

M0008/04A

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur & de la Recherche Scientifique.

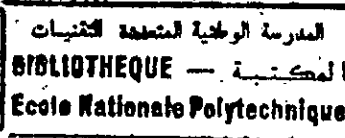
Ecole Nationale Polytechnique.



Département Hydraulique



Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau
LRS- EAU

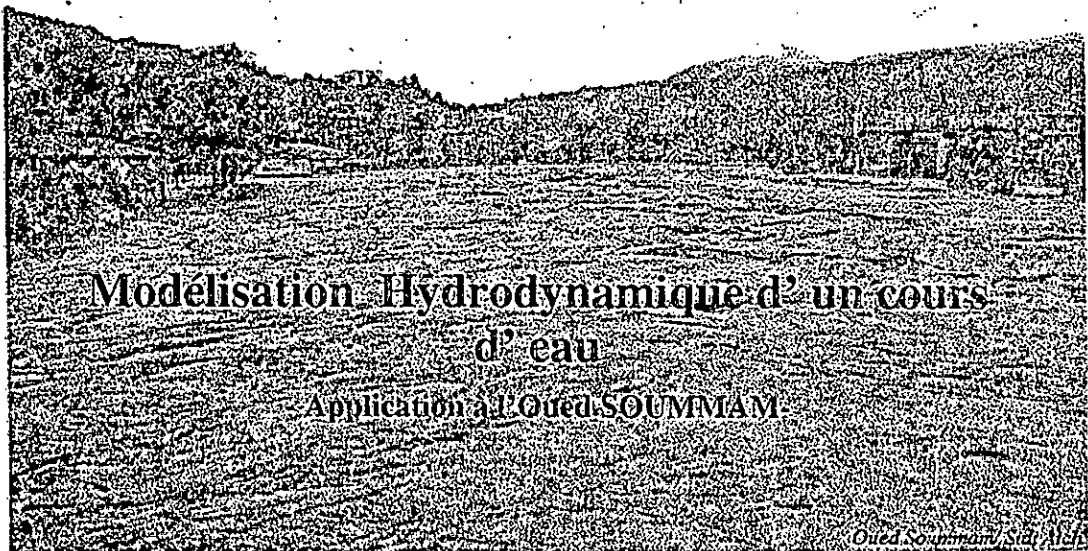


Institut National de Recherche en Informatique et
Automatique INRIA - France

Mémoire de Magister en Hydraulique

Préparé par
Mr. Karim IDER

Ingénieur d' Etat en Hydraulique (ENP)



Président du jury

Mr. A. Kettab

Professeur à l'ENP

Directeurs du mémoire

Melle Benmarnar Saadia
Mr. Dabaghi Fadi

Chargée de Cours à l'ENP
Directeur de Recherche à l'INRIA

Examineurs

Mr. S. Benziada
Mr. Y. Mouloudi
Mr. A. Semmar

Chargé de cours à l'ENP
Chargé de cours à l'ENP
Chargé de cours à l'INA

2003/2004

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

« Je montre mon travail tout en sachant qu'il n'est qu'une partie de la vérité, et je le montrerais même en le sachant faux, parce que certaines erreurs sont des étapes vers la vérité. Je fais, dans une tâche bien définie, le maximum de ce que je puis ».

Robert Musil (1932)

Dédicaces

A la mémoire de mon grand père

Je remercie mes parents et tous les membre de ma famille de m'avoir donné le goût des études et ne saurais conclure sans leurs dédier ce travail , tant leurs compréhension et leurs soutien ont été déterminant.

Ce modeste travail est dédié à l'ensemble des collègues et enseignants du département Hydraulique de l'Ecole Nationale Polytechnique, du Laboratoire de Recherche de Sciences de l'Eau (LRS-Eau) et à l'équipe COSIVIE¹ de l'INRIA².

Pour finir, je tiens à remercier l'ensemble de mes amis (es) pour leurs sympathie et gentillesse.

Karim IDER

¹ : Couplage de modèles pour la Simulation numérique pour des problématiques en Vironnementales.

² : Institut National de Recherche en Informatique et Automatique-Rocquencourt.

Remerciements



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

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à ma directrice de mémoire Melle Benmammar Saadia, qui a dirigé les travaux de ce mémoire, pour son soutien au cours de ces années, la confiance qu'elle m'a témoigné et l'ensemble des moyens qu'elle a mis à ma disposition.

Je saisis cette occasion pour exprimer mes sincères remerciements à Monsieur F. Dabaghi directeur de recherche à l'INRIA¹ et responsable de l'équipe COSIVIE², de m'avoir accepté comme stagiaire au sein de son équipe et pour l'ensemble des conseils et orientations prodigués durant mes différents stages de formation et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener à bien ce travail.

Mes vifs remerciements vont également au Professeur A. Kettab, Directeur du Laboratoire de Recherche des Science de l'eau LRS-Eau, pour l'ensemble des moyens qu'il a mis à ma disposition et pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury.

Je suis reconnaissant à Monsieur le Professeur M. K. Berrah Directeur de l'Ecole Nationale Polytechnique de m'avoir permis d'effectuer mes stages à l'INRIA- Rocquencourt. Je remercie aussi en cette occasion Monsieur le Professeur D. Ouazar coordonnateur Marocain des projets ESIMEAU³, CRUCID⁴ et WADI⁵ pour tous ses conseils, ses orientations et discussions fructueuses qu'on a eu ensemble pendant mes différents séjours à l'INRIA.

Je tiens à remercier Monsieur S. Benziada, Chargé de Cours à l'Ecole Nationale Polytechnique pour ses conseils, son écoute et ses aides durant toute la durée de ce mémoire et d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Je remercie également monsieur A. Semmar, Chargé de Cours à l'Institut National d'Agronomie (INA) pour ses encouragements, ses conseils et sa disponibilité pour examiner ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur Y. Mouloudi, Chargé de Cours à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir répondu favorablement pour faire partie du jury.

Enfin, mes remerciements les plus sincères s'adressent à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation et l'aboutissement de ce modeste travail.

¹ : Institut National de Recherche en Informatique et Automatique- Rocquencourt.

² : Couplage de modèles pour la Simulation numérique pour des problématiques environnementales.

³ : Elaboration d'un Système Intégré pour la Modélisation et la gestion des ressources en EAU en zones arides et semi-arides.

⁴ : Modélisation numérique des Crues via le Calcul Intensif Distribué

⁵ : Water supply watershed planning and management : an integrated approach.

L' Eau et les Catastrophes

Message du secrétaire général de L'OMM¹

Durant les dernières décennies, les catastrophes naturelles ont fait d'innombrables victimes, causé des dommages économiques de plus en plus importants et bouleversé la vie de centaines de millions de personnes dans le monde entier. Ces catastrophes désorganisent l'économie des pays touchés, frappent durement les plus pauvres et les plus vulnérables et, de l'avis général, sont un obstacle majeur au développement durable et à la réduction de la pauvreté. Pour y faire face, il faut intégrer la gestion des risques et des catastrophes dans une planification d'ensemble du développement, en se fondant sur une base de connaissances élargie, une mobilisation active des décideurs et une participation et une sensibilisation accrues du public.

Depuis toujours, les plans d'eau se sont révélés propices aux établissements humains et aux activités économiques. Durant les dernières décennies, l'accroissement de la population et sa concentration dans les centres urbains ont encore accéléré ce processus, exposant ainsi des communautés toujours plus nombreuses aux dangers liés à l'eau. Les coûts humains, économiques et environnementaux de ces catastrophes ont augmenté de façon spectaculaire depuis 40 ans. Aujourd'hui, près des trois quarts des catastrophes naturelles résultent de phénomènes extrêmes liés au temps, au climat et à l'eau. Une eau trop abondante, trop rare ou trop insalubre a un effet néfaste sur l'économie nationale et la santé, et les situations qui en découlent s'avèrent, à long terme, lourdes de conséquences pour le bien-être des populations touchées.

Grâce aux progrès accomplis dans les domaines de la météorologie et de l'hydrologie, on s'est rendu compte que la préparation aux catastrophes naturelles et l'atténuation de leurs effets peuvent contribuer à réduire les incidences négatives de ces dangers. Bien que la société ne soit pas en mesure d'éviter les dangers naturels, elle peut cependant remédier à sa propre vulnérabilité et limiter les risques connexes, les empêchant ainsi de se transformer en catastrophes. La réorientation de la gestion des catastrophes vers des stratégies fondées sur la prévention et l'anticipation peut grandement concourir à réduire la vulnérabilité des communautés aux cyclones, aux inondations, aux sécheresses et aux autres dangers de ce type. Lorsque des dispositions sont prises à l'avance pour atténuer les effets dévastateurs de ces dangers, les décideurs sont à même d'en prévenir les conséquences les plus graves à moindres frais. Les mesures de préparation et d'atténuation jouent donc un rôle essentiel dans la réduction de l'incidence des catastrophes.

Il importe cependant que ces mesures de préparation et d'atténuation se fondent sur une information digne de foi, et notamment sur des services de prévision et d'alerte précoce de plus en plus fiables et à échéance de plus en plus longue ainsi que sur la fourniture de données et de renseignements à long terme qui permettent de procéder à une évaluation des risques et d'élaborer et de mettre en œuvre des mesures d'atténuation tant structurelles que non structurelles. Nous pouvons largement tirer parti du vaste – et unique en son genre – système d'observation in situ et par satellite mis en place par l'OMM, de son réseau de centres de prévision et d'alerte, qui abritent quelques-uns des supercalculateurs les plus puissants du monde, et de son vaste système de télécommunications, qui permet à l'ensemble

¹ : Office Mondial de Météorologie.

des services météorologiques nationaux d'échanger des données et/ou des produits et d'assurer l'élaboration et la diffusion en temps opportun des prévisions à courte, moyenne et longue échéance et des messages d'alerte. De plus, il faut s'appuyer sur l'étude systématique des phénomènes météorologiques et hydrologiques et les observations relatives aux cyclones, aux fortes tempêtes, aux crues, aux glissements de terrain et aux coulées de boue pour bien comprendre comment et pourquoi les dangers naturels apparaissent et comment ils peuvent se transformer en catastrophes. Pour pouvoir se préparer et prendre des mesures qui permettent de parer la menace que font peser les catastrophes, il faut être informé des risques encourus, des solutions envisageables pour limiter ces risques et des moyens d'appliquer ces solutions.

L'alerte précoce en cas de catastrophe joue un rôle crucial dans toutes les entreprises humaines et doit être complétée par une stratégie qui permette de faire face à ces dangers et d'en atténuer les effets néfastes. La gestion des catastrophes est une technique pluridisciplinaire qui comporte une dimension sociale, culturelle et environnementale. Il faut par conséquent faire évoluer les stratégies de gestion des catastrophes, en se fondant non seulement sur des données techniques, mais aussi sur une solide base de connaissances d'ordre social et culturel.

La Journée mondiale de l'eau, qui a cette année pour thème « L'eau et les catastrophes », constitue un défi pour tous ceux qui sont chargés de la gestion des catastrophes – et en particulier celles et ceux qui s'occupent de la prévision et de l'annonce précoce des dangers naturels au sein des services météorologiques et hydrologiques nationaux – et leur fournit en outre l'occasion de communiquer avec les différents acteurs concernés par le canal des médias, des campagnes de sensibilisation du public et des interactions communautaires. Profitons de cette occasion pour élaborer des stratégies de préparation et d'intervention, sensibiliser le public à la prévision météorologique et hydrologique et renforcer la capacité des communautés à comprendre, dans leurs grandes lignes, les différents aspects de la gestion des catastrophes. Je voudrais aussi saisir cette occasion pour inviter les gouvernements, les organisations internationales, les organisations non gouvernementales, les milieux universitaires, les médias et les services météorologiques et hydrologiques nationaux à coordonner leurs connaissances et leurs actions et les inciter à s'informer et à se préparer afin d'atténuer les effets dommageables des dangers naturels, et notamment des catastrophes liées à l'eau, et de contribuer ainsi au développement durable de toutes les nations.

M. Michel Jarraud à la Communauté Internationale à l'Occasion de la
Journée Mondiale de l'eau, le 22 mars 2004.

في أيامنا هذه، يمكن الاعتبار أن من بين المسائل الأكثر تهديداً يتمثل في الخطر المتوقع حدوثه جراء حفيضان عنيف ومدمر.

لتقليل هذا الخطر نحلل الغمر (الطوفان) الناتج عن فيضان ماء من أجل إتجازار خرائط أخطار الفيضانات في سهول حوض الصب بغية تحضير المخطط الموافق للحماية ووضع أدوات فعالة قادرة على التنبؤ بارتفاع مستوى المياه للمساعدة في اتخاذ القرار قصد حماية السكان المعنيين بهذا الخطر.

إن المعطيات التكنولوجية الجديدة (ن إ ج¹ (SIG) - ن أ ر² (MNT)...) أضحت ذات استعمال كبير وسمحت بإيجاد الحلول لمثل هذه المتطلبات.

لقد أصبح وصف الظاهرة الطبيعية ممكناً بفضل نموذج رياضي، إن المعدلات المنشورة عام 1871 والتي أخذت اسم باري دوسان فونان (Saint Venant)، مازلت إلى يومنا هذا ذات أهمية بالغة في الري النهري والبحري، والتي يمكن أن تتحكم في الجريان ذو السطح الحر قليل العمق. يمكن الحصول عليها انطلاقاً من معدلات نافير ستوكس (Navier Stokes) بعد وضع فرضيات مسهلة.

في مذكرة الماجستير هذه، تناولنا مسألة الفيضانات، في المجرى السفلي للصومام عبر عدة مراحل، بدءاً بجلب المعطيات حتى معاينة النتائج مروراً بالمحاكاة الرقمية لجريان الوادي الشفرة الرقمية المختارة لهذه المحاكاة (ن م س ع م³ (FESWMS)) تقوم بحل معادلات سان فونان (Saint Venant) ذات بعد 2.5 باستخدام طريقة العناصر المتناهية، التجزيء أنجز بواسطة (م ت⁴ (logiciel de maillage EMC2))، وكذا بواسطة ن ر أ المنجز سابقاً.

إن طبيعة المسألة المعالجة بالشفرة (ن م س ع م³ (FESWMS) ذات بعد 2,5 تستوجب تجزيء سطحي ثلاثي الأبعاد.

تتحصل على التجزيء المستعمل في الحساب بتنفيذ سلسلة من البرامج المطورة بـ (م و ب م⁵ (INRIA)) وبرنامج إعادة التجزيء السطحي ثلاثي الأبعاد YAMS وكذا بعض البرامج الجزئية لمكتبة Modulef التي تسمح بالانتقال من التجزيء P¹ إلى P²

حل معادلات سان فونان يعطينا حدود الجريان والسرعات الأفقية وارتفاع الماء عند كل عقدة من التجزيء المكون للمجال الفيزيائي للجريان. من أجل المعاينة البيانية للنتائج استعملنا المتخصص (ن م س⁶ (SMS)). هذا الأخير مهياً ليتوافق مع شفرة الحساب المستعملة والذي يسمح كذلك بتمثيل المعلومات الإجمالية على كل العقد.

الكلمات المفتاحية : حوض الصب، للصومام، (ن إ ج¹ (SIG)، ن أ ر² (MNT)، سان فونان (Saint Venant) ذات بعد 2.5، ن م س ع م³ (FESWMS)، العناصر المتناهية، EMC2، YAMS، SMS

1: نظام الإعلام الجغرافي (SIG).

2: نموذج الأرض الرقمي (MNT).

3: نظام نمذجة للمياه السطحية بالعناصر المنتهية (FESWMS).

4: محرر التجزيء (Logiciel de Maillage).

5: المعهد الوطني للبحث في المعلوماتية و الاتوماتيك (INRIA)

6: نظام نمذجة المياه السطحية (SMS)

RESUME

De nos jours, l'un des problèmes considérés comme des plus alarmants est celui du risque éventuel qui peut survenir d'une crue violente et dévastatrice. En effet, les crues sont plus redoutées que souhaitées. Pour minimiser ce risque, l'analyse des submersions engendrées par une crue est le plus souvent menée pour l'établissement des cartes du risque d'inondation des surfaces situées dans les plaines d'un bassin versant en vue de préparer les plans correspondant à la protection civile. Ceci nécessite de plus en plus, pour l'aide dans la prise de décision, la mise à la disposition des acteurs de l'eau d'outils très puissants afin de prévoir les surélévations des niveaux d'eau et de prévenir les populations concernées. L'apport des nouvelles technologies (SIG¹, MNT², Visualiseurs, Maillages,) sont d'une grande utilité et permettent d'apporter des réponses à de telles exigences.

La description du phénomène naturel est rendue possible grâce à un modèle mathématique. Les équations désormais appelées de Barré de Saint Venant, publiées en 1871, sont encore aujourd'hui d'une extrême importance en hydraulique fluviale et maritime, elles régissent les écoulements à surface libre en eau peu profonde.

Dans ce mémoire de magister, nous avons abordé la problématique des crues, dans la vallée de la basse Soummam, en procédant par plusieurs étapes. Ces étapes incluent la phase d'acquisition de données jusqu'à la visualisation des résultats en passant par la simulation numérique de l'écoulement de l'oued. Le code de simulation numérique sélectionné FESWMS³ résout les équations de Saint Venant 2.5D en utilisant la méthode des éléments finis. Le maillage pré-process 2D est réalisé à l'aide du logiciel EMC2⁴ couplé avec le MNT réalisé. Le problème traité par le code FESWMS est de nature 2.5D, d'où le besoin d'un maillage de surface tridimensionnelle. Le maillage de calcul est obtenu par l'exécution d'une suite d'exécutables développés à l'INRIA, un logiciel de remaillage de surface 3D YAMS et quelques sous-programmes de la bibliothèque MODULEF permettent le passage d'un maillage P¹ au P². La résolution des équations de Saint Venant nous donne les limites de l'écoulement, les vitesses horizontales, et la hauteur d'eau en chaque nœud du maillage constituant le domaine physique d'écoulement. Pour la visualisation graphique des résultats, on a utilisé le visualiseur SMS⁵. Ce dernier est adapté au code de calcul utilisé et permet ainsi de représenter l'information globale sur tous les nœuds.

MOTS CLEF : Bassin Versant - Soummam- SIG - MNT- Saint Venant 2.5D -FESWMS - Eléments Finis - EMC2- YAMS- SMS.

¹ : Système d'Informations Géographiques

² : Modèle Numérique de Terrain

³ : Finite Element Surface Water Modelling System.

⁴ : Edition de Maillage et Contours 2D

⁵ : Surface water Modelling System

SUMMARY

Nowadays, one of the problems considered as more alarming is that of the possible risk which can occur from a violent rising and devastator. Indeed, the floods are more dreaded than wished. To minimize this risk, the immersion generated by flood generally carried out for the establishment of the charts of the floods risk of the surfaces located in the plains of the watershed in order to prepare the plans corresponding to civil protection: This requires more and more, for the assistance in the decision-making, an availability of the actors of water of the tools very powerful in order to envisage the heightenings of the water levels in order to prevent the populations concerned. The contribution of the new technologies (GIS, DTM, Visualisers, Mesh software...) are of great utility and allow to gives answers to such requirements. The description of the natural phenomenon is made possible thanks to a mathematical model. The equation from now on called Barre de Saint venant, published in 1871, are still nowadays with its extreme importance in hydraulics river and maritime, they govern the shallow water flows.

In this memory of magister, we approached the problems of the risings, in the valley of Basse Soummam, while proceeding by several stages. These stages include the acquisition's phase of data to the visualization of the results while passing by the digital simulation of rivers's flow. The code of numerical of simulation selected FESWMS solves the 2.5 Saint Venant equations by using the finite element method. The grid pre-process 2D is carried out with the EMC2 software and with the help of the realized DTM. The problem treated by the FESWMS code is of nature 2.5D, from where the the need of grid for three-dimensional surface. The grid of calculation is obtained by execution of continuation of exécutable developed at the INRIA, a software of mending of meshes of surface 3D (YAMS), and some under library programs MODULEF which allow the passage from the P^1 mesh to P^2 . The resolution of 2.5 D Saint vanant equations flow gives us the limits flow, the horizontal speeds, and the height of water in each node of the grid constituting the physical field of flow. For the graphic visualization of the results, one used visualisor SMS. This last is adapted to the computer code used and thus makes it possible to represent total's information on all the nodes.

WORDS KEY: Watershed, Soummam- SIG, DTM- Saint Venant 2.5D - FESWMS - Finite elements - EMC2- YAMS- SMS.

SOMMAIRE

NOTATIONS	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : CONCEPTS DE BASE SUR LES SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES (SIG) ET SUR LES MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN (MNT)	
A. CONCEPTS DE BASE SUR LES SIG.....	3
INTRODUCTION.....	3
I. SYSTEME D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES.....	3
1. <i>Information</i>	3
2. <i>Information géographique</i>	3
3. <i>Notion de système</i>	3
4. <i>Système d'information</i>	3
5. <i>Système d'information géographique</i>	4
II. QUESTIONS AUQUELLES UN SIG DOIT REpondRE	5
III. LES INTERETS DES SIG.....	5
IV. LES COMPOSANTES D'UN SIG.....	6
1. <i>Une boîte à outils</i>	6
2. <i>Base de données géographique</i>	6
3. <i>Interface utilisateur</i>	8
4. <i>Les aspects organisationnels</i>	
5. <i>Le personnel</i>	8
V. LES PRINCIPALES FONCTIONS D'UN SIG.....	9
1. <i>Acquisition de l'information géographique</i>	9
2. <i>Stockage et gestion des données</i>	10
3. <i>Manipulation et analyse des données</i>	11
4. <i>Restitution des données</i>	13
VI. MODE DE REPRESENTATION DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE.....	13
1. <i>Mode vecteur</i>	13
2. <i>Mode Raster</i>	14
VII. CARACTERISTIQUES DES SIG.....	14
VIII. QUELQUES EXEMPLES DE SIG.....	15

B: LES MNT- DEFINITIONS.....	20
INTRODUCTION.....	20
I. DEFINITIONS.....	20
II. ACQUISITION DE DONNEES.....	20
III. SOURCES D'INFORMATIONS.....	21
1. Cartes topographiques.....	21
2. Photographie aérienne.....	21
3. Imagerie satellite.....	22
IV. LES MODALITES DE CONSTRUCTION D'UN MNT.....	22
V. LES DIFFERENTS TYPES DE MNT.....	22
1. Les MNT sous forme de grilles régulières.....	22
2. les MNT sous forme de TIN.....	23
3. Contours.....	24
4. Grille triangulée.....	25
VI. CHOIX DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN.....	25
VII. CHOIX ENTRE RASTER ET VECTEUR.....	25
VIII. PRODUCTION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN.....	25
IX. LES UTILISATIONS ET LES REPRESENTATIONS FREQUENTES DES MNT.....	26
X. PRECISION D'UN MNT.....	28

chapitre II : Elaboration du modèle numérique d' altitude (MNA) DE LA ZONE D'ETUDE.

INTRODUCTION.....	29
I. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	30
II. ASPECT SOCIO- ECONOMIQUE DE LA REGION.....	30
III. ASPECT GEOMORPHOLOGIQUE.....	30
1. Caractéristiques géométriques.....	31
2. Relief.....	34
3. Caractéristiques du réseau hydrographique.....	35
IV. STRATEGIE ADOPTEE POUR LA REALISATION DU MNA.....	38
1. Données requises.....	38
2. Digitalisation des cartes.....	40
3. Elaboration du MNA de la zone d'étude.....	50
CONCLUSION.....	54

CHAPITRE III : LE MODELE MATHEMATIQUE DE SAINT VENANT

INTRODUCTION.....	55
I. EQUATIONS DE NAVIER STOKES.....	56
II. EQUATIONS DE REYNOLDS.....	58
1. Décomposition de Reynolds.....	58
2. Equations de Reynolds.....	59
III. MODELE MATHEMATIQUE DE SAINT VENANT.....	60
1. Champs d'application.....	60
2. Hypothèses adoptées.....	60
3. Equations du mouvement moyen dans l'espace.....	60
IV. APPLICATION DE LA MOYENNE SUR LA VERTICALE.....	64
1. Equation de continuité.....	64
2. Equation de la dynamique.....	65
V. MODELISATION DE LA TURBULENCE.....	74
1. Modèle du premier ordre.....	74
2. Modèle du deuxième ordre.....	76
VI. SIGNIFICATION PHYSIQUE DES TERMES.....	78
VII. CONDITIONS AUX LIMITES.....	79

CHAPITRE IV : LE MODELE NUMERIQUE FESWMS

INTRODUCTION.....	80
I. PRESENTATION DU CODE.....	81
1. Données d'entrée.....	81
2. Données de sortie.....	81
II. FORMULATION DU PROBLEME DISCRET DANS FESWMS.....	82
III. APPROXIMATION DES TERMES CORRECTIFS.....	91
IV. CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DUES A LA TURBULENCE.....	92
V. STRATEGIE DE RESOLUTION.....	92
VI. LE MAILLAGE.....	94
VII. EXECUTION DU PROGRAMME FLO2DH.....	95
1. Conditions initiales.....	95
2. Conditions aux limites.....	95
VIII. AJUSTEMENT AUTOMATIQUE DE FRONTIERE.....	101

CHAPITRE V : VISUALISATION ET ANALYSE DES RESULTATS

I. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU TRONÇON D'ETUDE	103
II. ASPECT HYDRO CLIMATOLOGIQUE	103
1. Précipitation annuelle.....	103
2. Le vent.....	104
3. Hydrométrie.....	104
4. Apport au niveau du bassin.....	105
III. LE MAILLAGE	105
1. Construction du maillage plan 2D.....	105
2. Construction du maillage de surface 3D.....	105
3. Utilisation du logiciel YAMS	106
4. Génération du maillage P^2	107
IV. VISUALISATION ET ANALYSE DES RESULTATS.....	107
CONCLUSION GENERALE	
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXE	

TABLE DES ILLUSTRATIONS

	Page
Figure I.1 : Base de données géographiques BDG.....	7
Figure I.2 : Les composantes d'un SIG.....	8
Figure I.3 : La règle des 5A.....	9
Figure I.4 : Les couches d'informations.....	12
Figure I.5 : Fenêtre principale du logiciel MapInfo.....	15
Figure I.6 : Fenêtre principale du logiciel ArcView.....	16
Figure I.7 : Structure hiérarchique de ArcView.....	17
Figure I.8 : Fenêtre représentant une vue dans ArcView.....	17
Figure I.9 : Un MNT sous forme de grille régulière.....	23
Figure I.10 : Un MNT sous forme de réseau de TIN.....	24
Figure I.11 : Surface représentée par des courbes isohypses(courbes d'égales valeurs).....	24
Figure I.12 : Surface représentée par une grille triangulée (triangulated GRID).....	25
Figure I.13 : MNT TIN avec et sans les lignes de crêtes et les thalwegs.....	26
Figure I.14 : Sources d'informations d'un MNT.....	27
Figure II.1 : Diagramme schématique de modélisation hydrodynamique.....	29
Figure II.2 : Situation géographique du bassin versant de la basse Soummam.....	33
Figure II.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la basse Soummam.....	34
Figure II.4 : Le réseau hydrographique du bassin de la Soummam.....	36
Figure II.5 : Profil en long de l'Oued Soummam.....	37
Figure II.6 : Différentes étapes pour la réalisation d'un MNA.....	38
Figure II.7 : Profils en travers de l'Oued Soummam.....	39
Figure II.8 : Tableau synoptique des feuilles constituant le bassin de la basse Soummam, INCT.....	40
Figure II.31 : Modèle numérique de type GRID, vue en perspective de la zone d'étude, pas=5m.....	53
Figure III.1 : Schéma représentant les différentes étapes poursuivies pour aboutir au modèle de saint venant.....	55
Figure III.2 : Système de coordonnées.....	57
Figure III.3 : Schéma de principe de la modélisation physique des écoulements Turbulents.....	58
Figure III.4 : Le domaine de calcul – le système de coordonnées et variables utilisées pour la dérivation des équations moyennées.....	61
Figure III.5 : Profils de la vitesse selon la verticale dans les directions x et y.....	67
Figure III.6 : Les modèles de turbulence.....	77
Figure IV.1 : Maillage schéma numérique explicite.....	83
Figure IV.2 : maillage schéma numérique implicite.....	85
Figure IV.3 : Définition de la normale au contour.....	86

Figure IV.4 : Elément triangulaire à six nœuds.....	88
Figure IV.5 : Les points d'intégration de Gauss.....	94
Figure IV.6 : Schéma représentant les frontières d'un domaine d'écoulement.....	96
Figure V.1 : Situation géographique de la zone d'étude.....	103
Figure V.2 : Localisation de la station hydrométrique 151001.....	104
Figure V.3 : Maillage EMC2 du tronçon de notre étude.....	105
Figure V.4 : Maillage avec la composante Z.....	106
Figure V.5 : Maillage après raffinement, Fichier de sortie du logiciel YAMS.....	106
Figure V.6 : Hauteur du fond par rapport au niveau de la mer.....	107
Figure V.7 : Champs de vitesse en (m/s) pour $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$	109
Figure V.8 : Profondeur de l'écoulement en (m) pour $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$	109
Figure V.9 : Zone de recirculation pour $Q=1000\text{m}^3/\text{s}$	109
Figure V.10 : Champs de vitesse en (m/s) pour $Q=2500\text{m}^3/\text{s}$	110
Figure V.11 : Profondeur de l'écoulement en (m) pour $Q=2500\text{m}^3/\text{s}$	110
Figure V.12 : Zone de recirculation pour $Q=2500\text{m}^3/\text{s}$	110
Figure V.13 : Champs de vitesse en (m/s) pour $Q=2600\text{m}^3/\text{s}$	111
Figure V.14 : Profondeur de l'écoulement en (m) pour $Q=2600\text{m}^3/\text{s}$	111
Figure V.15 : Zone de recirculation pour $Q=2600\text{m}^3/\text{s}$	111
Figure V.16 : Champs de vitesse en (m/s) pour $Q=2800\text{m}^3/\text{s}$	112
Figure V.17 : Profondeur de l'écoulement en (m) pour $Q=2800\text{m}^3/\text{s}$	112
Figure V.18 : Zone de recirculation pour $Q=2800\text{m}^3/\text{s}$	112
Figure V.19 : Champs de vitesse en (m/s) pour $Q=3000\text{m}^3/\text{s}$	113
Figure V.20 : Profondeur de l'écoulement en (m) pour $Q=3000\text{m}^3/\text{s}$	113
Figure V.21 : Zone de recirculation pour $Q=3000\text{m}^3/\text{s}$	113
Figure V.22 : Champs de vitesse en (m/s) pour $Q=4200\text{m}^3/\text{s}$	114
Figure V.23 : Profondeur de l'écoulement en (m) pour $Q=4200\text{m}^3/\text{s}$	114
Figure V.24 : Zone de recirculation pour $Q=4200\text{m}^3/\text{s}$	114
Figure V.25 : Schéma représentant les limites d'écoulements pour trois débits différents.....	116

Notations

Symbole	Unité	Signification
a_{vent}	-	Coefficient de résistance du vent
C	$(m^{1/2}.s^{-1})$	Coefficient de Chézy
c_1, c_2, c_3	(N)	Composantes de la force de Coriolis
C_f		Coefficient de frottement adimensionnel
C_μ		Constante numérique
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	-	Coefficients numériques du modèle k- ε
D	(m)	Dénivelée
D_s	(m)	Dénivelée spécifique
d	(m)	Diamètre du matériau
F_x, F_y, F_z	(m/s^2)	Composantes des forces de volume
$\overline{f_c}$	(N)	Force de Coriolis
$\overline{f_g}$	(N)	Force de la pesanteur
$f_{U_i}^T, f_{V_i}^T$	-	Expressions résiduelles transformées
$\langle G \rangle$	-	Moyenne de la grandeur G, selon la profondeur entre Z_f et Z_s
$g(x,y,z,t)$	-	Fonction quelconque
g	(m/s^2)	Accélération de la pesanteur
I_{comp}	-	Coefficient de compacité (indice de Gravelius)
$I_{c,moyenne}$	(m/Km)	La pente moyenne du cours d'eau
I_g	(%)	Indice de pente
H	(m)	Hauteur d'eau
K_e		Débitante à travers un élément
K_s	$(m^{1/3}.s^{-1})$	Coefficient de Strickler (expression du frottement pour un écoulement à surface libre)
k	$(m^2.s^{-2})$	Energie cinétique turbulente
L	(Km)	Longueur
l	(Km)	Largeur

l_m	(m)	Longueur de mélange
N_i		Fonction d'interpolation
\vec{n}_s	-	Normale extérieure à la surface libre
\vec{n}_f	-	Normale extérieure sur le fond
n	-	Coefficient de Manning
P	(N/m ²)	Pression
P_e	(Km)	Périmètre du bassin versant
P_k		Terme de production de l'énergie turbulente
Q	(m ³ /s)	Debit
R_h	(m)	Rayon hydraulique
R_{ij}	(N/m ²)	Tenseur de Reynolds
S	(Km ²)	Superficie du bassin versant
t	(s)	La variable de temps
T_{xx}, T_{xy}, T_{yy}	(N/m ²)	Contraintes effectives dans la plan vertical
u, v, w	(m/s)	Composantes de la vitesse dans les équations de Navier Stockes selon x, y, et z respectivement.
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	(m/s)	Vitesses moyennes en temps
u', v', w'	(m/s)	Les fluctuations de vitesses en temps
u_*	(m/s)	Vitesse de frottement sur le fond
U, V	(m/s)	Composantes de la vitesse moyennée selon la profondeur selon x et y (équations de Saint Venant)
U_{vent}, V_{vent}	(m/s)	Composante de la vitesse du vent
x, y, z	(m)	variables d'espace
Z_f	(m)	Cote du fond pour l'écoulement à surface libre.
Z_s	(m)	Cote de la surface libre
$\beta_{uu}, \beta_{uv}, \beta_{vu}, \beta_{vv}$		Termes correctifs qui résultent de l'intégration selon la verticale des équations du transport de la vitesse
δ_{ij}	-	Indice de Kronecker
Δt	(s)	Pas de temps
Δx	(m)	Pas d'espace
ε		Taux de Dissipation de l'énergie cinétique turbulente



φ	(rad)	Latitude
κ	-	Constante de Karman égale
λ	(rad)	Longitude
λ_c		Coefficient de perte de charge
μ	(kg. m ⁻¹ .s ⁻¹)	Viscosité dynamique
μ_t	(kg. m ⁻¹ .s ⁻¹)	Viscosité dynamique turbulente
ν	(m ² .s ⁻¹)	Coefficient de viscosité moléculaire (viscosité cinématique)
ν_e	(m ² /s)	Coefficient viscosité effective (coefficient de diffusion incluant la dispersion et la turbulence)
ν_t	(m ² /s)	Coefficient viscosité turbulente (coefficient de diffusion turbulente)
ρ	(Kg/m ³)	Masse volumique de l'eau
ρ_{air}	(Kg/m ³)	Masse volumique de l'air
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	-	Coefficient $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$
τ_{ij}	(N/m ²)	Tenseur de contraintes visqueuses
τ_p	(N/m ²)	Contrainte de cisaillement sur le fond
τ_x, τ_y	(N/m ²)	Contraintes de frottement au fond
Ω	-	Coefficient de Coriolis ($\Omega = 2\omega \sin \varphi$)
$\vec{\omega}$	(rad/s)	Vecteur rotation de la terre

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction Générale

Introduction Générale



La pluie est la cause fondamentale des crues dont les inondations sont les manifestations.

Une inondation est définie comme étant la réalisation d'un risque résultant de la concomitance d'un aléa hydrologique (occurrence de crue), et d'une vulnérabilité (occupation du sol – activité humaine) en un lieu géographique.

A l'intensité accrue des catastrophes naturelles, les pertes économiques qui leur sont associées ont massivement augmenté. Chaque année, les catastrophes naturelles se chiffrent dans le monde en centaines de milliers de victimes. Ces chiffres sont d'autant plus élevés que les catastrophes touchent des populations vulnérables. Si le nombre de victimes est en augmentation, ce n'est pas forcément à cause d'une occurrence ou d'une intensité plus grande des phénomènes, mais plus certainement à cause d'une croissance générale de la *vulnérabilité*. Selon l'OMM (Office Mondial de Météorologie), environ 1,5 milliards de personnes dans le monde ont été victimes des crues de 1991 à 2000.

Sur le plan technique, pour simuler les conséquences hydrauliques des crues (débordement, surfaces inondées...), on utilise des modèles hydrauliques d'écoulement appliqués aux géométries réelles des rivières. Selon le type de modèle, on calcule certains paramètres hydrauliques intéressants (hauteurs d'eau, débits, vitesses d'écoulement...). L'apport des outils de la géomatique dans ce domaine est considérable car ils permettent la cartographie automatique des résultats, ceci de manière interactive en utilisant les *systèmes d'information géographiques*.

Les crues qui surviennent et les dégâts qu'elles occasionnent dans la région de la basse Soummam, a montré encore une fois l'intérêt de maîtriser cette thématique qui prend de plus en plus d'envergure.

Dans ce travail de mémoire de magister, nous allons aborder la problématique des crues sur le oued Soummam en procédant par plusieurs étapes. Ces étapes incluent la *phase d'acquisition* de données jusqu'à la *visualisation* des résultats en passant par la *simulation numérique* des crues de la Soummam.

L'objectif du **premier chapitre** consiste à donner les concepts de base sur les systèmes d'information géographiques (SIG) et leurs intérêts dans l'organisation et la structuration des données sous forme de base de données en permettant l'accès facile à l'information, sa diffusion, son analyse et son interprétation et pour une éventuelle aide à la prise de décision. Dans ce chapitre, nous donnerons aussi une brève description des modèles numériques du terrain (MNT), et leurs intérêts dans la génération du maillage du domaine d'écoulement.

Dans le **deuxième chapitre**, sont décrits en détail les étapes poursuivies pour réaliser le modèle numérique d'altitude de la zone d'étude, située entre Sidi Aich et El Kseur.

Dans le **troisième chapitre**, sont présentées les équations de Saint Venant afin de mettre en évidence les phénomènes physiques modélisés et les précautions qu'ils impliquent en analyse numérique. La principale opération donnant les équations de Saint Venant à partir des équations de *Navier-Stokes* est une moyenne sur la verticale, toutefois l'existence de termes non linéaires oblige quelques hypothèses simplificatrices.

Pour être résolu numériquement, un problème continu doit être transformé en un problème discret, décrit par un certain nombre d'équations algébriques. Ce sera l'objet du **quatrième chapitre**. L'étude de l'inondation est traitée par la modélisation hydraulique. Le modèle hydrodynamique FESWMS est appliqué pour résoudre les équations de *Barré de Saint venant*.

Dans le **dernier chapitre**, sont donnés les résultats des simulations obtenus pour différents débits de crues de l'oued Soummam.

Enfin une conclusion et un ensemble de recommandations seront donnés.

Chapitre I :

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

CHAPITRE I : CONCEPTS DE BASE SUR LES SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES (SIG) ET SUR LES MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN (MNT).

A. CONCEPTS DE BASE SUR LES SIG

INTRODUCTION

Les techniques de saisie, de traitement et de communication de l'information géographique ont connu ces dernières années des évolutions très importantes tenant à l'adoption de nouvelles technologies et à la généralisation de l'informatisation des outillages (logiciels SIG) intégrant des fonctions évoluées d'analyse spatiale.

De nos jours, les SIGs ont produit des bouleversements d'une grande ampleur dans tous les domaines (hydrogéologie, hydrologie, aménagement des territoires, control du trafic routier, gestion des bassins versants...). Il apparaît donc nécessaire que pour une meilleure compréhension des phénomènes liés à la nature ou à l'activité humaine d'adopter une approche globale dite intégrée des problématiques des territoires en intégrant autant que possible les différentes préoccupations tant techniques, économiques, environnementales ou sociologiques de l'amont à l'aval du secteur d'étude. Cela n'était pas réalisable avec les anciennes méthodes et outils d'analyse. Le recours aux technologies modernes à savoir les systèmes d'informations géographiques se trouve justifié et permet ainsi de palier a cette carence..

I. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

1. Information

«C'est un renseignement sur quelqu'un, sur quelque chose (enquête), examen, investigation, étude - élément ou système pouvant être transmis par un signal ou une combinaison de signaux » [1].

2. Information géographique

Est appelée information géographique, toute information relative à un point ou un ensemble de points spatialement référencés sur la surface de la terre. Elle correspond à la représentation d'un phénomène réel localisé dans l'espace à un moment donné [2].

3. Notion de système

Un système est un ensemble **organisé globalement** et comprenant des éléments qui se coordonnent pour concourir à une information [3].

4. Système d'information

Pour Goulay, «un système d'informations est un ensemble structuré de services, de méthodes et d'outils susceptibles de répondre à des questions relatives à une organisation ou à un domaine particulier » [1].

Pour Gualtierotti, «un système d'informations est un ensemble de moyens (humains et matériels) et de méthodes se rapportant au traitement des différentes formes d'informations rencontrées dans les organisations » [1].

5. Système d'information géographique (SIG)

Malgré l'existence du secteur depuis plusieurs années, il n'existe malheureusement pas encore une définition claire et précise pour les SIGs et communément admise par l'ensemble des chercheurs du monde de systèmes d'informations géographiques. Néanmoins, nous allons donner quelques définitions que divers auteurs et organismes en donnent et qui sont assez voisines.

La société française de photogrammétrie et de télédétection (1999) définit les SIGs comme étant un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées [4].

- Pour Collet (1992), « un SIG est un environnement conçu pour l'analyse et la modélisation de la distribution spatiale de phénomènes. Il se compose d'une boîte à outils contenant des procédures d'analyse, de gestion, de saisie et de représentation, ainsi que d'une interface utilisateur » [5].
- Pour Ron Abler (1988), président de l'association des géographes américains, les SIGs sont simultanément : le télescope, le microscope, l'ordinateur, et l'imprimante des synthèses et analyses régionales des données spatiales.
- Pour Laurini (1993), « un SIG est un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage des données localisées » [6].
- Une définition quelque peu différente, faisant ressortir l'aspect aide à la décision par rapport à l'utilisation, est donnée par Michel Didier (1990) : « 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 » [7].
- Pour Jack Dangermonde (2001), président fondateur d'ESRI, « les SIGs sont un outil précieux de prévision, d'analyse, d'anticipation et donc d'aide à la décision ».
- La définition adoptée par le comité scientifique du colloque intégration de la photogrammétrie et de la télédétection dans les SIG SFPT à Strasbourg en 1990 est :

« Un Système d'information Géographique (SIG) est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler, organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace » [8].

Les SIGs rassemblent, au sein d'un outil informatique unique, des données de nature diverses mais localisées dans un espace géographique.

D'une manière générale, les SIGs sont essentiellement des systèmes informatiques qui remplacent la cartographie et l'archivage sur papier ou en automatisant certains aspects. Ils comportent typiquement les sous systèmes suivants [9] :

- Saisie de données à partir de cartes existantes, images satellites,...

¹ : Définition adoptée par le comité scientifique du colloque intégration de la photogrammétrie et de la télédétection dans les SIG SFPT, Strasbourg 1990.

- Stockage des données spatiales sous une forme qui permet la rapidité des mises à jour et des recherches en vue d'analyse ;
- Système de gestion de bases de données (SGBD) pour prendre en compte l'information relative aux attributs de caractéristiques définies dans l'espace ;
- Rapports et archivage de cartes.

II. QUESTIONS AUXQUELLES UN SIG DOIT REPONDRE

Un SIG doit toujours être en mesure de répondre aux différentes questions et préoccupations que se pose l'utilisateur. Ces dernières peuvent être réparties en cinq grands types et qui sont [10], [11] :

Où ? : Répartition spatiale des objets (trouver les zones favorables à l'implantation de forages, de barrages, de postes pluviométriques, de postes de surveillance de la qualité des eaux superficielles ou souterraines...)

Quoi ? : Proximité, superposition, que trouve-t-on à cet endroit ? (Quel est le chemin le plus rapide ou aller à un endroit donné) ;

Comment ? : Relations qui existent entre les objets et analyse spatiale (comment évolue tel ou tel phénomène dans un bassin versant).

Quand ? : Analyse temporelle ;

Et Si ? : Scénario d'évolution, simulation, études d'impact.

III. LES INTERETS DES SIG

Les SIG sont utilisés par de nombreux usagers. Ils sont utilisés par les administrations, par les services techniques municipaux, les organismes responsables de la gestion de l'environnement, les sociétés pétrolières, les banques, les instituts d'enseignement et de la recherche, les entreprises de travaux publics, les entreprises de la gestion des ressources en eau...etc.

L'utilisation intensive des SIGs tient au fait qu'ils représentent beaucoup d'avantages en permettant [12] :

- D'établir des cartographies rapides ;
- De recevoir dans un même système des données issues de sources différentes et de les combiner entre elles ;
- De réagir rapidement après des évènements ou des catastrophes ayant un impact sur le territoire ;
- D'offrir un environnement de travail complet ;
- D'améliorer la précision et la vitesse d'exécution de certaines opérations réalisables manuellement (extraction de tous les objets situés à une distance donnée d'un barrage, d'un champ de captage...) ;
- Une mise à jour rapide, voire à temps réel ;
- Effectuer à faible coût certaines analyses difficiles, voire impossibles à réaliser manuellement (extraction des pentes, valeur d'ensoleillement...) ;

- De fusionner des objets ayant une caractéristique commune (toutes les maisons raccordées au réseau d'alimentation en eau potable ou d'assainissement; toutes les localités traversées par une route donnée...).

IV. 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 [5], [12] :

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 numériques graphiques indispensables à la réalisation de l'analyse et à la production des résultats intermédiaires ou finaux.

2. Base de données géographiques

Une base de données géographique est un ensemble de couches superposables (figure L 1).

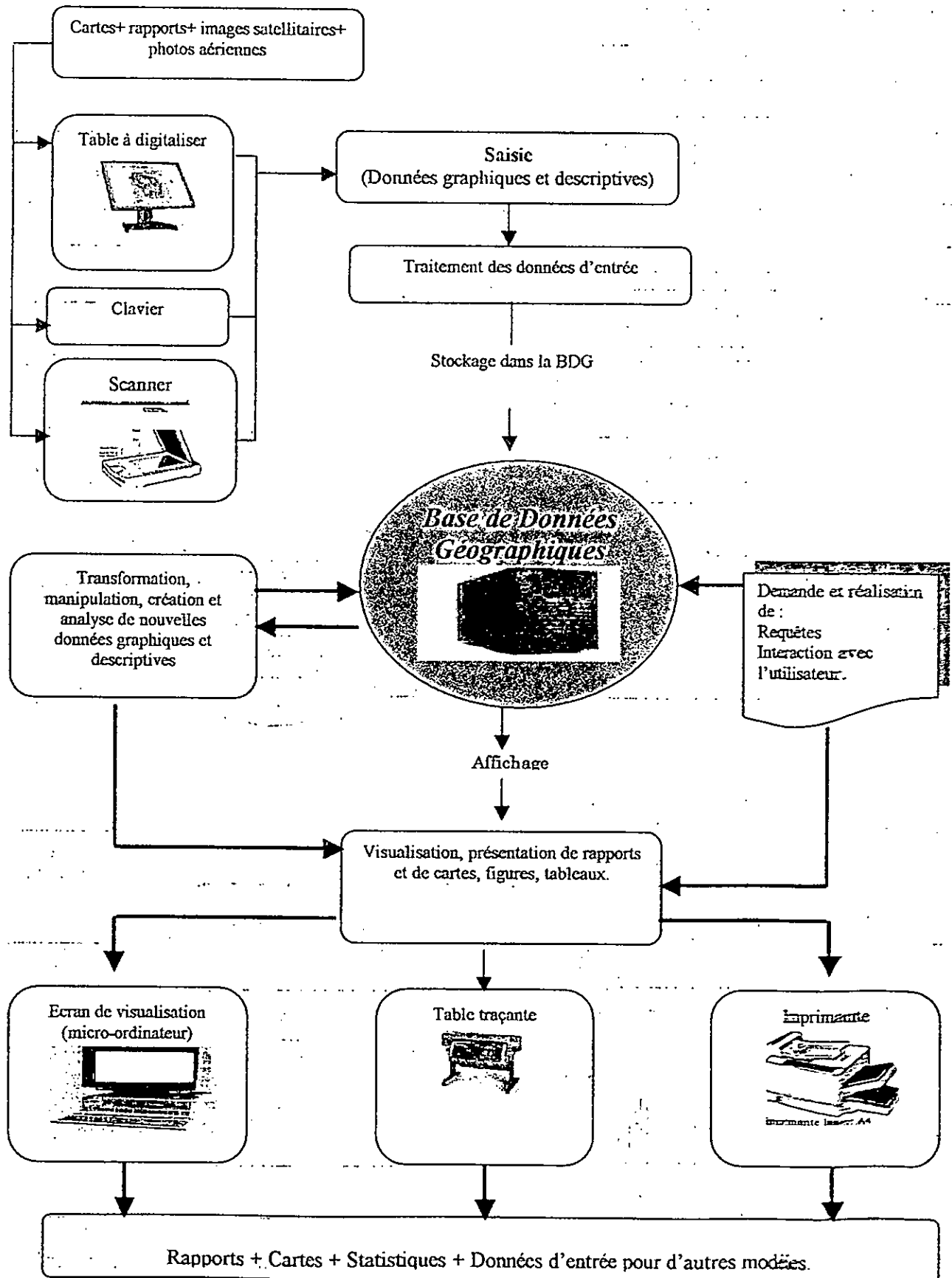


Figure I.1 : Base de données géographiques BDG

3. Interface utilisateur

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

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.

