur la zone graphique d'AUTOCAD.

Par la suite, en sélectionnant le module modélisation, nous lançons les calculs de triangularisation et nous plaçons les courbes de niveaux. (Figure V.17)

Puis, nous superposons le terrain et les couches représentant le niveau d'eau pour les différents débits.

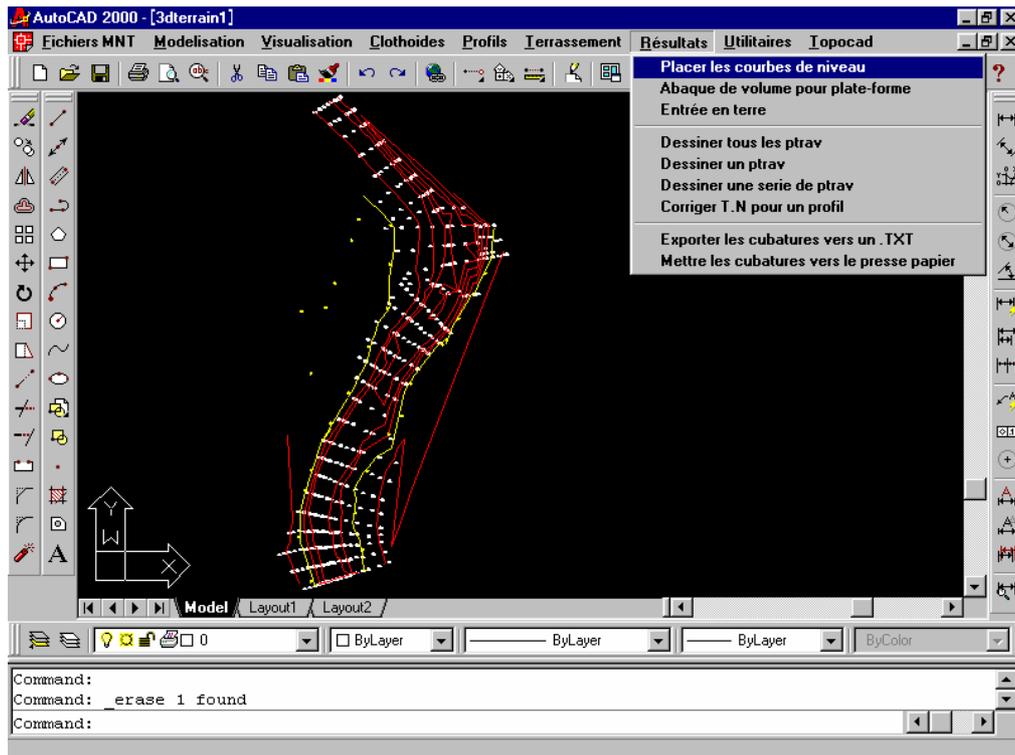
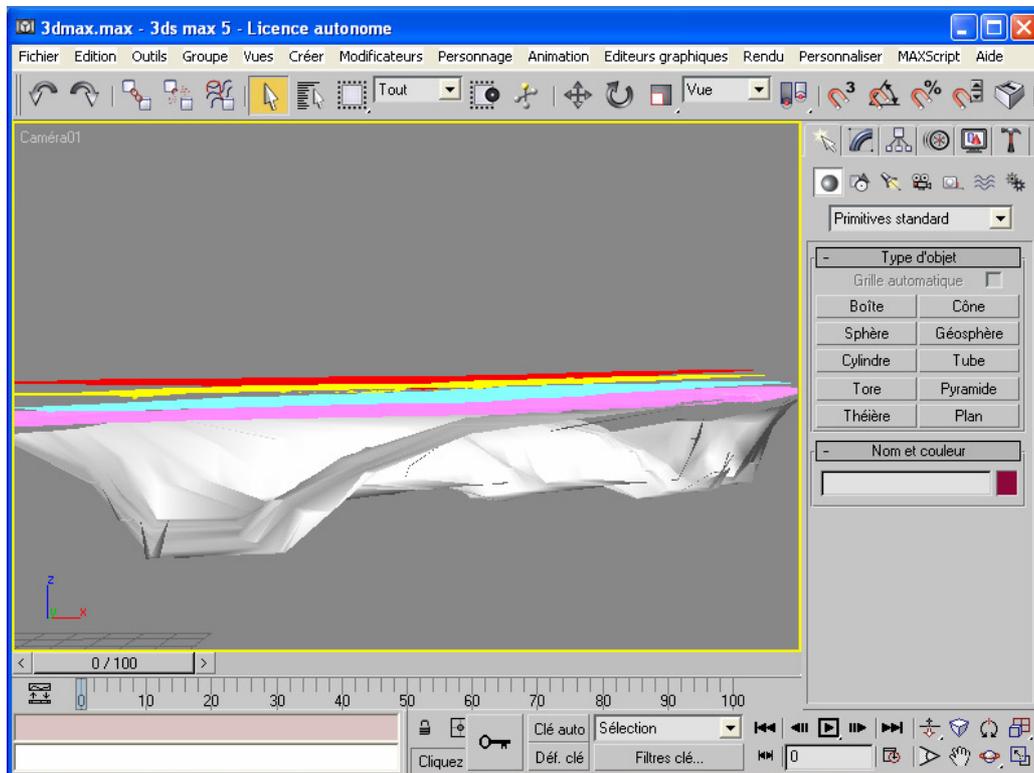