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 leurs travaux quotidiens. La claire identification des rôles de chacun des acteurs est souvent signe de bonne mise en œuvre d'un SIG.

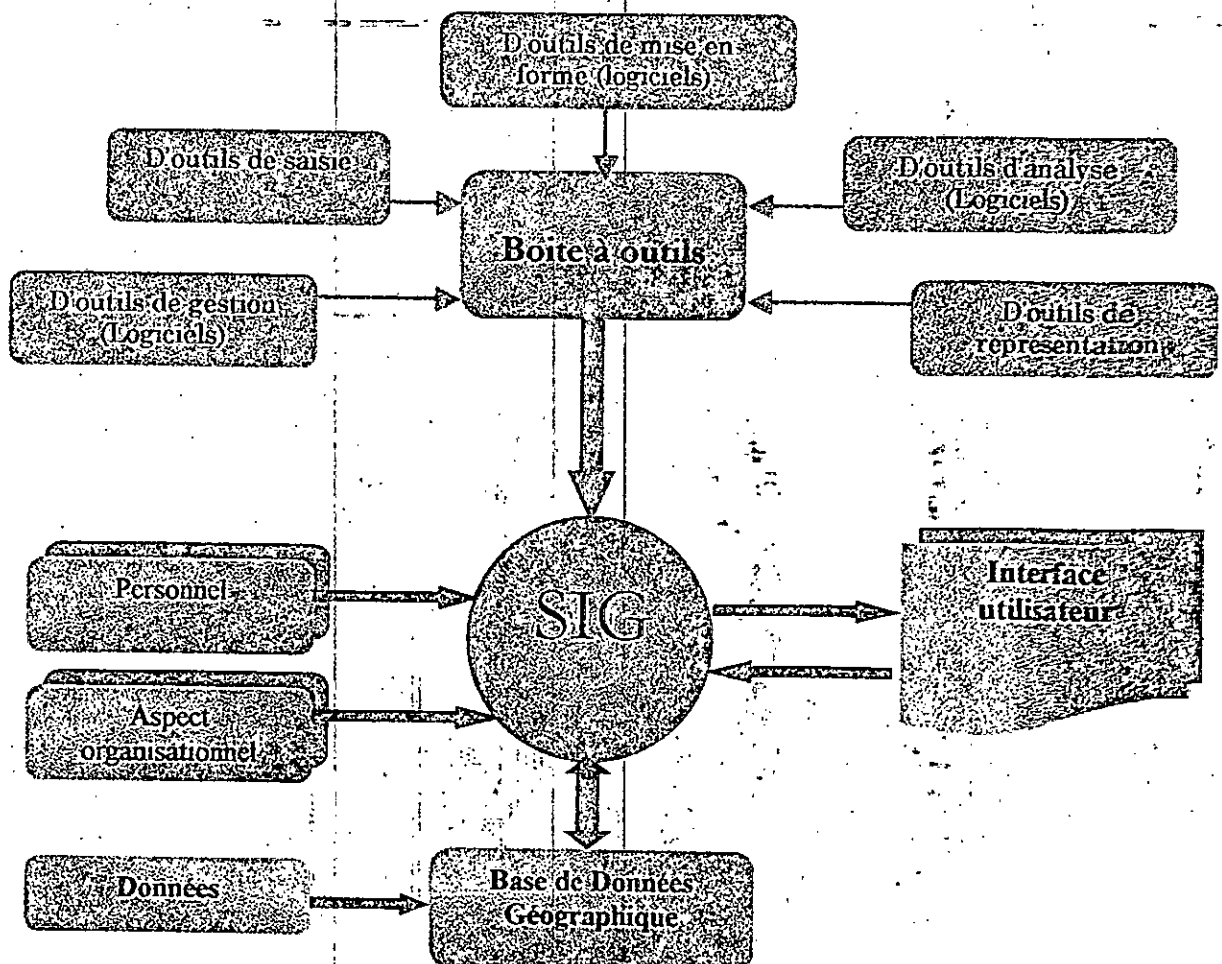


Figure I.2 : Les composantes d'un SIG

V. Les principales fonctions d'un SIG

Les fonctions d'un SIG peuvent être exprimées par la règle des 5 A [13].

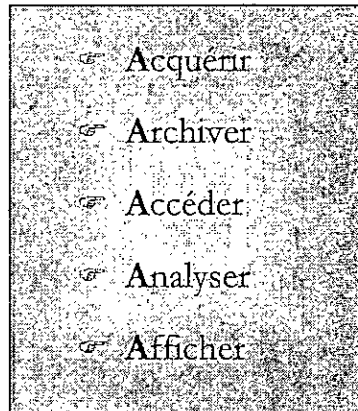


Figure I.3 : La règle des 5A.

1. Acquisition de l'information géographique

a. Entrée des données spatialement référencées

L'entrée des données (informations) afin de créer une base de données géographique peut être réalisée par plusieurs méthodes. Les plus courantes et les plus classiques utilisent les cartes existantes. Pour se faire, différents moyens sont utilisés pour numériser les papiers existants à savoir : La digitalisation et le scannage [12].

La digitalisation permet de récupérer des objets disposés sur un plan ou une carte préexistante. Elle consiste à faire évoluer un curseur sur un plan posé sur une table à digitaliser et préalablement calée en coordonnées [8]. La carte est réceptive aux signaux électriques émis par le curseur. Chaque objet ainsi digitalisé est introduit avec son code identifiant sa géométrie (point, ligne, surface fermée).

Le balayage électronique (réalisé à l'aide d'un scanner) est un autre procédé pour saisir une carte ou un plan existant. Il enregistre l'intensité de la réflexion d'un faisceau lumineux venant balayer ligne par ligne le document source. Chaque niveau d'intensité enregistré concerne une zone du document balayé et désigné par son numéro de ligne et son numéro de colonne. Le document est donc implicitement découpé par une trame.

Le scanner fournit comme résultat une trame dont la qualité dépend fortement de celle de l'originale.

b. Entrée des données descriptives

On a plusieurs types de données descriptives (sémantiques) [12] :

- Les attributs associés aux objets ;
- Les données textuelles ;
- Les données graphiques ;
- Les images, vidéo.

L'entrée de ces données peut se faire de plusieurs manières :

- Par saisie manuelle à l'aide du clavier ;
- Par récupération de fichiers de données créés par ailleurs ;

- De manière interactive: l'utilisateur choisit une entité spatiale et y affecte directement des attributs descriptifs.

c. Vérification et correction des erreurs

L'opération ayant pour but l'établissement d'un lien entre les données spatiales et descriptives est un moyen très efficace pour vérifier les erreurs.

- Les entités spatiales peuvent, lors de leurs acquisitions, être mal positionnées ou avoir une forme erronée.
- Un arc manquant ou un polygone mal fermé conduit à des résultats erronés.

d. Pré traitement des données spatiales

Avant qu'elles ne soient stockées dans la base de données (BD), et utilisées à des fins d'analyse, les informations doivent subir un certain nombre d'opérations de pré-traitement. Parmi ces opérations nous pouvons citer [14] :

- La création de la topologie ;
- La vectorisation et nettoyage des données scannées ;
- La conversion de structure de données : vecteur/raster ou raster/vecteur ;
- La conversion de format : d'un format d'échange au format propre du logiciel ;
- Les opérations géométriques : translation, rotation, changement d'échelle, changement de système de projection ;
- L'assemblage des zones adjacentes et ajustement des bords.

2. Stockage et Gestion des données

a. Stockage de données

Du fait de l'importance et de la multitude d'informations à stocker, les bases de données géographiques demandent d'importants espaces de stockage. Ces données sont habituellement stockées sur des bandes magnétiques et actuellement sur des disques laser.

Un SIG doit être en mesure de :

- Ne pas présenter des redondances de données ;
- Pouvoir accéder à des bases de données constituées ailleurs et indépendantes de ses bases de données ;
- Assurer la cohérence et l'intégrité des données ;
- Permettre la mise à jour rapide des données spatiales.

b. Mise à jour des données

Il y a très peu d'informations géographiques qui ne changent pas avec le temps, le besoin en informations actualisées se fait alors ressentir. De ce fait, les méthodes de représentation cartographiques statiques et les techniques de production respectives ne sont plus adéquates (cartes d'occupation du sol, cartes météorologiques, cartes de réseaux de mesures...). La mise à jour de cartes manuellement n'est pas possible. C'est pourquoi l'utilisation de photographies aériennes ou d'images satellitaires peut être une aide précieuse dans le maintien d'une base de données fiable et à jour [12].

c. Edition des données

Lorsque les données sont entachées d'erreurs, elles doivent être corrigées. Le recours à leur édition s'avère inévitable.

d. Extraction de données

L'extraction d'une information peut se faire de deux (02) manières par :

- Une consultation exhaustive (complète) des fichiers ;
- une formulation des requêtes ;

Dans un SIG, il existe deux types principaux de requêtes :

- une identification d'un objet dont on connaît la localisation et les caractéristiques ;
- Donner la liste des objets ayant certaines propriétés en visualisant leurs localisations.

3. Manipulation et analyse de données

a. Analyse statistique

Un bon système doit fournir des statistiques sur les données descriptives (moyenne, écart type, histogramme...). Il peut aussi mener des analyses très poussées (regressions, classifications, analyses en composantes principales...). Un SIG doit pouvoir être aisément interfaçable avec des logiciels de traitement statistiques (tableur, SPSS...).

b. Croisement de cartes

Cette opération consiste en la combinaison de deux ou plusieurs couches d'informations.

Le SIG stocke les informations sur le monde en une série de couches thématiques (ou couvertures). Cette approche est simple mais extrêmement puissante et universelle. Elle permet d'organiser la complexité du monde réel en une représentation simple pour faciliter la compréhension des relations entre les objets géographiques. Toutes les couches peuvent être alors considérées comme des variables géographiques.

Le monde réel est modélisé sous forme de couches d'informations séparées, relatives à différents thèmes (réseaux hydrographiques, réseaux hydrométriques, types de sols, végétation, réseaux routiers...). Ces couches pourront par la suite être re-combinées pour analyse ou superposées pour visualisation. Ce concept s'appuie sur une structure de bases de données relationnelles. La composition de plusieurs couches d'informations donne lieu à une carte et vis-versa.

Afin d'éviter de mélanger des objets de nature thématique différente, les entités d'un même thème sont regroupées à l'intérieur d'une même couche.

A titre d'exemple les couches peuvent être :

- ✓ Carte topographique ;
- ✓ Occupation du sol ;
- ✓ Relief ;
- ✓ Réseau routier ;
- ✓ Réseau piézométrique ;
- ✓ Réseau hydrométrique ;
- ✓ Réseau hydrographique ;
- ✓ Réseau pluviométrique ;
- ✓ Ouvrages hydrauliques

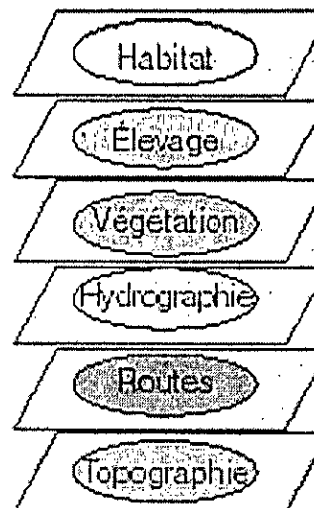


Figure I.4 : Les couches d'informations

c. Re-classification, recordage et agrégation

Le re-classification est l'affectation d'un nouvel attribut descriptif à un polygone, qui peut être déterminé à partir d'autres attributs de ce même polygone.

- **Extraction** : C'est la création d'une couverture ne contenant que les polygones répondant à un critère donné.
- **Agrégation** : Est la fusion des polygones ayant une propriété commune (la même valeur par exemple pour un attribut).
- **Elimination** : D'un polygone (ou des polygones) de petite(s) taille(s), dont la signification est jugée sans importance ou dont la présence est indésirable.
- **Mesure de l'espace**

Cette opération nous permet de réaliser les tâches suivantes :

- Le nombre de points, d'arcs et de polygones ;
- La distance entre deux points ;
- Le périmètre et la surface d'un polygone ;
- La recherche d'un chemin optimal.

4. Analyse de voisinage

- **Analyse de proximité**

Elle consiste à déterminer l'ensemble des points situés à une distance maximale d'une entité spatiale donnée.

- **Analyse de connectivité**

Elle consiste à déterminer les limites d'une région en cherchant à partir d'un point, dans toutes les directions, le point vérifiant une propriété particulière.

- **Recherche du chemin optimal**

L'analyse de chemin optimal vise à calculer le chemin le plus court entre deux points en terme de distance.

- **Interpolation**

Elle donne une estimation de la valeur d'une grandeur en un point où elle n'est pas connue (méthode de krigeage par exemple).

5. Restitution des données

La restitution est l'opération de présentation des résultats de l'extraction ou de l'analyse des données sous une forme conviviale et compréhensible par un utilisateur ou par un autre système informatique. Donc un produit SIG est capable de nous fournir :

- Des tableaux ;
- Des graphiques, des figures, des histogrammes ;
- Des cartes ;
- Des images (visualisations en 2D et 3D).

VI. MODE DE REPRESENTATION DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Les SIGs exploitent deux types de modèles géographiques [15] :

1. Le mode vecteur ;
2. Le mode raster.

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 [3] :

- 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 [3] :

- Sa structure complexe ;
- Ses fonctions d'analyse sont beaucoup plus complexes ;
- L'opération combinatoire longue et source d'erreurs ;

- Affichage et édition longs ;
- Technologie coûteuse ;
- Certaines données de variables continues (l'altitude, l'image satellite...) ne peuvent pas être représentées sans traitements préalables.

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) du pixel où '*il se trouve*'. A chaque nœud de la grille est attribué un code numérique identifiant l'objet cartographié. Pour localiser les zones et décrire leur géométrie, on utilise, en général, la définition suivante : « La géométrie d'une zone est l'ensemble des pixels dont l'intersection avec la zone est non nulle ».

Pour ce mode, nous pouvons énumérer un certain nombre d'avantages qui sont [3] :

- 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 [3] :

- 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).

VII. CARACTERISTIQUES DES SIG

Les caractéristiques dont jouit un SIG sont [13] :

- Ils sont dotés de fonctions de saisie, de stockage, de traitement et d'analyse ainsi que de restitution (diffusion) ;
- Ils ont la particularité, par rapport aux systèmes de gestion de bases de données (SGBD), de gérer des informations à références spatiales. Lesquelles sont associées à des objets ou à des phénomènes qui se caractérisent par :
 - Une position (adresse, coordonnées géographiques,...) ;
 - Une forme géométrique (point, polygone, poly line).
- Ils contiennent un SGBD à référence spatiale. Ainsi la gestion de la base de données à référence spatiale SGBS constitue la raison d'existence des SIGs ; Les données descriptives sont organisées dans une base de données selon divers types (hiérarchique, réseau, relationnel ou orienté objet). Quant aux données géométriques,

- elles sont organisées sous forme vectorielle ou en structure tessellation² régulière ou irrégulière.
- Ils ont un rôle d'intégrateur de données, plus particulièrement à ce qui a trait à leur capacité d'accepter des données de formats différents.

VIII. QUELQUES EXEMPLES DE SIG

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

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 à d'autres applications.

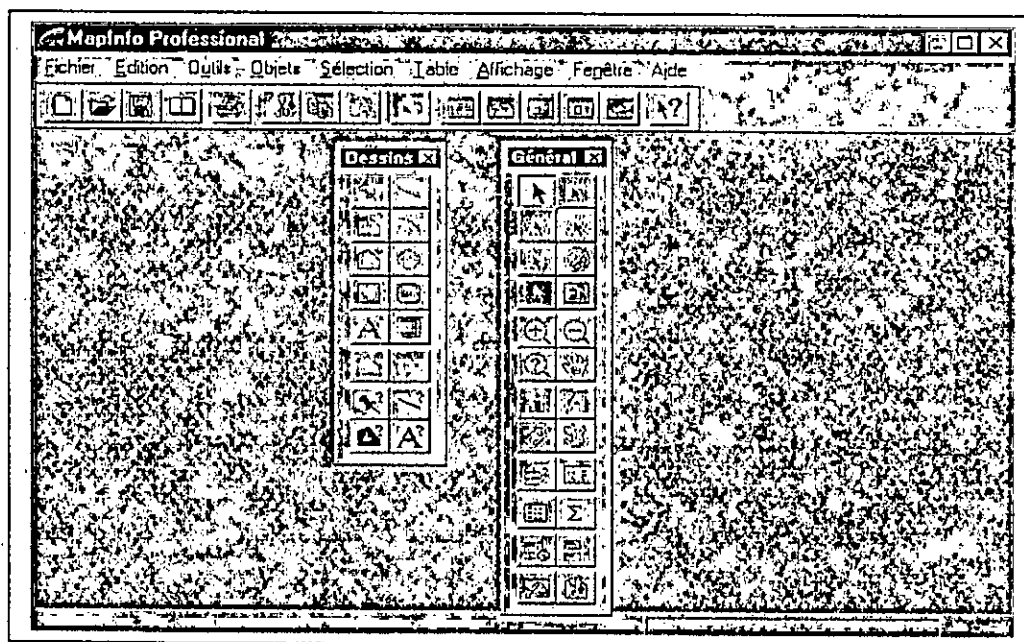


Figure I.5 : Fenêtre principale du logiciel MapInfo

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)*.

² : La subdivision de l'espace déterminé par un jeu de points distincts, tel que chaque point a une région associée à une région de l'espace plus proche de ce point que de n'importe quel autre point est appelé tessellation de Dirichlet.

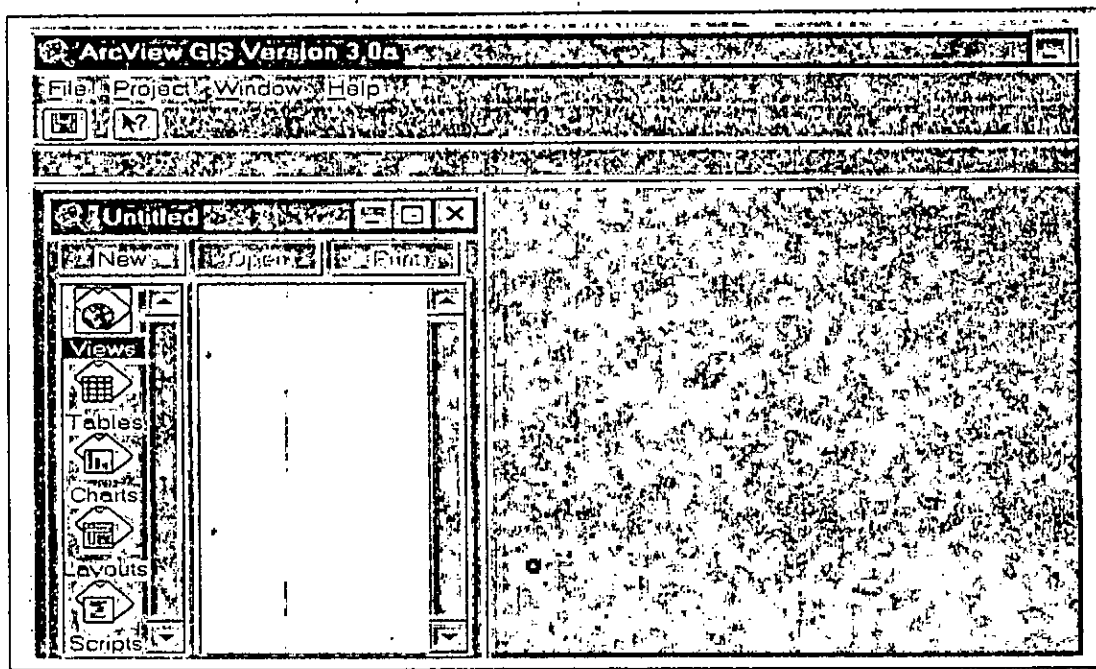


Figure I.6 : Fenêtre principale de ArcView

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.

2.1. Eléments composant Arcview

ArcView est un logiciel (SIG) qui nous permet de mener à bien des analyses spatiales approfondies. Il est caractérisé par sa souplesse et sa simplicité pour :

- Afficher,
- Interroger,
- Récapituler et organiser, géographiquement des données tabulaires.

Sa grande ouverture vers de multiples formats d'entrée et de sortie en fait un outil de choix pour étendre les SIGs auprès d'un large public. Arcview est utilisé dans de nombreux domaines : banque, urbanisme, assurance, télécommunication, environnement, hydraulique,...).

Les outils ou bien modules composant Arcview sont :

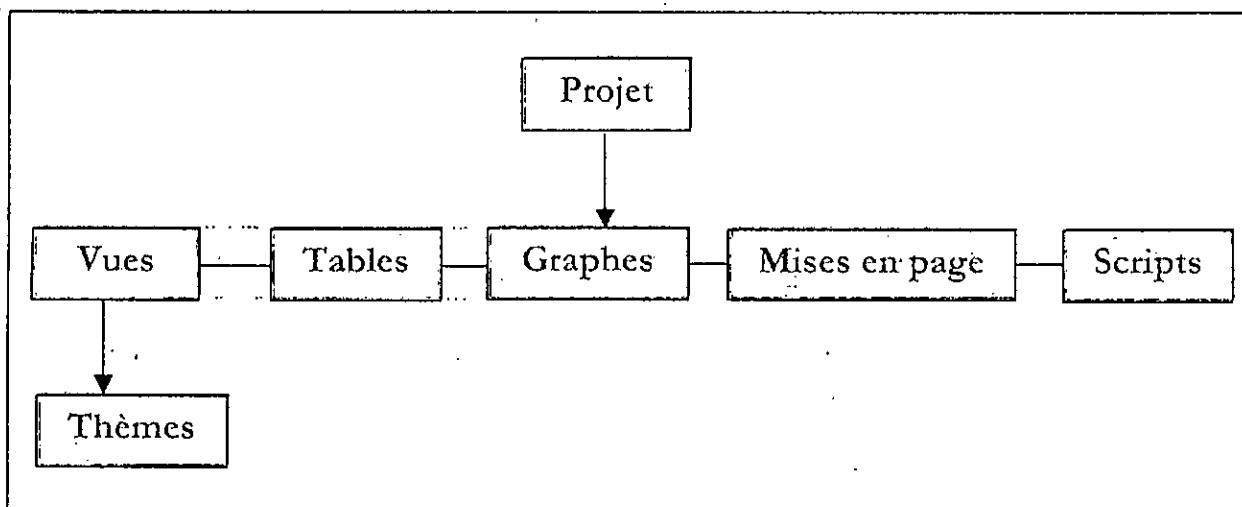


Figure I.7 : Structure hiérarchique de ArcView

a. Les vues (views)

La compréhension et la gestion, par l'utilisateur, des données géographiques affichées sur des cartes interactives nommées 'vues' sont rendues simples et faciles grâce à 'la table de matière Arcview' dont est dotée chaque vue.

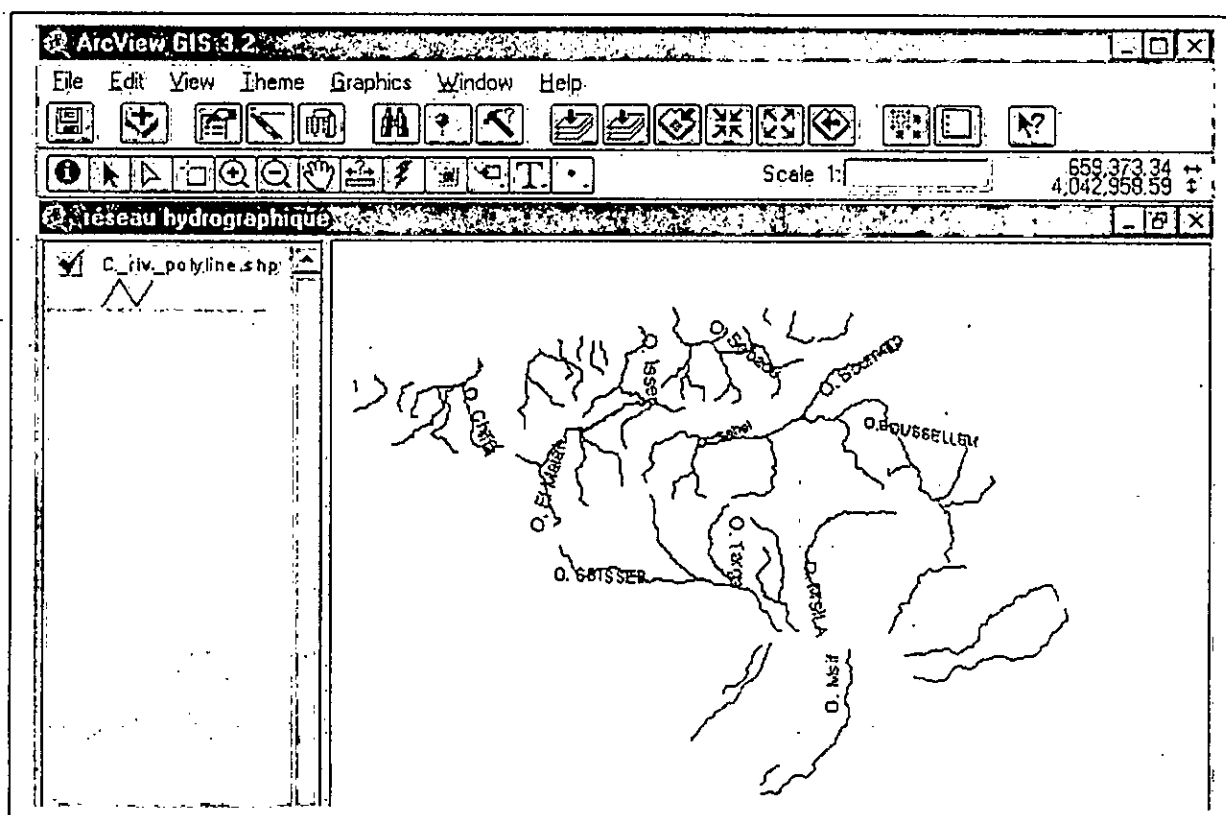


Figure I.8 : Fenêtre représentant une vue dans ArcView

Lorsque le nombre de données à traiter est important l'organisation de l'information géographique sous forme de couches est nécessaire voire même inévitable. Une carte est un ensemble de données géographiques formant un tout. Ces données couvrent un ou plusieurs domaines sur le même territoire et sont gérées, grâce à un système de gestion, ensembles. La décomposition d'une carte donne lieu à une ou plusieurs *couches* d'informations. Afin d'éviter le mélange des informations de nature thématiques différentes, les entités de même thème sont organisées dans une même couche appelée « couche thématique ». Dans la vue, on peut réaliser les opérations suivantes :

- ☞ Faire le zoom d'une région donnée sur la carte,
- ☞ Etiqueter la vue,
- ☞ Identifier simultanément les entités sur la carte par l'affichage des attributs de ces entités dans une boîte de dialogue.

b. Les tables (*tables*)

Une table est un fichier de données qui contient une série d'informations relatives à un point géographique de catégorie particulière. Avec ces données stockées dans les tables d'Arcview, l'utilisateur est véritablement aux commandes. En cliquant sur les entités dans une vue, les enregistrements correspondants sont mis en valeur systématiquement et affichant ainsi leurs attributs. En sélectionnant des enregistrements dans la table, les entités correspondantes sont mises automatiquement dans la vue. Les tables d'Arcview possèdent aussi une gamme complète d'entités permettant :

- ☞ D'obtenir des statistiques récapitulatives ;
- ☞ De trier et d'interroger.

c. Les graphes (*charts*)

Grâce à ses possibilités graphiques, Arcview offre à l'utilisateur l'avantage de visualiser des données diverses, intégrées dans l'environnement géographique. Les diagrammes fournissent des renseignements complémentaires sur les entités géographiques de la carte ou illustrer les mêmes données sous une autre forme. Pour ce faire, il suffit de cliquer sur des entités d'une vue pour les ajouter au diagramme. En outre, le logiciel permet, de travailler simultanément sur des représentations géographiques, tabulaires et en diagramme de données.

d. La Mise en page (*layouts*)

Les mises en page Arcview consistent à réaliser un certains nombre d'opérations (document avec titre, orientation, légende, rajouter des couleurs,...etc.), avant de lancer toute impression. Ces opérations permettent alors :

- ☞ De créer des cartes de qualité supérieure (cartes en couleur) ;
- ☞ Les cartes en liens directs avec les données qu'elles représentent ;
- ☞ De créer des documents précis : Les modifications apportées aux données sont automatiquement intégrées dans les cartes, et par conséquent un gain de temps considérable.

e. Les Scripts

Dans Arcview, les scripts sont des programmes (macros) écrits dans le langage de programmation *Avenue*. Ce dernier permet de personnaliser presque tous les aspects d'Arcview : de l'ajout d'un bouton pour exécuter un script (que l'on écrit) à la création de toute application que l'on peut distribuer.

f. Projet

Dès qu'on crée un projet, on peut le sauvegarder dans un fichier en rendant active la fenêtre projet et en choisissant l'option du menu **File / Save Project**.

2.2. Les fonctions d'Arcview

- Montre les couvertures dans une vue ;
- Visualise les tableaux d'attributs relatifs à cette vue ;
- Relie les tableaux d'attributs par un élément clé ;
- Réalise des graphiques pour obtenir des informations spatiales ;
- Crée des mises en page pour présenter les informations fournies par les vues, les graphiques et les tableaux.

2.3. Le langage de programmation Avenue

Avenue est un langage de programmation orienté objet intégré au SIG Arcview. Il représente l'environnement de développement pour Arcview [17]. Avec ce langage, on peut réaliser les différentes tâches suivantes :

- La modification des outils standards ;
- La création de nouveaux outils ;
- L'intégration de Arcview avec d'autres applications ;
- La personnalisation du travail effectué avec Arcview.

CONCLUSION

Les SIGs sont des outils très performants pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage des données. Néanmoins, ils présentent des avantages et des inconvénients.

Les avantages des SIG sont :

- Les données sont stockées sous forme informatique et de ce fait elles peuvent être extraites rapidement et à faible coût ;
- La mise à jour très rapide voire en temps réel ;
- Les tâches sont automatisées.

Les inconvénients des SIG sont :

- Le coût d'acquisition très élevé des données (sur le terrain) ;
- Difficulté d'acquisition des données sur le terrain ;
- Le coût d'acquisition du matériel et des logiciels de travail ;
- Le coût très élevé pour la mise en place sous forme informatique des données ;
- Il faut disposer de ressources financières conséquentes pour la formation du personnel ;
- Difficulté de manipulation des outils (difficulté et complexité de la gestion des données, informations hétérogènes, insuffisance de l'interface utilisateur des logiciels du marché) ;
- Difficulté d'intégration de données de diverses sources (télédétection) dans le SIG.

Les SIGs sont, donc très coûteux à mettre en œuvre et demandent de nombreux moyens financiers et humains. Il faut donc bien réfléchir sur le choix du SIG à adopter pour l'application choisie.

B. LES MNT - DEFINITIONS

INTRODUCTION

De nos jours, les techniques de cartographie sont rarement effectuées en considérant uniquement les questions planimétriques. Grâce à l'évolution des micro-ordinateurs et à leur capacité de traitement et de stockage, nous sommes à une époque du « *tout 3D* ». L'apport de la troisième dimension permettra d'apporter un peu plus de réalisme et de lisibilité pour un utilisateur non initié. La demande pour les modèles numériques d'altitudes s'accroît de manière spectaculaire avec l'utilisation des systèmes d'information géographiques (SIG) et avec l'amélioration de l'information extraite des données d'altitudes (cartographie des zones d'inondation, des zones forestières, de l'érosion, des failles,...). Les données d'altitudes sont aussi utilisées dans la production des cartes topographiques.

Le but principal de la modélisation du terrain est de représenter la surface naturelle de la terre de la manière la plus exacte et la plus précise.

I. DEFINITIONS

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), les modèles numériques 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 [18].

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 surface topographique [18].

II. ACQUISITION DES DONNEES

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 [19] :

- 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. SOURCES D'INFORMATIONS

1. Cartes topographiques

Les cartes topographiques représentent les documents de base pour l'établissement des MNT. La saisie des courbes de niveau qui sont des informations essentielles peut se faire de deux (02) manières différentes : la digitalisation et le scannage.

Le scannage est défini par le CNIG² comme étant « *la numérisation automatique par balayage d'un document graphique en un fichier informatique décrivant une matrice composée d'une trame de points d'intensités lumineuses et de couleurs différentes* ». Le fichier obtenu est un fichier Raster.

Après le scannage, on obtient une image constituée d'un seul bloc. Un point donné de cette image est appelé « *Pixel* ».

L'obtention des images raster de carte passe par les trois (03) étapes :

1. *Image cartographique numérique brute 'scannage brute'* : dans ce cas la carte n'a subi aucun traitement ;

2. *Image cartographique numérique rectifiée géométriquement* : l'image subit une rectification géométrique à partir d'un nombre de points limites de référence ;

3. *Image cartographique numérique géoréférencée* : A tout point on lui associe des coordonnées cartographiques rapportées à un système de projection connu.

Le pas de scannage est défini comme étant la taille du pixel de l'image. Ce pas est le même en ligne et en colonne.

Pour les images cartographiques numériques brutes le pas s'exprime :

- En millimètres
- En nombre de points par pouce
- En nombre de points par millimètres

Pour les images cartographiques géoréférencées à un système cartographique, on emploie particulièrement le terme Résolution. Cette dernière est alors exprimée en unité de terrain (le mètre).

2. Photographie aérienne

Selon Burrough [15], la photogrammétrie constitue la source principale et la plus précise pour la réalisation d'un MNT. Les développements récents de la photographie digitale font de cette technique un outil de plus en plus utilisé, notamment en géomorphologie fluviale [20].

L'information topographique est numérisée à partir des photographies aériennes en utilisant des Stéréoréstituteurs (appareils de restitution photogramétrique). Le relief est restitué sous la forme de courbes de niveau [15]. Ce procédé a l'inconvénient d'être très coûteux et très long.

² : Conseil National de l'Information Géographique (France)

3. Imagerie satellite

La réalisation automatique des MNT à partir de deux scènes du satellite SPOT³ formant un couple stéréoscopique est rendue possible grâce aux stéréoréstituteurs analytiques et moyennant quelques changements de logiciels pour l'adaptation à la géométrie des images de satellites.

IV. LES MODALITES DE CONSTRUCTION D'UN MNT

Le relief étant une surface continue, constitué d'une infinité de points. Pour le représenter de la façon la plus objective possible, on procède à un sondage de points en coordonnées (x, y, z) sur l'ensemble du territoire. Le modèle de la surface sera construit à partir de ces points suivant une triangulation respectant le critère de Delaunay (le cercle passant par les sommets de chaque triangle ne contient aucun autre point coté).

Les modèles numériques du terrain sont des jeux de données conçus pour décrire la forme du terrain en trois dimensions. Chaque point a des coordonnées X et Y et une altitude Z, et serviront de base aux applications informatiques correspondantes. Une surface de terrain peut être triangulée en trois phases :

- Projection des données sur le plan X, Y ;
- Application d'une triangulation à deux dimensions sur les points obtenus ;
- Réintroduction du paramètre d'altitude Z, afin de l'utiliser pour produire un T.I.N¹ qui représentera le terrain.

V. Les différents types de MNT

Il existe quatre (04) formes différentes représentations d'un modèle numérique de terrain qui sont [18] :

- 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).

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

Un M.N.T raster est une matrice d'altitude (figure I-9). 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 [21].

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

³ : SPOT : Le système SPOT est composé de plusieurs satellites en orbite et d'un ensemble performant d'équipements et de systèmes informatiques au sol

¹ : Triangulated Irregular Network.

6	9	9	11	12	12	12	12	9	6
9	15	16	18	21	21	19	20	15	8
10	18	22	25	26	26	25	25	20	11
11	19	27	29	30	31	29	28	23	14
11	20	28	33	35	34	34	31	25	13
12	22	29	34	37	37	35	32	24	13
12	22	29	33	35	36	34	29	24	14
9	17	25	29	34	34	32	28	23	13
7	13	18	22	27	27	26	23	18	11
5	8	10	14	15	16	14	12	11	6

Figure I.9 : Un MNT sous forme de grille régulière

a. A partir de courbes de niveau

La numérisation des courbes de niveau d'une carte standard (topographique) (qui sont d'ailleurs des approximations du terrain loin d'être exacte), 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...

b. 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.

c. A partir d'images numériques (satellites)

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 [18].

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.

2. MNT 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-10).

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) [21].

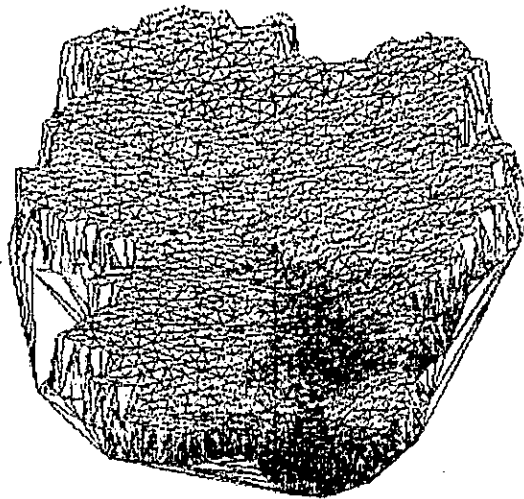


Figure I.10 : Un MNT sous forme de réseau de TINs

3. Contours

Les contours sont des polygones qui suivent la position d'une coordonnée Z donnée (figure I-11).

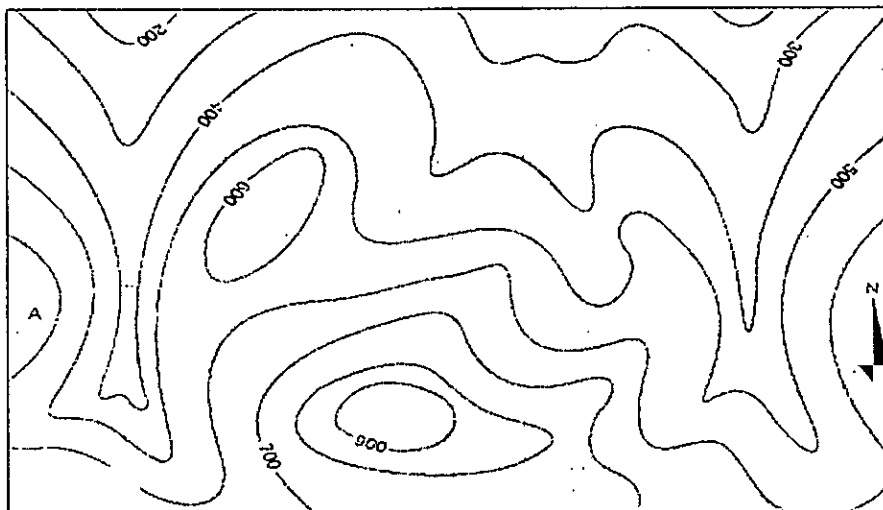


Figure I.11 : Surface représentée par des courbes isohypses (Courbes d'égales valeurs)

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 Grilles ne respecte pas.

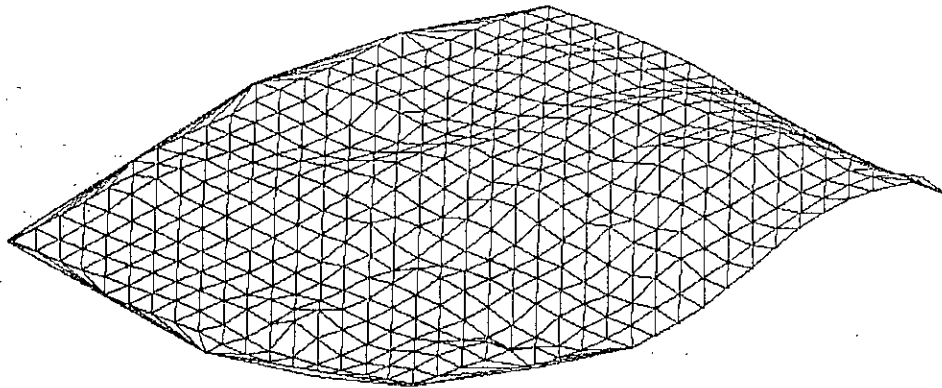


Figure I.12 : Surface représentée par une grille triangulée (Triangulated GRID)

VI. CHOIX DU MODELE NUMERIQUE 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.

Pour l'étude du relief sous forme numérique les MNT à grilles régulières sont les plus couramment utilisés [22].

VII. CHOIX ENTRE LE MODE RASTER / VECTEUR

L'utilisateur aura la possibilité de choisir entre le M.N.T RASTER ou M.N.T vecteur. Son choix dépend essentiellement des données dont il 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 [8].

VIII. PRODUCTION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

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

a. 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

b. 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. L'exemple d'un modèle

numérique construit avec des facettes triangulaires montre bien les deux cas de figure (Figure I.13).

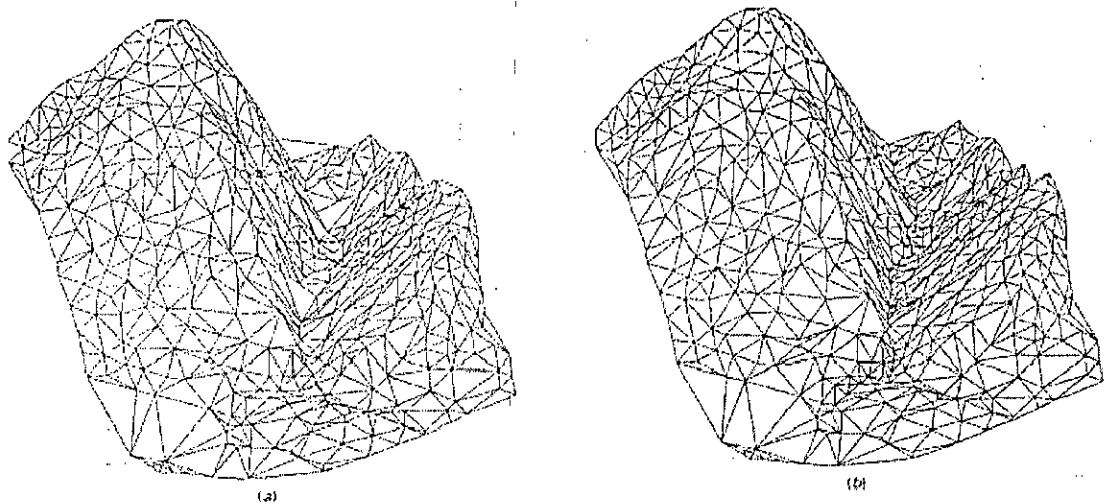


Figure I.13 : MNT TIN avec et sans les lignes de crêtes et les thalwegs.

IX. LES UTILISATIONS ET LES REPRESENTATIONS FREQUENTES DES MNTS

Les utilisations les plus fréquentes des MNT conduisent à [19] :

- ☞ 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.

L'extraction de bassins versants à partir d'un M.N.T dépend de plusieurs paramètres [23]. Parmi ces paramètres nous citons :

- La méthode utilisée pour l'extraction du réseau de drainage ;
- La précision des données spatiales utilisées.

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 [15] :

• Informations dérivées cartographiques

- a. Pentes et orientations : Dérivées à partir du fichier d'altitude ;
- b. Extraction de points singuliers : Il est souvent utile d'extraire les points singuliers d'un M.N.T. ceux ci peuvent être des cuvettes, des pitons¹, des lignes de crête ou de drainage ;
- c. Cuvette : Si la valeur du point central est égale au minimum et que cette valeur est unique alors ce point central est bien une cuvette ;

¹ : Pointe d'une montagne élevée

d. **Piton** : Si la valeur du point central est égale au maximum et que cette valeur est unique alors ce point central est bien un piton ;

e. **Cartes d'ensoleillement** ;

f. **Zones hypsométriques** ;

g. **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 complexes : exemple : vue en perspective.

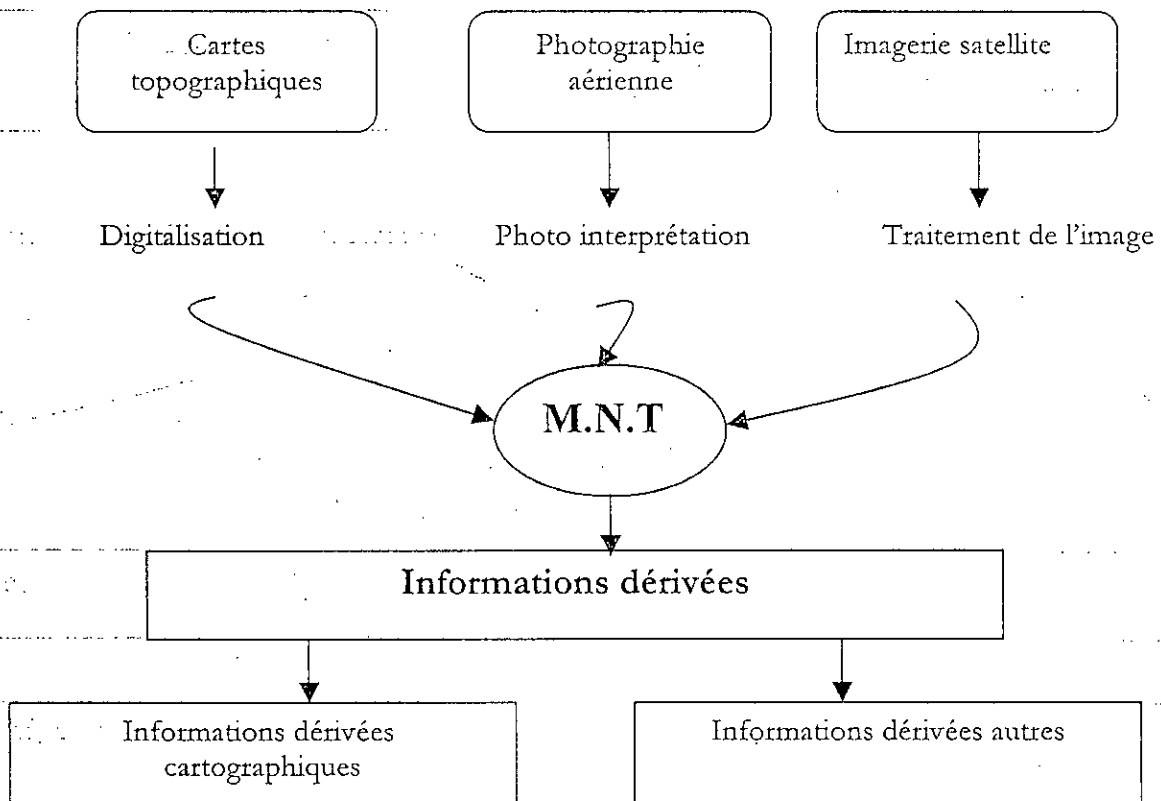


Figure I.14 : Sources d'informations d'un M.N.T.

X. Précision D'UN M.N.T

La précision du modèle numérique de terrain, qui est impossible d'ailleurs à formaliser, est globalement évaluée en fonction de plusieurs paramètres en particulier [20] :

- L'échelle de la carte topographique (courbes de niveaux) utilisée;
- Equidistance des courbes de niveau ;
- L'échelle de la résolution des images (ou photographies) utilisés ;
- 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).

Chapitre II :

Elaboration du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) de la zone d'étude.

CHAPITRE II : ELABORATION DU MODELE NUMERIQUE D'ALTITUDE (MNA) DE LA ZONE D'ETUDE.

INTRODUCTION

La simulation numérique des écoulements à surface libre nécessite la préparation de deux types de données :

- Les données hydrauliques qui sont particulièrement liées aux apports de l'oued et niveaux d'eau enregistrés sur le cours d'eau ;
- Les données topographiques : ces données nous proviennent des cartes topographiques et des levés de terrain (profils en long et en travers du cours d'eau, quelques points cotés, quelques repères géodésiques,...).

Les données topographiques qui ont trait au relief nous permettent de décrire de manière fidèle le domaine géométrique dans lequel s'effectue l'écoulement (plaine d'inondation, oued, canal artificiel, estuaires,...).

La description du domaine géométrique est rendue possible grâce à un fichier altimétrique appelé modèle numérique d'altitudes.

Le problème abordé dans ce chapitre est celui de la génération d'un modèle numérique d'altitude (MNA) à partir des courbes de niveaux numérisées. Le type de MNA auquel nous nous intéressons est la représentation continue de la surface du terrain sous forme de grille régulière à maille carré. Dans ce travail on aborde la construction du MNA « à moyenne échelle », c'est à dire dont les niveaux de détail et la précision sont ceux de la carte 1/25000 [22].

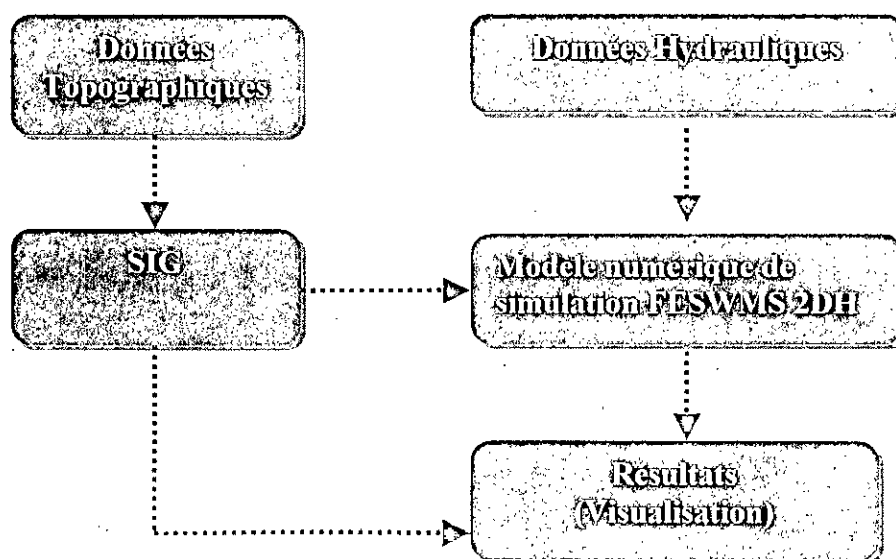


Figure II.1 : Diagramme schématisé de l'approche de la modélisation Hydrodynamique

I. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

La basse Soummam appartenant au sous bassin numéro 10 sur le répertoire de l'Agence Nationale Des Ressources Hydrauliques (ANRH), est une partie intégrante du bassin hydrologique de la Soummam situé à la limite entre le massif du Djurdjura au Nord et les monts des Bibans et des Babors au Sud.

La basse Soummam appartient à la wilaya de Bejaia, et s'étend de Sidi Aich jusqu'à la mer sur une distance de 45 Km et couvrant une superficie de 808 km².

Le bassin versant de la basse Soummam est limité :

Au **Nord** : par les monts de Taourirth Ighil, les crêtes du Djebel Aghbalou et du Djebel de Gouraya. Au **Sud** : par les chaînes des Bibans et des Babors. A l'**Ouest** : par le seuil de Sidi Aich. A l'**Est** : par la mer Méditerranée (golf de Bejaia) [24]

Le bassin de la basse Soummam est traversé d'Ouest en Est par l'Oued Soummam, formé par la confluence des oueds Sahel et Bouselam, décrit une série de méandres d'autant plus accentuées que l'on se rapproche de l'exutoire.

Le fond de vallée proprement dit à une largeur moyenne de l'ordre de 2 Km, avec des resserrements jusqu'à 100m de largeur comme c'est le cas à l'amont de la gorge de Sidi Aich et des élargissements jusqu'à 4 ou 5Km comme dans la région d'El Kseur ou la plaine de Bejaia à l'embouchure [25].

Les principales villes de cette région sont : Sidi Aich, Timezrit, Il Maten, El Kseur, Amizour, Oued Ghir et Bejaia.

II. ASPECT SOCIO- ECONOMIQUE DE LA REGION

La vallée de la basse Soummam joue un rôle essentiel dans le développement de l'économie régionale et nationale [25], [26] :

- Dans le domaine agricole, elle représente un potentiel important de terres irrigables économiquement. Ces terres sont situées en bordures immédiates de l'Oued Soummam les principales spéculations agricoles sont: les agrumes, les oliviers, les vignes, les arbres fruitiers, et les cultures maraîchères.
- La région abrite un certain nombre de villes et de villages qui attirent et sédentarisent de plus en plus la population montagnarde de la région.
- Dans le domaine des communications, elle représente un axe très important et vital, à la fois régional et national sur la plan routier (RN12, RN24, RN26), ferroviaire (voie de chemin de fer Bejaia -Alger), portuaire (port de Bejaia) et aérien (aéroport de Bejaia).
- Elle est empruntée sur toute sa longueur par l'Oléoduc Hassi Messaoud /Bejaia qui assure l'évacuation jusqu'au port de Bejaia d'une partie de pétrole extrait au Sud.
- L'industrie quant à elle occupe une place importante dans la région.

III. ASPECT GEOMORPHOLOGIQUE

La géomorphologie est l'étude des formes du relief terrestre. Elle permet de décrire et d'expliquer les différentes caractéristiques physiques d'un bassin versant, lesquelles jouent un rôle essentiel dans l'étude des différents termes constituant le bilan hydrologique (ruissellement, infiltration, évapotranspiration...). Parmi les caractéristiques d'un bassin on trouve :

1. Caractéristiques géométriques

a. La superficie

L'aire est la portion du plan délimitée par la ligne de crête ou contour du bassin. Sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre; soit par la méthode des *petits carrés*. Elle est généralement exprimée en (Km²) et peut être déterminée avec une précision acceptable, excepté en zone très plate. Dans ce cas, la délimitation de la ligne de partage des eaux est parfois très imprécise et seule une bonne connaissance du terrain peut permettre de lever certaines incertitudes.

La superficie du bassin versant de la basse Soummam est de l'ordre de 808Km² dont 77Km² sont occupés par la plaine alluviale [27].

b. Le périmètre

Le périmètre est la longueur, généralement exprimée en Km, de la ligne de contour du bassin; Sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre.

Le périmètre du bassin de la basse Soummam est de l'ordre 169Km.

c. Paramètre de forme

La forme d'un bassin a une influence sur la réaction du bassin versant à une averse donnée. En effet, le temps de concentration des eaux pour un bassin de forme allongée est plus long que pour un bassin de forme ramassée.

- Coefficient de compacité (Indice de Gravelius)

Appelé également coefficient de forme, il correspond au rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même superficie. Il nous donne une idée sur la forme du bassin (allongé ou ramassé).

$$I_{\text{comp}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (\text{II-1})$$

avec, P : est le périmètre du bassin, en Km;

S : est la superficie du bassin, en km².

L'indice de compacité du bassin de la basse Soummam est égal à 1.66, ce qui traduit bien le caractère allongé du bassin versant de la Soummam.

- Rectangle équivalent

La notion du rectangle équivalent permet de ramener la forme quelconque d'un bassin versant à une forme rectangulaire ayant la même superficie, le même périmètre et le même indice de compacité. Cette notion a été introduite pour pouvoir comparer des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

Ses dimensions sont données par les expressions suivantes :

$$L = S^{1/2} * \left(\frac{I_{\text{comp}}}{1.128} \right) \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{I_{\text{comp}}} \right)^2} \right] \quad (\text{II-2})$$

$$l = S^{1/2} * \left(\frac{I_{\text{comp}}}{1.128} \right) \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{I_{\text{comp}}} \right)^2} \right] \quad (\text{II-3})$$

L : est exprimée en Km; I_{comp} est l'indice de compacité, sans dimension;

S : est la superficie du bassin versant, exprimée en km².

Pour le bassin versant de la basse Soummam, on a : $L = 72.5 \text{ Km}$ et $l = 11.1 \text{ Km}$.

La longueur du bassin est approximativement égale à 6 fois sa largeur. Ceci influencera le temps de concentration du bassin versant en l'augmentant.

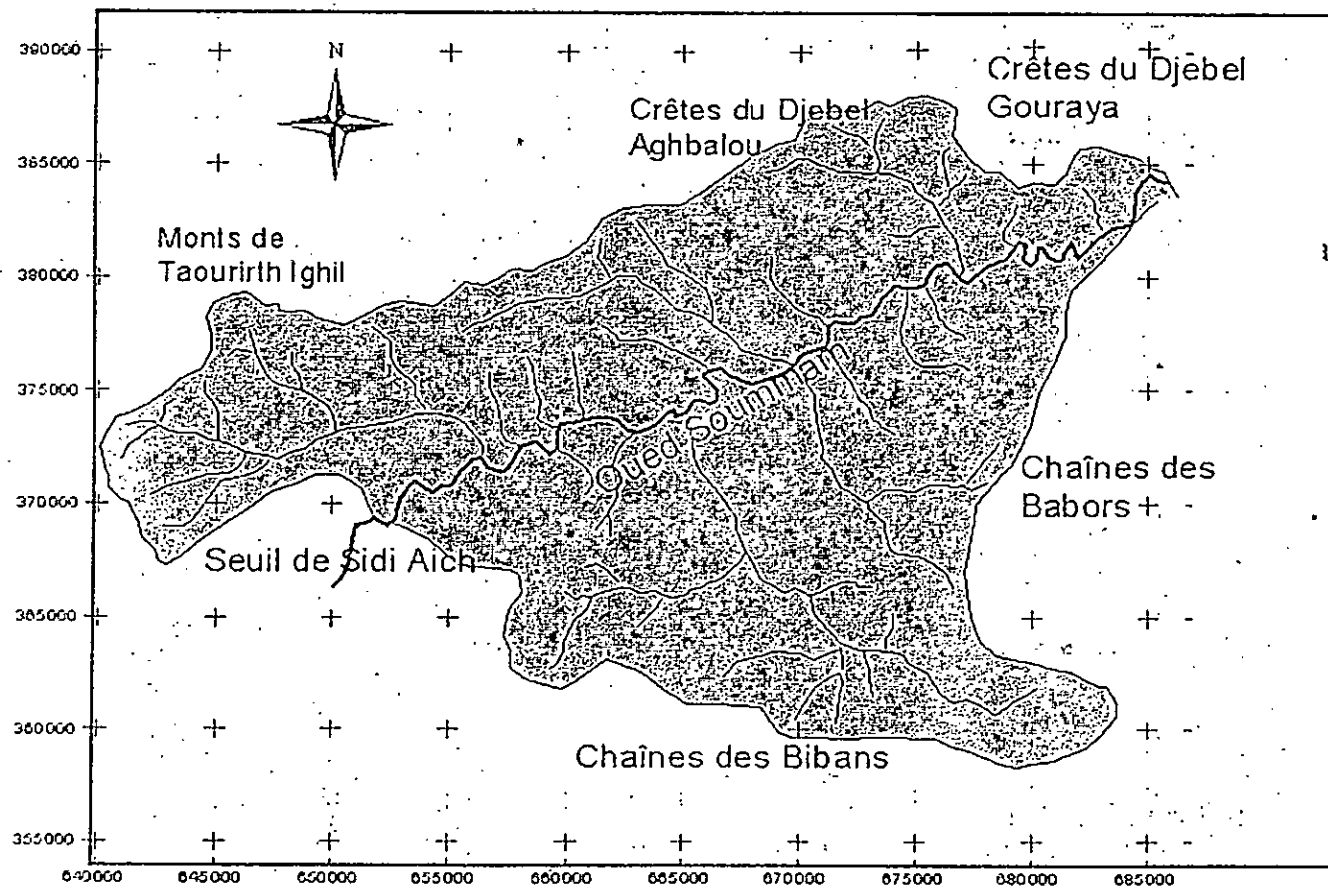


Figure II.2: Situation géographique du bassin versant de la Basse Soummam

2. Relief

a. Courbe hypsométrique

Cette courbe met en relation les altitudes et les surfaces dans le bassin versant sous forme de fréquences des superficies inférieures à un seuil donné [28], [29].

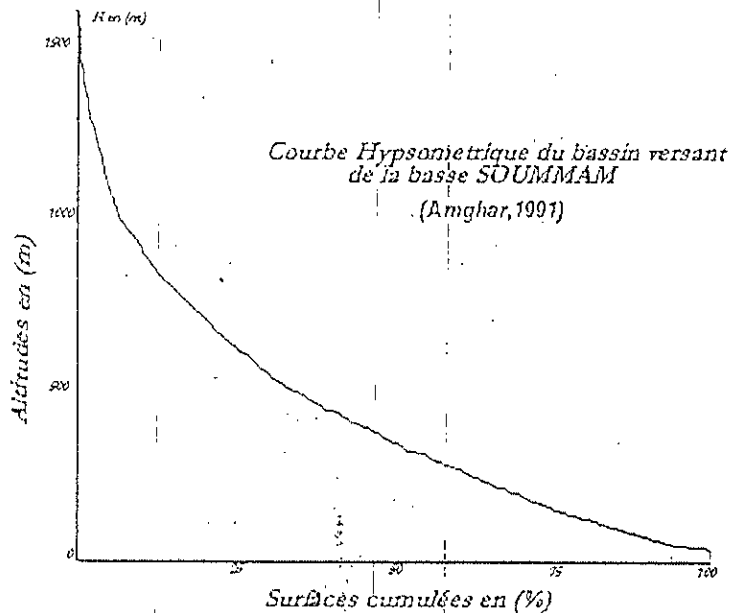


Figure II.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant de la Basse SOUMMAM

b. Indice global de pente

Cet indice caractérise le relief d'un bassin. Il est défini par la formule :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad \text{ou bien} \quad I_g = \frac{(I_{5\%} - I_{95\%})}{L} \quad (\text{II-4})$$

D : représente la dénivelée (en mètres), séparant les altitudes ayant approximativement 5% et 95% de la surface du bassin au-dessus d'elles. Ces altitudes sont déterminées à partir de la courbe hypsométrique; L : est la longueur du rectangle équivalent, exprimée en Km; I_g : est exprimé en m/Km.

$$H_{5\%} = 1075\text{m}, \quad H_{95\%} = 50\text{m} \quad \text{et} \quad L = 72.5\text{Km}.$$

L'indice de pente serait égal à 1.4%.

La valeur de l'indice de pente trouvé ci-dessus traduit la bonne aptitude du bassin versant au ruissellement.

c. Pente moyenne

Elle est très utile dans la mesure où elle nous renseigne sur la topographie et nous permet de comprendre le comportement hydrologique du bassin versant. La pente moyenne du bassin est estimée à 1.5m/Km.

d. Altitudes caractéristiques

De la courbe hypsométrique nous pouvons obtenir les différentes altitudes caractéristiques à savoir :

- **Altitudes maximale et minimale** : Elles représentent respectivement le point le plus élevé et le point le plus bas du bassin versant qui est généralement l'exutoire. Elles sont très utiles particulièrement lors de développement de relations faisant intervenir les variables climatologiques.
- **Altitude moyenne** : Elle est lue directement à partir de la courbe hypsométrique. L'altitude moyenne du bassin de la basse Soummam est de l'ordre de 430.7m.
- **Altitude médiane** : Elle correspond à l'altitude lue au point 50% de la surface totale du bassin versant sur la courbe hypsométrique. Elle est proche de l'altitude moyenne si la courbe présente une pente régulière. Elle est estimée à 330m.

Nous constatons que la valeur de l'altitude moyenne est nettement supérieure à l'altitude de fréquence $\frac{1}{2}$, ce qui traduit bien la dissymétrie du bassin. En effet, 70 % du bassin présente une altitude inférieure à 200m alors que 10 % a une altitude supérieure à 800m.

e. Dénivelée spécifique

La dénivelée spécifique est le produit de l'indice de pente global I_g par la racine carrée de la superficie du bassin (S) :

$$D_S = I_g \sqrt{S} \quad (\text{II-5})$$

On peut distinguer différentes classes de relief en fonction de D_S :

- Relief faible $D_S < 50$ m,
- Relief modéré $50 \text{ m} < D_S < 100$ m,
- Relief fort $100 \text{ m} < D_S$.

Pour le bassin de notre étude, nous avons D_S est égale à 203m. Nous concluons que le bassin de la basse Soummam possède un relief fort.

3. Caractéristiques du réseau hydrographique

L'appartenance du bassin versant de la basse SOUMMAM au bassin versant de la SOUMMAM (BV15) lui confère un réseau hydrographique riche et diversifié où les eaux superficielles sont drainées par les différents affluents situés sur les rives gauches et droites de l'oued principal. Parmi ces affluents nous pouvons citer : Oued Remilla, Oued Amizour, Oued Ghir, Oued El Kseur [30].

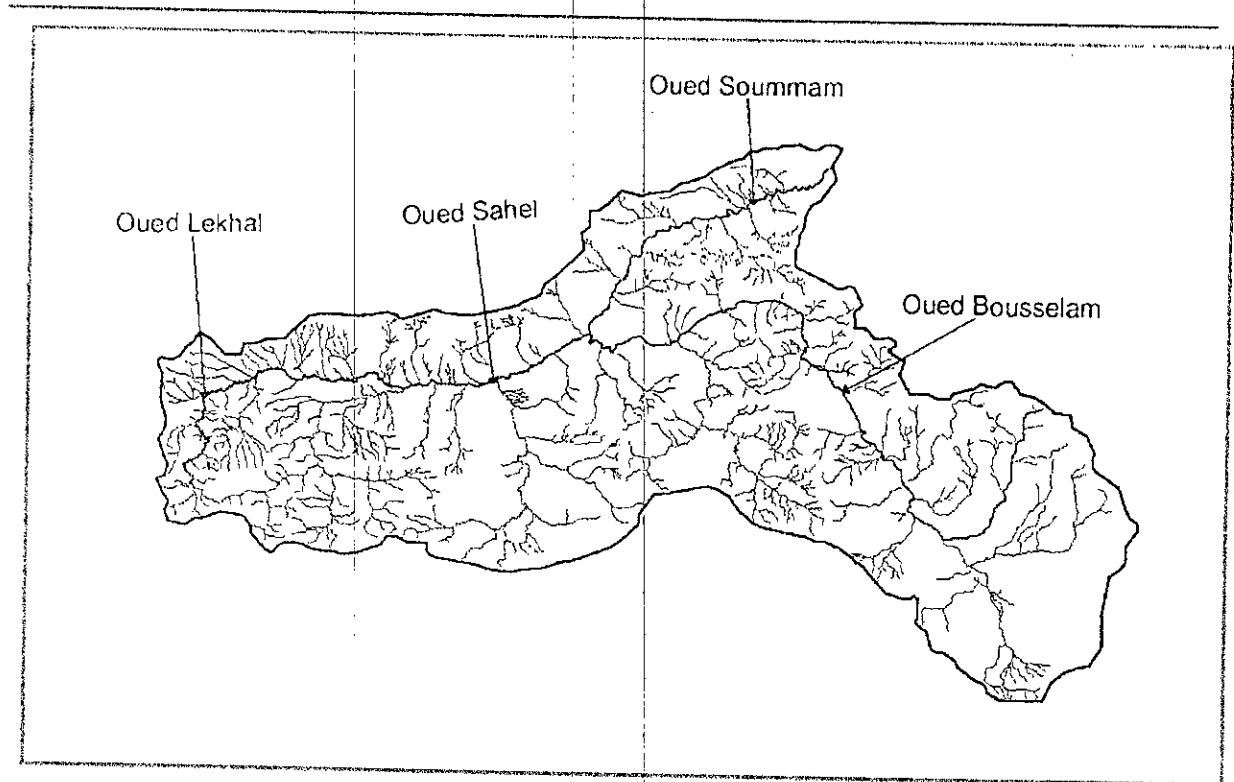


Figure II.4 : Le réseau hydrographique du bassin versant de la SOUMMAM
(Source : ABH AHS)

Le profil en long du cours d'eau représente la variation altimétrique du fond du cours d'eau en fonction de la distance à l'émissaire. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire, donc le temps de concentration. Cette variable influence le débit Maximum observé du cours d'eau. Une pente douce donne à l'eau le temps de s'infiltrer. La pente moyenne du cours d'eau est donnée par la formule suivante :

$$I_{c.moyenne} = \frac{\Delta h_{max}}{L} \tag{II-6}$$

avec,

Δh_{max} : dénivellation Max du cours d'eau en [m]

L : longueur du cours d'eau principal en [m], L= 46.7Km.

$$I_{c.moyenne} = \frac{\Delta h_{max}}{L} = \frac{H_{S/Aich} - H_{Bejaia}}{L} = \frac{90.5 - 0}{46.7 * 10^3} \quad \text{ce qui donne} \quad I_{c.moyenne} = 1.9m / Km$$

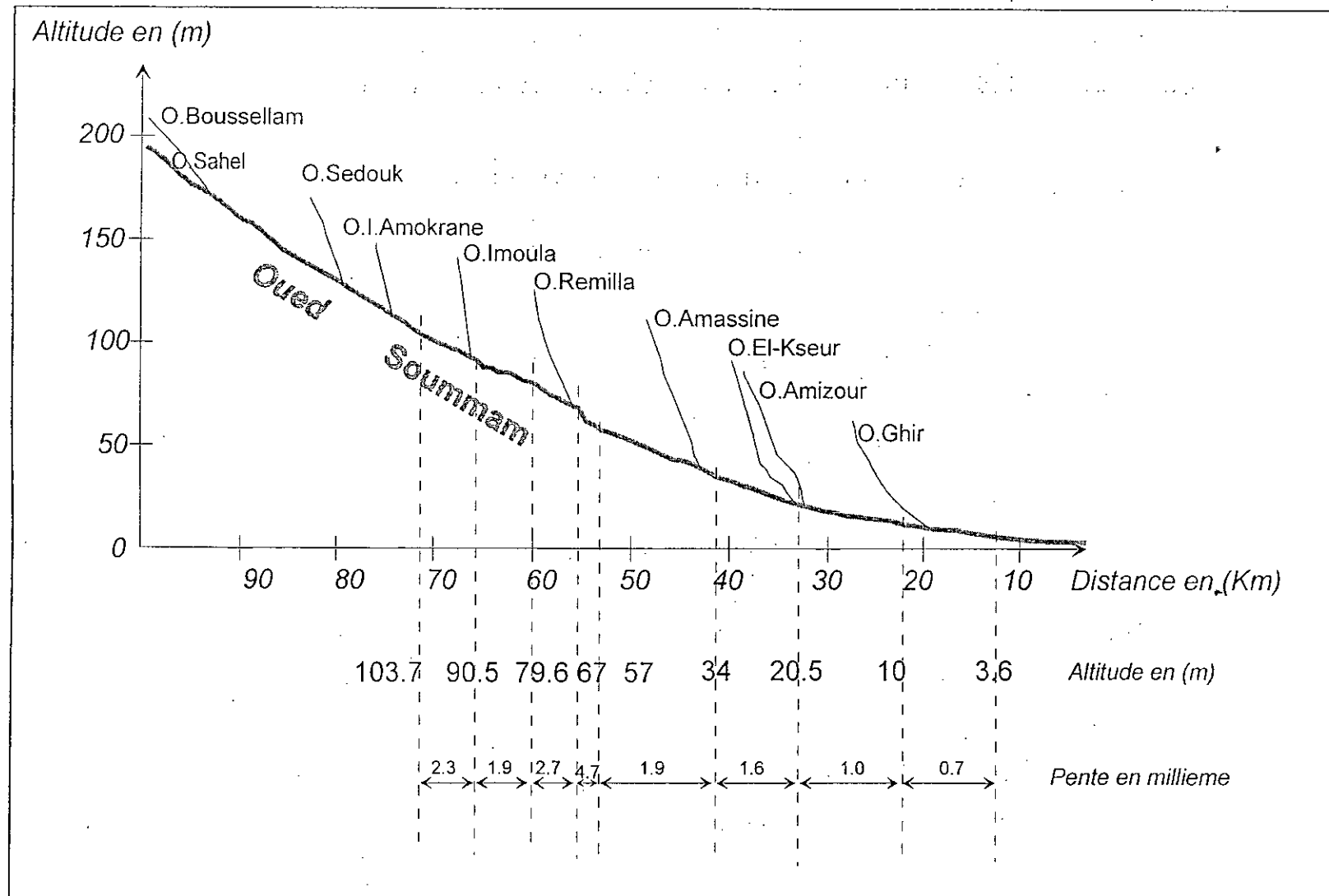


Figure II.5 : Profil en long de l'Oued Soummam

IV. STRATEGIE ADOPTÉE POUR LA RÉALISATION DU MNA

Le diagramme suivant (figure II.6) résume les différentes tâches suivies pour l'établissement d'un MNA :

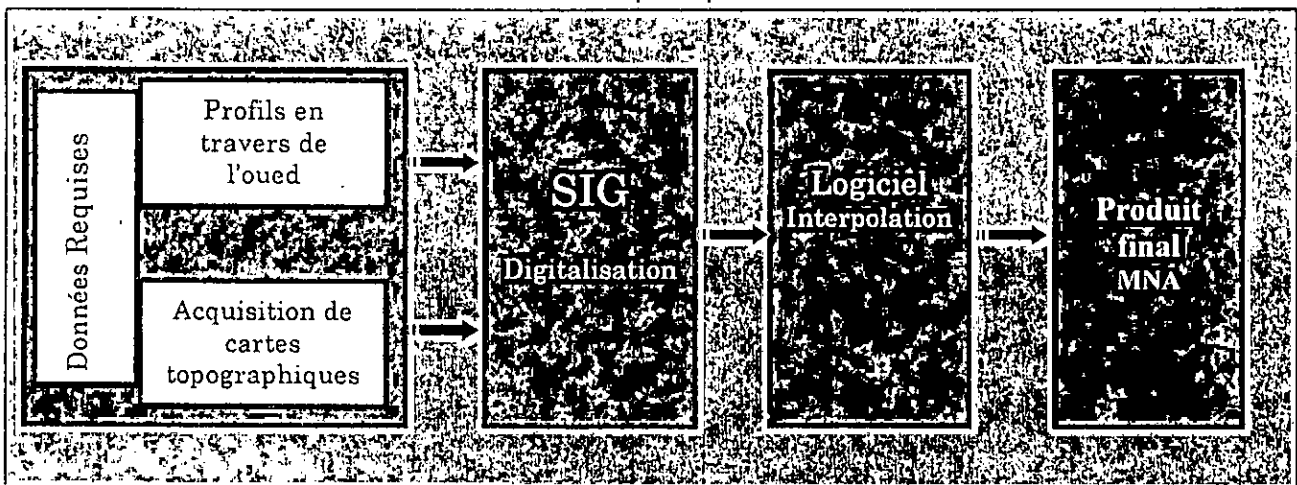


Figure II.6 : Différentes étapes pour la réalisation d'un MNA

1. Données requises

Dans le cas des simulations numériques en hydraulique, les levés de terrain indispensables sont : les berges et les profils en travers des cours d'eau. Pour les oueds de débit modeste, et en situation d'étiage, il est possible de procéder à des levés bathymétriques¹. Toutefois, la densité des profils bathymétriques est nécessairement plus importante car nous sommes obligés de tenir compte d'une incertitude sur la variation de la forme du lit puisqu'il n'est pas visible. Une bonne description du lit mineur est importante car même en situation de crue, ce lit assure en général l'essentiel de l'évacuation du volume. Lors de l'étude des débordements, le lit majeur doit être décrit par une information sur l'altimétrie des zones présentant des variations brusques du relief. Toute imprécision dans la description du lit actif de l'oued (lit mineur+lit majeur) se reporte sur les paramètres de calage, avec les conséquences que cela peut engendrer.

a. Les profils en travers de l'Oued

Les données des profils en travers utilisées dans cette présente étude ont été collectées auprès de la DHW² de Bejaia. En raison de leur insuffisance (en terme de densité) nous avons été amenés à générer de *nouveaux points* tout le long de l'axe de l'oued et au niveau de chaque profil en travers afin de reproduire de manière fidèle *la sinuosité* de l'oued et la topographie de la plaine qui est susceptible d'être inondée. Cette tâche a été effectuée en tenant compte des points des profils en travers déjà existants et en s'appuyant sur les données des cartes topographiques de la zone d'étude.

¹ : La bathymétrie englobe les travaux de relevés des fonds de mers, lacs et cours d'eau. Elle se distingue de la topographie par le domaine accessible submergé.

² : Direction d'Hydraulique de Wilaya

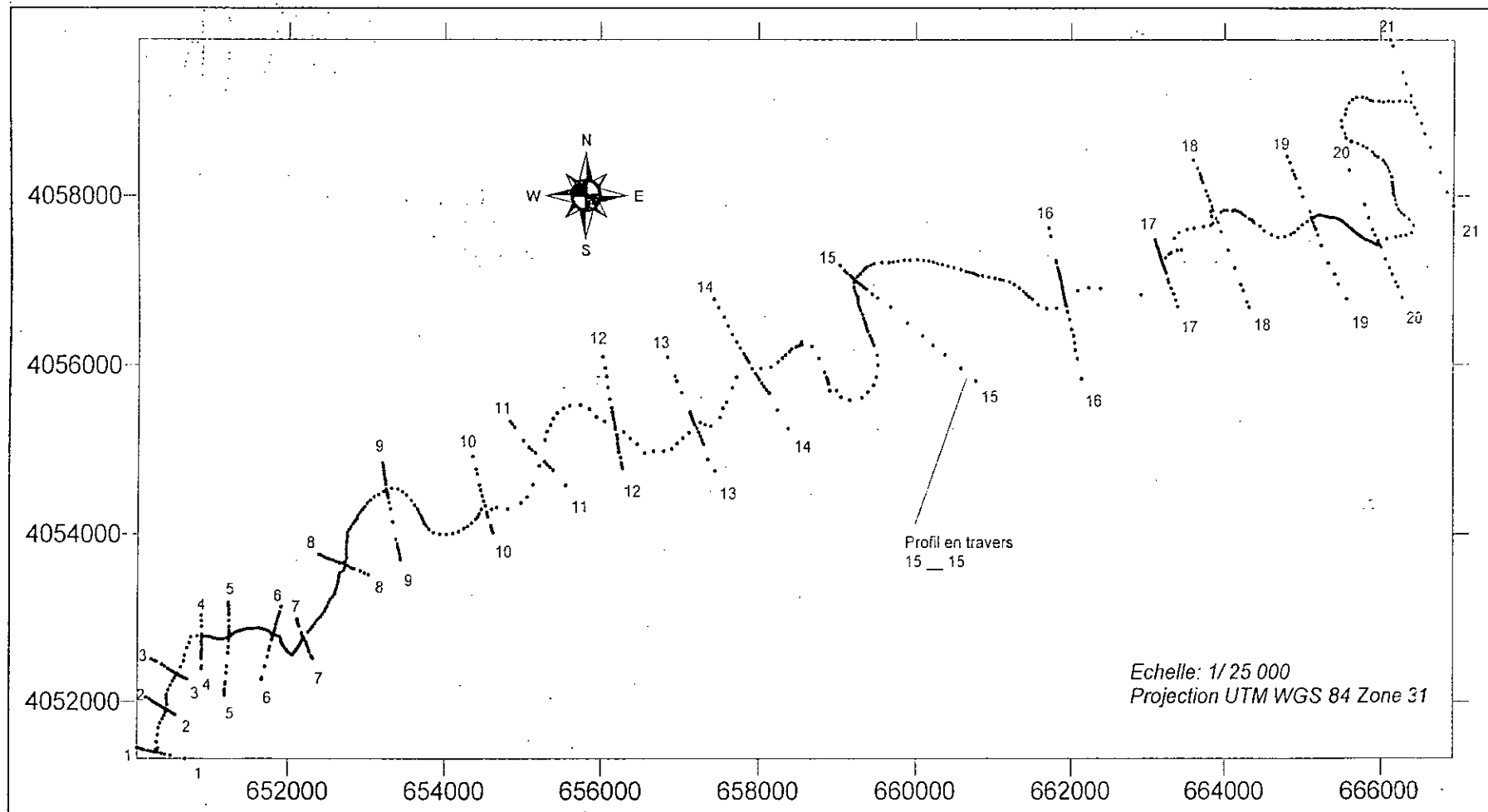


Figure II.7 : Profils en travers de l'Oued SOUMMAM de Sidi Aich à El Kseur.

b. Cartes topographiques utilisées

Le site d'étude est délimité en faisant l'assemblage de trois cartes à l'échelle 1/25000 (figure II.7) :

- Carte 1/25000 de Sidi Aich (NJ-31-V-43-Est) ;
- Carte 1/25000 de Sidi Aich ((NJ-31-V-42 Ouest) ;
- Carte 1/25000 de Sidi Aich (NJ-31-V-41 Est).

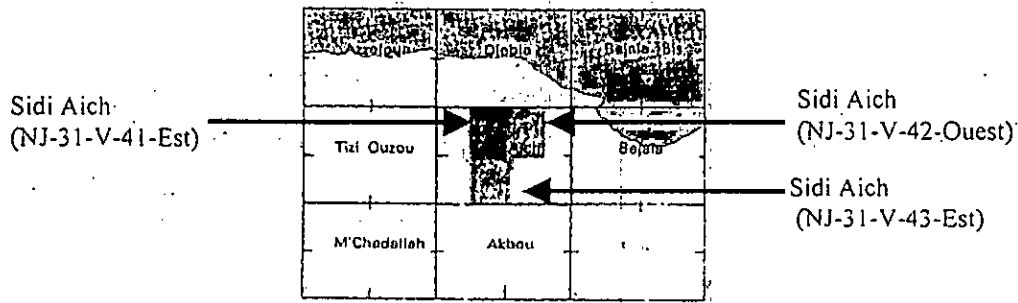


Figure II.8 : Tableau synoptique des feuilles constituant le bassin de la Basse Soummam, INCT

2. Digitalisation des cartes

La première étape consiste à scanner les cartes topographiques. Une fois que les cartes sont scannées elle sont importées vers un logiciel SIG afin d'extraire des couches d'informations sous forme de couches thématiques (réseau hydrographique, courbes de niveaux, réseau routier, infrastructures hydrauliques, aménagements hydrauliques, points d'eau, ouvrages de mobilisation des ressources en eau, etc.). Ceci est réalisé en digitalisant dans des tables différentes chaque type d'information. Nous pouvons constituer autant de couches que nous souhaitons.

En lançant le SIG MapInfo la fenêtre ci-dessous apparaît :

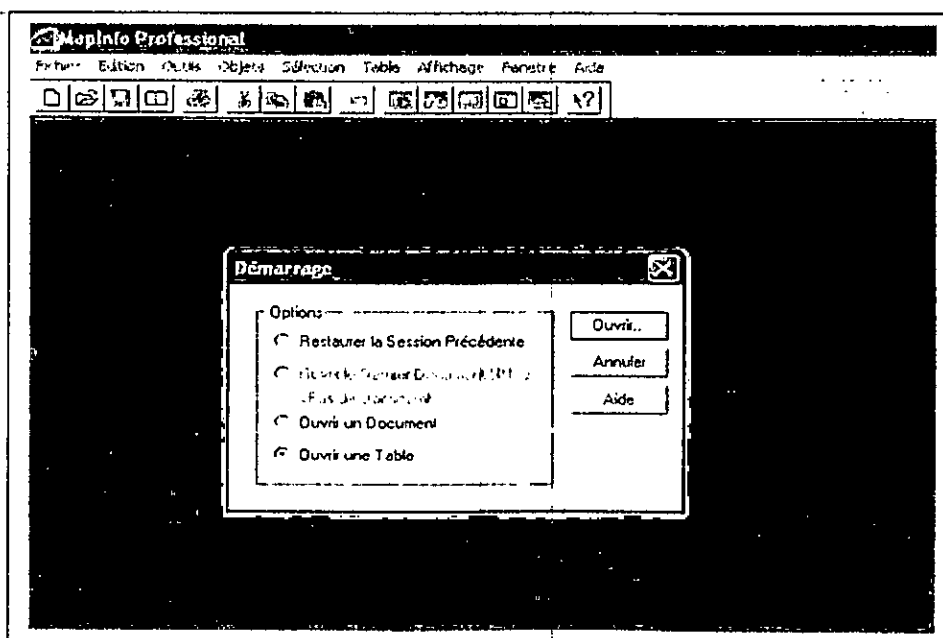


Figure II.9

En activant l'icône *ouvrir une table* et en validant en appuyant sur *ouvrir*, la boîte de dialogue suivante apparaît.

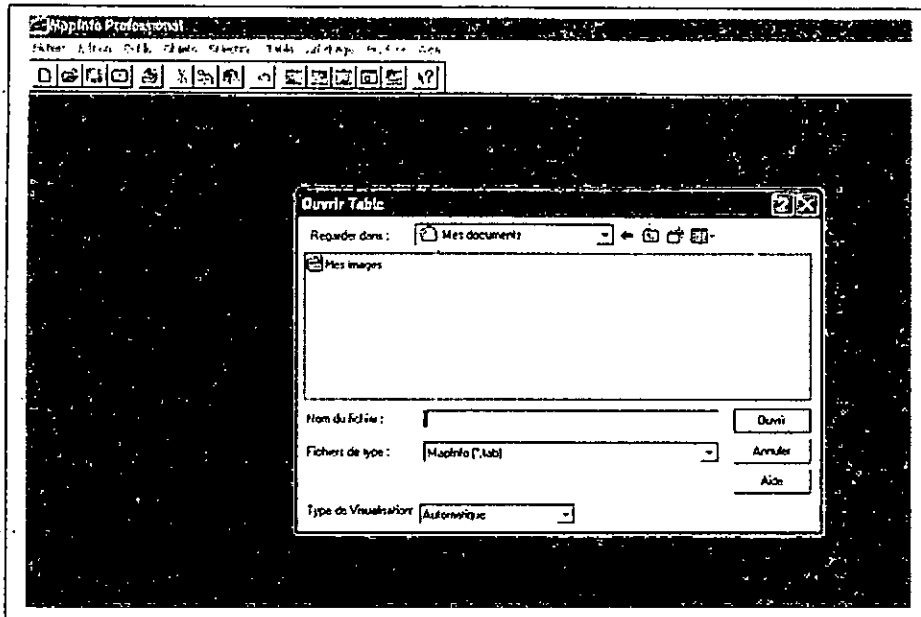


Figure II.10

Nous spécifions le type du format de l'image grâce à l'ascenseur de la boîte de dialogue suivante :

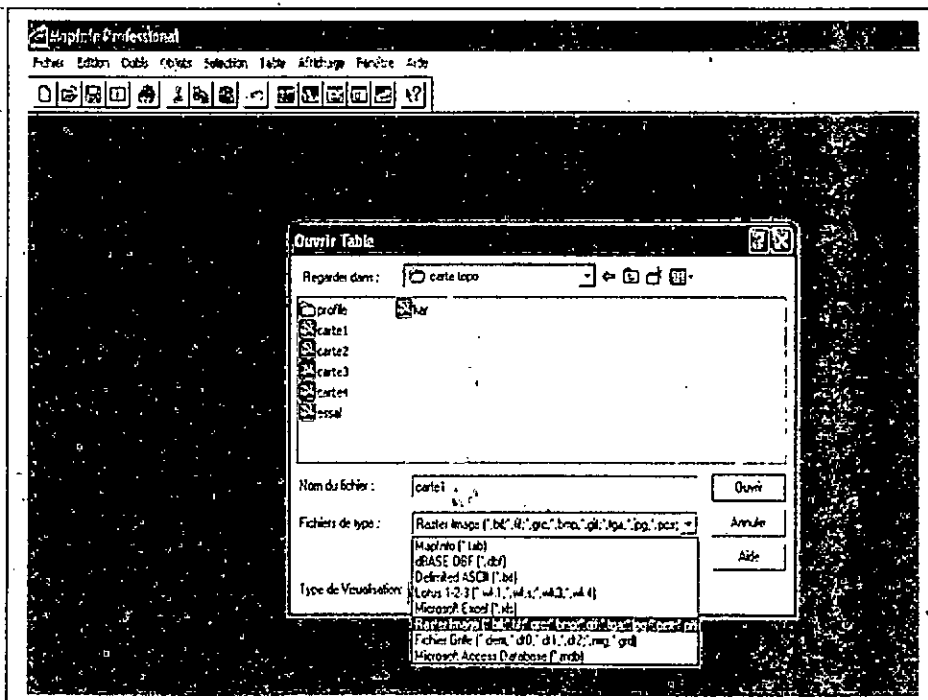


Figure II.11

En validant en appuyant sur ouvrir, la boîte de dialogue ci-dessous s'affiche :

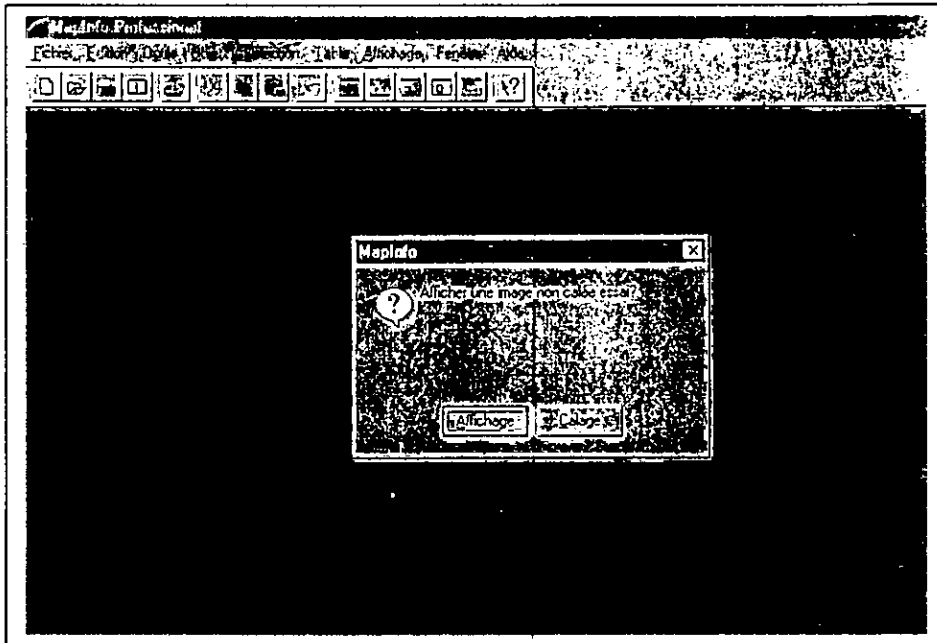


Figure II.12

Nous aurons à choisir entre *Afficher* la carte ou la *Caler*. En cliquant sur l'icône « calage », la boîte de dialogue ci dessous apparaît

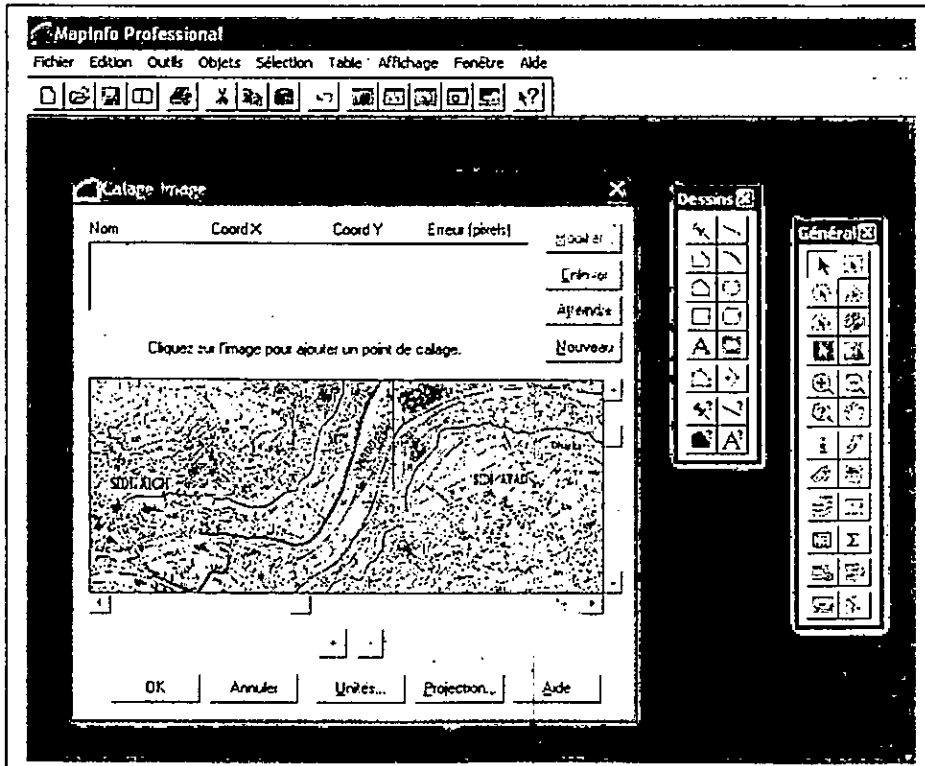


Figure II.13

Pour faire le calage, nous devons tout d'abord choisir le système de projection dans lequel la carte est représentée (carte originale). Pour ce faire, nous déroulons la palette des coordonnées à l'aide de la flèche de la liste déroulante et nous choisissons la projection. MapInfo, nous propose une liste de projections (Lambert1, Lambert2, UTM WGS 84, ...). Dans notre cas, la carte est projetée dans le système UTM WGS 84³.

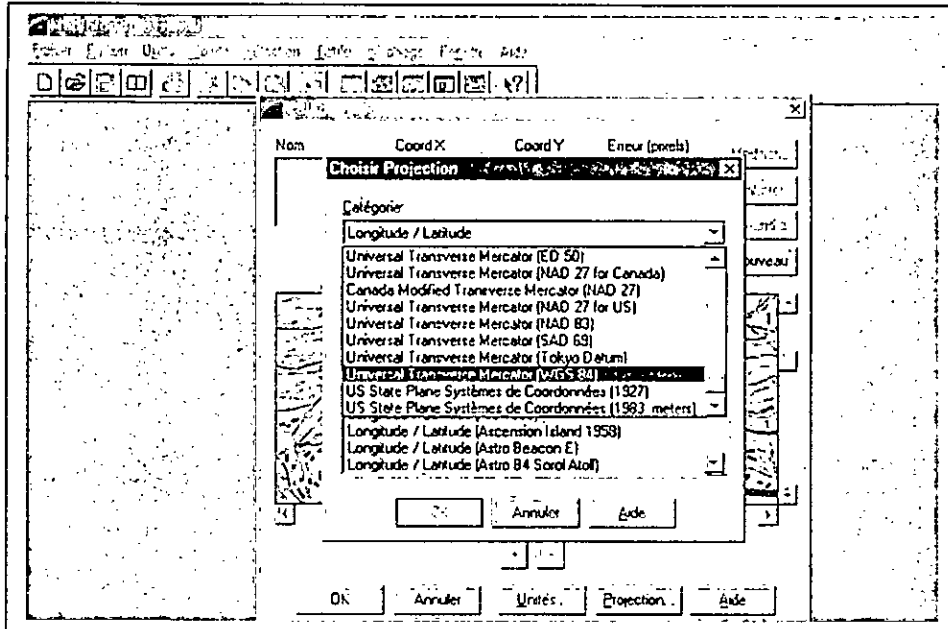


Figure II.14

Une fois le système de projection est choisi, nous devons choisir aussi le fuseau dans lequel notre carte est située : le fuseau UTM zone 31.