Figure V.17 : fenêtre principale du logiciel TOPOCAD

Le fichier final sera enregistré sous format Autocad (DWG ou DXF), en exportant ce fichier vers le logiciel 3Dmax, on voit clairement le terrain et les différents couche d'eau. (FigureV.18)



FigureV.18 : fenêtre principale du logiciel 3Dmax

Le 3Dmax, utilisé beaucoup plus par les architectes [Soltan, 2006], nous permet une bonne visualisation en tridimensionnel du phénomène étudiée. (Figure V.19)

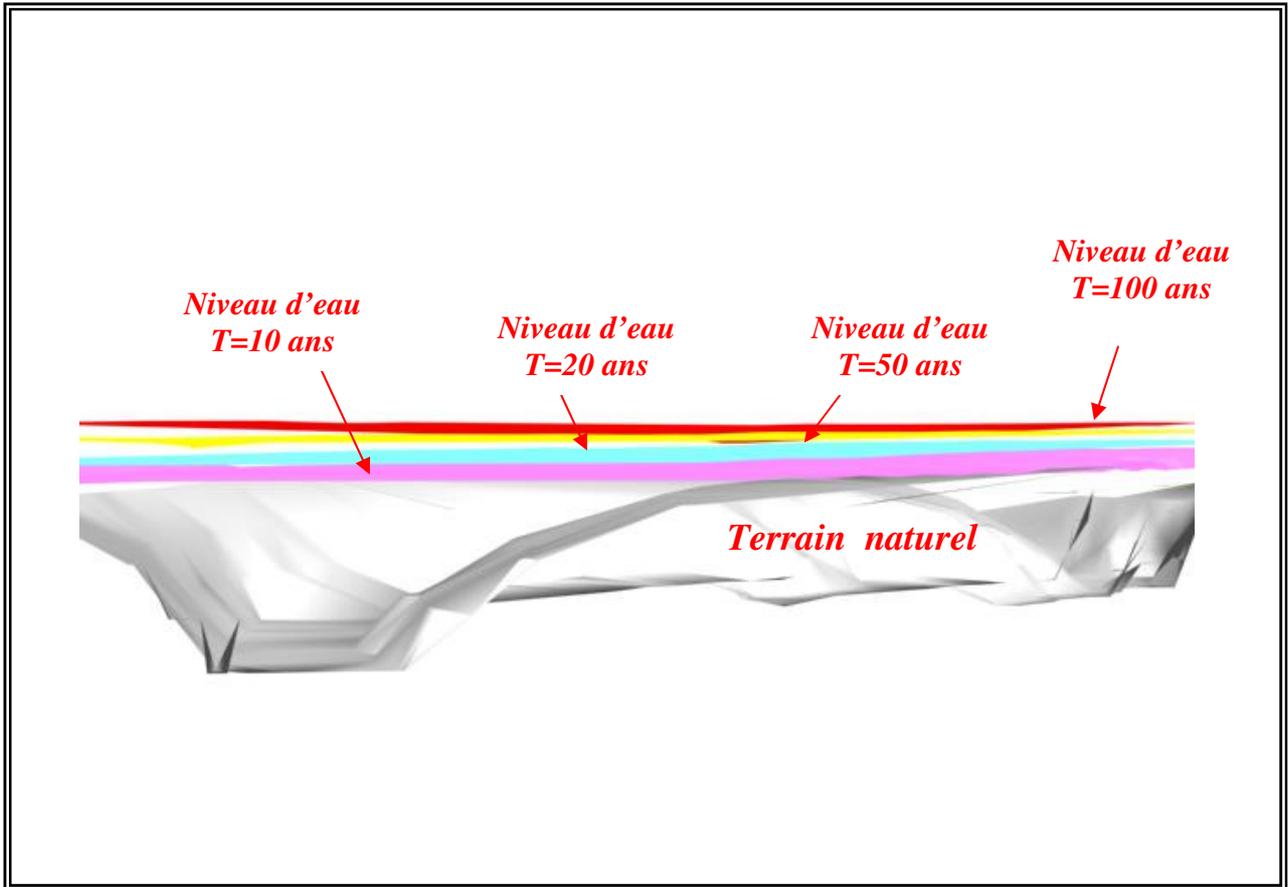


Figure V.19 : Présentation en 3D du phénomène étudiée

Conclusion Générale

La maîtrise des crues constitue un centre d'intérêt d'actualité vers lequel convergent plusieurs approches. La simulation numérique en est une. Elle permet de mieux comprendre le phénomène des crues, et ce dans le but d'apporter une contribution aux problèmes de gestion des risques d'inondations, par le développement d'une politique plus rationnelle et d'établir des systèmes d'alertes adéquates ainsi que des plans de protection et d'intervention devant ce type de catastrophe.

Le travail que nous avons présenté réside en une étude d'une crue d'un tronçon réel de l'oued Allalah à l'aide d'un modèle numérique, afin de reproduire le phénomène physique par simulation de l'écoulement.

En premier lieu, une étude hydrographique, hydrologique et hydrométrique du bassin versant de Ténès a été effectuée pour caractériser l'écoulement dans le cours d'eau. Le bassin versant de Ténès favorise la torrencialité de l'écoulement et indique une érosion hydrique relativement forte. Sa pluviométrie est moyenne - moyenne annuelle de pluie de 550 mm- générant un débit maximum de fréquence centennale évalué à $912 \text{ m}^3 / \text{s}$.

En second lieu, le bassin versant a été traité à l'aide des différents outils de dessin assisté par informatique. Et notamment la partie aval de l'oued Ténès objet de notre travail.

Avant de procéder à la simulation numérique en utilisant le logiciel FESWMS, nous avons délimité le contour du domaine d'étude et réalisé un maillage pauvre triangulaire à trois nœuds. Nous sommes passés au maillage de surface 3D, par récupération de la composante Z de chaque nœud du maillage, ceci est réalisé grâce au programme EXTRACTCCOR qui a attribué à chaque nœud la composante Z. Enfin, nous avons procédé au raffinement de ce maillage en utilisant le logiciel YAMS.

La simulation numérique de l'écoulement dans ce tronçon a été faite au moyen du modèle hydrodynamique appelé FESWMS basé sur la résolution des équations de Saint -Venant par la méthode des éléments finis. Les sorties du FESWMS donnent comme résultats de calcul, en chaque nœud du maillage une hauteur d'eau ainsi que les deux composantes (U, V) de la vitesse.