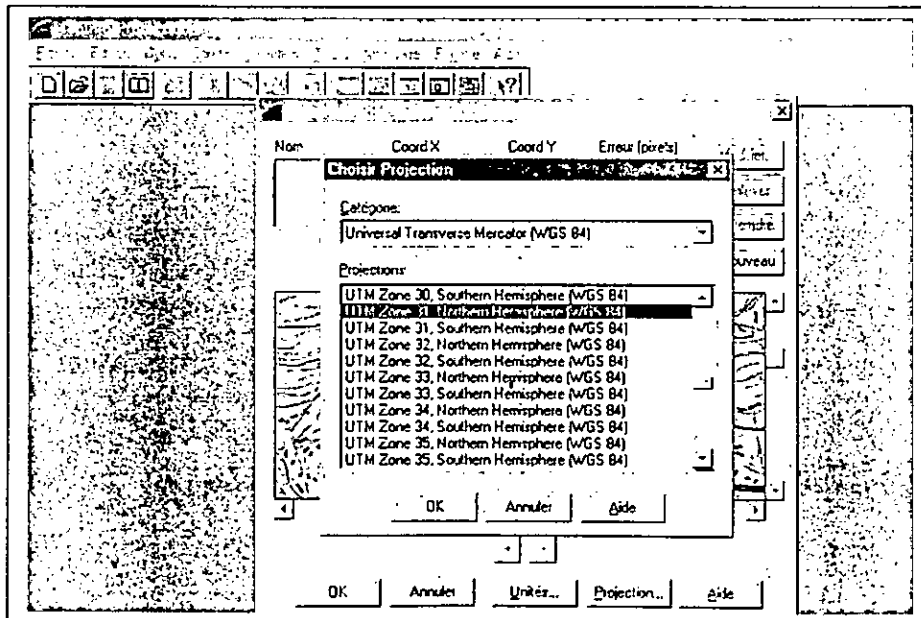


Figure II.15

³ : Universal Transverse Mercator World Geodetic System 1984.

La phase de calage proprement dite nécessite la saisie de plusieurs points de calage. Ceci est réalisé comme suit :

Tout d'abord nous choisissons sur l'image un point de référence qui servira de point de calage. (figure II.16).

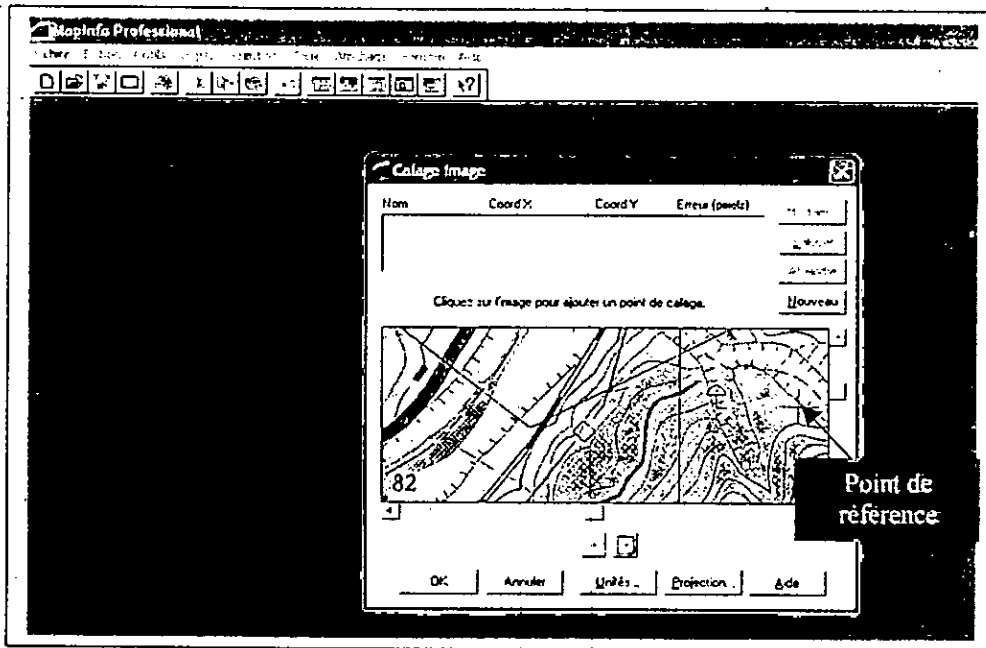


Figure II. 16

Une fois le point de référence est repéré sur l'image affichée sur l'écran, nous cliquons sur le pixel correspondant pour introduire ses coordonnées géographiques lues à partir de la carte topographique (figure II.17).

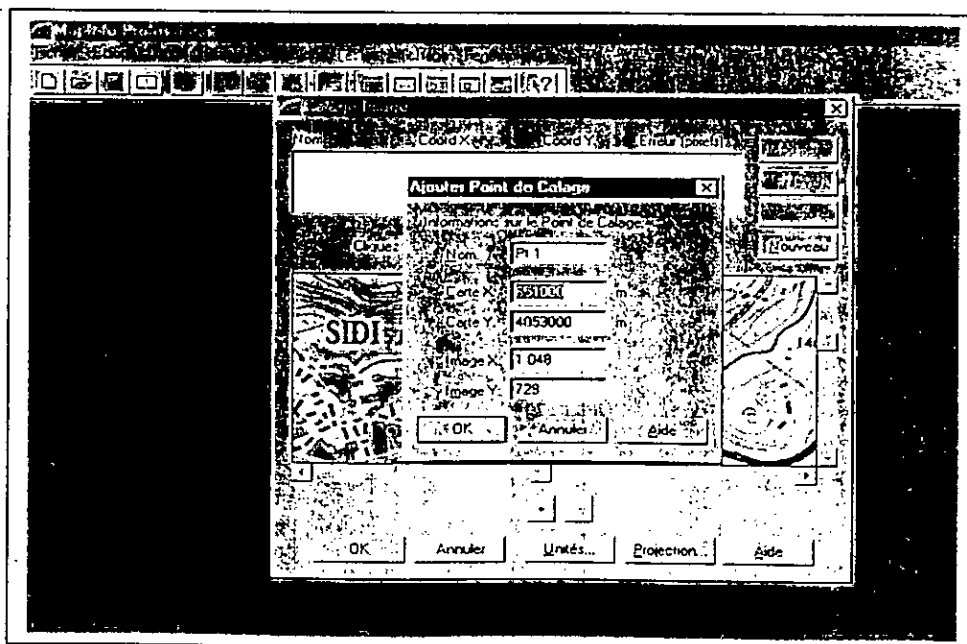


Figure II. 17

Nous renouvelons cette opération autant de fois que nous le souhaitons (au moins quatre (04) points doivent être saisis). Lors de la saisie de ces points, il est préférable de quadriller la carte de telle sorte que les points de repère soient pris dans les quatre coins de la carte.

Lorsque nous définissons plusieurs points de calage, MapInfo affiche une erreur de calcul pour chaque point. Une valeur d'erreur de zéro indique que le point de calage est *placé correctement* (figure II.18). Une valeur d'erreur supérieure à zéro indique que la position du point de calage semble incorrecte, par rapport à la position des autres points de calage. Le code d'erreur numérique indique l'écart de distance (en pixels) entre la position du point de calage et la position calculée par MapInfo.

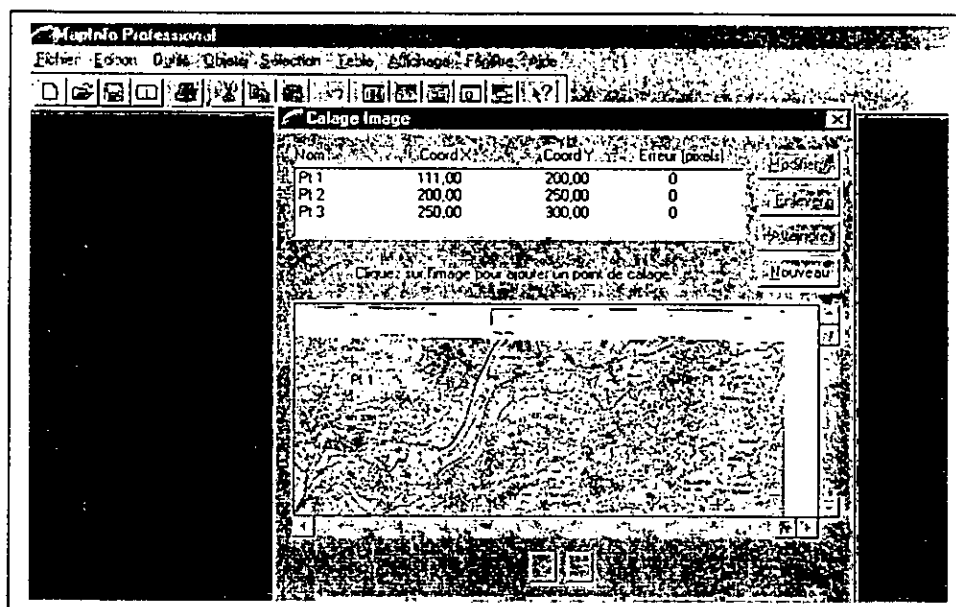


Figure II.18

Si l'erreur est voisine de zéro, on clique sur Ok et la fenêtre ci-dessous apparaît (figure II.19).

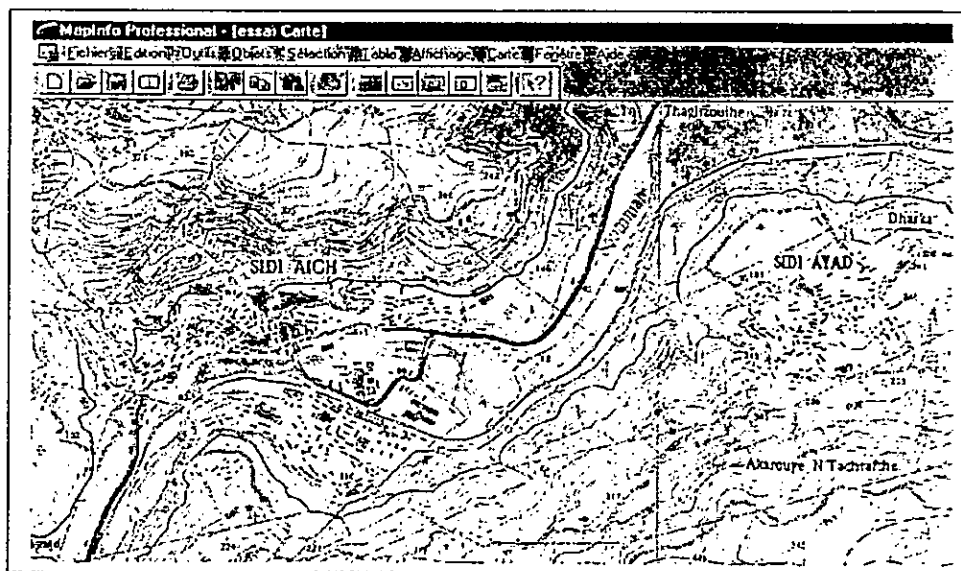


Figure II.19

Avant de commencer la digitalisation, nous devons créer une nouvelle table de données. Ceci est réalisé en appuyant sur l'option nouvelle table du menu fichier (figure II.20).

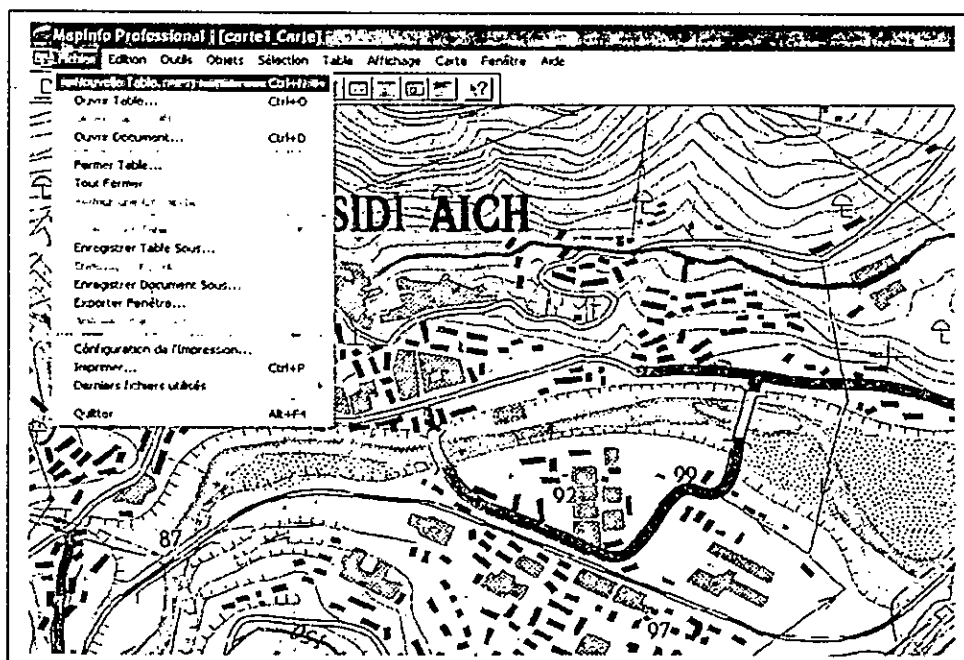


Figure II.20

En validant la boîte de dialogue ci-dessous apparaît (figure II.21).

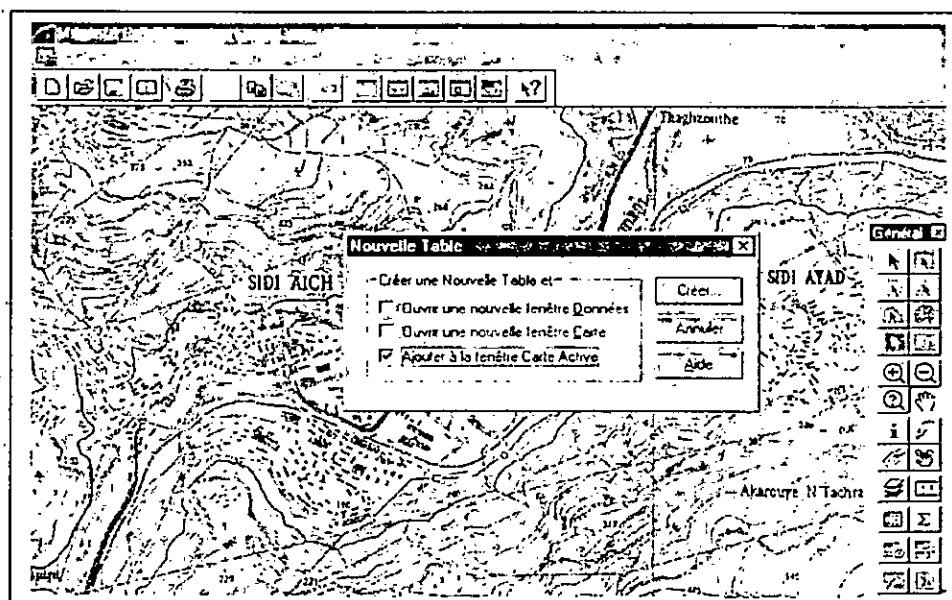


Figure II.21

En activant l'icône ajouter à la fenêtre Carte Active (figure II.21), la boîte de dialogue ci-dessous apparaît.

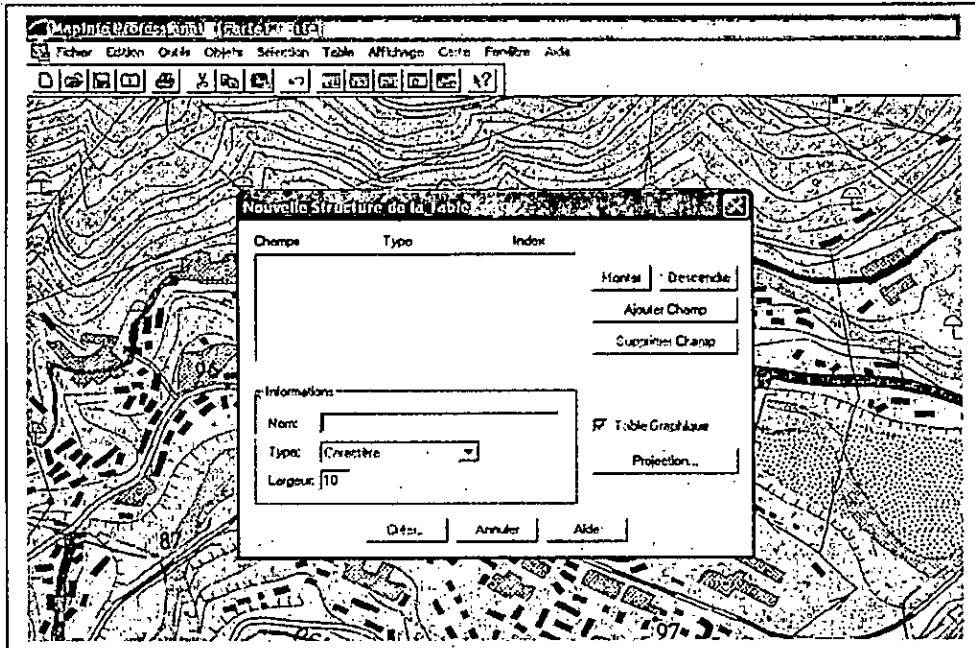


Figure II. 22

Nous devons saisir les champs qui constituent la table de données de cette nouvelle couche (figure II.23).

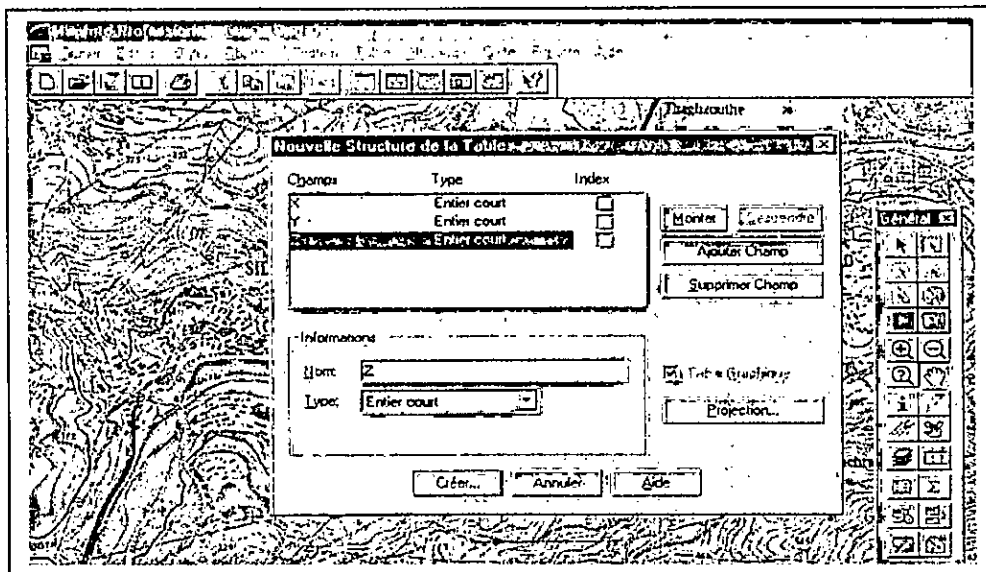


Figure II.23

En validant par un clic sur l'icône « Créer » (figure II.23), nous sommes appelés à donner un nom à cette nouvelle carte (nouvelle couche d'information), (figure II.24).

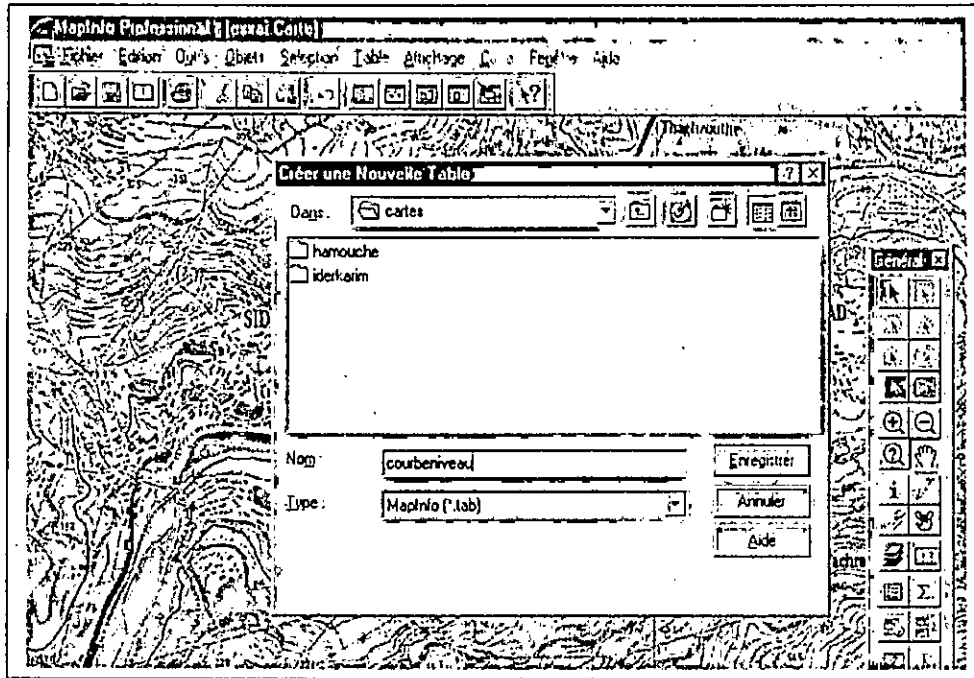


Figure II. 24

Après cette opération, l'outil de digitalisation est activé et nous pouvons dès à présent commencer à digitaliser en choisissant le thème (point, polyline, polygone), (voir carte dans la figure II.25).

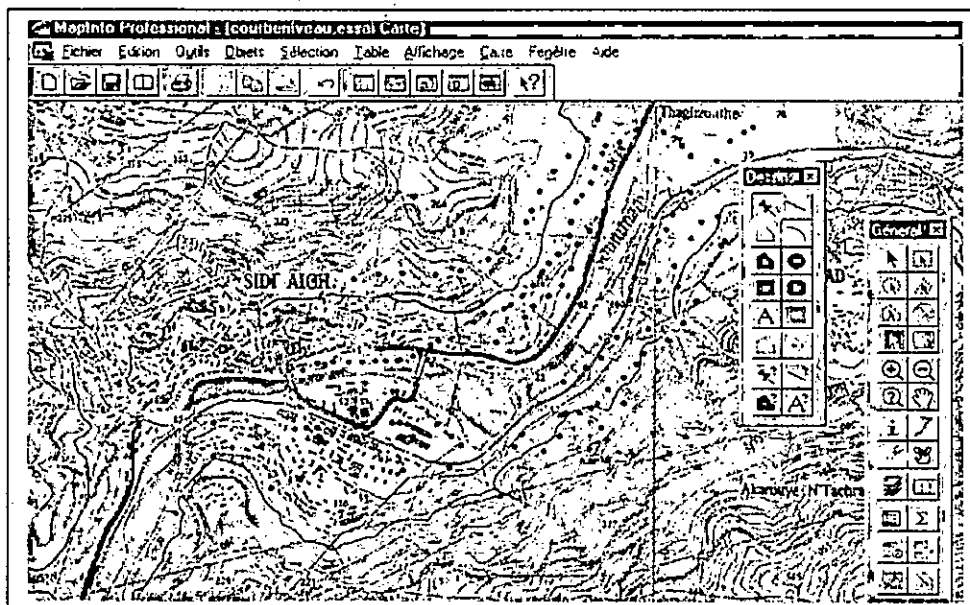


Figure II. 25

Nous pouvons afficher dans la même fenêtre (en mosaïque), la table de données et la carte qui lui est associée (figure II.26, ci-dessous).

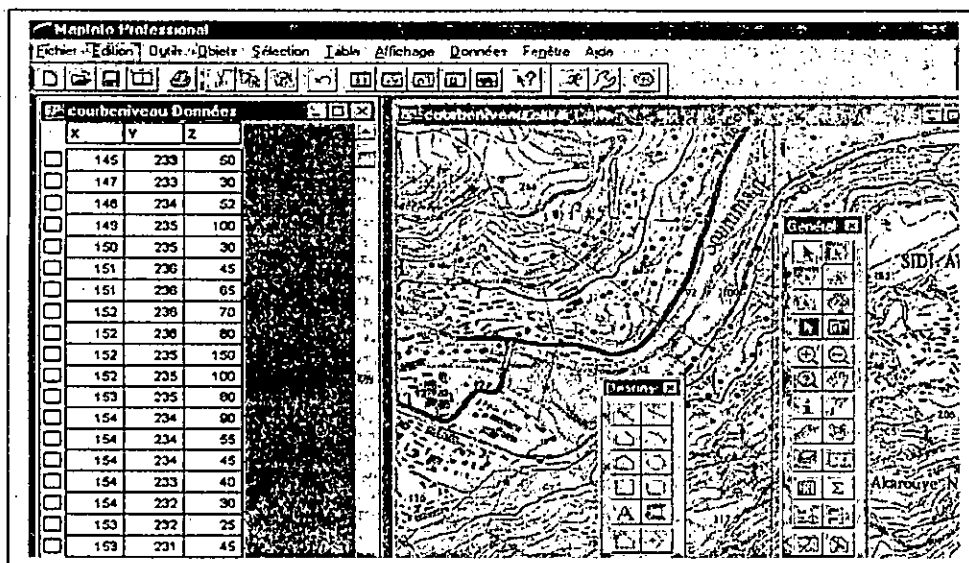


Figure II.26

Une fois la digitalisation terminée, nous pouvons exporter la table de données vers d'autres logiciels afin d'y porter d'autres traitements en spécifiant l'extension (Map Info inter change (*.mif), Auto Cad (*.dxf), dBase (*.dbf), ASCII avec séparateur (*.txt).

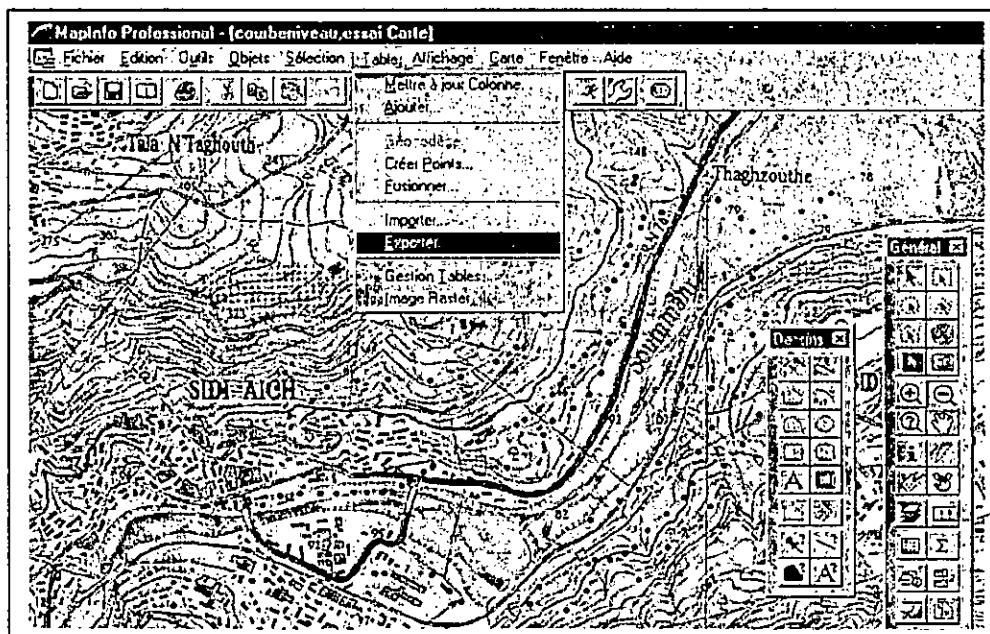


Figure II.27

En cliquant sur exporter (figure II.27), la boîte de dialogue ci-dessous apparaît :

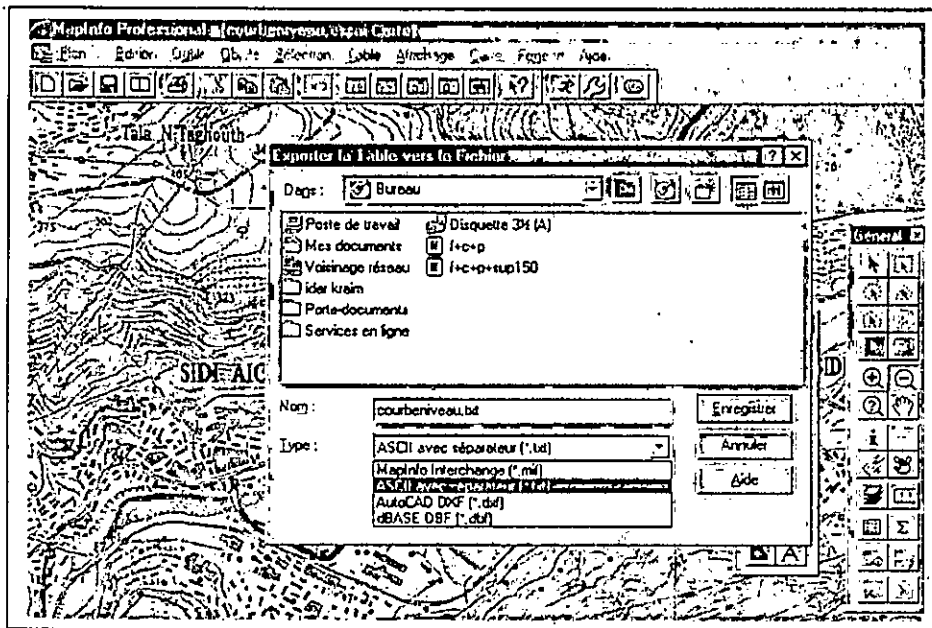


Figure II.28

3. Elaboration du MNA de la zone d'étude

L'outil SIG, comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre précédent, permet de gérer et d'analyser les données spatiales. Les fonctionnalités des SIG sont alors beaucoup plus opérationnelles, que si l'on dispose d'une *bonne couverture spatiale* des phénomènes que l'on veut étudier. Malheureusement, parfois on ne possède pas d'informations ayant trait à la variable étudiée. D'ailleurs, il est quasiment impossible de collecter de façon exhaustive les données en tout points de l'espace. Ceci pour des raisons pratiques évidentes (coût, inaccessibilité,.....). L'élaboration d'une procédure d'analyse spatiale d'un processus avec un SIG implique alors des traitements par interpolation de données pour générer et estimer la valeur d'un paramètre dans un secteur où l'on ne dispose pas de mesures.

L'interpolation est un moyen de générer l'information aux points de l'espace non enquêté où les mesures ne sont pas disponibles.

Un MNA nous permettra d'évaluer l'altitude en tout point de la plaine alluviale de la zone située entre Sidi Aich et El Kseur. Cette évaluation est basée sur une extrapolation des courbes de niveau. Celles-ci sont dans un premier temps assimilées à un ensemble de points, répartis de manière irrégulière sur tout le domaine d'étude où chaque point comporte en attribut l'altitude de la courbe dont il est extrait.

L'interpolation est effectuée par le logiciel surfer afin de déterminer les valeurs de l'altitude entre ces points. Il est bien sûr possible de choisir une méthode d'interpolation parmi la gamme proposée et de l'appliquer avec différents paramètres.

L'interpolation qu'elle soit déterministe ou probabiliste est le résultat d'un traitement et de l'analyse des données en vue de leur exploitation dans les SIG.

L'approche *d'interpolation déterministe* regroupe les méthodes d'interpolation dont la fonction de structure est choisie a priori. Ces méthodes ont comme inconvénient de ne pas fournir d'informations sur la variance d'estimation.

L'approche *probabiliste* est basée sur le Krigeage. Le Krigeage est une méthode géostatistique qui permet l'estimation des valeurs locales en considérant l'organisation spatiale des variables étudiées. C'est une méthode qui permet de générer des surfaces estimées à partir d'un échantillon de points géoréférencés [31]. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation, le Krigeage se distingue par ses caractéristiques d'estimation non biaisée et d'estimation d'une variance associée.

En lançant le programme GRID.exe, nous sommes invités à choisir la méthode que le surfer utilisera pour *interpoler* les valeurs de l'altitude Z. Pour ce faire, Nous devons tout d'abord spécifier les dimensions des mailles qui constitueront notre site d'étude. Dans notre cas, nous avons opté pour le choix de la méthode de Krigeage (Kriging) largement répandue pour l'élaboration des MNT. Cette méthode bien qu'elle prenne beaucoup de temps donne des résultats de bonne qualité.

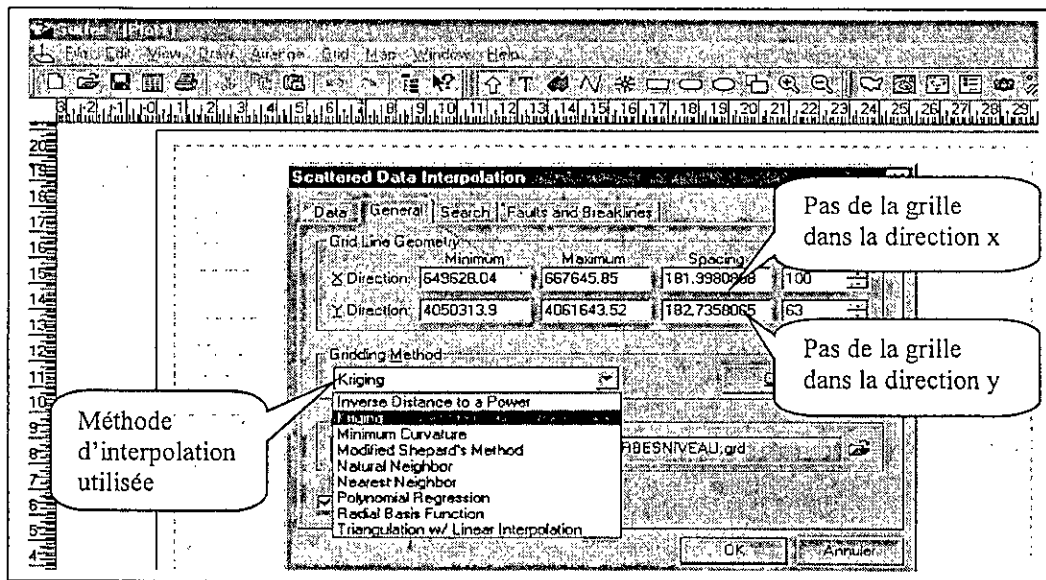


Figure II.29

Le surfer nous fournit une grille donnant les altitudes de l'ensemble des points distribués de manière régulière dans tout le domaine d'étude. En effet, il affecte à chaque nœud de la grille constituant le domaine d'étude une altitude qui est estimée par la méthode de Krigeage.

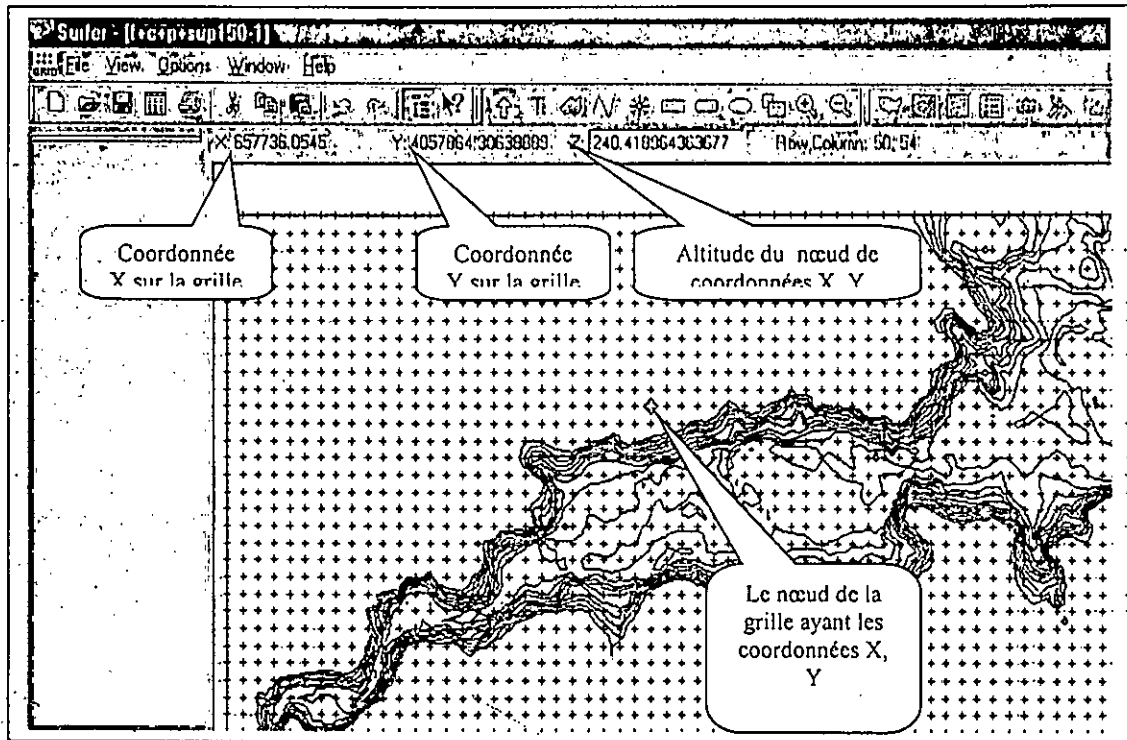


Figure II.30

Cette grille pour qu'elle puisse être utilisée et intégrée dans un SIG (MapInfo, ArcView, Geoconcept...) pour des fins d'analyse et de traitement sera enregistrée sous l'extension (*.dat).

Sur la figure ci-dessus, nous avons représenté le modèle numérique de terrain de la zone d'étude sous forme de grille régulière de 5mx5m. Pour chaque pas d'espace de 5m nous avons l'altitude du point considéré. Cette figure illustre les courbes de niveaux de la plaine située entre sidi Aich et El Kseur.

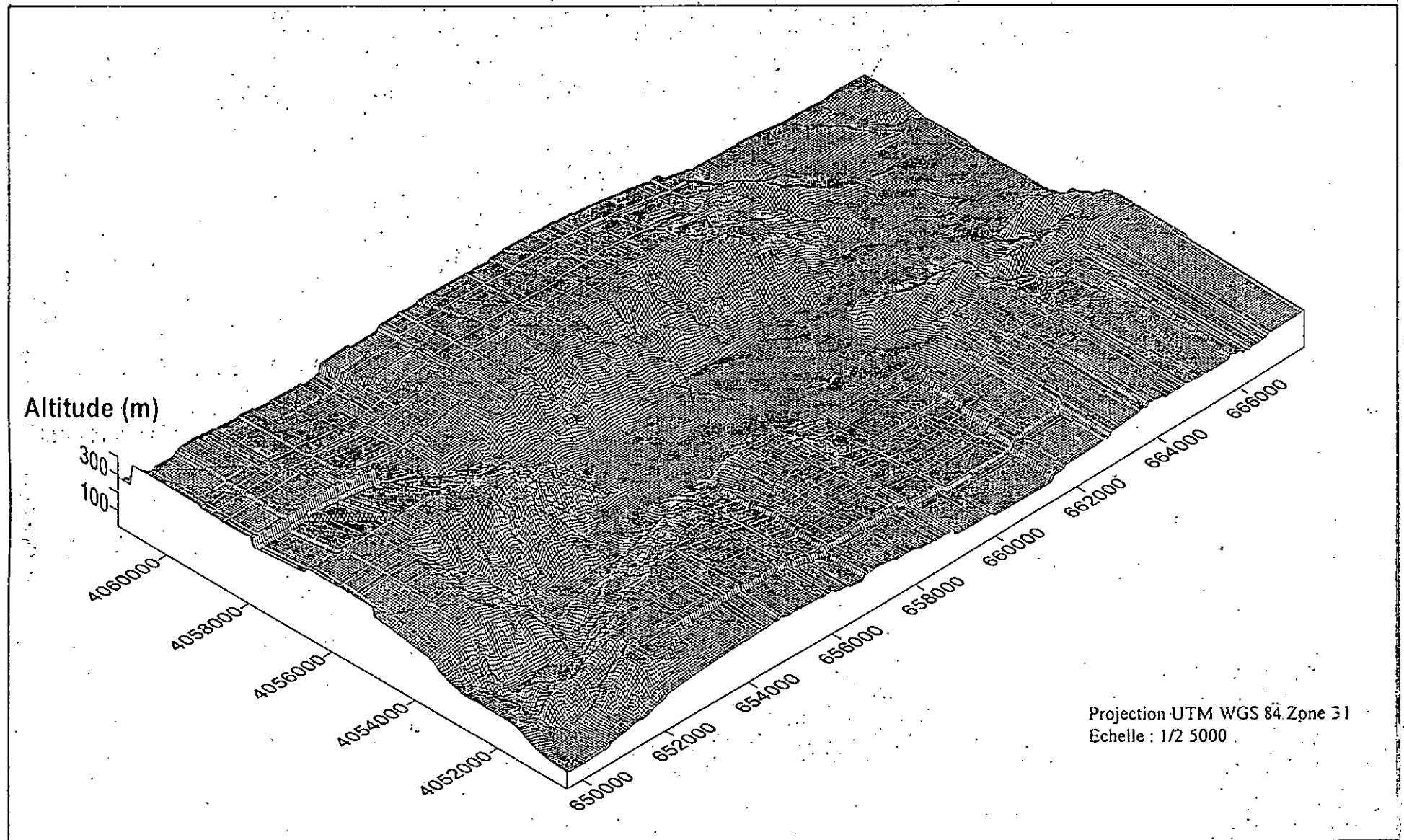


Figure II.31 : Modèle numérique de type GRID, Vue en perspective de la zone d'étude, Pas=5 m

CONCLUSION

Le MNA a été élaboré à partir des courbes de niveaux digitalisées par le SIG MapInfo. Les cartes topographiques utilisées sont à l'échelle 1/25 000. Le logiciel Surfer a été utilisé pour interpoler les altitudes afin d'obtenir le modèle numérique d'altitude (MNA). Le choix de ce logiciel a été dicté par les bons résultats qu'il donne en comparaison avec les autres logiciels comme Idrissi et Arcview [32].

La figure II.31 représente le modèle numérique d'altitude de la zone d'étude réalisé avec le surfer avec un pas d'espace de 5m dans les deux directions X et Y. Nous remarquons toutefois qu'à partir d'une certaine altitude le logiciel donne des résultats qui ne reflètent pas la réalité du terrain à cause de la non disponibilité de l'information altimétrique dans ces zones.

Ce modèle numérique d'altitude (MNA), va nous servir dans la description de la géométrie du domaine d'étude et donc dans l'élaboration du maillage pour les simulations numériques.

nous servir dans la description de la géométrie du domaine d'étude et donc dans l'élaboration du maillage pour les simulations numériques.

Chapitre III :

Le Modèle mathématique de Saint Venant

CHAPITRE III : LE MODELE MATHÉMATIQUE DE SAINT VENANT

INTRODUCTION

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. Un certain nombre d'approximations a été effectué et s'avère aujourd'hui valable pour des écoulements gouvernés par les équations de Navier - Stokes.

Le niveau d'approximation le plus élevé est représenté par *les équations de Navier -Stokes* sans aucune modification.

Un autre niveau d'approximation concerne les écoulements à très haut nombre de Reynolds où la plus grande partie de l'écoulement est turbulent. *Les équations de Reynolds* peuvent alors être utilisées.

Les équations de Barré de saint venant (1871) jouent un rôle très important dans l'étude des écoulements en rivière ou canaux (naturels ou artificiels) ou les écoulements en mer. Dans ce chapitre, on va formuler le système d'équations de Saint Venant en partant des équations générales de Navier Stokes. Les différentes étapes sont résumées sur la figure suivante :

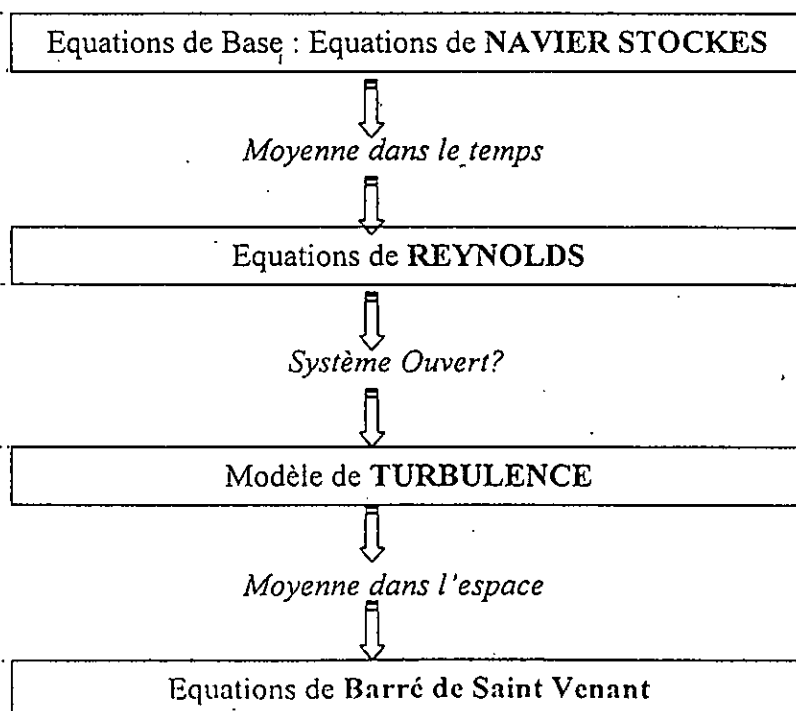


Figure III.1 : Schéma représentant les différentes étapes poursuivies pour aboutir au modèle de Saint Venant

I. EQUATIONS DE NAVIER STOKES

1. Equations gouvernant les écoulements à surface libre

- Equation de continuité

L'équation de continuité pour un fluide incompressible exprime le principe de conservation de la masse est donnée par:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{pas d'apport latéral}) \quad (\text{III-1})$$

- Equation de la dynamique (conservation de la quantité de mouvement)

L'équation de conservation de la quantité de mouvement est donnée par l'équation suivante [33]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (\text{III-2})$$

avec, F_i : les forces de volume, ρ et ν : la masse volumique et la viscosité cinématique de l'eau.

La projection de cette équation sur les axes (\vec{i} , \vec{j} et \vec{k}) nous donne le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

avec, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ et $\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$

Les forces de volume : Elles se composent de plusieurs forces

- *Les Forces de la pesanteur*

Elles s'écrivent sous la forme suivante :

$$\vec{f}_g = \rho \vec{g} \quad (\text{III-4})$$

- *Force de Coriolis*

La force de Coriolis par unité de masse due à la rotation de la terre s'écrit sous la forme suivante :

$$\vec{f}_c = -2 \vec{\omega} \wedge \vec{V} \quad (\text{III-5})$$

Dans un repère local tel que x orienté vers l'Est, y vers le Nord, et z perpendiculaire au plan formé par (x, y). Le vecteur de rotation $\vec{\omega}$ a pour composantes :

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ w \cos \varphi \\ w \sin \varphi \end{pmatrix}$$

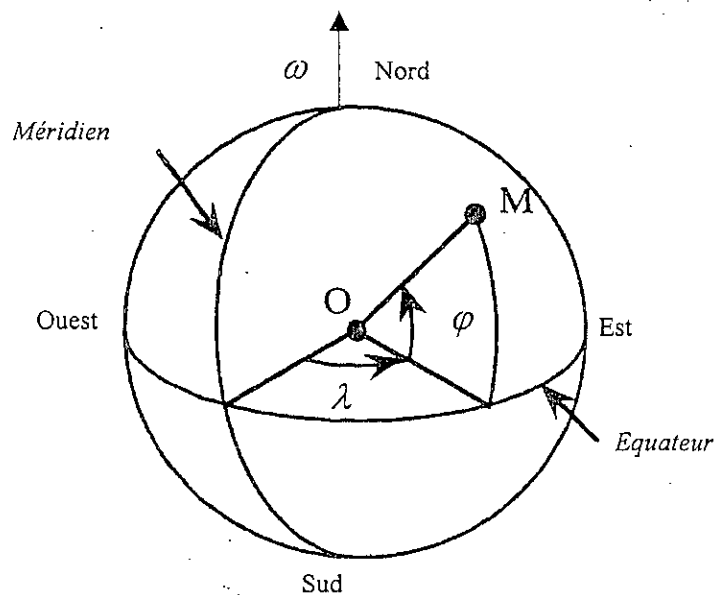


Figure III.2 : Système de coordonnées

où, φ : est la latitude du point considéré,

λ : est la longitude,

ω : est la vitesse angulaire de rotation de la terre ($\omega = 7.292 \cdot 10^{-5}$ rad/s)

L'accélération de Coriolis s'écrit donc dans le repère local :

$$\text{Selon } x : c_1 = 2 |\omega| (v \sin \varphi - w \cos \varphi) \bar{i}$$

$$\text{Selon } y : c_2 = -2 u |\omega| \sin \varphi \bar{j}$$

$$\text{Selon } z : c_3 = 2 u |\omega| \cos \varphi \bar{k}$$

Les forces de volume peuvent être regroupées alors en une seule force :

$$\vec{f} = \vec{f}_g + \vec{f}_c$$

La force de Coriolis peut être négligée devant la force de la pesanteur suivant la direction z . Sous cette hypothèse les forces de volume s'écrivent :

$$\vec{f} = 2\rho|\omega|[(v \sin \varphi - w \cos \varphi) \bar{i} - 2\rho|\omega|u \sin \varphi \bar{j} - 2\rho g \bar{k}] \quad (\text{III-6})$$

Le système devient :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + \rho c_1 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + \rho c_2 \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

II. EQUATIONS DE REYNOLDS

L'idée de Boussinesq et Reynolds était d'oublier le mouvement instantané du fluide, trop complexe, et de chercher des équations prédisant simplement le mouvement moyen. Ceci n'est pas du tout facile, même si l'on connaît l'équation de Navier Stokes car le problème n'est pas fermé au sens où l'on ne connaît pas a priori la relation liant les contraintes de Reynolds aux quantités moyennes (problème de passage du *micro* au *macro*). Cela veut dire que même si l'on connaît les lois particulières régissant les éléments d'un système, on ne peut déduire simplement les lois gouvernant l'ensemble du système [34], [35].

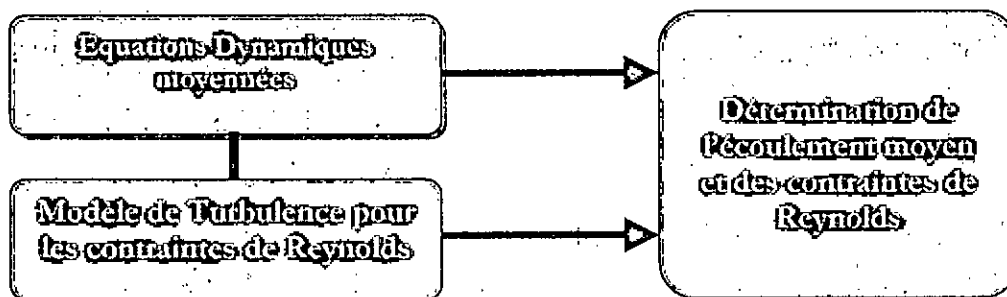


Figure III.3 : Schéma de principe de la modélisation physique des écoulements Turbulents

Cette approche, utilisant les équations de Navier -Stokes moyennées en temps conduit à de nouvelles difficultés : A cause de la non -linéarité des termes convectifs, tout processus statistique conduit à l'apparition de nouvelles grandeurs (corrélations).

Les équations du mouvement moyen s'obtiennent en introduisant la décomposition de Reynolds dans les équations instantanées puis en prenant la moyenne.

1. Décomposition de Reynolds

La quantité $g(x, y, z, t)$ peut être décomposée en deux parties distinctes de la manière suivante :

$$g(x, y, z, t) = \bar{g}(x, y, z, t) + g'(x, y, z, t) \quad (\text{III-8})$$

tel que : $\bar{g}(x, y, z, t)$: la partie moyenne

$g'(x, y, z, t)$: la partie fluctuante.

2. Equations de Reynolds

En appliquant la décomposition aux différentes grandeurs, on a :

$$\begin{cases} u(t) = \bar{u} + u'(t) \\ v(t) = \bar{v} + v'(t) \\ w(t) = \bar{w} + w'(t) \\ p(t) = \bar{p} + p'(t) \end{cases} \quad \text{(III-9)}$$

Le système d'équations décrivant le comportement d'un mouvement turbulent est donné ainsi par le système suivant [36] :

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \Delta \bar{u}_i - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + g_i + \bar{C}_i \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \end{cases} \quad \text{(III-10)}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\tau}_{ij} - \rho (\overline{u'_i u'_j})] + g_i + \bar{C}_i \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \end{cases}$$

Avec,

$$\bar{C}_i \begin{cases} C_1 = 2|\omega|(\bar{v} \sin \varphi - \bar{w} \cos \varphi) \\ C_2 = -2\bar{u}|\omega| \sin \varphi \\ C_3 = 2\bar{u}|\omega| \cos \varphi \end{cases}$$

Ces équations sont appelées *Equations de Reynolds ou (RANS)*¹. Elles contiennent des termes inconnus $(\overline{u'_i u'_j})$ qui sont appelés *les tensions de Reynolds*. Physiquement, elles reflètent l'échange de quantité de mouvement, par diffusion turbulente, entre les différentes parties de l'écoulement.

Le système d'équation de Reynolds est ouvert, c'est à dire qu'il y a plus d'inconnues que d'équations. Pour le résoudre, il faut modéliser les termes inconnus afin de les relier aux grandeurs calculées. C'est le rôle fondamental des modèles de turbulence.

Les modèles de turbulence se présentent en général sous la forme d'un ensemble d'équations dans lesquelles apparaissent les contraintes turbulentes. Cet ensemble d'équations complète les équations dynamiques moyennées et doit permettre la résolution simultanée de toutes les équations du mouvement.

¹ :Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations

III. MODELE MATHEMATIQUE DE SAINT VENANT

Un autre type de loi de conservation est celui de Saint Venant. Ce système, régissant l'écoulement à surface libre, dérive des lois de la mécanique des fluides. Il est obtenu en intégrant les équations de Navier Stokes sur la verticale, moyennant les hypothèses formulées par Barré de Saint Venant en 1871 dont celle de la *répartition hydrostatique de la pression*. Le modèle de saint venant est appelé également : *modèle des eaux peu profondes* ou *équations des ondes longues*.

Le modèle de Saint Venant peut être formulé sous deux formes fondamentales :

- *Forme conservative* : Qui s'appuie sur le niveau d'eau en guise de pression et sur les composantes du débit spécifique (q_x, q_y) dans les directions \bar{x} et \bar{y} pour décrire le mouvement de l'eau.
- *Forme non conservative* : Dans cette formulation le niveau d'eau est utilisé aussi pour la pression, mais le mouvement est déterminé à l'aide des composantes de la vitesse (u, v) .

1. Champs d'application

Le modèle de Saint Venant 2D est souvent appliqué dans :

- L'étude des écoulements dans les plaines inondées ;
- L'étude des écoulements dans rivières peu profonde ;
- L'étude des estuaires ou les côtes marines.

2. Hypothèses adoptées

Pour que le modèle donne des résultats et reflète fidèlement la réalité physique de l'écoulement, saint venant a émis un certain nombre d'hypothèses qu'il faudrait satisfaire à savoir :

- L'eau est un fluide incompressible ;
- La répartition de la pression est hydrostatique dans une section. Cela impose que le rayon de courbure des lignes de courant soit important. C'est à dire que les méandres soient larges et que le tirant d'eau soit grand devant les aspérités du fond ;
- La pente du fond est faible vis à vis de la profondeur d'eau ;
- La composante verticale de la vitesse w ainsi que ses variations (spatiales et temporelles) sont faibles pour être négligées ;
- Les variations verticales des deux composantes horizontales de la vitesse \bar{u} et \bar{v} sont négligeables.

3. Equations du mouvement moyen dans l'espace

a. Domaine géométrique

Le domaine d'étude Ω dans le repère $R = (O, x, y, z)$ (Oz suivant la verticale es limité en bas par le fond d'équation $z = Z_f(x, y)$ et en haut par la surface libre de l'eau d'équation $z = Z_s(x, y, t)$. Il est borné latéralement par un cylindre vertical d'intersection Γ avec tout

plan de côte constante. Le disque horizontal de frontière Γ est noté Ω_0 . Le domaine de calcul est ainsi défini par [37] :

$$\Omega = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \text{ tel que } (x, y) \in \Omega_0 \text{ et } Z_f(x, y) \leq z \leq Z_s(x, y, t)\}$$

• La pesanteur est orientée dans le sens des z négatifs ;

• La hauteur d'eau ou profondeur est notée H et est égale à $Z_s - Z_f$;

• Le fond est une donnée, la hauteur est en général une inconnue.

• Le temps est noté t ; les normales au fond et à la surface libre sont respectivement \vec{n}_f et \vec{n}_s .

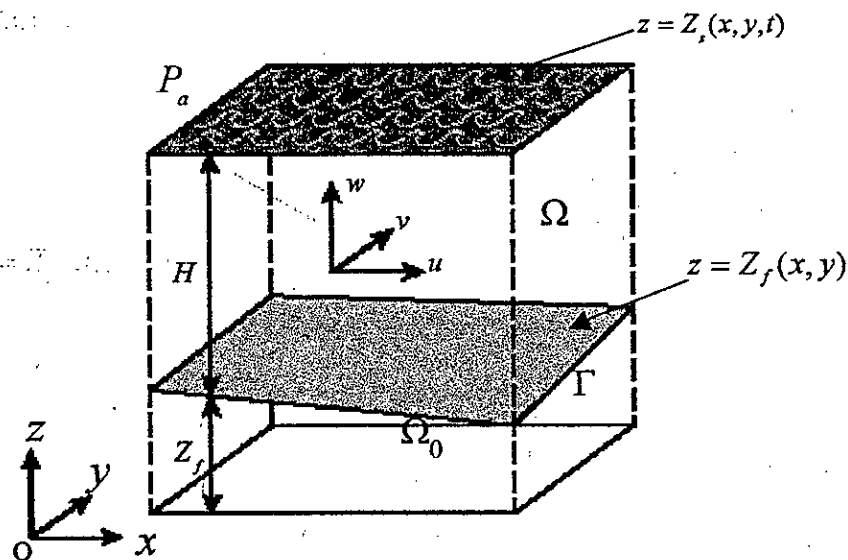


Figure III.4 : Le domaine de calcul - Le système de coordonnées et variables utilisées pour la dérivation des équations moyennées.

b. Moyenne selon la verticale (moyenne spatiale)

La moyenne selon la profondeur d'une fonction quelconque $g(x, y, z, t)$, est par définition :

$$G = \langle g \rangle = \bar{g} = \frac{1}{Z_S - Z_F} \int_{Z_F}^{Z_S} f(x, y, z, t) dz \quad (\text{III-11})$$

c. Conditions à l'interface du domaine liquide

L'équation de la surface libre est de la forme $z = Z_s(x, y, t)$ et peut s'écrire aussi sous la forme $S(x, y, z, t) = 0$ avec, $S(x, y, z, t) = z - Z_s(x, y, t)$.

La normale à la surface libre est orientée vers les z positifs (donc normale extérieure par rapport au volume contenant l'eau).

• Le vecteur normal \vec{n}_s en un point quelconque de la surface libre se construit à partir du gradient de la fonction $S(x, y, z, t)$:

$$\vec{n}_s = \frac{\nabla S}{\|\nabla S\|} = \frac{(-\frac{\partial Z_s}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial Z_s}{\partial y} \vec{j} + \vec{k})}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \quad (\text{III-12})$$

- A la surface libre, on a :

$$\left. \frac{dS(x, y, z, t)}{dt} \right|_{z=Z_s} = 0$$

Cette condition est appelée condition cinématique de surface.

$$\text{On a : } \frac{dS}{dt} = \frac{dz}{dt} - \frac{dZ_s}{dt} = 0 \quad \text{d'où} \quad \frac{dz}{dt} = \frac{dZ_s}{dt}$$

$$\text{Sachant que } dZ_s = \frac{\partial Z_s}{\partial t} dt + \frac{\partial Z_s}{\partial x} dx + \frac{\partial Z_s}{\partial y} dy$$

$$\text{ceci donne } \left. \frac{dz}{dt} \right|_{z=Z_s} = \bar{u}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \bar{v}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\partial Z_s}{\partial t} \quad (\text{III-13})$$

On sait que la quantité $\frac{dz}{dt}$ représente la vitesse suivant l'axe z et elle est égale à \bar{w} .

En remplaçant $\frac{dz}{dt}$ par w dans l'équation précédente (III-13), on obtient :

$$\bar{u}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \bar{v}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\partial Z_s}{\partial t} - \bar{w}(x, y, Z_s, t) = 0 \quad (\text{III-14})$$

Ce qui s'interprète en disant que la vitesse verticale d'une particule se trouvant à la surface libre est égale à la vitesse d'élévation de celle-ci.

- L'équation du fond est de la forme $F(x, y, z, t) = z - Z_F(x, y)$ (le fond est supposé immobile).

- Le vecteur normal \vec{n}_f en un point quelconque appartenant au fond se construit de la même façon que \vec{n}_s :

$$\vec{n}_f = \frac{\nabla F}{\|\nabla F\|} = \frac{(-\frac{\partial Z_f}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial Z_f}{\partial y} \vec{j} + \vec{k})}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_f}{\partial y}\right)^2 + 1}} \quad (\text{III-15})$$

- Au fond du canal, on a : $z = Z_F(x, y) : \left. \frac{dF(x, y, z, t)}{dt} \right|_{z=Z_F} = 0$

$$\text{d'où : } \frac{dz}{dt} = \frac{dZ_F}{dt}$$

$$dZ_F = \frac{\partial Z_F}{\partial t} dt + \frac{\partial Z_F}{\partial x} dx + \frac{\partial Z_F}{\partial y} dy$$

$$d'où : \frac{dZ_F}{dt} = \frac{\partial Z_F}{\partial t} + \bar{u}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \bar{v}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y}$$

Puisque le fond ne change pas avec le temps (fond immobile), alors la dérivée de $\frac{dZ_F}{dt}$ est nulle.

$$\text{On a donc : } \frac{dZ_F}{dt} - \bar{u}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} - \bar{v}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} = 0,$$

d'où :

$$\bar{w}(x, y, Z_F, t) - \bar{u}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} - \bar{v}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} = 0 \quad (\text{III-16})$$

Ce qui signifie qu'au fond (limite solide fixe), la vitesse verticale doit être nulle.

d. Intégration selon la verticale de la dérivée d'une fonction quelconque

- Intégration selon la verticale en espace

$$\frac{\partial(HG)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\int_{Z_F}^{Z_S} g dz \right) = g(Z_S) \frac{\partial Z_S}{\partial x_i} - g(Z_F) \frac{\partial Z_F}{\partial x_i} + \int_{Z_F}^{Z_S} \frac{\partial g}{\partial x_i} dz \quad (\text{III-17})$$

avec, $i = 1$ pour x et $i = 2$ pour y .

Il en résulte l'expression de la moyenne (sur la hauteur d'eau) d'une dérivée selon x et y :

Dans la direction x :

$$\frac{\partial(HG)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{Z_F}^{Z_S} g dz \right) = g(Z_S) \frac{\partial Z_S}{\partial x} - g(Z_F) \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \int_{Z_F}^{Z_S} \frac{\partial g}{\partial x} dz$$

$$D'où : \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) = \frac{1}{H} \frac{\partial(HG)}{\partial x} + \frac{1}{H} g(Z_F) \frac{\partial Z_F}{\partial x} - \frac{1}{H} g(Z_S) \frac{\partial Z_S}{\partial x}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{1}{H} \frac{\partial(HG)}{\partial x} - \frac{1}{H} \left(g \left\| \bar{n}_f \right\| n_x \right)_{z=Z_f} + \frac{1}{H} \left(g \left\| \bar{n}_s \right\| n_x \right)_{z=Z_s} \quad (\text{III-18})$$

Flux à travers le fond

Flux à travers la surface

Avec le même raisonnement, nous obtenons pour y :

$$\frac{\partial g}{\partial y} = \frac{1}{H} \frac{\partial(HG)}{\partial y} - \frac{1}{H} \left(g \left\| \bar{n}_f \right\| n_y \right)_{z=Z_f} + \frac{1}{H} \left(g \left\| \bar{n}_s \right\| n_y \right)_{z=Z_s} \quad (\text{III-19})$$

Flux à travers le fond

Flux à travers la surface

Dans la direction verticale z , nous obtenons l'expression suivante :

$$\frac{\partial g}{\partial z} = \frac{1}{H} \left(\bar{w}(x, y, Z_S, t) - \bar{w}(x, y, Z_F, t) \right) \quad (\text{III-20})$$

• Intégration selon la verticale en temps

$$\frac{\partial \overline{HG}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{Z_f}^{Z_s} g dz \right) = g(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial t} - g(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \int_{Z_f}^{Z_s} \frac{\partial g}{\partial t} dz \quad (\text{III-21})$$

$$\frac{\partial \overline{g}}{\partial t} = \frac{1}{H} \frac{\partial (HG)}{\partial t} - \frac{1}{H} g(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial t}$$

En tenant compte de la condition cinématique à la surface libre, nous obtenons :

$$\frac{\partial \overline{g}}{\partial t} = \frac{1}{H} \frac{\partial (HG)}{\partial t} - \frac{1}{H} \left(g \cdot \vec{V} \cdot \vec{n}_s \parallel \vec{n}_s \right)_{z=Z_s} \quad (\text{III-22})$$

IV. APPLICATION DE LA MOYENNE SUR LA VERTICALE

1. Equation de continuité

L'application de l'opérateur de moyenne à l'équation de continuité donne :

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} \right) dz = 0 \quad (\text{III-23})$$

En notant U, V les composantes horizontales de la vitesse moyennées selon la verticale, on obtient :

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H(x, y, t)} \int_{Z_f}^{Z_s} \overline{u}(x, y, z, t) dz \quad (\text{III-24})$$

$$V(x, y, t) = \frac{1}{H(x, y, t)} \int_{Z_f}^{Z_s} \overline{v}(x, y, z, t) dz \quad (\text{III-25})$$

L'application de la règle de Leibniz donne :

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} \right) dz = \frac{1}{H} \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{1}{H} \overline{u}(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial x} - \frac{1}{H} \overline{u}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial (HV)}{\partial y} + \frac{1}{H} \overline{v}(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \frac{1}{H} \overline{v}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial y}$$

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} \right) dz = \frac{1}{H} \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial (HV)}{\partial y} + \frac{1}{H} \left(\overline{u}(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \overline{v}(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial y} \right) + \frac{1}{H} \left(-\overline{u}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial x} - \overline{v}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{1}{H} (\overline{w}(Z_s) - \overline{w}(Z_f)) \right)$$

En utilisant la condition de la surface libre :

$$\overline{u}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \overline{v}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\partial Z_s}{\partial t} = 0$$

et celle au fond :

$$-\bar{u}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} - \bar{v}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} = 0$$

on obtient :

$$\frac{\partial Z_s}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0$$

puisque $Z_s(x, y, t) = Z_f(x, y) + H(x, y, t) \Rightarrow \frac{\partial Z_s}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial t}$ l'équation de continuité moyennée sur la verticale s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \tag{III-26}$$

2. Equation de la Dynamique

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= \bar{c}_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \Delta \bar{u} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} &= \bar{c}_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \nu \Delta \bar{v} \\ 0 &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} \end{aligned} \right. \tag{III-27}$$

Nous procédons à l'intégration selon la verticale de ces équations terme par terme. Avant de passer à cette étape nous allons introduire l'équation de continuité dans les équations constituant le système précédent.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} &= \bar{c}_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \nu \Delta \bar{u} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} &= \bar{c}_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \nu \Delta \bar{v} \\ 0 &= g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} \end{aligned} \right. \tag{III-28}$$

On procède au moyennage des équations comme suit :

a. Equation dynamique selon la direction x

• Les termes de variation en en temps et de transport convectif

Pour la direction x, on prend la moyenne des termes de variation en temps et de transport convectif de l'équation de la dynamique projetée sur l'axe des x :

$$\begin{aligned} \frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) dz &= \frac{1}{H} \frac{\partial(HU)}{\partial t} - \frac{1}{H} \bar{u}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial t} \\ &+ \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{1}{H} \bar{u}(Z_f) \bar{u}(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial x} - \frac{1}{H} \bar{u}(Z_s) \bar{u}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial x} \\ &+ \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{1}{H} \bar{u}(Z_f) \bar{v}(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \frac{1}{H} \bar{u}(Z_s) \bar{v}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial y} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{uu}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{uv}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{uw}}{\partial z} \right) dz = \frac{1}{H} \frac{\partial (HU)}{\partial t} - \frac{1}{H} \bar{u}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{uu}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{uv}}{\partial y} + \frac{1}{H} \bar{u}(Z_f) \left[\bar{u}(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \bar{v}(Z_f) \frac{\partial Z_f}{\partial y} \right] + \frac{1}{H} \bar{u}(Z_s) \left[-\bar{u}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial x} - \bar{v}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial y} \right]$$

En tenant compte des conditions à la surface libre et au fond, nous obtiendrons :

$$-\bar{w}(x, y, Z_s, t) + \bar{u}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \bar{v}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\partial Z_s}{\partial t} = 0 \text{ (Condition à la surface)}$$

$$\bar{w}(x, y, Z_f, t) - \bar{u}(x, y, Z_f, t) \frac{\partial Z_f}{\partial x} - \bar{v}(x, y, Z_f, t) \frac{\partial Z_f}{\partial y} = 0 \text{ (Condition au fond)}$$

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{uu}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{uv}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{uw}}{\partial z} \right) dz = \frac{1}{H} \frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{1}{H} \bar{u}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Huu}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Huv}}{\partial y} + \frac{1}{H} \bar{u}(Z_s) \frac{\partial Z_s}{\partial t}$$

Nous concluons que la moyenne selon la verticale des termes convectifs et en temps selon la direction x s'écrivent comme suit :

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{uu}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{uv}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{uw}}{\partial z} \right) dz = \frac{1}{H} \frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Huu}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Huv}}{\partial y}$$

$$\text{On pose : } \beta_{uu} = \frac{1}{HU \cdot U} \int_{Z_f}^{Z_s} \bar{u \cdot u} dz$$

$$\beta_{uv} = \beta_{vu} = \frac{1}{HUV} \int_{Z_f}^{Z_s} \bar{uv} dz$$

$$\beta_{vv} = \frac{1}{HV \cdot V} \int_{Z_f}^{Z_s} \bar{v \cdot v} dz$$

$$\frac{1}{H} \frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Huu}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Huv}}{\partial y} = \frac{1}{H} \frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial (\beta_{uu} HU \cdot U)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial (\beta_{uv} HU \cdot V)}{\partial y} \quad (\text{III-29})$$

b. Equation dynamique selon la direction y

On suit le même raisonnement que pour la direction x :

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{uv}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{vv}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{vw}}{\partial z} \right) dz = \frac{1}{H} \frac{\partial (HV)}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Huv}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Hvv}}{\partial y}$$

en utilisant les notations β_{uu} , β_{uv} , β_{vv} et β_{vw} , on a :

$$\frac{1}{H} \frac{\partial (HV)}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Huv}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{Hvv}}{\partial y} = \frac{1}{H} \frac{\partial (HV)}{\partial t} + \frac{1}{H} \frac{\partial (\beta_{uv} HU \cdot V)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial (\beta_{vv} HV \cdot V)}{\partial y} \quad (\text{III-30})$$

β_{uu} , β_{uv} , β_{vv} et β_{vw} sont des termes correctifs qui résultent de l'intégration selon la verticale des équations du transport de la vitesse. Ils traduisent l'action des fluctuations sur le

de ce mouvement moyen, ils expliquent de ce fait 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 correction du flux de la vitesse dépendent de la distribution de la vitesse verticale, et sont souvent supposés égaux à l'unité (lorsqu'on a une distribution constante de la vitesse) [38].

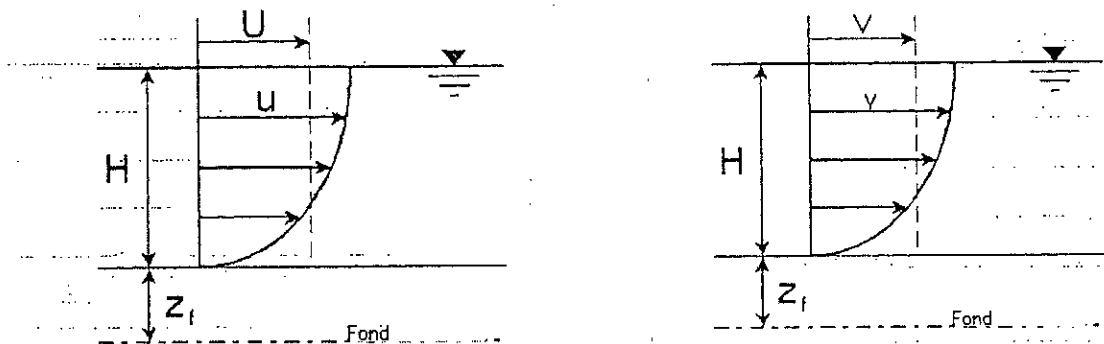


Figure III.5: Profils de vitesse selon la verticale dans les directions x et y

- **Les termes en pression**

L'expression donnant la pression découle de l'équation du mouvement suivant la verticale.

L'équation selon la verticale est donnée par :

$$g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} = 0 \quad (\text{III-31})$$

La pression $P(x, y, z, t)$ n'étant donc due qu'au poids de la colonne d'eau au-dessus du point de coordonnées (x, y, z) . Cela découle bien sur de l'hypothèse de la pression hydrostatique selon laquelle l'accélération due à la pression équilibre la gravité.

L'intégration de cette équation selon la verticale donne :

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} dz = -\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \rho g dz \Rightarrow \frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} dz = -\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \rho g dz$$

La pression au niveau d'un point M ayant une hauteur Z_m par rapport au plan de référence

$$\text{est égale à : } \int_{Z_m}^{Z_s} \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} dz = - \int_{Z_m}^{Z_s} \rho g dz$$

De manière générale la pression en un point situé à une altitude z par rapport au plan de référence est donnée par

$$\bar{P}(x, y, z, t) = \bar{P}(x, y, Z_s, t) + \rho g (Z_s(x, y, t) - z)$$

avec,

$$\bar{P}(x, y, Z_s, t) = P_{\text{atm}}, \text{ on a : } \bar{P}(x, y, z, t) = P_{\text{atm}} + \rho g (Z_s(x, y, t) - z)$$

La dérivée partielle de la pression par rapport à x et y auront pour expression :

$$\frac{\partial \bar{P}(x, y, z, t)}{\partial x} = \rho g \frac{\partial Z_s(x, y, t)}{\partial x} \quad (\text{III-32})$$

$$\frac{\partial \bar{P}(x, y, z, t)}{\partial y} = \rho g \frac{\partial Z_s(x, y, t)}{\partial y} \quad (\text{III-33})$$

Ceci est vrai si la masse volumique ne varie pas suivant l'horizontale.

Puisque ces quantités ne dépendent pas de z , elles ne seront pas donc affectées par l'opérateur moyenne :

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \frac{\partial \bar{P}(x, y, z, t)}{\partial x} dz = \rho g \frac{\partial Z_s(x, y, t)}{\partial x} \quad (\text{III-34})$$

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \frac{\partial \bar{P}(x, y, z, t)}{\partial y} dz = \rho g \frac{\partial Z_s(x, y, t)}{\partial y} \quad (\text{III-35})$$

• Forces de Coriolis

Dans la direction x , la composante de la force de Coriolis est donnée :

$$c_1 = 2|\omega|(v \sin \varphi - w \cos \varphi)$$

Le moyennage de cette quantité selon la verticale donne :

$$\frac{1}{H} \int_{z_f}^{z_s} c_1 dz = 2|\omega| \frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} (\bar{v} \sin \varphi - \bar{w} \cos \varphi) dz$$

$$\frac{1}{H} \int_{z_f}^{z_s} c_1 dz = 2|\omega| \frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} (\bar{v} \sin \varphi - \bar{w} \cos \varphi) dz = 2|\omega| V \left(\sin \varphi - \frac{W}{V} \cos \varphi \right)$$

$$\frac{1}{H} \int_{z_f}^{z_s} c_1 dz = 2|\omega| V \left(\sin \varphi - \frac{W}{V} \cos \varphi \right) \quad (\text{III-36})$$

La valeur moyenne W de la vitesse verticale peut être négligée devant la valeur moyenne de la vitesse horizontale V .

$$\frac{1}{H} \int_{z_f}^{z_s} c_1 dz = 2|\omega| V \sin \varphi$$

On pose $\Omega = 2|\omega| \sin \varphi$ ce paramètre est appelé *paramètre de Coriolis*, ce qui donne

$$\frac{1}{H} \int_{z_f}^{z_s} c_1 dz = \Omega V \quad (\text{III-37})$$

Dans la direction y , on a :

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} c_2 dz = -2 |\omega| \frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \bar{u} \sin \varphi dz = -2U|\omega| \sin \varphi$$

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} c_2 dz = -2U|\omega| \sin \varphi = -\Omega U \quad \text{(III-38)}$$

Pour la plupart des courants où la proportion de la largeur sur la profondeur est grande (l'écoulement sur presque toutes les rivières), l'effet de Coriolis sera petit et peut être négligé [39].

• **Les termes de frottement visqueux**

Nous allons procéder étape par étape comme suit :

Dans la direction x :

$$\bar{v} \Delta \bar{u} = \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{xy}}{\partial y} + \left(\bar{\tau}_{xx} \Big|_{Z_f} \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \bar{\tau}_{xy} \Big|_{Z_f} \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \bar{\tau}_{xz} \Big|_{Z_f} - \bar{\tau}_{xy} \Big|_{Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial x} - \bar{\tau}_{xy} \Big|_{Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \bar{\tau}_{xz} \Big|_{Z_s} \right) \right]$$

$$\bar{v} \Delta \bar{u} = \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{xy}}{\partial y} + \left(-\bar{\tau}_{xj} \|\nabla F\| n_j \Big|_{z=Z_f} + \bar{\tau}_{xj} \|\nabla S\| n_j \Big|_{z=Z_s} \right) \right] \quad \text{(III-39)}$$

L'équation (III.39) peut se mettre sous la forme

$$\bar{v} \Delta \bar{u} = \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{xy}}{\partial y} + \|\nabla S\| T_x(x, y, Z_s, t) - \|\nabla F\| T_x(x, y, Z_f, t) \right] \quad \text{(III-40)}$$

Dans la direction y :

$$\bar{v} \Delta \bar{v} = \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{yy}}{\partial y} + \left(\bar{\tau}_{yy} \Big|_{Z_f} \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \bar{\tau}_{yx} \Big|_{Z_f} \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \bar{\tau}_{yz} \Big|_{Z_f} - \bar{\tau}_{yx} \Big|_{Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial x} - \bar{\tau}_{yx} \Big|_{Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \bar{\tau}_{xz} \Big|_{Z_s} \right) \right]$$

$$\bar{v} \Delta \bar{v} = \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{yy}}{\partial y} + \left(-\bar{\tau}_{yj} \|\nabla F\| n_j \Big|_{z=Z_f} + \bar{\tau}_{yj} \|\nabla S\| n_j \Big|_{z=Z_s} \right) \right] \quad \text{(III-41)}$$

L'équation (III.41) peut se mettre sous la forme

$$\bar{v} \Delta \bar{v} = \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial \bar{H} \bar{t}_{yy}}{\partial y} + \|\nabla S\| T_y(x, y, Z_s, t) - \|\nabla F\| T_y(x, y, Z_f, t) \right] \quad \text{(III-42)}$$

où

T_x, T_y désignent les composantes horizontales du vecteur contrainte \bar{T} défini pour un vecteur unitaire \bar{n} par

$$\bar{T} = \tau \bar{n} \quad \text{(III-43)}$$

Pour un point appartenant à la surface libre, les composantes horizontales du \bar{T} sont données par les expressions suivantes

$$-T_x(x, y, Z_s, t) \|\nabla S\| = \bar{\tau}_{xx}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \bar{\tau}_{xy}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial y} - \bar{\tau}_{xz}(x, y, Z_s, t) \quad (\text{III-44})$$

$$-T_y(x, y, Z_s, t) \|\nabla S\| = \bar{\tau}_{yx}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \bar{\tau}_{yy}(x, y, Z_s, t) \frac{\partial Z_s}{\partial y} - \bar{\tau}_{yz}(x, y, Z_s, t) \quad (\text{III-45})$$

Pour un point appartenant au fond, les composantes horizontales du \bar{T} sont données par les expressions suivantes

$$-T_x(x, y, Z_f, t) \|\nabla F\| = \bar{\tau}_{xx}(x, y, Z_f, t) \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \bar{\tau}_{xy}(x, y, Z_f, t) \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \bar{\tau}_{xz}(x, y, Z_f, t) \quad (\text{III-46})$$

$$-T_y(x, y, Z_f, t) \|\nabla F\| = \bar{\tau}_{yx}(x, y, Z_f, t) \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \bar{\tau}_{yy}(x, y, Z_f, t) \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \bar{\tau}_{yz}(x, y, Z_f, t) \quad (\text{III-47})$$

L'apparition des composantes horizontales du vecteur contrainte sur le fond, dans les écoulements moyennés est très avantageuse car elle permet de prendre en compte le frottement exercé par le fond sur l'écoulement. La même remarque s'applique aux composantes horizontales du vecteur contrainte à la surface libre de l'eau qui permettent de prendre en compte l'action du vent.

Les termes $-\frac{1}{\rho H} \bar{\tau}_{xj} \|\nabla F\| n_j \Big|_{z=Z_f}$, $-\frac{1}{\rho H} \bar{\tau}_{yj} \|\nabla F\| n_j \Big|_{z=Z_f}$, $\frac{1}{\rho H} \bar{\tau}_{xj} \|\nabla S\| n_j \Big|_{z=Z_s}$, $\frac{1}{\rho H} \bar{\tau}_{yj} \|\nabla S\| n_j \Big|_{z=Z_s}$ des équations représentent les forces de frottement par unité de masse au fond et en surface dans les directions x et y.

Dans la direction x :

$$F_{\text{frottement-x}}^f = -\frac{1}{\rho H} \bar{\tau}_{xj} \|\nabla F\| n_j \Big|_{z=Z_f} \quad (\text{III-48})$$

$$F_{\text{frottement-x}}^s = \frac{1}{\rho H} \bar{\tau}_{xj} \|\nabla S\| n_j \Big|_{z=Z_s} \quad (\text{III-49})$$

Dans la direction y :

$$F_{\text{frottement-y}}^f = -\frac{1}{\rho H} \bar{\tau}_{yj} \|\nabla F\| n_j \Big|_{z=Z_f} \quad (\text{III-50})$$

$$F_{\text{frottement-y}}^s = \frac{1}{\rho H} \bar{\tau}_{yj} \|\nabla S\| n_j \Big|_{z=Z_s} \quad (\text{III-51})$$

• Prise en compte des frottements en surface

Les courants de surface sont le résultat d'une interaction entre la surface libre et l'atmosphère. L'atmosphère exerce par l'intermédiaire des vents une force d'entraînement mécanique (force de frottement) sur les eaux de surface [36].

Le frottement engendré par le vent à la surface libre de l'eau peut être caractérisé par une contrainte de cisaillement. Il peut être négligé dans certains cas mais important dans d'autres.

Les contraintes totales de surface seront alors données par les expressions :

$$\tau_x^s = \rho_{\text{air}} a_{\text{vent}} U_{\text{vent}} \sqrt{U_{\text{vent}}^2 + V_{\text{vent}}^2} \quad (\text{III-52})$$

$$\tau_x^s = \rho_{\text{air}} a_{\text{vent}} V_{\text{vent}} \sqrt{U_{\text{vent}}^2 + V_{\text{vent}}^2} \quad (\text{III-53})$$

avec, a_{vent} : le coefficient de résistance du vent

$U_{\text{vent}}, V_{\text{vent}}$: composantes de la vitesse du vent.

F_x^s, F_y^s : représentent les forces de frottement de surface par unité de masse, elles ont l'unité d'une accélération.

Les valeurs de a_{vent} peuvent être obtenues par différentes formules. Parmi les formules utilisées nous trouvons [40]:

$$\text{Si } |\vec{V}| < 5 \text{ m/s } a_{\text{vent}} = 0.565 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Si } 5 < |\vec{V}| < 19.22 \text{ m/s } a_{\text{vent}} = (-0.12 + 0.137 |\vec{V}|) \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Si } |\vec{V}| > 19.22 \text{ m/s } a_{\text{vent}} = 2.513 \cdot 10^{-3}$$

V : Vitesse du vent à proximité de la surface d'eau.

• Prise en compte des frottements au fond

Les frottements sur les parois, principalement sur fond et sur les berges, agissent par le biais de la contrainte tangentielle au fond. Elle s'oppose à la direction de l'écoulement. Cette grandeur peut être reliée aux caractéristiques moyennes de l'écoulement [41].

En général, le frottement au fond est supposé proportionnel au carré de la vitesse. Comme il s'exerce dans la direction opposée à celle de la vitesse, on peut l'exprimer sous la forme :

$$\bar{T}(x, y, Z_f, t) = -\rho C_f \|\bar{V}(x, y, Z_f, t)\| \bar{V} \quad (\text{III-54})$$

où, C_f est le coefficient de frottement au fond qui dépend essentiellement de la rugosité du fond du canal. Le coefficient de frottement s'exprime en fonction du coefficient de Chézy sous la forme :

$$C_f = \frac{g}{C^2} = \frac{gn}{H^{1/3}} \quad (\text{III-55})$$

A la paroi, l'effet de la turbulence est négligeable et tend vers 0. Ainsi donc, la contrainte se réduit uniquement au cisaillement visqueux.

$$\tau_p = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (\text{III-56})$$

La vitesse de frottement au fond u_* s'exprime par relation suivante :

$$u_* = \left(\frac{\tau_p}{\rho} \right)^{1/2} \quad (\text{III-57})$$

La vitesse de frottement u_* est reliée à la vitesse moyenne débitante V et le coefficient de perte de charge λ_c

$$u_* = \sqrt{\frac{\lambda_c}{8}} \cdot V \quad (\text{III-58})$$

λ_c : Coefficient de perte de charge,

Cette formule est valable pour toutes les formes de conduit et pour toutes les conditions d'écoulement [36].

Lorsque l'écoulement est turbulent λ_c dépend de la nature du fond et de la hauteur d'eau dans le canal qui est elle aussi une inconnue dans les problèmes d'écoulement à surface libre. C'est la raison, d'ailleurs, pour laquelle on préfère utiliser un coefficient qui traduise uniquement l'effet de la rugosité du fond (*Coefficient de Strickler*).

$$K_s = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda_c R^{4/3}}} \quad (\text{III-59})$$

Dans le cas des écoulements en eau peu profonde on prend $R_h = H$, ce qui conduit à :

$$K_s = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{\lambda_c H^{1/3}}} \quad (\text{III-60})$$

les termes traduisant le frottement du fond dans les équation du mouvement moyen peuvent se mettre sous la forme :

$$\tau_x^f = -\frac{\|\nabla F\|}{\rho H} T_x(x, y, Z_f, t) \quad (\text{III-61})$$

$$\tau_y^f = -\frac{\|\nabla F\|}{\rho H} T_y(x, y, Z_f, t) \quad (\text{III-62})$$

où :

$$\tau_x^f = \frac{\|\nabla F\|}{H} \cdot \frac{g}{C^2} U \sqrt{U^2 + V^2} \quad (\text{III-63})$$

$$\tau_y^f = \frac{\|\nabla F\|}{H} \cdot \frac{g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (\text{III-64})$$

• Les termes turbulents (tenseur de Reynolds)

Le moyennage des termes du tenseur de Reynolds se fait de la même façon que pour les termes visqueux.

Dans la direction x :

$$\frac{\partial \overline{u \cdot u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u \cdot v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u \cdot w}}{\partial z} = \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{u \cdot u}}{\partial x} - \left[\frac{1}{H} \overline{u \cdot u} \right]_{z=Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{1}{H} \overline{u \cdot u} \Big|_{z=Z_f} \frac{\partial Z_f}{\partial x}$$

$$+ \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{u \cdot v}}{\partial y} - \frac{1}{H} \overline{u \cdot v} \Big|_{z=Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{1}{H} \overline{u \cdot v} \Big|_{z=Z_s} \frac{\partial Z_f}{\partial y} + \frac{1}{H} \left(\overline{u \cdot w} \Big|_{z=Z_s} - \overline{u \cdot w} \Big|_{z=Z_f} \right)$$

$$\frac{\partial \overline{u \cdot u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u \cdot v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u \cdot w}}{\partial z} = \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{u \cdot u}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{u \cdot v}}{\partial y} - \frac{1}{H} \left(\overline{u \cdot u} \Big|_{z=Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{1}{H} \overline{u \cdot v} \Big|_{z=Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \overline{u \cdot w} \Big|_{z=Z_s} \right)$$

$$+ \frac{1}{H} \left(\overline{u \cdot u} \Big|_{z=Z_f} \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \overline{u \cdot v} \Big|_{z=Z_s} \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \overline{u \cdot w} \Big|_{z=Z_f} \right)$$

$$\frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}} + \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}} + \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{w}} \right) dz = \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}}{\partial y} \quad (\text{III-65})$$

$$-\frac{1}{H} \|\nabla S\| R_{xj} n_j \Big|_{z=Z_s} - \frac{1}{H} \|\nabla F\| R_{xj} n_j \Big|_{z=Z_f}$$

Dans la direction y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{w}}}{\partial z} &= \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}}{\partial x} - \frac{1}{H} \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}} \Big|_{z=Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{1}{H} \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}} \Big|_{z=Z_f} \frac{\partial Z_f}{\partial x} \\ &+ \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}}{\partial y} - \frac{1}{H} \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \Big|_{z=Z_s} \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{1}{H} \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \Big|_{z=Z_s} \frac{\partial Z_f}{\partial y} + \frac{1}{H} \left(\overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{w}} \Big|_{z=Z_s} - \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{w}} \Big|_{z=Z_f} \right) \\ \frac{1}{H} \int_{Z_f}^{Z_s} \left(\overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}} + \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} + \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{w}} \right) dz &= \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial H \overline{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}}{\partial y} \end{aligned} \quad (\text{III-66})$$

$$-\frac{1}{H} \|\nabla S\| R_{yj} n_j \Big|_{z=Z_s} - \frac{1}{H} \|\nabla F\| R_{yj} n_j \Big|_{z=Z_f}$$

En posant $Z_s = Z_f + H$ l'écriture du system de Saint venant en mouvement moyen en tenant compte de la turbulence s'écrit alors sous la forme suivante :

Dans la direction x :

$$\frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta_{uu} HU.U)}{\partial x} + \frac{\partial (\beta_{uv} HU.V)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_f(x, y, t)}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial H \overline{\tau_{xx}}}{\partial x} - \frac{\partial H \overline{\tau_{xy}}}{\partial y} + (\tau_x^f - \tau_x^s) \right]$$

$$+ \frac{\partial H \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}}}{\partial x} + \frac{\partial H \overline{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}}{\partial y} - \|\nabla S\| R_{xj} n_j \Big|_{z=Z_s} + \|\nabla F\| R_{xj} n_j \Big|_{z=Z_f} - \Omega HV = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta_{uu} HU.U)}{\partial x} + \frac{\partial (\beta_{uv} HU.V)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_f(x, y, t)}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} \\ + \frac{1}{\rho} \left[(\tau_x^f - \tau_x^s) + \frac{\partial H}{\partial x} (\overline{\rho u \cdot u} - \tau_{xx}) + \frac{\partial H}{\partial y} (\overline{\rho u \cdot v} - \tau_{xy}) \right] \end{aligned} \quad (\text{III-7})$$

$$-\|\nabla S\| R_{xj} n_j \Big|_{z=Z_s} + \|\nabla F\| R_{xj} n_j \Big|_{z=Z_f} - \Omega HV = 0$$

Dans la direction y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (HV)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta_{uu} HV.U)}{\partial x} + \frac{\partial (\beta_{uv} HV.V)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_f(x, y, t)}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} \\ + \frac{1}{\rho} \left[(\tau_y^f - \tau_y^s) + \frac{\partial H}{\partial x} (\overline{\rho u \cdot v} - \tau_{xy}) + \frac{\partial H}{\partial y} (\overline{\rho v \cdot v} - \tau_{yy}) \right] \end{aligned} \quad (\text{III-68})$$

$$-\|\nabla S\| R_{yj} n_j \Big|_{z=Z_s} + \|\nabla F\| R_{yj} n_j \Big|_{z=Z_f} + \Omega HU = 0$$

V. MODELISATION DE LA TURBULENCE

L'écoulement turbulent est un mode naturel de mouvement de fluide visqueux où des mécanismes internes d'échange énergétiques assurent au sein même de l'écoulement, la création et le maintien de toute une hiérarchie de mouvements chaotiques répartis continûment sur une large gamme d'échelles macroscopiques [42].

Si le problème des fluides laminaires est relativement simple à résoudre, le calcul des fluides turbulents par les équations de Navier Stokes est encore un domaine en pleine extension.

La modélisation de la turbulence est abordée de deux façons différentes, soit par la viscosité turbulente ou par les équations de transport des tensions de Reynolds [43].

1. Modèles du premier ordre

La notion de viscosité turbulente est due à Prandtl [34]. Par analogie à la loi de comportement reliant le tenseur de contraintes visqueuses au champ de vitesse, Prandtl suppose que les contraintes de Reynolds ont la même forme que les contraintes moléculaires visqueuses, mais avec une viscosité moléculaire remplacée par une viscosité turbulente. Les contraintes de turbulence s'écrivent alors sous la forme suivante [44].

$$R_{ij} = -\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (\text{III-69})$$

avec, k : est la trace du tenseur de Reynolds et représente le double de l'énergie cinétique du mouvement moyen $2k = \overline{u_i u_i}$

ν_t : est la viscosité turbulente, elle est caractéristique de l'écoulement et non pas du fluide.

Cette hypothèse de fermeture Newtonienne est bien entendu discutable, la simple proportionnalité linéaire entre les contraintes de Reynolds et le taux de déformation ne pouvant pas se démontrer, mais elle permet d'obtenir des équations de type Navier Stokes pour le champs moyen.

En portant ces équations dans le système de Reynolds, on aboutit à :

$$\begin{cases} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right] + g_i + \overline{c_i} \end{cases} \quad (\text{III-70})$$

Dans les codes d'écoulements internes, le terme $-\frac{2}{3} k \delta_{ij}$ est souvent omis car il joue le même rôle qu'une pression. Ici, la pression est supposé hydrostatique, il n'est plus possible d'y intégrer ce terme qui devra donc apparaître dans la résolution numérique [37].