Pour l'exploitation des résultats finaux, le logiciel SMS, nous a permis de représenter l'information sur chaque nœud du maillage.

Les différentes figures nous ont permis de constater visuellement l'évolution de l'écoulement dans le tronçon de l'oued Allalah. Les vitesses sont importantes dans les sections étroites et en remontant de l'aval vers l'amont, la hauteur d'eau décroît le long de l'axe de l'écoulement.

Finalement, nous avons visualisé graphiquement les différents niveaux d'eau selon les quatre scénarios par le logiciel 3ds max, Cette visualisation permet de donner une vue tridimensionnelle du lit du cours d'eau avec les différents niveaux d'eau atteints par l'oued Allalah au droit du tronçon étudié.

Cependant, la modélisation des écoulements à surface libre pour des cas réels est confrontée à des problèmes :

- ✘ Détermination des conditions initiales et des conditions aux limites : la simulation d'une crue observée nécessite la disponibilité d'un hydrogramme de crue qui constitue la condition à l'amont, accompagné d'une courbe de tarage qui est la condition à l'aval.
- ✘ La topographie : dans cette étude, nous sommes limité uniquement à un tronçon, cette limitation nous est imposée par l'incapacité de la machine (ordinateur) à résoudre un nombre important d'équation pour un long tronçon, elle est aussi parfois imposé par le manque d'information (levé topographique du site incomplet).
- ✘ Détermination des caractéristiques physiques du lit de l'oued : l'une des difficultés de la modélisation des écoulements dans la nature est la détermination du coefficient de rugosité. En effet, le cours d'eau présente des singularités (élargissement, rétrécissement, changement de pente...) dont il faut tenir compte. Pour cela, ce coefficient devra être soigneusement évalué et choisi de préférence in -situ car tout mauvais choix aura une grande influence sur la validation des résultats.

De nombreux modèles sont exposés pour la représentation des phénomènes naturels, mais malheureusement leur amélioration conduit à l'introduction de paramètres souvent difficiles à estimer et à l'exploitation d'un volume de données de plus en plus important. Le FESWMS a donné lieu à des résultats satisfaisants peuvent être améliorés en affinant mieux l'estimation des paramètres, en élargissant le contour du domaine d'étude et en affinant le maillage pour mieux reproduire les conditions réelles de l'écoulement, qui sont la topographie du cours d'eau.