Pour pouvoir résoudre les équations de Reynolds il faut fermer le problème, c'est à dire exprimer le tenseur inconnu R_{ij} en fonction de 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)

• Deux équations de transport- diffusion (modèle à deux équations)

a. Modèle à longueur de mélange : 0 équations

Ce modèle est largement utilisé depuis 1925. dans ce modèle la viscosité turbulente ν_t sera proportionnelle à une échelle de vitesse turbulente θ et à une échelle de longueur l . Ces deux valeurs doivent être des caractéristiques du mouvement turbulent de grande échelle (défini par les grands tourbillons) puisque c'est eux qui sont à l'origine du transport de la chaleur, de la masse et donc contribuent aux corrélations $\overline{u_i u_j}$. [45].

b. Modèle de Prandtl Kolmogorov : 1 équation

La fermeture à une équation se fait grâce à la proposition de Kolmogorov Prandtl en utilisant l'équation qui relie la viscosité turbulente avec la racine de l'énergie cinétique turbulente et la longueur l qui reste donnée algébriquement [46].

$$\nu_t = C_\mu l_m \sqrt{k} \quad (\text{III-71})$$

La viscosité dans ce cas dépendra de l'énergie cinétique d'agitation turbulente dont la racine carrée est prise comme échelle de vitesse significative. La valeur de cette quantité est obtenue après résolution de l'équation d'évolution (transport de k) préalablement modélisée.

$$\nu_t = C_\mu l_m \sqrt{k} \quad (\text{III-72})$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = C_\mu l_m \sqrt{k} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{C_\mu l_m \sqrt{k}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) - C_d \frac{k^{3/2}}{l_m} \quad (\text{III-73})$$

l_m : est une loi empirique de longueur de mélange.

$$C_\mu = 1 \quad \sigma_k = 1 \quad C_d = 0.07 \text{ à } 0.09$$

c. Modèle $k-\varepsilon$: 2 équations

C'est un modèle à viscosité turbulente que l'on doit à Launder et Spalding (1972). Ce modèle est fondé sur le calcul des grandeurs physiques représentatives de la turbulence dans l'écoulement. Pour les écoulements à grand nombre de Reynolds (turbulence développée), la viscosité turbulente est donnée sous la forme [36], [44].

$$\nu_t = C_v \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{III-74})$$

avec, k : L'énergie cinétique turbulente et ε : Taux de dissipation $\varepsilon = \nu \frac{\partial u_i \partial u_i}{\partial x_j \partial x_j}$

La détermination de ν_t , en tout point de l'écoulement, est alors obtenue en rajoutant deux (02) équations de bilan supplémentaires au système de reynolds.

- Une équation pour l'énergie cinétique turbulente
- Une équation pour le taux de dissipation.

La première équation est sous la forme suivante :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon \quad (\text{III-75})$$

P_k : est le taux de production de l'énergie turbulente résultant de l'interaction des contraintes turbulentes avec le mouvement moyen. ce taux est exprimé par la formule suivante

$$P_k = \nu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (\text{III-76})$$

La seconde équation est sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) - C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{III-77})$$

Les constantes qui figurent dans cette équation sont déterminées par expérience:

$$C_v = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

2. Modèles de deuxième ordre

Malgré le succès des modèles de premier ordre en pratique, beaucoup d'applications, faisant intervenir des phénomènes complexes (anisotropie, ...), exigent un niveau de modélisation plus avancé. Ces modèles contrairement aux modèles de premier ordre, ne sont pas fondés sur le concept de la viscosité turbulente. Ils s'appuient sur des équations de transport pour les tensions de Reynolds. Ces modèles représentent mieux les aspects non linéaires, les instabilités, et permettent un échange d'énergie entre les mouvements moyens et fluctuants. Ils respectent aussi l'évolution de l'anisotropie de la turbulence. En effet, ils permettent une meilleure appréciation de la physique des écoulements et donnent une description plus réaliste de la turbulence. Mais malgré leurs avantages, ils ne sont pas très utilisés à cause des difficultés numériques rencontrées lors de leur manipulation. Dans le cas des écoulements cisailés les modèles de premier ordre sont plus supérieurs à ceux du second ordre [44], [47].

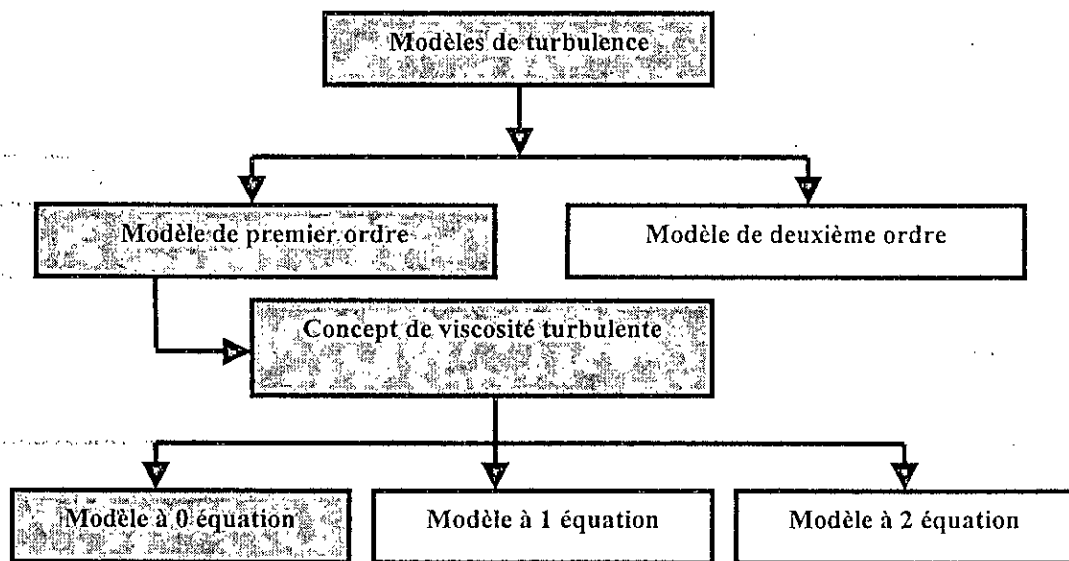


Figure III.6: Les modèles de Turbulence

$$\overline{\tau_{ij}} = -\mu \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad \text{et} \quad -\overline{\rho \cdot u_i \cdot v_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{uu} HU.U)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{uv} HU.V)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_f(x,y)}{\partial x} + \frac{1}{2}g \frac{\partial H^2}{\partial x} \tag{III-78}$$

$$+ \frac{1}{\rho} \left[(\tau_x^f - \tau_x^s) + \left(\frac{\partial HT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial HT_{xy}}{\partial y} \right) \right] - \Omega HV = 0$$

$$\frac{\partial(HV)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{uv} HUV)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{vv} HV.V)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_f(x,y)}{\partial y} + \frac{1}{2}g \frac{\partial H^2}{\partial y} \tag{III-79}$$

$$+ \frac{1}{\rho} \left[(\tau_y^f - \tau_y^s) + \left(\frac{\partial HT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial HT_{yy}}{\partial y} \right) \right] + \Omega HU = 0$$

avec :

$$T_{xx} = \overline{\rho \cdot u \cdot u} - \overline{\tau_{xx}} = -2(\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial x} \tag{III-80}$$

$$T_{xy} = \overline{\rho \cdot u \cdot v} - \overline{\tau_{xy}} = -(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \tag{III-81}$$

$$T_{yy} = \overline{\rho \cdot v \cdot v} - \overline{\tau_{yy}} = -2(\mu + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial y} \tag{III-82}$$

Le système d'équation final du modèle de Saint venant s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{uu}HUU)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{uv}HUV)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_f(x, y, t)}{\partial x} + \frac{1}{2}g \frac{\partial H^2}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[(\tau_x^f - \tau_x^s) + \left(\frac{\partial HT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial HT_{xy}}{\partial y} \right) \right] - \Omega HV = 0 \\ \frac{\partial(HV)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta_{vu}HUV)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{vv}HVV)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_f(x, y, t)}{\partial y} + \frac{1}{2}g \frac{\partial H^2}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left[(\tau_y^f - \tau_y^s) + \left(\frac{\partial HT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial HT_{yy}}{\partial y} \right) \right] + \Omega HU = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$$

Nous avons toujours $H = Z_s - Z_f$, le terme en gradient de Z_f peut donc être séparé en deux termes : un terme de gradient de la hauteur d'eau H , et un terme (qui est une donnée du problème) en gradient de Z_f . Ce dernier terme représente alors le *moteur* de l'écoulement lié à la pente du fond [36].

VI. LA SIGNIFICATION PHYSIQUE DES TERMES

Dans le tableau ci dessous, nous allons récapituler la signification physique de chaque ensemble de termes figurant dans les équations de l'écoulement moyen et son équivalent dans les équations de Saint Venant.

Termes	Signification	Equivalent
$\frac{\partial(HU)}{\partial t}$	Termes de variation en temps	$H \frac{\partial u}{\partial t}$
$\frac{\partial(\beta_{uu}HUU)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta_{uv}HUV)}{\partial y}$	Termes de transport convectif	$H \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right)$
$gH \frac{\partial Z_f(x, y, t)}{\partial x} + \frac{1}{2}g \frac{\partial H^2}{\partial x}$	Terme de pression	$H \frac{\partial P}{\partial x} = H \rho g \frac{\partial h}{\partial x}$
$-\Omega HV$	Force de Coriolis	$H \frac{1}{\rho} f_x$
$\frac{1}{\rho} \left[\left(\frac{\partial HT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial HT_{xy}}{\partial y} \right) \right]$	Termes de frottement	$\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$
τ_x^f	Termes de frottement au fond	
τ_x^s	Termes de frottement a la surface	

VII. CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions aux limites de l'écoulement à considérer dans le domaine physique (frontière et les sections intermédiaires) peuvent être résumées comme suit :

- *Sur le fond* : on peut admettre les deux cas suivants :

En toute rigueur, la condition à la limite pour la vitesse sur une paroi solide est la condition dite d'adhérence (Condition d'adhérence parfaite du fluide à la paroi, c'est-à-dire en imposant $\vec{V} = \vec{0}$ ($U = V = 0$)). En raison de la turbulence et de l'existence d'une couche limite, la vitesse près de la paroi devient rapidement non nulle. Cette condition est en fait souvent remplacée par deux conditions plus faibles : l'imperméabilité et la donnée d'une contrainte tangentielle due au frottement sur la paroi.

Sur une paroi infranchissable, la condition d'imperméabilité se traduit par la condition de glissement parfait, c'est-à-dire en imposant seulement une vitesse nulle selon la normale à la paroi et en laissant la vitesse tangentielle totalement libre, ce qui se traduit mathématiquement par : $\vec{V} \cdot \vec{n}_f = 0$ (tel que \vec{n}_f est la normale au fond).

- *Sur les frontières ouvertes*, il faudra obtenir des informations supplémentaires sur la pression, la hauteur d'eau, la vitesse et le débit.

☞ *A la section d'entrée* : on peut connaître le profil de vitesse ou un débit et éventuellement une hauteur d'eau.

☞ *A la section de sortie* : on peut dans certains cas donner la hauteur (dans le cas où le régime est fluvial ou en présence d'une singularité).

- *A la frontière libre (surface libre)* : Deux conditions sont à spécifier :

☞ Une condition cinématique $\vec{V} \cdot \vec{n}_s = 0$ c'est-à-dire en chaque point la particule fluide suit la tangente à la surface libre.

☞ Une condition dynamique exprimant la variation dans le temps de la surface libre.

Chapitre IV :

Le modèle numérique FESWMS

CHAPITRE IV : LE MODELE NUMERIQUE FESWMS

INTRODUCTION

Avec l'avènement du calcul numérique et la performance des outils de calcul, l'hydraulique a connu ces dernières années des avancées considérables.

La résolution des équations décrivant le mouvement d'un fluide réel a toujours été un véritable casse tête pour l'hydraulicien car les problèmes traités sont souvent ouverts (le nombre d'inconnues est supérieur aux nombre d'équations). Ceci est dû d'une part au caractère turbulent de l'écoulement et d'autre part à la présence des termes non linéaires dans les équations.

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 une panoplie de *codes de calcul* conçus par différents spécialistes du domaine. Parmi ces logiciels, nous pouvons citer : *PHOENICS, FLUENT, TELEMAC, HEC-2D, ...*

La modélisation des écoulements à surface libre peut être réalisée en ayant recours à différents modèles numériques [45].

- **Modèles unidimensionnels** : Ils sont généralement utilisés pour modéliser les écoulements ayant une direction privilégiée et vérifiant l'hypothèse de la pression hydrostatique. Dans ces modèles, la résolution des équations de Saint Venant 1D détermine pour chaque section la hauteur et le débit (ou la vitesse moyenne dans cette section). A titre d'exemple, nous citons : *MIKE11, HEC-2, ...*
- **Modèles bidimensionnels** : Les modèles 2D, plus complexes que les premiers résolvent les équations de Saint Venant 2D. La description du phénomène physique est plus précise puisqu'elle nous permet de déterminer la hauteur d'eau H et les deux composantes (U, V) de la vitesse moyenne sur la verticale. A titre d'exemple nous citons : *FESWMS, TELEMAC-2D, MIKE 21, River 2D, HYDROSIM, ...*
- **Modèles tridimensionnels** : Pour rendre compte de la réelle complexité des phénomènes naturels, le recours aux modèles 3D s'avère inévitable. Dans ce cas, les équations de Navier Stokes sont résolues sans tenir compte de l'hypothèse de pression hydrostatique. Les modélisations tridimensionnelles sont beaucoup moins répandues que les précédentes à cause des capacités des moyens informatiques qui ont été longtemps insuffisants pour résoudre les équations en 3D. Actuellement, les développements technologiques de l'informatique et les efforts consentis pour palier à ce problème permettent d'aller au-delà de cette restriction même si les temps de calcul restent toujours importants. A titre d'exemple nous citons : *TELEMAC 3D*

Dans ce présent travail nous avons opté pour le choix d'un modèle bidimensionnel à savoir le FESWMS. Ce dernier est du domaine public et téléchargeable sur Internet à l'adresse :

<http://water.usgs.gov/software/feswms.html>

I. PRESENTATION DU CODE FESWMS

FESWMS : Finite element Surface Water Modelling System

FESWMS est un ensemble modulaire de programmes informatiques développés pour simuler les écoulements à surface libre qui sont essentiellement à deux dimensions dans le plan horizontal. Il est conçu pour analyser l'écoulement autour des piles de ponts où les conditions hydrauliques complexes et irrégulières existent. En outre, il peut être appliqué pour l'étude d'autres types d'écoulements à surface libre : *permanent ou non permanent* [47],[48].

FESWMS calcule les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement aux niveaux des différents nœuds constituant le maillage du domaine d'écoulement. Il est applicable pour l'étude des écoulements dans les rivières (ou oueds) en eau peu profonde, les plaines inondées et les estuaires.

FESWMS permet en effet de :

- Simuler les écoulements même en présence des irrégularités topographiques ou géométriques ;
- Tenir compte des effets du frottement au fond ainsi que des phénomènes de turbulence ;
- Tenir compte du transport de sédiments au niveau du cours d'eau.
- Tenir compte des contraintes de cisaillement en surface dues au vent ;
- Tenir compte de l'effet de rotation de la terre (*accélération de Coriolis*).

Ce programme permet de résoudre les équations de la dynamique et de continuité intégrées sur la profondeur en posant différentes hypothèses fondamentales dont celle de la pression hydrostatique.

La discrétisation spatiale est de type éléments finis P^2 pour les vitesses U, V et P^1 pour la hauteur d'eau.

Le corps du modèle est formé par les trois (03) programmes, séparés mais complémentaires, suivants :

- *Le module d'introduction de données 'Data Input module' : DINMOD ;*
- *Le module de simulation proprement dit 'Depth Averaged module' : FLOMOD ;*
- *Le module de visualisation : 'Analysis output module' : ANOMOD.*

1. Données d'entrée

Pour faire tourner le code de simulation **FESWMS** un certain nombre de données doit être spécifié [49]:

- Le fichier de données définissant les conditions aux limites.
- Fichier contenant les conditions initiales.
- Le fichier contenant les propriétés des matériaux constituant le lit du cours d'eau.
- Les paramètres du modèle ainsi que les informations sur les éléments finis.

2. Données de sortie

Les fichiers de sortie sont donc :

- Le fichier des vitesses moyennes dans le plan horizontal ;
- Le fichier des niveaux d'eau.

En raison de la *non convivialité* et la *non interactivité* des pré et post processeurs (DINMOD et ANOMOD) le recours à d'autres logiciels plus interactifs et plus conviviaux grâce à leurs interfaces graphiques se trouve justifiée. Dans notre travail, nous utiliserons pour la préparation des données les logiciels EMC2 (annexe) et YAMS (Annexe) et pour la visualisation VISU (Annexe c), et MEDIT (Annexe). Nous signalons toutefois qu'ils sont développés au sein par l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA). Le module de simulation FLOMOD applique la méthode des éléments finis pour résoudre les équations qui gouvernent le phénomène physique.

II. FORMULATION DU PROBLEME DISCRET DANS FESWMS

1. Méthodes de discrétisation

Pour être résolu numériquement, un problème continu doit être transformé en un problème discret, décrit par un certain nombre d'équations algébriques. Pour discrétiser les équations de la mécanique des fluides on dispose de différentes méthodes. Les plus utilisées sont :

- La méthode des différences finies ;
- La méthode des volumes finis ;
- La méthode des éléments finis.

D'un point de vue historique, la méthode des différences finies a été la première à être utilisée en mécanique des fluides. Cette méthode est intéressante d'un point de vue numérique mais son usage est limité à des domaines de forme géométrique non complexe. Pour résoudre ce problème, la majorité des codes de calculs industriels ont recours à la méthode des volumes finis, associée à des maillages déstructurés. Cependant, pour traiter les problèmes d'interaction fluide structure, de plus en plus de logiciels utilisent la méthode des éléments finis.

Cette méthode, utilisée depuis de nombreuses années en dynamique des structures, est apparue en mécanique des fluides plus récemment [44].

a. Discrétisation temporelle

La discrétisation temporelle des équations de transport peut être illustrée en prenant comme exemple l'équation de Burger linéaire suivante [39] :

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial t} + c(x, t) \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} = f(x, t) \quad (\text{IV-1})$$

avec, la condition initiale $U(x, 0) = w(x)$.

Pour résoudre numériquement l'équation (IV-1), on propose une approximation de la fonction inconnue U par une méthode de différences finies. Pour ce faire, on introduit un pas spatial $\Delta x > 0$, un pas temporel Δt et on pose $x_j = j \Delta x$ ($j=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) ainsi que $t_n = n \Delta t$ ($n=0, 1, 2, \dots$).

• Schéma explicite

Si $U_j^n \approx U(x_j, t_n)$ est une approximation de la solution de U au point x_j et au temps t_n on aura :

$$\frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t} + c(x_j, t_n) \frac{U_{j+1}^n - U_{j-1}^n}{2\Delta x} = f(x_j, t_n) \quad (\text{IV-2})$$

pour : $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ et $n = 0, 1, 2, \dots$

L'approximation initiale est définie par : $U_j^0 \approx w(x_j)$ pour $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Le schéma 1 est appelé *schéma explicite centré*. Il permet de calculer explicitement u_j^{n+1} avec $j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ à partir des valeurs de U_j^n .

On appelle *schéma numérique explicite*, un schéma pour lequel une seule inconnue apparaît dans l'équation aux différences finies, d'une manière telle qu'il permet son évaluation en fonction des grandeurs connues, ici les $U_{j-1, n}$, $U_{j, n}$, $U_{j+1, n}$, du pas de temps précédent.

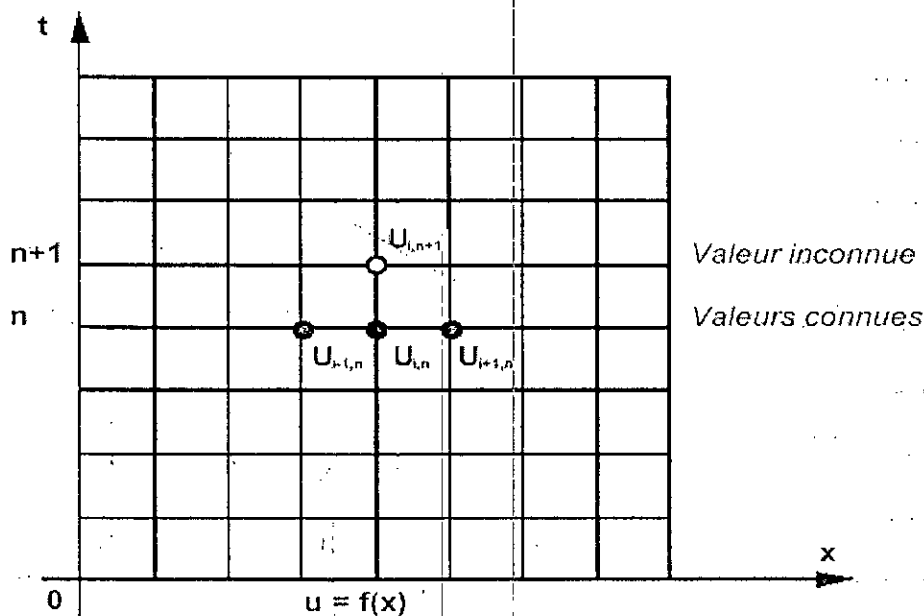


Figure IV.1 : Maillage schéma numérique explicite

Le schéma explicite centré est toujours instable. c'est un mauvais schéma numérique qu'il ne faut pas utiliser [50].

Un autre *schéma explicite décentré* est proposé pour pallier au problème de stabilité.

$$\frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t} + c(x_j, t_n) \frac{U_j^n - U_{j-1}^n}{\Delta x} = f(x_j, t_n) \text{ si } c(x_j, t_n) > 0 \text{ (schéma décentré en arrière)}$$

$$\frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t} + c(x_j, t_n) \frac{U_{j+1}^n - U_j^n}{\Delta x} = f(x_j, t_n) \text{ si } c(x_j, t_n) < 0 \text{ (schéma décentré en avant)}$$

Ce schéma permet aussi de calculer explicitement les valeurs de U_j^{n+1} à partir des valeurs de U_j^n , dans ce cas le schéma est stable si et seulement si : $\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{c_0}$, pour $c = c_0$ égale à une constante.

Dans le cas où c n'est pas constant et si nous utilisons le schéma décentré, le schéma devient stable sous la condition suivante :

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{\sup_{x \in R, t > 0} |c(x, t)|} \quad (\text{IV-3})$$

Cette condition est appelée condition de *Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)*. Dans les cas pratiques, les pas spatial et temporel doivent être choisis de manière à ce que la condition (IV-3) soit satisfaite. Ainsi, pour un pas spatial $\Delta x > 0$, on doit choisir un pas temporel

Δt plus petit que $\frac{\Delta x}{\sup |c(x, t)|}$ sinon le schéma produit, à un moment ou un autre, des

valeurs $\left| U_j^n \right|$ qui augmentent indéfiniment lorsque n augmente. On dit que le schéma est *conditionnellement stable* [51].

Le nombre de Courant est un nombre sans dimension. Il est le rapport de la vitesse avec laquelle se propagent les perturbations de l'équation différentielle partielle et de la

vitesse $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ définie par les proportions du maillage. Ce nombre joue un rôle très important,

en particulier pour l'analyse des critères de stabilité.

1. **Avantages** : La méthode est relativement facile à élaborer et à programmer.

2. **Désavantages** : Les conditions de stabilité imposent souvent des valeurs très petites pour le pas de temps, il peut en résulter des temps de calcul relativement long.

- **Schéma implicite**

1. **Avantage** : La stabilité est maintenue pour des valeurs des pas de temps beaucoup plus grands, ce qui diminue de manière parfois considérable les temps effectifs de calcul.

2. **Désavantages** : La méthode est plus complexe à mettre en œuvre. Comme des manipulations de matrices doivent être effectuées à chaque pas de temps, le temps de calcul pour un pas de temps est beaucoup plus important que pour les techniques explicites. D'autre part, comme de grands pas de temps sont utilisés, l'erreur de troncature est plus grande, et par conséquent, l'utilisation de la technique implicite pour traiter des problèmes transitoires est moins précise que les méthodes explicites. Cependant, pour les problèmes où seule compte la solution stationnaire, cette faible précision en temps ne joue pas de rôle.

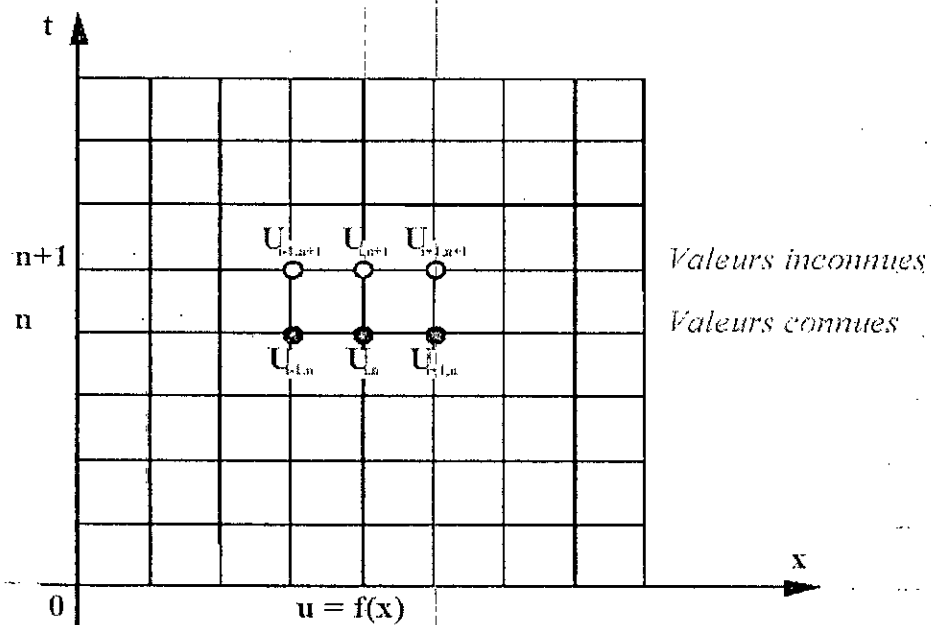


Figure IV.2 : Maillage schéma implicite

Dans le code FESWMS, la discrétisation des équations est obtenue en utilisant le *schéma aux différences finies implicite*. Ce dernier, contrairement au *schéma explicite*, a l'avantage d'être *inconditionnellement stable* quelles que soient les valeurs de Δx et de Δt .

La discrétisation de l'équation de Burger est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + c_0 \frac{\partial U}{\partial x} \approx \frac{1}{\theta \Delta t} (U^{n+1} - U^n) - \frac{1-\theta}{\theta} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)^n + c_0 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^{n+1} \quad (\text{IV-4})$$

Le premier terme de cette équation peut être réarrangé et s'écrire sous la forme :

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)^{n+1} \approx \frac{1}{\theta \Delta t} U^{n+1} - \left(\frac{1}{\theta \Delta t} U^n + \frac{1-\theta}{\theta} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)^n \right) \quad (\text{IV-5})$$

On pose : $\alpha = \frac{1}{\theta \Delta t}$ et $\beta_U = \alpha U^n + \frac{1-\theta}{\theta} \left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)^n$

Les termes β_U sont connus à chaque étape puisqu'ils dépendent des termes à l'instant initial t_0 .

De la même façon les dérivées temporelles de V et de H s'écrivent comme suit :

$$\left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)^{n+1} = \alpha V^{n+1} - \beta_V \quad \text{avec, } \beta_V = \alpha V^n + \frac{1-\theta}{\theta} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)^n \quad (\text{IV-6})$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial t} \right)^{n+1} = \alpha H^{n+1} - \beta_H \quad \text{avec, } \beta_H = \alpha H^n + \frac{1-\theta}{\theta} \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right)^n \quad (\text{IV-7})$$

b. Discrétisation spatiale : Formulation par éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode de calcul numérique apparue dans les années 1950. Elle est adaptée à la résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP), pour des problèmes stationnaires ou transitoires, linéaires ou non linéaires, et d'une à trois variables d'espace indépendantes [52]. L'espace de travail est découpé en sous domaines, les éléments finis, délimités par des nœuds sur lesquels est discrétisée l'inconnue. Elle consiste à passer de la formulation de l'EDP, dite forte, à une formulation intégrale, dite faible, par la méthode des résidus pondérés [44].

De façon générale, cette formulation est donnée par l'approche de la méthode des résidus pondérés et plus particulièrement par la méthode de Galerkin en ce qui concerne les équations de la mécanique des fluides.

La forme intégrale du modèle est donnée par les équations suivantes [53] :

$$\int_A \delta U \left[\frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial \beta_{uu} HU}{\partial x} + \frac{\partial \beta_{uv} HUV}{\partial y} + gH \frac{\partial z_f}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\tau_x^f - \tau_x^s + \left(\frac{\partial HT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial HT_{xy}}{\partial y} \right) \right) - \Omega HV \right] dD = 0 \quad (IV-8)$$

$$\int_A \delta V \left[\frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial \beta_{uv} HUV}{\partial x} + \frac{\partial \beta_{vv} HVV}{\partial y} + gH \frac{\partial z_f}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\tau_y^f - \tau_y^s + \left(\frac{\partial HT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial HT_{yy}}{\partial y} \right) \right) + \Omega HU \right] dD = 0 \quad (IV-9)$$

$$\int_A \delta H \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} \right] dA = 0 \quad (IV-10)$$

Les termes de l'intégrale contenant des opérateurs du second ordre sont intégrés par partie afin de pouvoir réduire le degré de la fonction d'interpolation en utilisant la formule de Green- Gauss suivante [53] :

$$\int_A g \frac{\partial f}{\partial x} dx dy = - \int_A f \frac{\partial g}{\partial x} dx dy + \int_S fg dy = - \int_A f \frac{\partial g}{\partial x} dx dy + \int_S fg \cos \theta dS$$

$$\int_A g \frac{\partial f}{\partial y} dx dy = - \int_A f \frac{\partial g}{\partial y} dx dy + \int_S f.g dx = - \int_A f \frac{\partial g}{\partial y} dx dy + \int_S fg \sin \theta dS$$

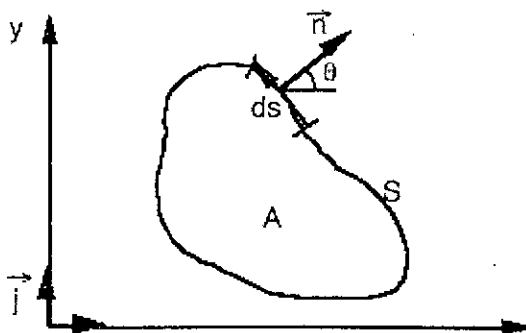


Figure IV. 3 : Définition de la normale au contour

Les équations précédentes (IV-8), (IV-9) et (IV-10) deviennent donc :

$$\int_A \delta U \left[\frac{\partial HU}{\partial t} + gH \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_x^f - \tau_x^s) - \Omega HV \right] dA - \int_A \left(\beta_{uu} HUU \frac{\partial \delta U}{\partial x} + \frac{1}{2} gH^2 \frac{\partial \delta U}{\partial x} + HT_{xx} \frac{\partial \delta U}{\partial x} + \beta_{uv} HUV \frac{\partial \delta U}{\partial y} + HT_{xy} \frac{\partial \delta U}{\partial y} \right) dA \quad (IV-11)$$

$$+ \int_S \left(\left(\beta_{uu} HUU \delta U + \frac{1}{2} gH^2 \delta U + HT_{xx} \delta U \right) \cos \theta + \left(\beta_{uv} HUV \delta U + HT_{xy} \delta U \right) \sin \theta \right) dS = 0$$

$$\int_A \delta V \left[\frac{\partial HV}{\partial t} + gH \frac{\partial Z_f}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_y^f - \tau_y^s) + \Omega HU \right] dA - \int_A \left(\beta_{uv} HUV \frac{\partial \delta V}{\partial x} + \frac{1}{2} gH^2 \frac{\partial \delta V}{\partial y} + HT_{xy} \frac{\partial \delta V}{\partial x} + \beta_{vv} HVV \frac{\partial \delta V}{\partial y} + HT_{yy} \frac{\partial \delta V}{\partial y} \right) dA \quad (IV-12)$$

$$+ \int_S \left(\left(\beta_{uv} HUV \delta V + HT_{xy} \delta V \right) \cos \theta + \left(\beta_{vv} HVV \delta V + \frac{1}{2} gH^2 \delta V + HT_{yy} \delta V \right) \sin \theta \right) dS = 0$$

$$\int_A \delta H \frac{\partial H}{\partial t} dA - \int_A \left(HU \frac{\partial \delta H}{\partial x} + HV \frac{\partial \delta H}{\partial y} \right) dA + \int_S (HU \delta H \cos \theta + HV \delta H \sin \theta) dS = 0 \quad (IV-13)$$

2.1.1.1. **Modèle** Pour discrétiser les équations de Reynolds moyennées, associées à un modèle de turbulence de premier ordre à savoir (viscosité turbulente constante) nous avons tout d'abord procédé à la transformation de la formulation mathématique en formulation variationnelle faible de type Galerkin (méthode des résidus pondérés) laquelle assure le passage au modèle numérique [53],[54].

2.1.1.2. **Modèle** De façon générale, cette dernière permet de résoudre des équations non linéaires aux dérivées partielles en transformant le problème continu en un problème discret décrit par un système d'équations algébriques. Pour cela, l'espace physique est divisé en un certain nombre de régions élémentaires, appelées éléments, comportant un ensemble de nœuds sur lesquels les variables du problème (vitesse, hauteur, pression...) sont définies. A l'intérieur de chaque élément, les champs scalaires ou vectoriels sont approximés à l'aide de fonctions d'interpolation [55].

2.1.1.3. **Modèle** Dans le modèle FESWMS les éléments triangulaires à six nœuds sont utilisés. Les valeurs nodales des composantes horizontales de la vitesse seront localisées au niveau des six (06) nœuds de l'élément.

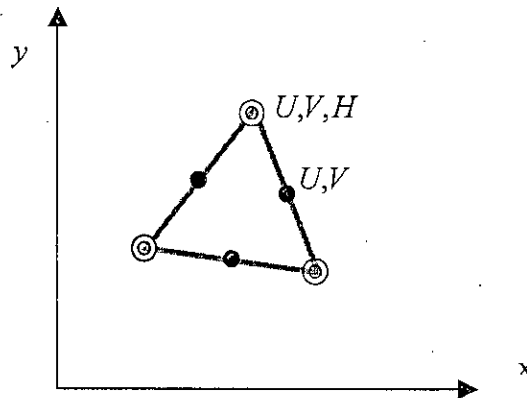


Figure IV. 4 : Élément triangulaire à six nœuds

Les fonctions d'approximation nodale seront basées sur une fonction polynomiale du second ordre pour les vitesses et linéaires pour les hauteurs d'eau. Ainsi nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} U = \sum_j U_j N_j \\ \delta U = \sum_j \delta U_j N_j \\ V = \sum_j V_j N_j \\ \delta V = \sum_j \delta V_j N_j \\ H = \sum_j H_j M_j \\ \delta H = \sum_j \delta H_j M_j \end{cases} \quad (\text{IV-14})$$

Les formes résiduelles sont données par :

$$\begin{aligned} f_{U_i} = & \sum_e \int_{A_e} [N_i \left(\frac{\partial HU}{\partial t} + gH \frac{\partial Z_f}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_x^f - \tau_x^s) - \Omega HV \right) + \frac{\partial N_i}{\partial x} \left(-\beta_{uu} HUU - \frac{1}{2} gH^2 + 2H(v + v_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(-\beta_{uv} HUV + H(v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right)] dA_e + \\ & \sum_e \int_{S_e} [N_i \left(\left(\beta_{uu} HUU + \frac{1}{2} gH^2 \right) \cos \theta + \beta_{uv} HUV \sin \theta \right) - \left(2H(v + v_t) \frac{\partial U}{\partial x} \cos \theta + H(v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \sin \theta \right)] dS_e \end{aligned} \quad (\text{IV-15})$$

$$\begin{aligned}
f_{v_i} = & \sum_e \int_{A_e} \left[N_i \left(\frac{\partial HV}{\partial t} + gH \frac{\partial Z_r}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_y^r - \tau_y^s) + \Omega H U \right) + \frac{\partial N_i}{\partial x} \left(-\beta_{uv} H U V + H(v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right) \right. \\
& + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(-\beta_{vv} H V V - \frac{1}{2} g H^2 + 2H(v + v_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right) \Big] dA_e \\
& + \sum_e \int_{S_e} \left[N_i \left(\beta_{uv} H U V \cos \theta + \left(\beta_{vv} H V V + \frac{1}{2} g H^2 \right) \sin \theta - \left(H(v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \cos \theta + 2H(v + v_t) \frac{\partial V}{\partial y} \sin \theta \right) \right) \right] dS_e
\end{aligned} \tag{IV-16}$$

$$f_{H_i} = \sum_e \int_{A_e} M_i \left[\frac{\partial H}{\partial t} + H \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial H}{\partial y} \right] dA_e \tag{IV-17}$$

Les équations aux dérivées sont données par les expressions suivantes

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_{U_i}}{\partial U_j} = & \sum_e \int_{A_e} \left[N_i N_j \left(\alpha H + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{gn^2}{H^{1/3}} \|\nabla F\| \left[\frac{2U^2 + V^2}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right] \right) - 2\beta_{uu} H U \frac{\partial N_i}{\partial x} N_j + 2H(v + v_t) \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} \right. \\
& \left. - \beta_{uv} H V \frac{\partial N_i}{\partial y} N_j + H(v + v_t) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dA_e \\
& + \sum_e \int_{S_e} \left[2UH\beta_{uu} N_i N_j \cos \theta + \beta_{uv} H V N_i N_j \sin \theta - 2H(v + v_t) \frac{\partial N_j}{\partial x} N_i \cos \theta - H(v + v_t) \frac{\partial N_j}{\partial y} N_i \sin \theta \right] dS_e
\end{aligned} \tag{IV-18}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_{U_i}}{\partial V_j} = & \sum_e \int_{A_e} \left[N_i N_j \left(-\Omega H + \frac{gn^2}{H^{1/3}} \|\nabla F\| \frac{UV}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right) - \beta_{uv} H U N_j \frac{\partial N_i}{\partial y} + H(v + v_t) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial x} \right] dA_e \\
& + \sum_e \int_{S_e} \left[\beta_{uv} H U N_i N_j \sin \theta - H(v + v_t) N_i \frac{\partial N_j}{\partial x} \sin \theta \right] dS_e
\end{aligned} \tag{IV-19}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_{U_i}}{\partial H_j} = & \sum_e \int_{A_e} \left[N_i M_j \left(\alpha U + \frac{\partial U}{\partial t} + g \frac{\partial Z_f}{\partial x} - \Omega V - \frac{1}{3} \frac{gn^2}{H} \|\nabla F\| U \sqrt{U^2 + V^2} \right) \right. \\
& \left. + M_j \frac{\partial N_i}{\partial x} \left(-\beta_{uu} U U - gH + 2(v + v_t) \frac{\partial U}{\partial x} \right) + M_j \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(-\beta_{uv} U V + (v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right) \right] dA_e
\end{aligned} \tag{IV-20}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_{V_i}}{\partial U_j} = & \sum_e \int_{A_e} \left[N_i N_j \left(\Omega H + \frac{gn^2}{H^{1/3}} \|\nabla F\| \frac{UV}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right) - \beta_{uv} H V N_j \frac{\partial N_i}{\partial x} + H(v + v_t) \frac{\partial N_j}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial x} \right] dA_e \\
& + \sum_e \int_{S_e} \left[\beta_{uv} H V N_i N_j \cos \theta - H(v + v_t) N_i \frac{\partial N_j}{\partial y} \cos \theta \right] dS_e
\end{aligned} \tag{IV-21}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_{V_i}}{\partial V_j} = & \sum_e \int_{A_e} [N_i N_j \left(\alpha H + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{gn^2}{H^{1/3}} \|\nabla F\| \frac{2VV + U^2}{\sqrt{U^2 + V^2}} \right) - \beta_{uv} H U N_j \frac{\partial N_i}{\partial x} + H(v + v_t) \frac{\partial N_j}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\
& - 2\beta_{vv} H V N_j \frac{\partial N_i}{\partial y} + 2H(v + v_t) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y}] dA_e \\
& + \sum_e \int_{S_e} [\beta_{uv} H U N_i N_j \cos \theta + 2H V \beta_{vv} N_i N_j \sin \theta - H(v + v_t) N_i \frac{\partial N_j}{\partial x} \cos \theta - 2H(v + v_t) N_i \frac{\partial N_j}{\partial y} \sin \theta] dS_e
\end{aligned} \tag{IV-22}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f_{V_i}}{\partial H_j} = & \sum_e \int_{A_e} [N_i M_j \left(\alpha V + \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial Z_t}{\partial y} + \Omega U - \frac{1}{3} \frac{gn^2}{H^{4/3}} \|\nabla F\| U \sqrt{U^2 + V^2} \right) + M_j \frac{\partial N}{\partial x} \left(-\beta_{uv} UV + (v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right) \\
& + M_j \frac{\partial N_i}{\partial y} \left(-\beta_{vv} VV - gH + 2(v + v_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right)] dA_e \\
& + \sum_e \int_{S_e} [N_i M_j \left(\beta_{uv} UV - (v + v_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \cos \theta + \left(\beta_{vv} VV + gH - 2(v + v_t) \frac{\partial V}{\partial y} \right) \sin \theta \right)] dS_e
\end{aligned} \tag{IV-23}$$

$$\frac{\partial f_{H_i}}{\partial U_i} = \sum_e \int_{A_e} \left(M_i H \frac{\partial N_j}{\partial x} + M_i N_j \frac{\partial H}{\partial x} \right) dA_e \tag{IV-24}$$

$$\frac{\partial f_{H_i}}{\partial V_i} = \sum_e \int_{A_e} \left(M_i H \frac{\partial N_j}{\partial y} + M_i N_j \frac{\partial H}{\partial y} \right) dA_e \tag{IV-25}$$

$$\frac{\partial f_{H_i}}{\partial H_i} = \sum_e \int_{A_e} \left(M_i \left(\alpha + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) + M_i \frac{\partial M_j U}{\partial x} + M_i \frac{\partial M_j V}{\partial y} \right) dA_e \tag{IV-26}$$

Dans le modèle FESWMS, la méthode des résidus pondérés (RP) de Galerkin est appliquée aux équations pour former les équations discrétisées en éléments finis. À l'intérieur de chaque élément, les champs scalaires ou vectoriels sont approximés à l'aide de fonctions d'interpolation. Comme le système obtenu est non linéaire, une méthode itérative de type Newton est utilisée pour le résoudre. A chaque itération, les équations aux éléments finis fournissent un résidu. On se réfère à ces équations comme des expressions résiduelles.

Le principe de la formulation variationnelle utilisé est le suivant [54], [55].

On cherche une solution $U, V \in V$ et $H \in H$ où V et H sont les espaces des champs de solutions admissibles respectivement pour la vitesse et pour la profondeur. On approxime V et H par des espaces vectoriels V_1 et H_1 de dimension finie. Soit (N_1, N_2, \dots, N_p) et (M_1, M_2, \dots, M_q) leurs base respectivement. On peut ainsi approcher une solution (U, V) et H par $(U^*, V^*) \in V_1$ et $H^* \in H_1$ tel que : $U^* = \sum U_i N_i$, $V^* = \sum V_i N_i$ et $H^* = \sum H_i M_i$ où U_i, V_i et H_i sont respectivement les valeurs approchées de U, V et H en un point donné du domaine discrétisé.

Ensuite, on multiplie les équations de quantité de mouvement discrétisées en temps par une fonction test N_i et on approxime U, V et H par U^*, V^* et H^* . De même pour l'équation de

continuité, on la multiplie par une fonction test M_i . L'étape suivante consiste ensuite à intégrer par partie ces équations en utilisant le théorème de Green pour aboutir aux expressions résiduelles $f_{U_i}, f_{V_i}, f_{H_i}$ des quantités U, V et H . Avec les expressions résiduelles on se ramène à un système non linéaire du type

$$F(U, V, H) = (f_{U_i}, f_{V_i}, f_{H_i}) = (0, 0, \dots, 0). \quad (\text{IV-27})$$

Pour linéariser le système, on utilise la méthode de Newton qui revient à résoudre

$$\nabla F(U, V, H) \cdot (\Delta U, \Delta V, \Delta H) + F(U, V, H) = 0. \quad (\text{IV-28})$$

Le système à résoudre est de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_{U_i}}{\partial U_i} & \frac{\partial f_{U_i}}{\partial V_i} & \frac{\partial f_{U_i}}{\partial H_i} \\ \frac{\partial f_{V_i}}{\partial U_i} & \frac{\partial f_{V_i}}{\partial V_i} & \frac{\partial f_{V_i}}{\partial H_i} \\ \frac{\partial f_{H_i}}{\partial U_i} & \frac{\partial f_{H_i}}{\partial V_i} & \frac{\partial f_{H_i}}{\partial H_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_i \\ \Delta V_i \\ \Delta H_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{U_i} \\ -f_{V_i} \\ -f_{H_i} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-29})$$

III. APPROXIMATION DES TERMES CORRECTIFS

En faisant l'approximation de la distribution verticale de vitesse par la fonction logarithmique [48] :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z - Z_f}{k}\right) \quad (\text{IV-30})$$

avec, $u_* = \sqrt{C_f} U$, on peut écrire en adimensionnelle :

$$\frac{u(z)}{U} = \frac{\sqrt{C_f}}{\kappa} \ln\left(\frac{z - Z_f}{k}\right) \quad (\text{IV-31})$$

Les coefficients de correction sont donnés par l'expression :

$$\beta = 1 + \frac{C_f}{\kappa^2} \quad (\text{IV-32})$$

Les termes correctifs β sont calculés dans Flo2DH comme suit :

$$\beta = \beta_0 + c_\beta C_f \quad (\text{IV-33})$$

En comparant ces deux expressions, on a : $\beta_0 = 1$ et $c_\beta = \frac{1}{\kappa^2}$. ($c_\beta = 6.25$)

Dans le code FESWMS, des valeurs par défaut sont données pour β_0 et c_β , et sont égales à 1 et 0, respectivement. Ces valeurs signifient que les variations de la vitesse selon la verticale sont négligeables.

IV. CONTRAINTES DE CISAILLEMENT DUES A LA TURBULENCE

Le modèle de turbulence employé dans le code de simulation FESWMS¹ est un modèle basé sur le concept de la viscosité turbulente à zéro équation. Dans ce code les contraintes de Reynolds sont modélisées en considérant que la viscosité turbulente est constante sur toute la verticale. Une viscosité constante peut suffire dans les cas où l'écoulement est gouverné par le gradient de pression et par le transport, en régime de marée par exemple, et suffit pour modéliser la circulation océanique à grande échelle. En dimension 2, cette viscosité doit inclure la dispersion. Les valeurs de ν_t fournies par la littérature vont de 0.12 m²/s à 1500 m²/s [37]. Dans le FESWMS, ν_t est donnée par la formule suivante :

$$\nu_t = c_\mu \cdot u_* \cdot H \quad (\text{IV-34})$$

où, ν_t : est la viscosité turbulente ; C_μ : Coefficient adimensionnel ; $u_* = \sqrt{\frac{\lambda_c}{8} |V|}$: la vitesse de frottement au fond et H : la hauteur d'eau.

Pour les canaux naturels à ciel ouvert, la viscosité turbulente peut être reliée à la vitesse de frottement au fond et à la profondeur de la veine liquide par la formule [48] :

$$\nu_t = (0.6 \pm 0.3) \cdot u_* \cdot H \quad (\text{IV-35})$$

où, chaque valeur de la plage de valeur correspond à un type de canal ou à un changement rapide de la géométrie.

La viscosité totale sera donc donnée par la somme des viscosités cinématique du fluide et de la viscosité turbulente. Elle sera exprimée par la formule :

$$\nu_e = \nu_0 + c_\mu u_* H \quad (\text{IV-36})$$

avec, ν_e : la viscosité effective;

Ainsi en tenant compte des conditions aux limites suivantes :

1. Il n'y a pas de transfert de masse d'eau à travers la surface libre et le fond (imperméabilité de la surface et du fond) ;
2. Les contraintes turbulentes au fond sont négligeables devant les contraintes visqueuses.

Les contraintes de cisaillement latérales causées par la turbulence sont calculées en utilisant le concept de viscosité turbulente en faisant l'analogie avec les contraintes visqueuses et en remplaçant le coefficient de viscosité cinématique par celui de la viscosité turbulente [48].

V. STRATEGIE DE RESOLUTION

1. Algorithme de Newton

La discrétisation des équations dans FESWMS, est basée sur la méthode des éléments finis type Galerkin. Elle conduit à un système non linéaire. Dans notre cas le système à résoudre est de la forme $K(a) a = f$. Il est résolu via une stratégie combinant la méthode de Newton ou la quasi Newton et un schéma de solution frontale pour la numérotation des éléments finis. Le schéma itératif peut être écrit comme suit [39] :

¹: Finite Element Surface Water Modelling System

$$a_{i+1} = a_i - J(a_i)^{-1} R(a_i) \quad (\text{IV-37})$$

où, a_{i+1} est le nouveau vecteur solution à calculer, a_i est le vecteur solution à la $i^{\text{ème}}$ itération, $J(a_i)$ est la Jacobienne calculée à partir de a_i , et $R(a_i) = K(a_i) a_i - f$ est le vecteur résiduel. En pratique, chaque itération est effectuée comme suit :

$$J(a_i) \Delta a_i = -R(a_i) \quad (\text{IV-38})$$

où, Δa_i est la valeur incrémentale de la solution. Une mise à jour est calculée par

$$a_{i+1} = a_i + w_r \Delta a_i \quad (\text{IV-39})$$

avec, w_r est le facteur de relaxation variant entre 0 et 2 (par défaut il vaut 1). Ce facteur permet souvent d'améliorer la vitesse de convergence et sa valeur optimale dépend du problème.

A chaque itération, la matrice jacobienne est décomposée par factorisation LU de Gauss en une matrice triangulaire supérieure U et inférieure L . Une variante plus économique, dite de Quasi Newton, consiste à bloquer la jacobienne J pendant le processus itératif de Newton en prenant $J = J(a_0)$, avec a_0 l'état initial. En général, la méthode de Quasi-Newton dépend intimement du choix de a_0 .

2. Intégration numérique

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

$$\int_{A_e} f(x, y) dx dy = A_e \sum_{i=1}^k w_i f(x_i, y_i) \quad (\text{IV-40})$$

A_e , étant la surface de l'élément d'intégration, f la fonction à intégrer, k le nombre de point d'intégration numérique et w_i le facteur de pondération associé au $i^{\text{ème}}$ point d'intégration de coordonnées (x_i, y_i) .

Un processus d'intégration numérique doit prouver une précision suffisante pour assurer la convergence d'une solution de la méthode des éléments finis. Strang et Fix ont proposé que la convergence a lieu si le processus d'intégration numérique est suffisamment précis pour calculer la surface d'un élément [55].

Pour cela, une formule d'intégration d'ordre 6 est utilisée. Elle s'appuie sur les 7 points de Gauss illustrés sur la figure IV.5.

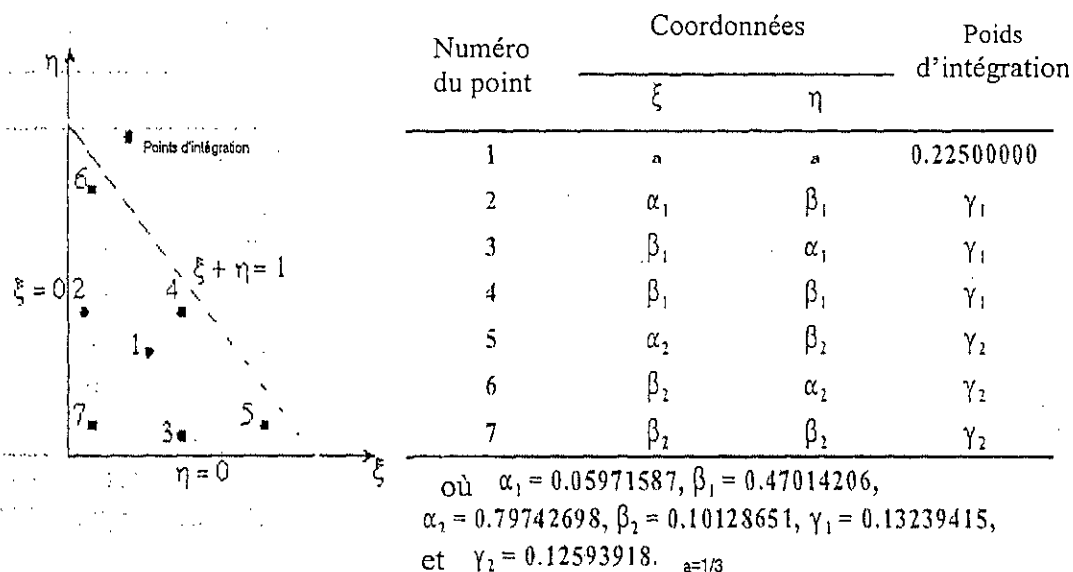


Figure IV.5 : Les points d'intégration de Gauss

VI. LE MAILLAGE

1. Construction du maillage plan

La difficulté principale lors de la construction du maillage est d'assurer, à l'aide d'un nombre de mailles optimisé, la meilleure représentation possible de l'ensemble de la zone d'étude. De ce point de vue, l'apport des éléments finis est essentiel puisqu'il permet de raffiner le maillage dans les zones complexes (méandres, confluence, ...). En effet, si le nombre de mailles est trop élevé, les calculs à effectuer sont considérables et trop longs, et s'il n'y en a pas assez, le modèle n'est pas suffisamment précis pour qu'on puisse en tirer des conclusions pertinentes.

Le maillage a été effectué avec le logiciel **EMC2**. Son maniement offre une grande souplesse et permet de paramétrer entièrement le maillage. Ainsi, tous les sous-domaines sur lesquels s'appliquent des opérations particulières (définition de conditions aux limites, post-traitement) peuvent être clairement identifiés sans avoir à écrire des listes de numéros de nœuds ou d'éléments [56]. Les maillages utilisés pour cette étude sont composés de triangles à trois nœuds.

Le maillage est réalisé en exploitant les données du modèle numérique d'altitude MNA du tronçon d'étude en effectuant les étapes suivantes :

1. Récupérer le contour de la zone qui intéresse notre étude grâce au SIG en utilisant les données du MNA,
2. Lancer le logiciel EMC2,
3. Ouvrir le fichier contenant les coordonnées des points constituant le contour,
4. Spécifier les différents paramètres du maillage (nombre d'intervalles, la référence des domaines, ...)
5. Récupérer fichier contenant le maillage plan du domaine d'étude.

2. Construction du maillage 3D

Le logiciel EMC2 est un logiciel d'édition de maillage et de contours 2D. Pour pouvoir réaliser un maillage 3D, il nous faut récupérer la composante Z de chaque nœud constituant le maillage. Ceci est réalisé grâce à un programme FORTRAN appelé « extractcoor ».

Une fois ce fichier est crée, on procède à l'élaboration du maillage 3D grâce au logiciel YAMS . Ce dernier permet d'enrichir le maillage déjà réalisé [57].

VII. EXECUTION DU PROGRAMME FLO2DH

Avant de lancer l'exécutable du code FESWMS, un certain nombre de conditions doit être spécifié dans le fichier data.

Lors de l'exécution du code FESWMS, un certain nombre de conditions doit être spécifié pour pouvoir lancer la simulation. Ces conditions sont [48]

1. Conditions initiales

A l'instant initial $t=t_0$, les vitesses moyennées sur la profondeur U, V dans les directions x et y respectivement et la profondeur d'eau H doivent être spécifiées comme conditions initiales du problème dans tous les points du domaine soit pour l'écoulement stationnaire ou instationnaire. Notons que les conditions initiales sont rapidement *oubliées* par l'écoulement, mais influencent le temps de convergence des résultats. Nous distinguons deux types de conditions initiales

a. Démarrage à chaud

Quand des résultats antérieurs de simulation sont disponibles, ils peuvent être introduits et utilisés comme des conditions initiales pour une éventuelle nouvelle simulation. La solution peut ne pas converger si les variations du maillage et des conditions aux limites sont significatives.

b. Démarrage à froid

Si on ne possède pas de résultats de simulation antérieurs dans le cas où on met en marche le modèle pour la première fois, les conditions initiales sont inconnues et le *démarrage à froid* est utilisé. Dans ce cas, on adopte généralement une élévation du plan d'eau identique pour tous les nœuds du maillage et les vitesses sont prises égales à 0 partout dans le domaine. Ces conditions se traduisent alors par :

$$\begin{cases} U = V = 0 \\ H = Z_w - Z_f \end{cases} \quad \text{(IV-41)}$$

2. Les conditions aux limites

La définition des conditions aux limites nécessite l'introduction de relations particulières sur les frontières du domaine de calcul. Ces conditions sont de type valeurs imposées, sortie ou entrée libre, parois solide...

Les conditions aux limites sont spécifiées autour du domaine du maillage pour toute la durée de la simulation. Elles consistent en l'introduction du flux normal ou de la contrainte normale et le flux tangentiel ou la contrainte de cisaillement en chaque point du maillage constituant la frontière du domaine.

Le besoin en informations au niveau des frontières dépend du type de cette même frontière et des conditions de l'écoulement. Physiquement, il existe deux types de frontières qui sont le plus souvent rencontrés dans les écoulement à surface libre (voir **figure IV.6**).

- Les frontières ouvertes.

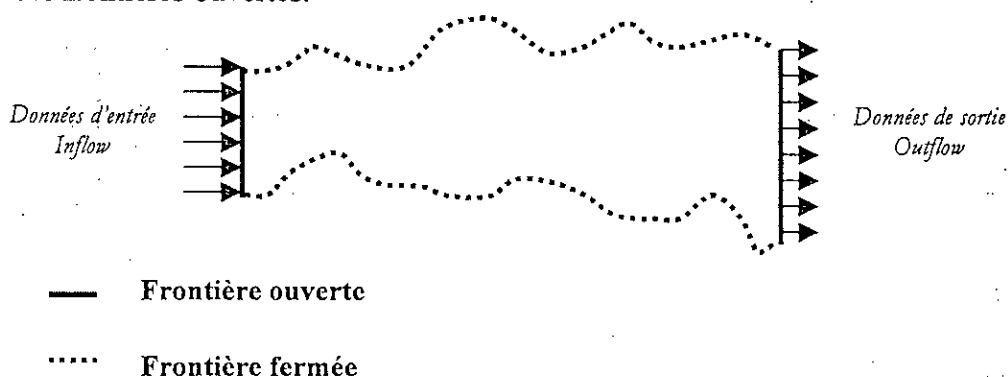


Figure IV.6 : Schéma représentant les frontières d'un domaine d'écoulement

2.1. Frontières fermées

La frontière fermée définit les caractéristiques géométriques telles que les limites naturelles d'écoulement, les piles de ponts, les îles, les digues, les barrages... Généralement l'écoulement à travers une frontière fermée est souvent nul, ceci conduit à considérer que le débit normal unitaire à la frontière fermée est nul $q_n = 0$ [48]. La vitesse normale U_n est égale à zéro partout sur la frontière fermée. D'autres conditions supplémentaires doivent être spécifiées. En effet, le débit tangentiel unitaire, la contrainte de cisaillement tangentielle ou une relation liant le premier à la deuxième, doivent être introduits en considérant qu'il y a glissement ou non glissement.

a. Conditions de glissement

Elle permet l'écoulement dans la direction tangente à la frontière en chaque nœud constituant le maillage et impose une contrainte nulle à la frontière. Cette condition est souvent utilisée quand la frontière libre représente un mur vertical imaginaire (fictif) où la profondeur d'écoulement est petite et les contraintes de cisaillement sont négligeables.

b. Condition de non glissement

Dans ce cas, les vitesses sont prises égales à zéro. Cette condition est utilisée quand les vitesses tout le long de la frontière sont très petites et le maillage est construit de manière très fine pour prendre en compte les gradients de vitesses qui existent tout près de cette frontière.

2.2. Frontières ouvertes

Elles définissent une aire du maillage où l'écoulement est censé entrer (section amont) ou sortir (section aval). Les valeurs qui doivent être spécifiées au niveau des frontières ouvertes dépendent d'un côté du type de la frontière (section amont ou aval) et de l'autre côté du type de l'écoulement (supercritique ou subcritique).

a. Condition à l'amont

Si l'écoulement à l'entrée du domaine est subcritique, l'une des combinaisons suivantes en plus de la contrainte tangentielle doit être spécifiée :

- 1) Les vitesses tangentes et normales à la section d'entrée.
- 2) Le débit unitaire normal et tangentiel à cette section.
- 3) La hauteur du plan d'eau.

Si l'écoulement à l'amont est supercritique, les débits unitaires normal et tangentiel à la frontière et la hauteur du plan d'eau doivent être fixés pour chaque nœud.

En général le débit est donné à la section d'entrée et la hauteur est spécifiée à la section de sortie pour chaque nœud de cette section.

b. Condition à l'aval

A la section de sortie les contraintes tangentielles sont automatiquement prises égales à zéro en chaque nœud. Seule la hauteur du plan d'eau a besoin d'être spécifiée pour chaque nœud du maillage de la section située en aval. Cette hauteur peut être spécifiée comme étant une condition au limite. Elle peut être donnée directement, calculée en utilisant la méthode de la pente de la ligne d'eau (*Slope Area Method*), ou déduite à partir de la courbe de tarage¹.

3. Application des conditions aux limites

La formulation par éléments finis de Galerkin permet de considérer les conditions aux limites compliquées comme *conditions naturelles* (conditions de Neumann) du problème. Les conditions aux limites naturelles sont implicitement imposées dans le problème et ne requièrent pas beaucoup de traitements. Les conditions aux limites qui sont explicitement imposées sont appelées *conditions forcées* ou *conditions essentielles* (conditions de Dirichlet) [48].

a. Frontières ouvertes

Les vitesses et la hauteur d'eau peuvent être appliquées comme conditions essentielles pour chaque nœud de la frontière ouverte. Ces valeurs sont imposées en chaque nœud i du maillage en exprimant les expressions résiduelles comme suit :

$$\begin{cases} f_{U_i} = U_i^* \\ f_{V_i} = V_i^* \\ f_{H_i} = H_i^* \end{cases} \quad (\text{IV-42})$$

Avec U_i^* , V_i^* , H_i^* sont les valeurs respectivement des vitesses et de la hauteur spécifiées pour chaque nœud i du maillage. Les dérivées par rapport aux vitesses au niveau d'un nœud j sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \bullet \quad \frac{\partial f_{U_i}}{\partial U_j} &= \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}, & \frac{\partial f_{U_i}}{\partial V_j} &= 0, & \frac{\partial f_{U_i}}{\partial H_j} &= 0 \\ \bullet \quad \frac{\partial f_{V_i}}{\partial U_j} &= 0, & \frac{\partial f_{V_i}}{\partial V_j} &= \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}, & \frac{\partial f_{V_i}}{\partial H_j} &= 0 \end{aligned}$$

¹ : " Courbe indiquant la relation entre la hauteur d'eau et le débit d'un cours d'eau au droit d'une station hydrométrique. Traduite en chiffres, c'est un barème d'étalonnage " *Glossaire International d'Hydrologie* "

$$\bullet \quad \frac{\partial f_{H_i}}{\partial U_i} = 0, \quad \frac{\partial f_{H_i}}{\partial V_i} = 0, \quad \frac{\partial f_{H_i}}{\partial H_j} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Nous pouvons aussi de la même manière appliquer des débits unitaires en chaque nœud i du maillage en redéfinissant les expressions résiduelles comme suit :

$$f_{U_i} = U_i H_i - q_{x_i}^* \quad \text{et} \quad f_{V_i} = V_i H_i - q_{y_i}^*$$

où $q_{x_i}^*, q_{y_i}^*$ sont respectivement les débits unitaires spécifiés en chaque nœud i du maillage dans les directions x et y . Les dérivées par rapport aux vitesses et à la profondeur d'eau au nœud j sont données par :

$$\frac{\partial f_{U_i}}{\partial U_j} = \begin{cases} H_i & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}, \quad \frac{\partial f_{U_i}}{\partial V_j} = 0, \quad \frac{\partial f_{U_i}}{\partial H_j} = \begin{cases} U_i & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

$$\frac{\partial f_{V_i}}{\partial V_j} = \begin{cases} H_i & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}, \quad \frac{\partial f_{V_i}}{\partial U_j} = 0, \quad \frac{\partial f_{V_i}}{\partial H_j} = \begin{cases} V_i & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Quand la profondeur d'eau est spécifiée comme étant une condition naturelle, la conservation de la masse est assurée et le débit total entrant sera égal au débit total sortant dans le cas des simulations en régime stationnaire. Toutefois, la profondeur d'eau calculée en chaque nœud du maillage où la condition naturelle est appliquée peut être légèrement différente des valeurs spécifiées. Quand la profondeur d'eau est prise comme condition essentielle, la profondeur calculée serait égale à la profondeur spécifiée mais le débit total sortant peut différer légèrement du débit entrant dans le cas d'un régime permanent car les équations de conservation de la masse en chaque point du maillage de la frontière ont été remplacées.

Si le débit total à travers la section d'entrée est spécifié, le coefficient de frottement est supposé constant et le débit total est divisé sur l'ensemble des nœuds de la section d'entrée en utilisant la notion de débitance. En effet, la section d'entrée est définie par une liste de points qui sont connectés entre eux pour former une série d'éléments verticaux. Chaque tranche verticale est composée par une série de trois nœuds (1, 2 et 3) où 1 et 3 sont les nœuds extrêmes de chaque élément et le 2 et le nœud du milieu. La débitance à travers chaque élément est donnée par la formule :

$$K_e = A \sqrt{\frac{g R_{he}}{C_f}} \quad (\text{IV-43})$$

où, R_{he} est le rayon hydraulique de l'élément considéré, A est la surface mouillée (section d'écoulement). La débitance totale de la section est donnée par la somme des débitances des différents éléments contenus dans cette section.

La débitance à travers chaque élément est distribuée sur les trois nœuds qui forment l'élément comme suit :

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{6} K_c (1 - \xi) \\ K_2 = \frac{2}{3} K_c \\ K_3 = \frac{1}{6} K_c (1 + \xi) \end{cases} \quad (\text{IV-44})$$

avec, $\xi = 5\Delta H / 12\bar{H}$; $\Delta H = H_3 - H_1$, $\bar{H} = \frac{1}{2}(H_1 + H_3)$, H_1 est la profondeur au nœud 1, H_3 est la profondeur au nœud 3.

Le débit normal à la frontière ouverte en chaque nœud de la section est calculé sur la base du produit du ratio de la débitance nodale et la débitance totale de chaque élément et le débit total traversant la section transversale [55].

$$Q_i = \frac{K_i}{\sum K_{ei}} Q_T \quad (\text{IV-45})$$

b. Débit total a travers les frontières

Le long de la frontière, fermée ou ouverte, où l'écoulement normal à la frontière est imposé, les expressions résiduelles dans les directions x et y sont transformées en expressions résiduelles dans les directions qui sont normales et tangentes à la frontière. Au nœud i la transformation est calculée comme suit [48],[55]:

$$f_{U_i}^T = f_{U_i} \cos \delta + f_{V_i} \sin \delta, \quad (\text{IV-46})$$

$$f_{V_i}^T = -f_{U_i} \sin \delta + f_{V_i} \cos \delta \quad (\text{IV-48})$$

$f_{U_i}^T, f_{V_i}^T$: sont les expressions résiduelles transformées et δ représente l'angle entre l'axe des x positif et la tangente à la frontière au nœud i .

Si le débit normal à la frontière ouverte au nœud i est spécifié, l'expression résiduelle pour le débit tangent à la frontière serait donnée par l'expression :

$$f_{U_i}^T = a_i^o U_i + b_i^o V_i - Q_i^o \quad (\text{IV-49})$$

si le débit normal à une frontière fermée au nœud i est spécifié, l'expression résiduelle pour le débit normal à la frontière serait donné par :

$$f_{V_i}^T = a_i^c U_i + b_i^c V_i - Q_i^c \quad (\text{IV-50})$$

les coefficients $a_i^c, b_i^c, a_i^o, b_i^o$ sont déterminés en imposant à ce que le débit calculé à travers la frontière ouverte ou fermée au nœud i soit égal au débit spécifié. Ceci impliquera :

$$U_i \sum_e \int_{S_e^o} N_i H \cos \theta \, dS_e + V_i \sum_e \int_{S_e^o} N_i H \sin \theta \, dS_e = Q_i^o \quad (\text{IV-51})$$

$$U_i \sum_e \int_{S_e^c} N_i H \cos \theta \, dS_e + V_i \sum_e \int_{S_e^c} N_i H \sin \theta \, dS_e = Q_i^c \quad (\text{IV-52})$$

avec, N_i sont les fonctions d'interpolation pour la vitesse au nœud i , S_e^o : la section du maillage de frontière ouverte, S_e^c : la section du maillage de frontière fermée (solide). Q_i^c : représente le débit d'infiltration, nous le supposons nul dans tout ce qui suit.

En comparant les expressions, nous aurons :

$$\begin{aligned} a_i^o &= \sum_e \int_{S_e^o} N_i H \cos \theta \, dS_e^o & b_i^o &= \sum_e \int_{S_e^o} N_i H \sin \theta \, dS_e^o \\ a_i^c &= \sum_e \int_{S_e^c} N_i H \cos \theta \, dS_e^c & b_i^c &= \sum_e \int_{S_e^c} N_i H \sin \theta \, dS_e^c \end{aligned}$$

Les dérivées des expressions résiduelles à travers les frontières ouvertes sont données par :

$$\frac{\partial f_{U_i}^T}{\partial U_j} = \begin{cases} a_i^o & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}, \quad \frac{\partial f_{V_i}^T}{\partial V_j} = \begin{cases} b_i^o & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}, \quad \frac{\partial f_{U_i}^T}{\partial H_j} = \frac{\partial a_i^o}{\partial H_j} U_i + \frac{\partial b_i^o}{\partial H_j} V_i$$

$$\text{où, } \frac{\partial a_i^o}{\partial H_j} = \sum_e \int_{S_e^o} N_i M_j \cos \theta \, dS_e^o \quad \text{et} \quad \frac{\partial b_i^o}{\partial H_j} = \sum_e \int_{S_e^o} N_i M_j \sin \theta \, dS_e^o$$

Les dérivées des expressions résiduelles à travers les frontières fermées (solides) sont données :

$$\frac{\partial f_{U_i}^T}{\partial U_j} = \begin{cases} a_i^c & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}, \quad \frac{\partial f_{V_i}^T}{\partial V_j} = \begin{cases} b_i^c & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}, \quad \frac{\partial f_{U_i}^T}{\partial H_j} = \frac{\partial a_i^c}{\partial H_j} U_i + \frac{\partial b_i^c}{\partial H_j} V_i$$

$$\text{où, } \frac{\partial a_i^c}{\partial H_j} = \sum_e \int_{S_e^c} N_i M_j \cos \theta \, dS_e^c \quad \text{et} \quad \frac{\partial b_i^c}{\partial H_j} = \sum_e \int_{S_e^c} N_i M_j \sin \theta \, dS_e^c$$

VIII. AJUSTEMENT AUTOMATIQUES DE FRONTIERES

La solution peut ne pas converger si les conditions initiales ne sont pas suffisamment proches de la vraie solution, sans se soucier du type de démarrage. Si on fait le démarrage à froid et des problèmes de convergence se développent alors, la différence entre les conditions aux limites indiquées et les conditions initiales est probablement trop grande.

Le facteur de relaxation peut être diminué de sorte que le changement de la solution d'une itération à une autre soit réduit. Une autre manière de résoudre ce problème de convergence est d'augmenter temporairement la viscosité cinématique turbulente à une grande valeur. Les grandes viscosités turbulentes encouragent la convergence de la solution en raison de leur effet dispersif quand les gradients de vitesse sont grands. De grandes valeurs de viscosité doivent probablement être maintenues pour deux ou trois itérations avant qu'elles soient réduites aux valeurs physiquement appropriées.

Si le problème de convergence persiste et une parcelle du maillage éléments finis a été inspectée soigneusement pour assurer les contradictions géométriques, alors le réseau a besoin probablement d'être raffiné. Les secteurs nécessitant l'amélioration seront situés là où les vitesses et les variations des vitesses sont extrêmement grandes.

L'ajustement automatique de la frontière dans FLO2DH laisse les nœuds qui ne sont pas complètement couverts par l'eau pour exister dans un réseau d'éléments finis.

Si on ne permet pas à la frontière de s'ajuster automatiquement, alors tous les nœuds dans le réseau de maillage doivent être humides à chaque instant (c'est à dire, la profondeur d'eau doit toujours être supérieure à zéro en un nœud du maillage) autrement des problèmes seront posés quand le nœud devient sec (c'est à dire, la profondeur d'eau devient inférieure ou égale à zéro en un nœud du maillage).

Un algorithme conceptuellement simple est employé pour déterminer automatiquement la frontière d'un maillage d'éléments finis de sorte que les nœuds secs n'existent pas. Le procédé exclut du maillage actif tous les éléments qui sont reliés à un ou plusieurs nœuds secs.

Pour expliquer comment l'algorithme détermine si un élément doit être inclus dans un réseau actif, plusieurs termes doivent être définies.

Un élément serait « *on* » s'il est inclus dans l'élément actif, et serait « *off* » s'il n'est pas inclus.

Un élément sec est un élément qui est relié au moins à un nœud qui est sec. Un élément humide est un élément dans lequel tous les nœuds sont humides.

Au début de chaque itération, chaque élément qui est *on* est vérifié pour se trouver arrêté s'il devient sec. S'il se trouve qu'il est sec, c'est tout l'élément qui sera tourné *off*. La décision pour allumer un élément est basée sur la profondeur minimum de l'eau aux nœuds humides et l'altitude maximum du fond aux points secs de nœud reliés à l'élément. Si l'altitude minimum de la surface d'eau est plus grande que l'altitude maximum du fond, plus une petite tolérance de profondeur, l'élément est allumée. Le besoin de tolérance sur la profondeur est double. D'abord, en raison des pertes de frottement, il y aura probablement un certain changement de l'altitude de la surface d'eau à travers un élément quand elle est allumée. En second lieu, l'état d'un élément (humide ou sec) peut osciller d'une itération à l'autre, et fait converger la solution lentement ou pas du tout. Une tolérance de profondeur de 0.15 m s'est avérée pour fournir de bons résultats et est la valeur par défaut utilisée dans

Flo2DH. Cependant, la meilleure tolérance de profondeur à employer dépendra de la taille des éléments dans un réseau, et des conditions d'écoulement.

Il est possible qu'un élément qui est humide soit tourné « *off* » dans la solution finale. Cependant, la profondeur de l'écoulement dans l'élément serait petite, et l'effet de ne pas tenir compte de l'élément dans le réseau actif serait négligeable. La possibilité qu'un élément humide sera tourné « *off* » dans la solution finale peut être réduite au minimum en construisant de plus petits éléments.

Le dispositif automatique d'ajustement de la frontière permet à un réseau d'éléments finis d'être conçu sans trop de soucis pour l'endroit des frontières. Cependant, des altitudes du fond doivent toujours être assignées soigneusement. Si le dispositif ajustement automatique des frontières est employé et un nœud du maillage (situé sur le banc du canal au milieu d'une plaine d'inondation, par exemple) devient sec, tous les éléments reliés à ce point de nœud seront arrêtés pour la prochaine itération. Le déplacement d'un grand nombre d'éléments d'un réseau actif pourrait affecter de manière significative la solution à moins que tous les éléments arrêtés aient été tout à fait petits.

Chapitre V :

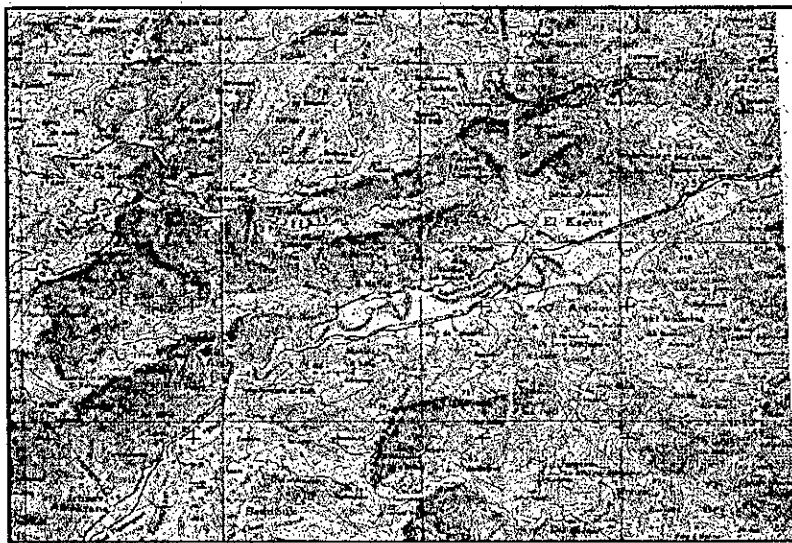
Application : Visualisation et Analyse des Résultats.

CHAPITRE V : APPLICATION : VISUALISATION ET ANALYSE DES RESULTATS

I. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU TRONÇON D'ETUDE

Le tronçon de l'oued concerné par cette étude se situe entre Sidi Aich et El Kseur (Figure V.1). Il est situé juste à la sortie de Sidi Aich. Pour des raisons liées purement au code de calcul nous avons pris un petit tronçon de 620 m approximativement. Pour des débits différents de l'oued nous avons appliqué le code de simulation FESWMS.

Parce que le profil en long présente des irrégularités de fond, nous avons été amenés à prendre un tronçon dont la pente est régulière. Dans le cas contraire le code ne convergera pas.



Tronçon de l'Oued entre Sidi Aich et El Kseur

Figure V. 1 : situation géographique de la zone d'étude

La première étape a consisté à définir le contour du domaine où peut s'effectuer l'écoulement à l'aide du SIG. Ensuite, on a procédé à l'élaboration du maillage de ce domaine grâce au logiciel EMC2. En effet, en définissant le contour, ce logiciel donnera dans un premier temps, un maillage pauvre. Ce dernier servira à préparer le maillage définitif sur lequel s'effectueront les calculs.

II. ASPECT HYDROCLIMATOLOGIQUE

1. Précipitation annuelle

Le montant de la précipitation annuelle est caractérisé par de grands écarts dans le bassin versant de la Soummam. La précipitation annuelle est maximum sur les montagnes de Djurdjura et est estimée à environ 1500 mm par an. La cote méditerranéenne, où la pluviosité annuelle atteint 1000 mm, est également une région à forte précipitation. La précipitation minimum, de 300 à

400 mm par an en moyenne correspond à la partie Sud- Est du bassin sur le plateau qui s'étend de Sétif aux monts du Hodna [26].

Le gradient pluviométrique augmente d'Ouest en Est et de la plaine vers les reliefs, contrairement au gradient thermique qui diminue sur les reliefs et près des zones côtières.

2. Le vent

De par sa situation entre deux grands ensembles géomorphologiques distincts : septentrional et méridional situés respectivement au Nord et au Sud, le bassin n'est pas influencé par les vents. En effet, ces deux ensembles constituent de véritables barrières naturelles isolant la plaine de la basse Soummam des vents du Nord et du sud. Seule la limite Est permet une large ouverture sur la mer méditerranée et les vents venant du Nord-Est. La vallée est caractérisée par la prédominance de deux directions du vent :

- La direction Ouest à Nord Ouest prédomine durant la saison s'étendant du mois d'Octobre à Avril.
- La direction Nord Est à Est prédomine durant la saison allant du mois de mai à septembre.

Les fréquences du vent de direction Nord et Sud sont presque nulles. Seules la direction Sud- Ouest présente une fréquence appréciable pendant la saison s'étendant de Mai à Septembre [29].

3. Hydrométrie

La station hydrométrique qui contrôle le bassin versant de la Soummam est située à Sidi Aich. Elle contrôle une superficie de 8420 km². Comme tout bassin versant, le bassin de la basse Soummam reçoit l'eau des précipitations et en restitue une partie à son exutoire, la mer.

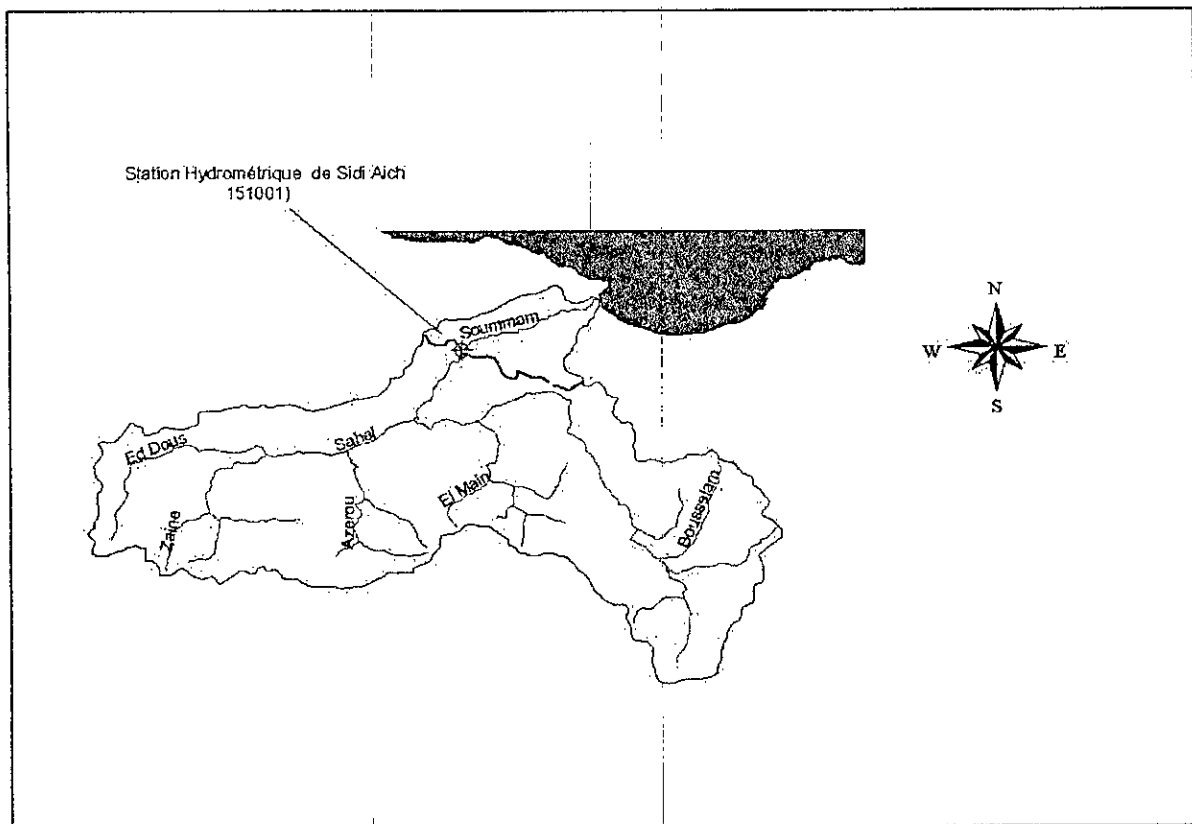


Figure V. 2 : Localisation de la station hydrométrique 151001

4. Apports au niveau du bassin

Selon l'étude réalisée par l'Hydrotechnic Corporation [26], l'écoulement annuel de l'oued Soummam à Sidi Aich est de l'ordre de 600 hm^3 . Il est de l'ordre de 461.5 hm^3 selon l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H).

Il n'existe pas de dispositifs de mesure des apports à l'exutoire et il n'est pas donc possible d'en présenter un bilan exact. Il est cependant possible de se faire une idée sur les apports par un modèle de transformation de la **Pluie en Débit**.

L'écoulement annuel de l'aire additionnelle de drainage (allant de Sidi Aich jusqu'à Bejaia) d'une superficie de 808 km^2 est de 150 hm^3 . Le débit moyen annuel à l'exutoire serait alors de 750 hm^3 [26].

III. LE MAILLAGE

1. Construction du maillage plan 2D

Le maillage réalisé par EMC2 est constitué de 682 sommets et 1265 éléments triangulaires (figure V. 3).

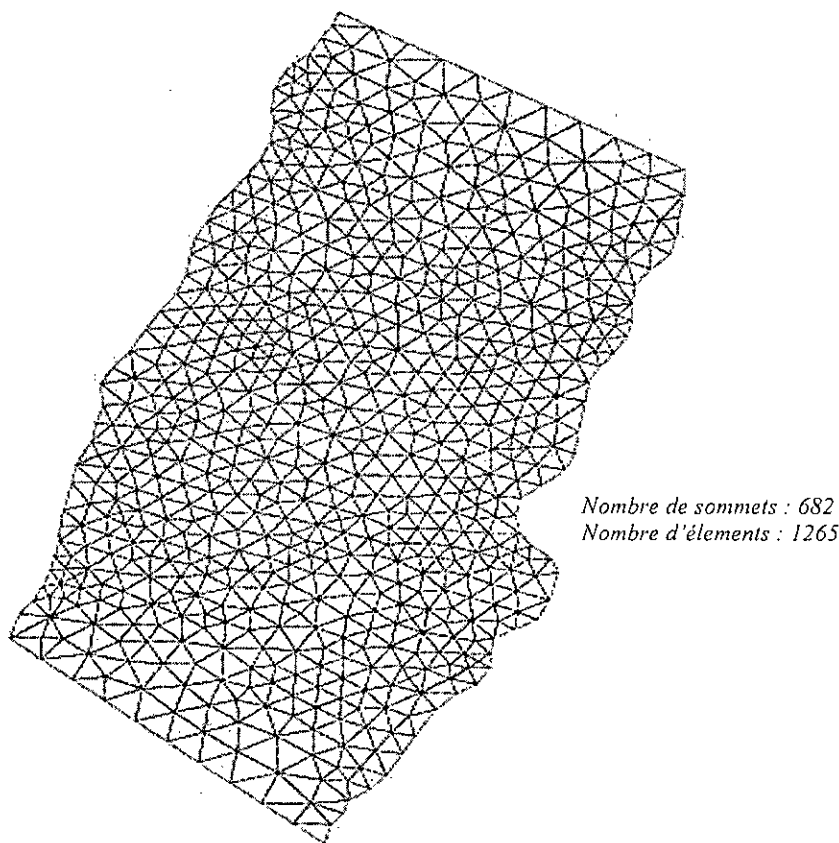


Figure V. 3 : Maillage EMC2 du tronçon de notre étude

2. Construction du maillage de surface 3D

A partir du maillage initial de surface et de la grille du MNT déjà élaboré nous pouvons construire le maillage de surface 3D. ceci grâce au programme EXTRACTCCOR

(l'figureV.4) .

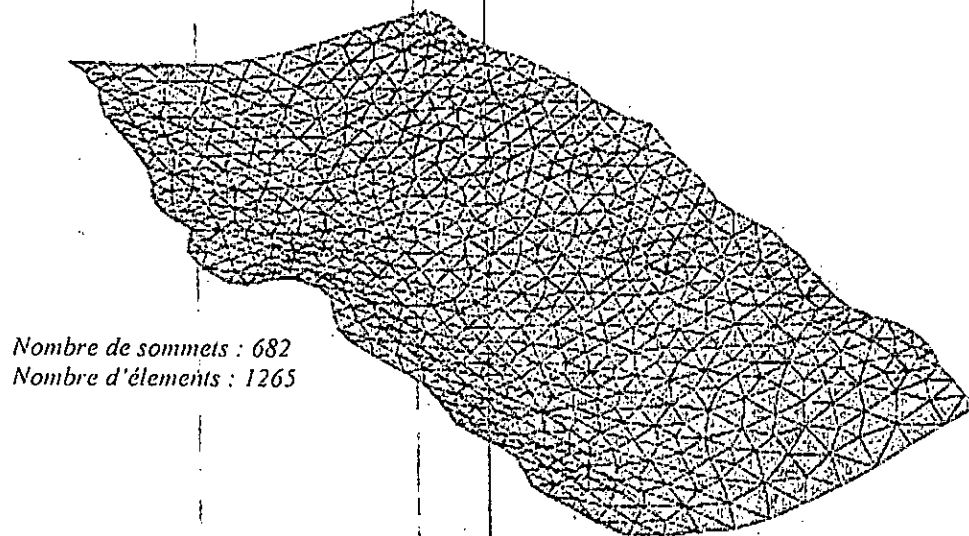


Figure V. 4 : Maillage avec la composante Z

3. Utilisation du logiciel YAMS

L'enrichissement du maillage est effectué en moyennant le logiciel YAMS.

Le logiciel YAMS a à remailler la géométrie donnée par EMC2 tout en respectant la métrique imposée (qui conditionne la taille des éléments). S'il ne trouve pas un fichier de métrique associé, il fait la triangulation suivant une métrique prise par défaut. YAMS utilisera le maillage déjà réalisé par EMC2 (après récupération de la composante Z de chaque nœud), et créera de nouveaux nœuds en attribuant à chaque nouveau point créé une altitude calculée par interpolation. Enfin, le maillage P^1 est obtenu [57]. Le maillage obtenu est donné dans la (figure V.5).

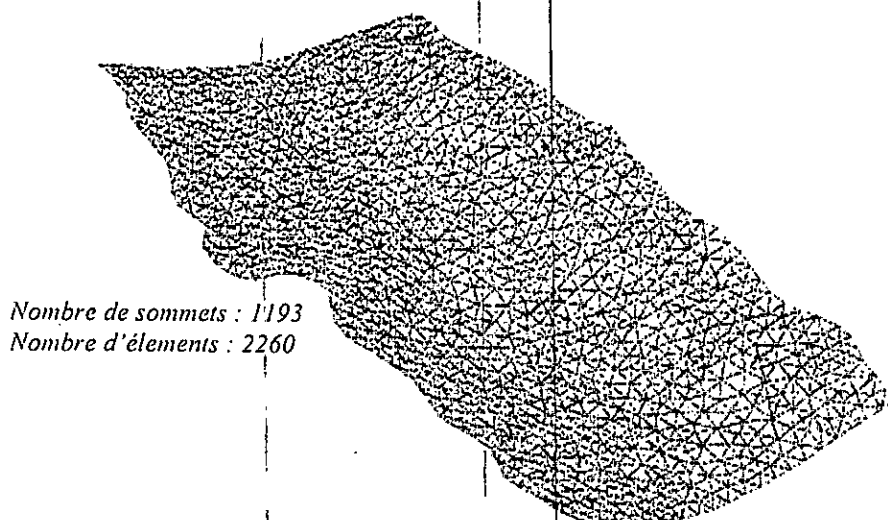


Figure V. 5 : Maillage après raffinement, fichier de sortie du logiciel YAMS

4. Génération du maillage P^2

Une fois le maillage P^1 est généré, nous devons procéder à la génération d'un maillage P^2 qui serait accepté par le code de simulation FLOMOD. Pour ce faire nous avons eu recours à quelques programmes de la bibliothèque MODULEF¹ pour créer un maillage P^1 iso P^2 c'est à dire chaque triangle sera divisé en 4 triangles P^1 . A la fin on récupère les nœuds sommets du premier triangle P^1 et les nœuds sommets du triangle intérieur qui constituent les nœuds P^2 en utilisant des tables de correspondance.

Une fois le maillage P^2 est généré à partir du maillage P^1 selon le format accepté par le code de simulation FLOMOD, on procède à la préparation du fichier de données en utilisant l'outil SIG et en spécifiant les différents paramètres du modèle. Ensuite, on lance l'exécution du code FESWMS [55].

IV. VISUALISATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Comme nous l'avons déjà signalé FESWMS est un code de calcul qui simule les écoulements surfaciques dans différents systèmes hydrauliques. Ce logiciel résoud les équations de mouvement et de continuité intégrées sur la profondeur. On obtient ainsi la hauteur moyenne et les composantes de la vitesse moyennes sur la profondeur. Pour la visualisation graphique des résultats, nous avons utilisé la combinaison de moyens parmi lesquels nous pouvons citer (MEDIT, VISU et le SMS). Ces logiciels sont très interactifs mais les deux premiers présentent l'inconvénient d'être de nature P^1 . Ce problème ne se pose pas pour le visualiseur SMS car il est adapté au code utilisé (FESWMS), et permet ainsi de représenter l'information globale sur tous les nœuds du maillage.

L'élévation du fond Z_f le long du tronçon est représentée par les figures suivantes :

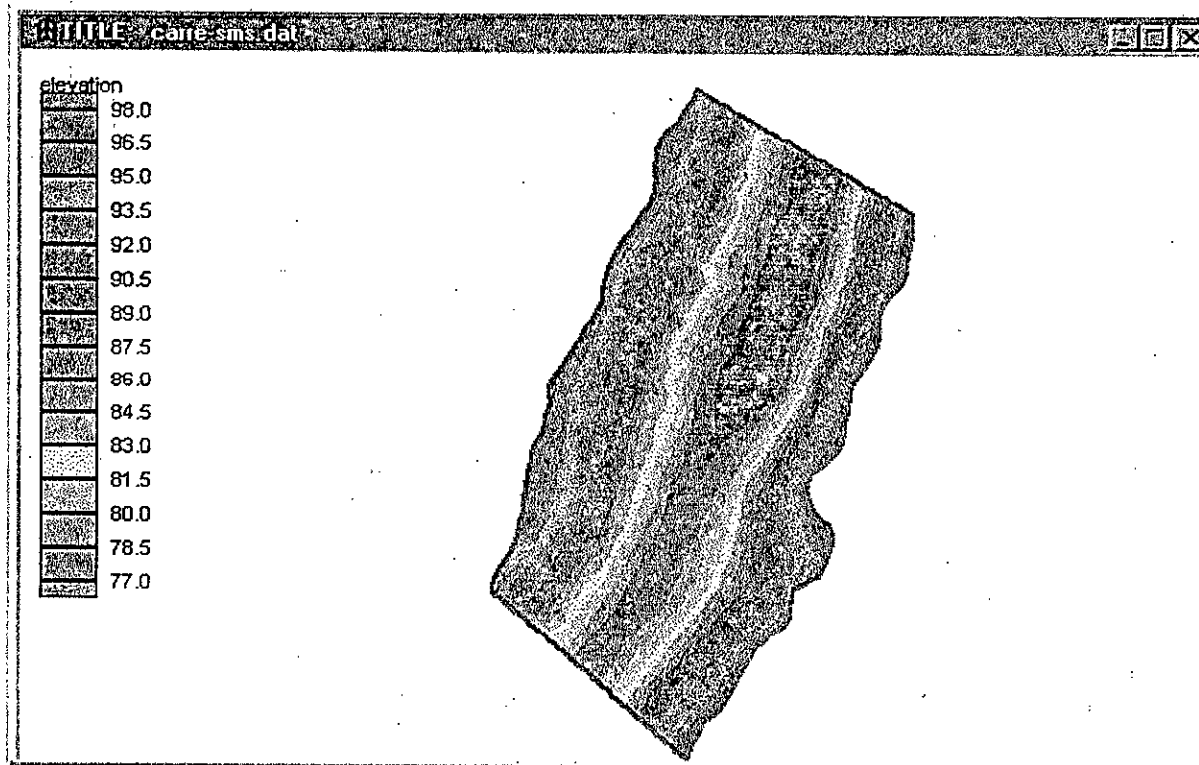


Figure V. 6 : Hauteur du fond par rapport au niveau de la mer.