Référence Bibliographique

Abdelali, K., 1999. « Proposition d'un plan d'aménagement de la vallée de l'Ourika suite à la crue du 17 août 1995 par l'élaboration d'une base de données multi -sources (haut atlas de Marrakech) », thèse de doctorat 3eme cycle, université Mohamed V-AGDAL

Becheraier, L., 2002. « L'acquisition des données géographique dans un SIG, applications sur la Soummam par GEOCONCEPT», mémoire de d'ingénieur, ENP.

Benlameur, A., 2004. « Cartographie automatique de l'évapotranspiration au niveau du bassin versant de la Soummam et régions limitrophes», mémoire de d'ingénieur, ENP.

Bennani, Dj., 2003. « Elaboration des hydrogrammes de crue sur le bassin versant de la SOUMMAM», mémoire de d'ingénieur, ENP.

Bouchaibi, J., 1998. « Elaboration d'un TIN (Triangulated Irregular Network) pour la modélisation numérique de bassin versant », mémoire de d'ingénieur (EMI Maroc).

Carlier, M., 1980. « Hydraulique générale et appliquée», Eyrolles, Paris.

Charef, N., 1998. « Etude et conception d'un barrage sur l'oued BOUZINA-W.BATNA», mémoire de d'ingénieur, ENP.

Cheikh, M., 1999. « Concepts de base des systèmes d'information géographiques, CNIG, université de Blida du 25 au 29 Septembre 1999, Algérie.

Collet, C., 1992. « Systèmes d'information géographiques en mode image », presses polytechniques et universitaires Romandes, collection gérer l'environnement, Lausanne, Suisse.

Demmak, A., 1982. « Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale», mémoire de Doctorat, Université de Pierre et Marie curie, Paris.

Floissac, F., 1997. « Traitement automatique des MNTs pour l'analyse géomorphologique, application au Afars et à Taiwan », INRIA Sophia Antipolis.

Gaouas, A., 2001. « Cours sur les systèmes d'information géographiques», INA Alger.

Graf, H., Altinakar, S., 1993. « Hydraulique fluviale », presses polytechniques et universitaires Romandes, collection gérer l'environnement, Lausanne, Suisse.

Hammouche, A., 2004. «Simulation hydrodynamique des crues – cas de l'oued SOUMMAM- », mémoire de Magister, Université A.MIRA de Béjaia.

Hecht, F., Saltel, E., 1990. « Emc2 un logiciel d'édition de maillages et de contours bidimensionnels », rapport technique N°118, INRIA.

Henine, H., 2002. « Interfaces conviviales via l'intégrateur ESIMEAU entre un SIG et des modèles numériques de simulation », mémoire d'ingénieur, ENP.

Henine, H., 2005. « Interfaçage entre un modèle hydrologique/ modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous web incluent les SIG », mémoire de Magister, ENP.

Henry, J. - B; Grussenmeyer, P.; Mallet, J.-P; Maquaire, O., 2001. « Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format, application au versant instable de Super ».

Ider, K., 2004. « Modélisation hydrodynamique d'un cours d'eau, Application à l'Oued Soummam », mémoire de Magister, ENP.

Kadir, O., 2006. « Délimitation des zones inondables cas de l'oued SEBAOU », mémoire de Magister, ENP.

Kherbache, K., 2004. « Contribution à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique par la méthode des volumes finis », mémoire de d'ingénieur, ENP.

Liamas, J., 1992. « Hydrologie générale application et principe », Edition Gactan Morin, Canada.

Réménieras, G., 1980. « L'hydrologie de l'ingénieur », Edition Eyrolles.

Soltan, A., 2006. « Utilisation du logiciel SIG Géo Concept pour l'élaboration d'une base de donnée de la Soummam », mémoire d'ingénieur, ENP.

Talamali, S., 2002. « L'hydrodynamique des rivières et les systèmes d'information géographique », mémoire de Magister, ENP.

TOUZOT, G., 1984. « Une présentation de la méthode des éléments finis », Paris.

U.S Department of transportation FESWMS-2DH, (1989) « Finite Element Surface Water Modelling System-Two Dimensional Flow in Horizontal Plane » Users Manual, Virginia.

U.S Department of transportation FESWMS-2DH, (1991). « Finite Element Surface Water Modelling System-Two Dimensional Flow in Horizontal Plane » Users Manual, Virginia.

www.FAO.org

www.Seig.ensg.ign.fr

Mémoire de Magister