¹ : Une bibliothèque modulaire d'éléments finis

La simulation a été faite pour plusieurs débits en régime permanent. Le tableau ci dessous résume les débits la hauteur du plan d'eau à l'aval pour différents scénérii.

En effet nous avons considéré plusieurs débits à savoir $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 2600 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 2800 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Débit $Q(\text{m}^3/\text{s})$	Niveau du plan initiale $H_{\text{init}}(\text{m})$	Niveau du plan d'eau à l'aval $H_{\text{aval}}(\text{m})$
1000	85.05	85.00
2500	89.75	89.70
2600	89.95	89.90
2800	89.95	90.10
3000	92.00	91.75
4200	93.00	92.80

Tableau 1 : Conditions initiales à l'amont et à l'aval

Les simulations hydrodynamiques réalisées avec le modèle FEWMS ont permis de déterminer les champs de vitesses, la profondeur du plan d'eau et les limites d'écoulements pour chaque débit du cours d'eau. Les figures V.7, V.10, V.13, V.16, V.20 et V.22 donnent les champs de vitesses et les limites d'écoulement pour les différents débits. Les profondeurs du tirant d'eau sont données par les figures V.8, V.11, V.14, V.17, V.20, et V.23.

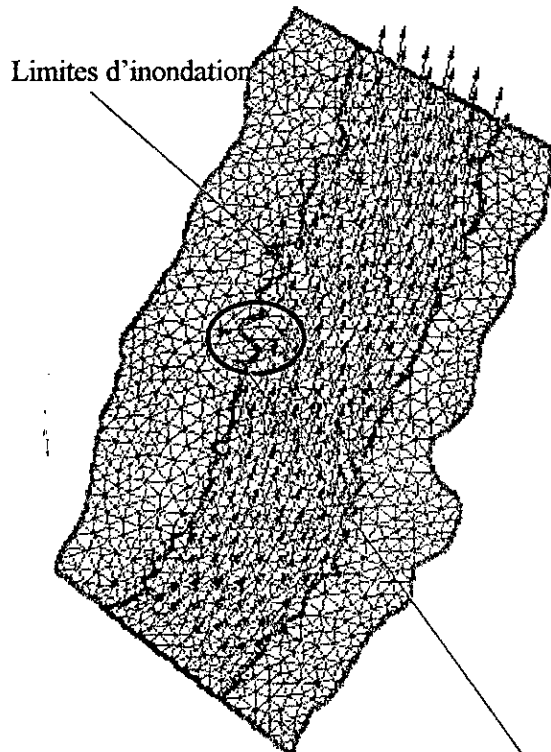


Figure V.7 : Champs de vitesse (m/s)

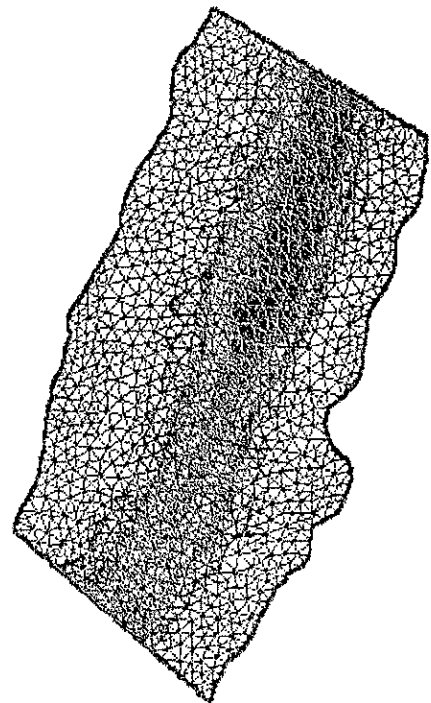
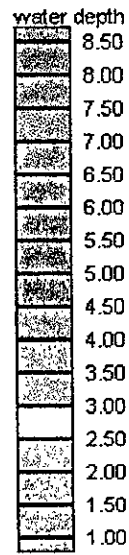


Figure V.8: Profondeur de l'écoulement en (m)

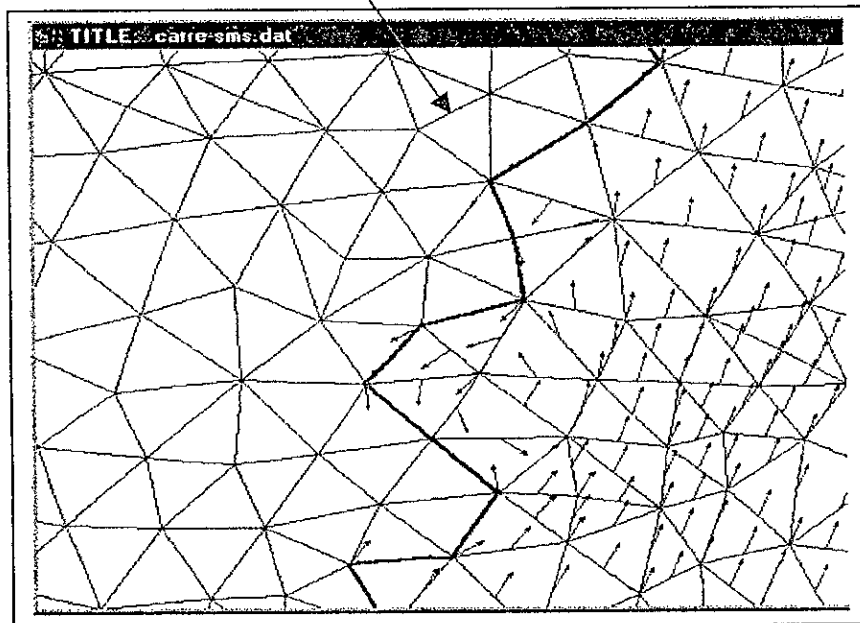


Figure V.9 : Zone de recirculation

$$Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$$

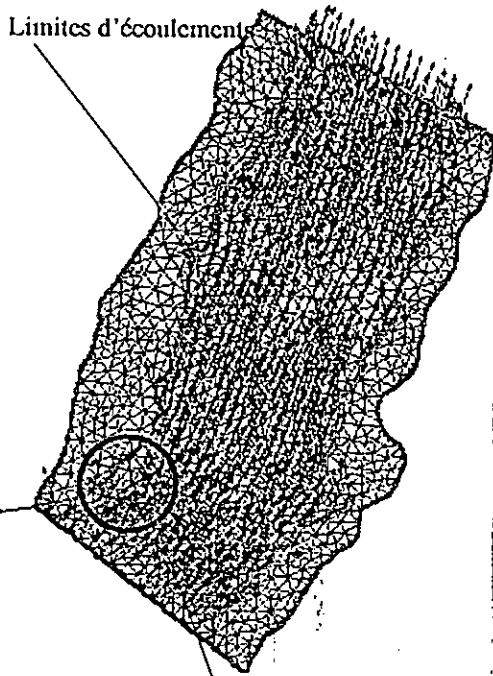


Figure V. 10: Champs de vitesse (m/s)

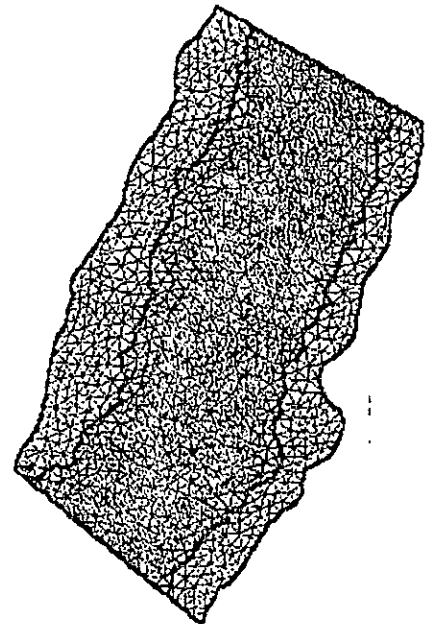
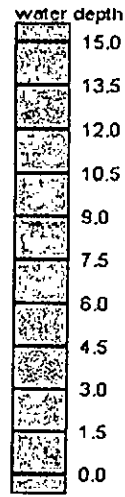


Figure V.11: Profondeur de l'écoulement en (m)

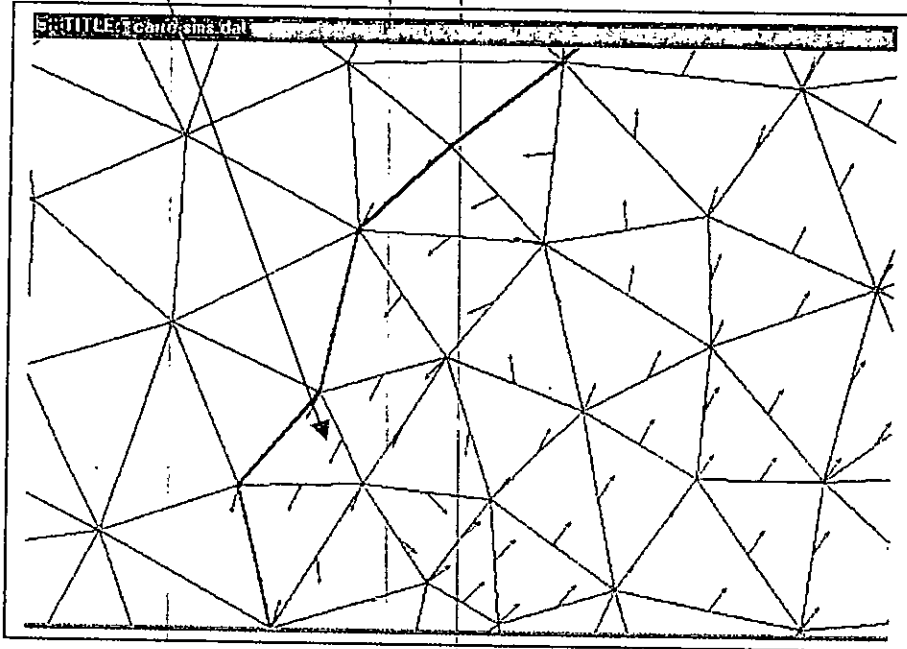


Figure V.12 : Zone de recirculation

$$Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$$

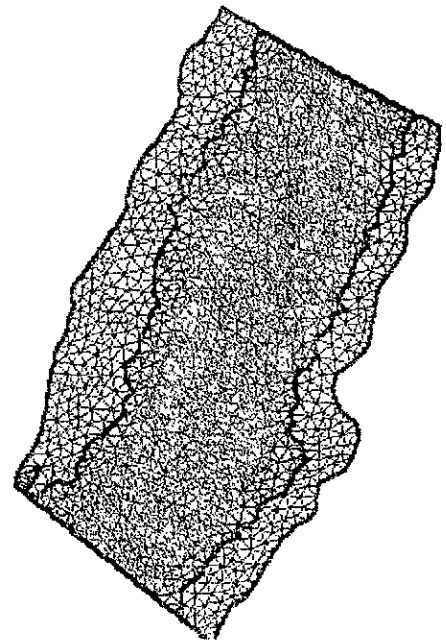
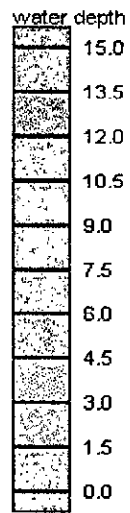
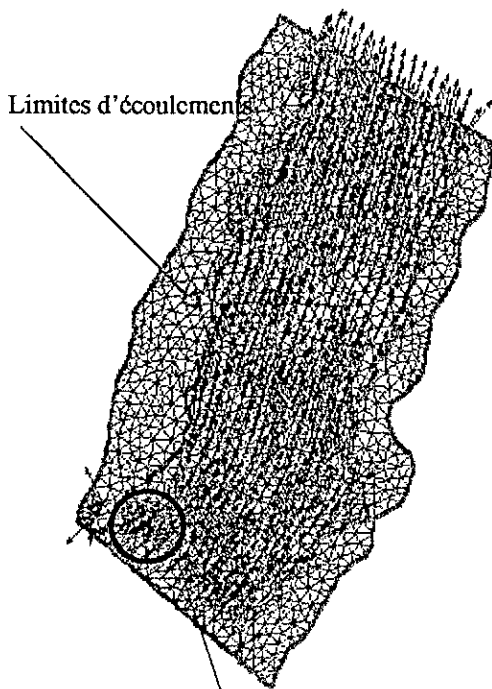


Figure V.13: Champs de vitesse (m/s)

Figure V.14 : Profondeur de l'écoulement en (m)

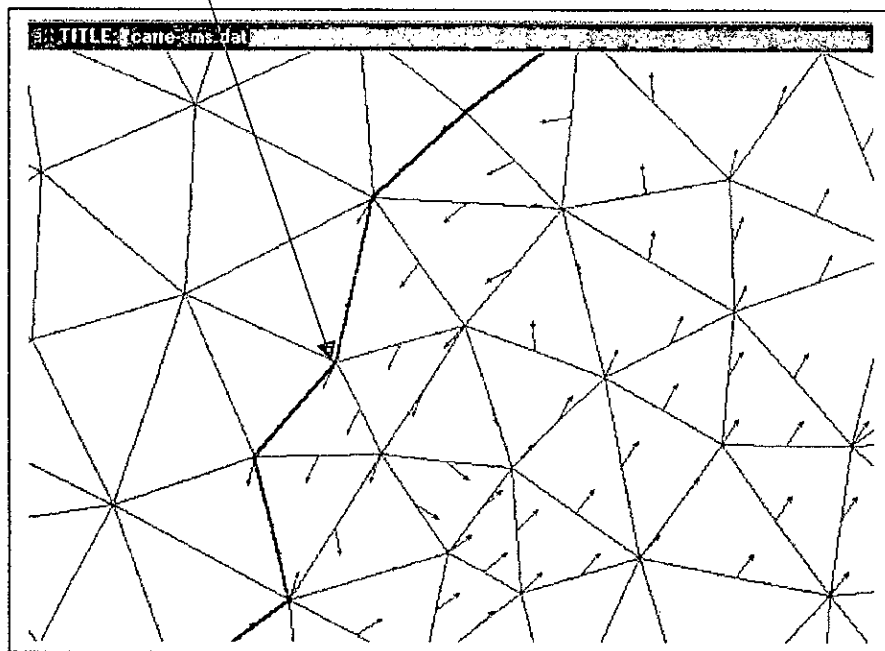


Figure V.15 : Zone de recirculation

$$Q = 2600 \text{ m}^3/\text{s}$$

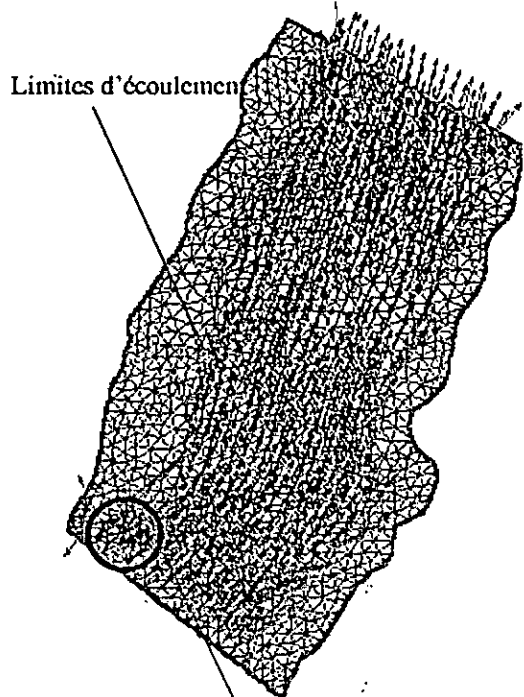


Figure V.16 : Champs de vitesse (m/s)

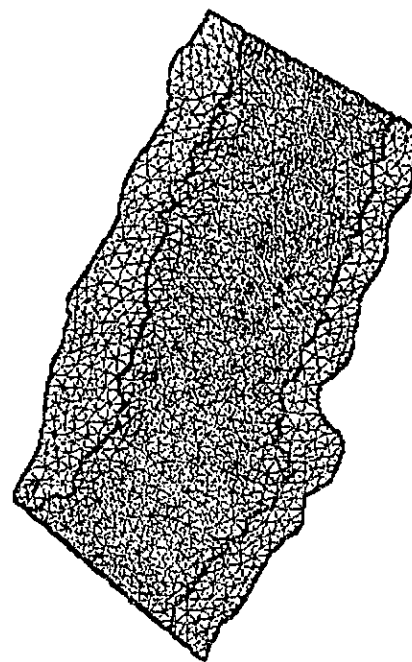
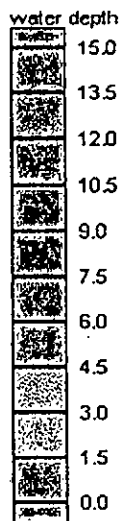


Figure V.17: Profondeur de l'écoulement en (m)

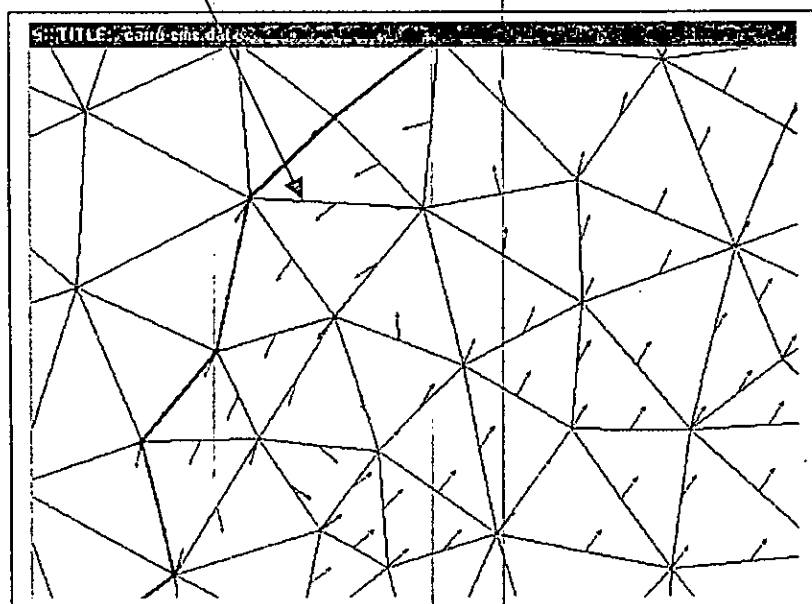


Figure V.18 : Zone de recirculation

$$Q=2800 \text{ m}^3/\text{s}$$

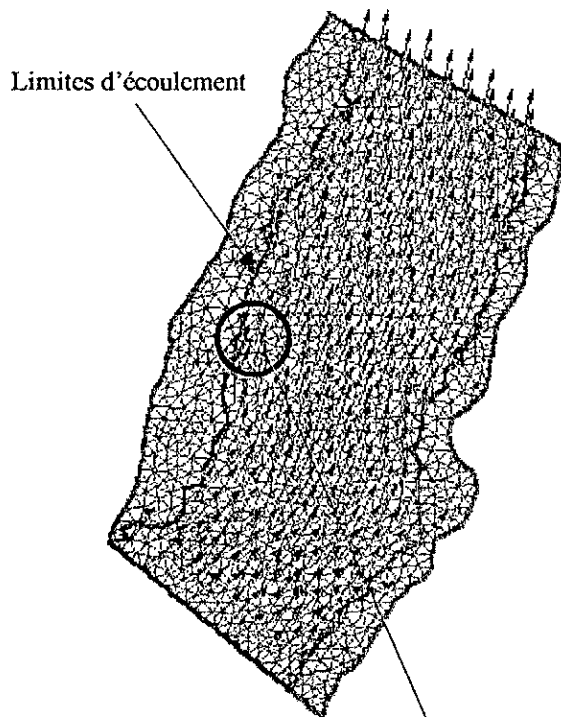


Figure V.19: Champs de vitesse (m/s)

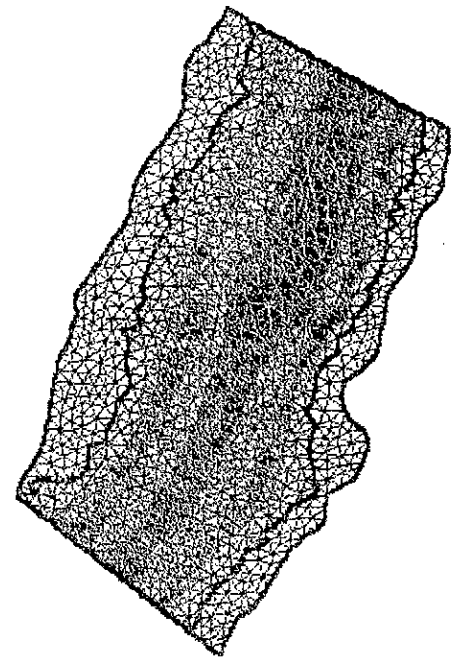
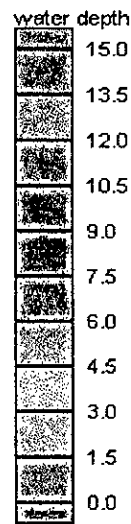


Figure V.20: Profondeur de l'écoulement en (m)

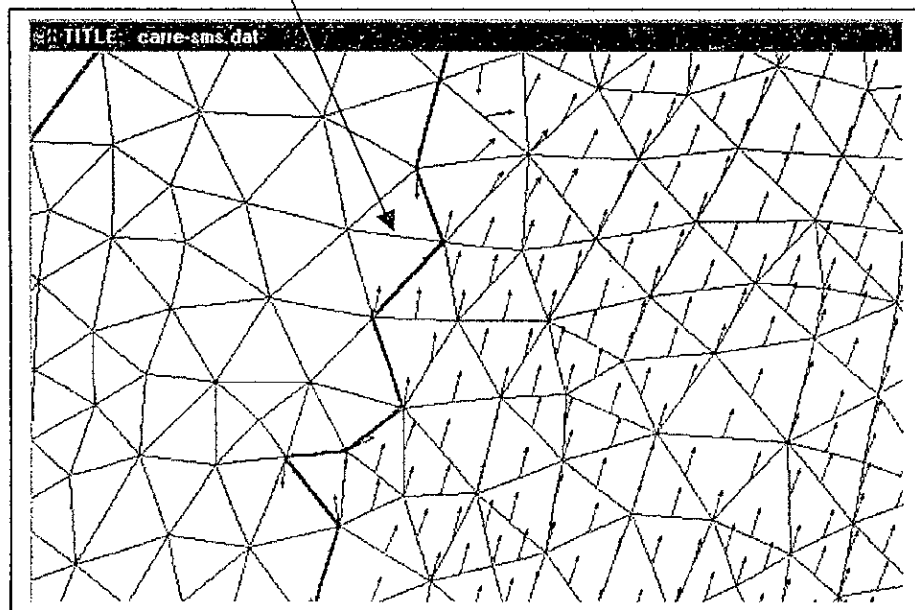


Figure V.21 : zone de recirculation

$$Q = 3000 \text{ m}^3/s$$

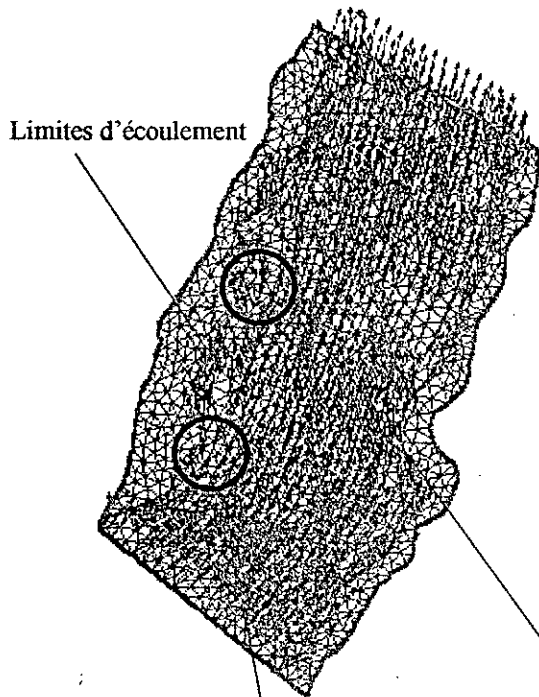


Figure V.22 : Champs de vitesse (m/s)

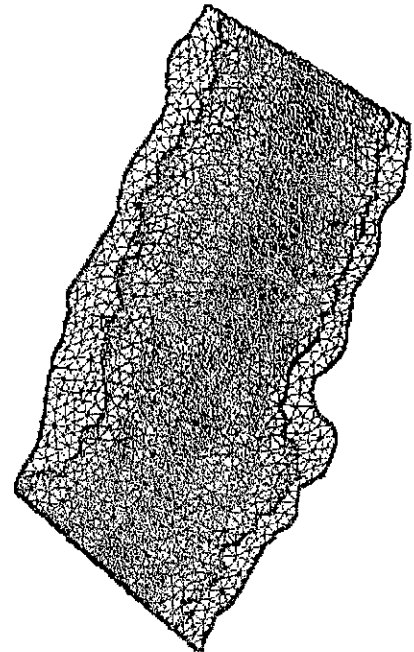
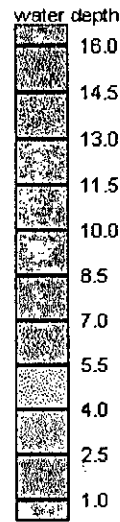


Figure V.23: Profondeur de l'écoulement en (m)

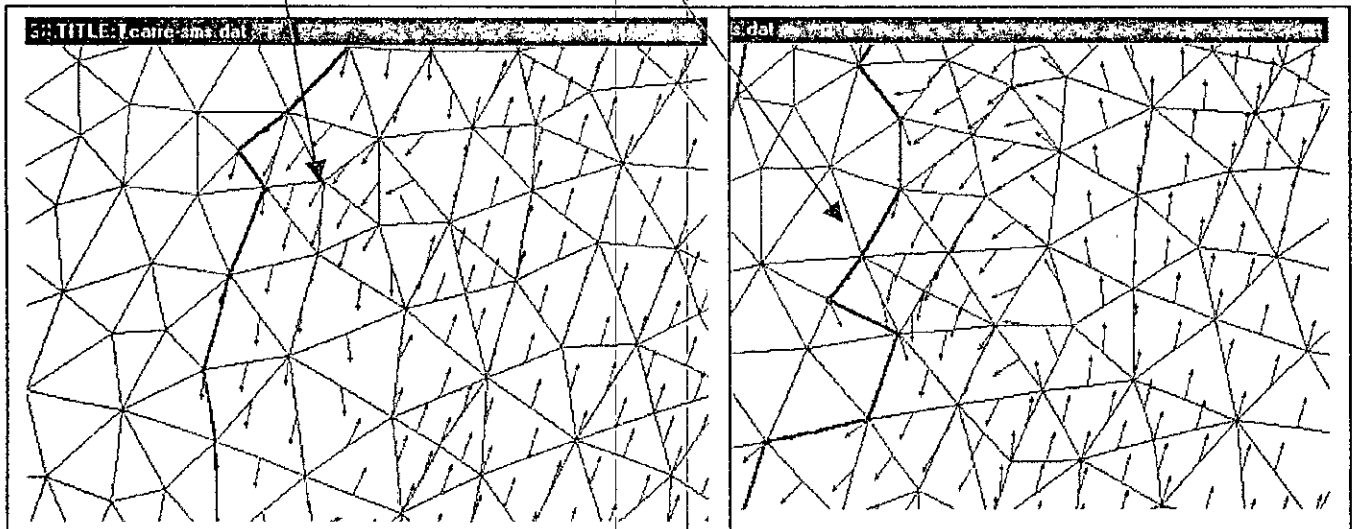


Figure V.24 : Zones de recirculation

$Q = 4200 \text{ m}^3/s$

Le débit $Q_{10 \text{ ans}} = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ représente le débit décennal. Quant au débit $Q_{25 \text{ ans}} = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$, il correspond au débit dont la période de retour est de 25 années. Généralement, les crues qui surviennent dans le bassin suite à la surabondance des précipitations et du ruissellement du bassin versant de la Soummam dépassent largement les capacités hydrauliques naturelles de l'oued.

Débit $Q(\text{m}^3/\text{s})$	Largeur moyenne en (m)	Largeur maximale en (m)
1000	81	145
2500	104	170
2600	107	174
2800	110	177
3000	114	180
4200	119	193

Tableau 2: largeurs moyennes et maximales pour différents débits de crues

Nous remarquons sur le tableau ci dessus (Tableau 2) que les largeurs moyennes d'écoulement varient peu en comparaison avec la variation des débits. Ceci confirme bien le caractère encaissé de la vallée. En effet, de par sa situation entre deux ensembles géomorphologiques, la vallée présente un sillon inter- montagneux de qui a une largeur peu variable. Comme conséquence, la conservation de la masse s'exprimera par l'augmentation de la hauteur d'écoulement en passant d'un débit à un autre.

Les zones de recirculation sont aussi représentées sur les figures V.9, V.12, V.15, V.18, V.21 et V.24. Ces dernières sont essentiellement dues à la géométrie du canal (élargissement, rétrécissements, changement de pente, ...). Le code FEWMS nous fournit aussi la largeur maximale et moyenne du champ d'écoulement pour les divers débits.

Les rouleaux de recirculation sont causés par la macro rugosité du lit du cours d'eau ou par la présence d'un obstacle. En effet, lorsque le lit du cours d'eau est rugueux, les particules fluide seront freinées et les vitesses seront réduites ou annulées. Ceci va constituer une sorte d'obstacle pour les autres particules fluides qui viennent se buter contre elles et va causer, de ce fait, un changement de direction et créera des rouleaux.

Le coefficient de rugosité sont des coefficients empiriques qui affecte beaucoup la solution. Un coefficient de rugosité estimé pendant la conception initiale d'un maillage ne devrait pas être beaucoup ajusté si des données topographiques suffisantes et précises ont été rassemblées.

La principale difficulté dans la mise au point des modèles numériques de simulation en général et de FESWMS en particulier, est le choix correct du coefficient de rugosité de chaque élément.

Dans notre cas nous avons pris un coefficient de Manning à 0.035, calculé sur la base de la granulométrie du lit mineur, et sur les jaugeages ainsi que sur les nivellements des repères indiquant la cote atteinte par l'eau effectués à la station de Sidi Aich, pendant la crue de 1967 [25].

Des changements aux coefficients de rugosité doivent être faits soigneusement de sorte que les valeurs ajustées soient appropriées pour le matériel du lit, la pente de canal, et la couverture végétale qui existent dans le domaine couvert par un maillage particulier.

Pour bien simuler les écoulements de l'oued, nous devons prendre des coefficients de rugosité différents pour le lit mineur et majeur.

Les coefficients de viscosité ν_t affectent habituellement la solution moins que les coefficients de rugosité. L'influence de ν_t est plus grande dans un maillage d'élément finis où les gradients de vitesse sont grands.

Des coefficients croissants de ν_t réduisent les gradients de vitesse, et la distribution horizontale de la vitesse devient uniforme.

Si on veut prendre en compte d'éventuelles singularités de la solution ou des détails géométriques avec la discrétisation, il est naturel de faire des raffinements de maillage locaux dans certaines régions.

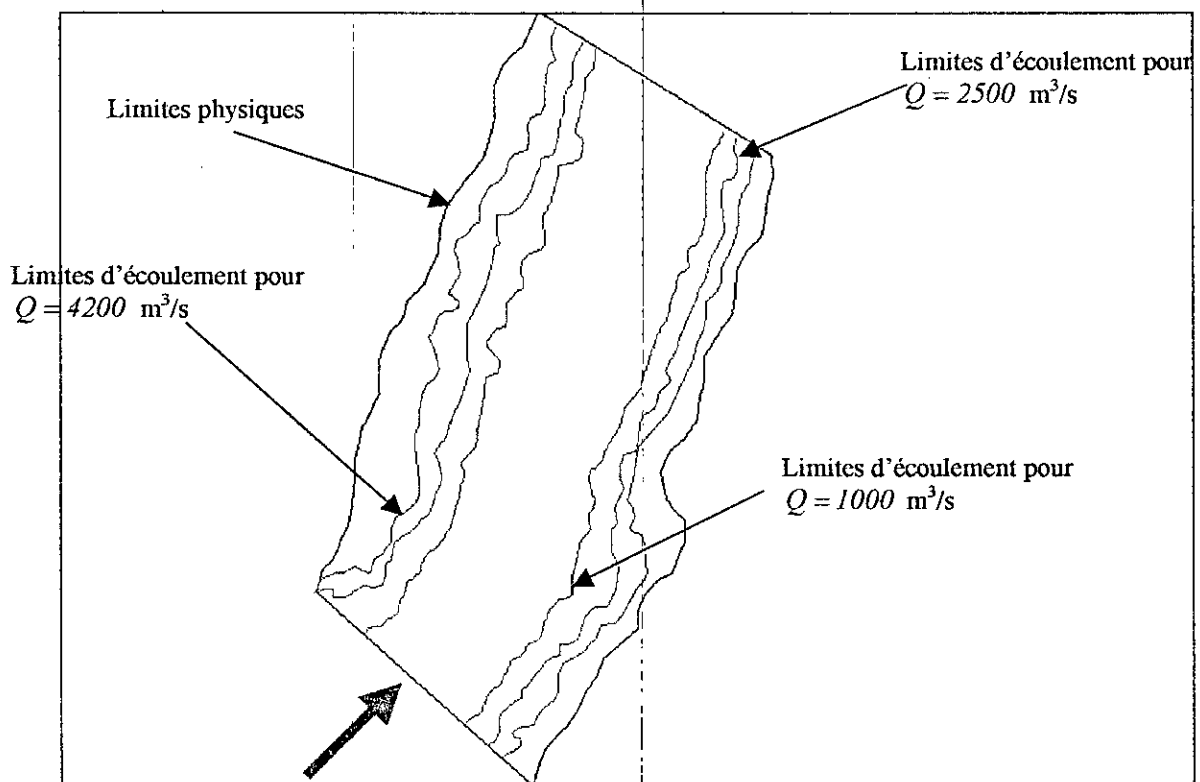


Figure V.25 : Schéma représentant les limites d'écoulement pour trois débits différents.

en Général

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'originalité de ce travail réside dans l'étude des crues en utilisant un code de calcul de type éléments finis appliqué sur un tronçon réel de l'oued Soummam. En effet, ces dernières années, la modélisation numérique s'est imposée comme un puissant outil pour la modélisation des phénomènes physiques. On résout numériquement les équations de Navier-Stokes en présence de la turbulence. La partie de notre travail qui s'inscrit dans ce domaine a consisté à rechercher un modèle numérique, peu coûteux en temps de calcul, permettant de représenter les écoulements dans les canaux naturels. Dans la version actuelle du code FESWMS, à savoir Flo2dh, les équations de Saint Venant sont discrétisées par une méthode d'éléments- finis et résolues par un algorithme implicite, inconditionnellement stable. Le modèle de turbulence associé est un modèle à viscosité constante.

La discrétisation en éléments finis de la géométrie complexe du tronçon est réalisée en utilisant plusieurs logiciels. En effet, dans un premier temps nous avons procédé à la délimitation du contour du domaine d'étude à l'aide du SIG. Pour réaliser le maillage pauvre triangulaire à trois nœuds, nous avons utilisé le logiciel EMC2. Pour pouvoir réaliser un maillage de surface 3D, il nous a fallu récupérer la composante Z de chaque nœud constituant le maillage. Ceci est réalisé grâce au programme EXTRACTCCOR. Ce dernier permet de comparer les coordonnées de chaque nœud du maillage EMC2 avec les coordonnées de la grille du MNA et d'attribuer la composante Z au dit nœud.

Une fois le maillage 3D est réalisé nous avons procédé au raffinement de ce maillage moyennant le logiciel de remaillage YAMS.

FESWMS donne comme résultats de calcul, en chaque nœud du maillage, une hauteur d'eau ainsi que les deux composantes horizontales moyennées de la vitesse. Pour une approche plus physique des résultats, il est important de visualiser la direction de cette vitesse ainsi que sa norme : c'est ce qu'on appelle le champ de vitesse. Ceci est réalisé grâce au logiciel SMS.

L'une des difficultés de la modélisation des écoulements dans la nature est la détermination de l'ordre de grandeur du frottement et donc du coefficient de Strickler à imposer sur les divers tronçons du bief à étudier. En effet, la rivière en crue comporte des parties ayant des caractéristiques très différentes. Le lit mineur, qui correspond à la partie de la rivière où l'écoulement se fait la majeure partie du temps est plus lisse et sa rugosité est généralement constante sur des tronçons assez long. Quant au lit majeur, il correspond à la partie occupée épisodiquement. En général, il est encombré par la végétation, et parfois de constructions et sa rugosité est importante. Pour être fidèle, la modélisation doit ainsi prendre en compte des coefficients de rugosité différents pour le lit majeur et mineur. Mais la distinction entre les deux lits n'est pas souvent évidente. On fait alors souvent un choix empirique du coefficient de Strickler basé sur le type de relief, la nature et la densité de végétation, la présence de construction, etc., et en utilisant un barème. Toute erreur sur l'évaluation du coefficient de Strickler aura des incertitudes sur les résultats. Si on surestime le coefficient de Strickler, on surestime de temps de propagation et sous-estime la hauteur d'eau.

Lors de l'étude des crues, il existe aussi des singularités sur le lit du cours d'eau qu'il faut prendre en compte en les modélisant (cas des ouvrages tel que les ponts).

En effet, lors d'une onde de submersion, la géométrie peut présenter des irrégularités qui remettent en cause l'hypothèse hydrostatique.

Le code FESWMS tient compte de plusieurs paramètres physiques ceci rend d'un côté les résultats proche de la réalité mais d'un autre côté le choix judicieux de ces paramètres rend son application délicate.

RECOMMANDATIONS

Pour une meilleure reproduction des écoulements en nature il est indispensable de caler le modèle numérique de simulation. Le calage consiste principalement à ajuster les coefficients empiriques de la formulation, dont le coefficient de rugosité. Il permet également de vérifier que la schématisation adoptée respecte les conditions d'écoulement naturelles. Pour caler un modèle, les données nécessaires sont :

- les observations recueillies au cours d'une visite de site,
- les conditions aux limites correspondantes aux différentes mesures (débit et niveau aval),
- les relations niveau/ débit disponible sur le site.

Afin de réduire les risques d'inondation et éviter les dommages qui en résultent un certain nombre de recommandations peut être émis, parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Planifier l'utilisation des sols de manière à éviter de construire dans les régions vulnérables et en bordures de l'oued.
- Limiter la dégradation de l'environnement, comme la déforestation ou réaliser des ouvrages tels que les petits barrages pour écrêter les crues, des digues pour détourner les eaux de crue.
- Puisque la pluie est la cause fondamentale des crues dont les inondations sont les manifestations, il faut donc développer des systèmes opérationnels de prévision hydrologiques, pour la mise en alerte des populations.
- Valoriser le rôle de la communication tant pour la compréhension des informations techniques, que pour l'efficacité des moyens et des actions préventives, prévisionnelles, de secours et d'évacuation.
- Développement de systèmes d'information intégré SII¹ (nouveaux outils de planification) pour faciliter la mise en œuvre des actions à mener à l'échelle du bassin versant
- Développement des outils de traitement de données puissant pour la modélisation et la simulation des caractéristiques des bassins versants (topographie, physiographie, inventaire des sites potentiels, morphologie,...), et des phénomènes Hydrologiques et hydrauliques pour améliorer la simulation des écoulements pour des scénarios variés.

L'objectif à terme de ce type d'étude est de développer des systèmes interactifs d'aide à la prise de décision pour la planification rationnelle des bassins versant afin de réduire les risques d'inondation et instaurer des systèmes d'alertes des population en cas d'une crue imminente qui peut survenir en cas d'un épisode pluvieux. Ce type de systèmes permet aussi de réaliser des plans de protection et d'intervention en cas d'une telle catastrophe.

¹ *SII* : Comme son nom l'indique, un système intégré : est un système informatique caractérisé par une composante logicielle basée sur la possibilité d'intégration d'autres éléments logiciels provenant de diverses sources

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dimos, P. & Donay, J-P., 1996. « La conception de SIG méthode et formalisme », Hermès, paris
- [2] Quodverte, P., 1994. « Cartographie numérique et information géographique. Importance et conséquences du progrès des sciences et des techniques », thèse de doctorat, université d'Orléans.
- [3] Cheikh, M., 1999. « Concepts de base des systèmes d'information géographiques, CNIG, université de Blida du 25 au 29 Septembre 1999, Algérie »
- [4] Habert, E., 2000. « Qu'est ce que un système d'information géographique ? », Laboratoire de cartographie appliquée, Institut de recherche pour le développement (IRD).
- [5] Collet, C., 1992. « Systèmes d'information géographiques en mode image », presses polytechniques et universitaires Romandes, collection gérer l'environnement, Lausanne, Suisse
- [6] Laurini, R. & Milleret-Raffort, F., 1993. « Les bases de données en géomatique », Hermès, paris.
- [7] Didier, M. & Bouveron, C., 1993. « Guide économique et méthodologique des SIG », Hermès, Paris
- [8] Gilliot, J., 2000. « Introduction aux SIG Systèmes d'informations géographiques, Introduction & information spatiale », DAA AGER
- [9] Ian, G., 1991. « Object oriented methods », Addison-Wesley
- [10] Denegre, J. & Salge, F., 1997. « Des systèmes d'information géographiques », presse universitaire de France, collection Que sais-je ?
- [11] Dangermond, J., 2001. « L'information géographique est un langage puissant et universel », interview.
- [12] Gaouas, A., 2001. « Cours sur les Systèmes d'information géographiques », INA Alger.
- [13] Laaribi, A., 2000. « SIG et analyse multicritère », Hermès sciences
- [14] Ndiaye, D., 1997. « Statistique pour la politique de l'environnement : Système d'information Géographique », pp.54-60
- [15] Bouchaibi, J., 1998. « Elaboration d'un TIN (Triangulated Irregular Network) pour la modélisation numérique de bassin versant », mémoire d'ingénieur (EMI, Maroc).
- [16] ArcView, 1995. « GIS the geographical information system for everyone », ESRI (*Environmental systems research institute*)

-
- [17] **Avenue, 1995.** « Customisation and application development for ArcView », ESRI (*Environmental systems research institute*)
- [18] **Abdelali, K., 1999.** « Proposition d'un plan d'aménagement de la vallée de l'Ourika suite à la crue du 17 aout 1995 par l'élaboration d'une base de données multi -sources (haut atlas de Marrakech) », thèse de doctorat 3eme cycle, université Mohamed V-AGDAL
- [19] **Floissac, F., 1997.** « Traitement automatique des MNTs pour l'analyse géomorphologique. Application aux Afars et à Taiwan », INRIA Sophia Antipolis
- [20] **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 ».
- [21] **Ventalon, B., 2001.** « Valorisation du modèle numérique de terrain du grand Lyon et création de produits composites 3D au sein de l'espace plan et images de la communauté urbaine de Lyon », mémoire d'ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg (E.N.S.A.I.S).
- [22] **Goncalves, G. R., 1999.** « Qualité Requise en Modélisation Numérique du relief: Etude de l'équivalence entre modèle cartographique et modèle numérique », thèse de doctorat en sciences d'information géographique, université Marne-La -Vallée
- [23] **Sysler, F., Muller, F., Cochonneau, G., Guyot, J.L., 1999.** « Délimitation de bassins versants à partir d'un modèle numérique de terrain. comparaison de différentes méthodes pour la bassin du Rio Negro (Amazone) », Manaus'99-hydrological and Geochemical Processes in large Scale River Basins.
- [24] **Clincks, C., 1973.** « Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la basse Soummam (Sidi Aich – Bejaia) », Agencé Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H).
- [25] **Coyne & Bellier, 1973.** « Etude de la régularisation de la Soummam », Direction D'hydraulique de la Wilaya de Bejaia.
- [26] **Hydrotechnic Corporation, 1973-1974.** « Etude technico-économique des ressources hydrauliques de l'Algérie rapport régionaux / HYDROTECHNIC »
- [27] **Ait Ouyoub, A. & Neghouche, S., 2001.** « Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère de la plaine alluviale de la basse Soummam », mémoire d'ingénieur, IST, USTHB, Alger
- [28] **Amghar, A., 1991.** « Synthèse hydrogéologique de la vallée de la basse Soummam », mémoire d'ingénieur (PFE), USTHB, Alger.
- [29] **Zerourou, M., 1990.** « Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée de la basse Soummam », mémoire d'ingénieur, USTHB, Alger
- [30] **Plan National de L'Eau PNE, 1995.** « Direction des Grands Aménagements et Infrastructures Hydrauliques (DGAIH), ministère des ressource »

-
- [31] Le Core, G., 1998. « Outil d'analyse par Krigeage », IFREMER-Sète, Atelier SIG COPEMED, Malaga.
- [32] Monat, F., 2000. « Mise en place d'un système d'information géographique (SIG) sur le bassin versant du Merguellil », Rapport de stage.
- [33] Comollet, R., 1982. « Mécanique expérimentale des fluides », Masson, Paris
- [34] Lesieur, M., 1994. « La turbulence, presse universitaire de Grenoble »
- [35] Candel, S., 2001. « mécanique des fluides », 2eme édition, Dunod
- [36] Violette, P.-L., Chabard, J.P., Esposito, P., Laurence, D., 1998. « Mécanique des fluides appliquée », presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- [37] Hervouet, J. M., 2001. « Hydrodynamique des écoulements à surface libre, modélisation numérique avec la méthode des éléments finis », thèse d'habilitation à diriger des recherches, université de CAEN/ Basse Normandie U.F.R des sciences.
- [38] Fröhlich, D.C., 1989. « Finite Element Surface-Water Modeling System: Two dimensional flow in horizontal plane Version 1 Draft User's Manual US Department of Transportation Federal Highway Administration, Virginia.
- [39] Nakhle, B., 2000. « Modélisation numérique des écoulements d'eau à frontière libre », DEA Modélisation et Calcul Intensif, Université libanaise – Université Saint- Joseph
- [40] Hervouet J.-M. & Van Haren, L., 1994. « TELEMAC- 2 D version 3.0 principe note », Rapport EDF HE-43/94/052/B.
- [41] Balyn, P., 2001. « Contribution à la modélisation numérique de l'évolution morphologique des cours d'eau aménagés lors des crues », thèse de doctorat , université Claude Bernard Lyon I.
- [42] Chassaing, P., 2000. « Turbulence en mécanique des fluides », INP Toulouse
- [43] Bergstrom R., 1997. « Two equation turbulence models for swirling flow, the degree of master of science in engineering physics », Chalmers university, Sweden
- [44] Turbelin, G., 2000. « Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent », thèse de doctorat, université d'Evry Val d'Essonne
- [45] Buil, N., 1999. « Modélisation tridimensionnelle du transport de polluants dans les écoulements à surface libre de rivière », thèse de doctorat, université Claude Bernard –Lyon I
- [46] Celik, I., B., 2002. « Overview of Turbulence Models for Industrial Applications: Part-I: Introduction to Turbulence Modelling, West Virginia University »

- [47] Froehlich, D.C., 1991. « Finite Element Surface-Water Modeling System: Two dimensional flow in horizontal plane Version 2 Draft User's Manual US Department of Transportation Federal Highway Administration, Virginia.
- [48] Froehlich, D.C., 2002. « Finite Element Surface-Water Modeling System: Two dimensional flow in horizontal plane Version 3 Draft User's Manual US Department of Transportation Federal Highway Administration, Virginia.
- [49] Le Dimet, F-X., Mazouric, C., Castaigns, W.,(2001)., «Models and data for flood modelling », LMC(Laboratoire de modélisation et calcul)-(IMAG) (Institut d'informatique et mathématique appliquées de Grenoble).
(http://www-lmc.imag.fr/lmc-edp/Cyril.Mazauric/html_fr/Doc/paper.pdf)
- [50] Rappaz, J. & Picasso, M., 2000. « Introduction à l'analyse numérique », presses polytechnique et universitaires romandes.
- [51] Steffer, P. & Blackburn, J., 2001. « River2D : Two dimensional depth averaged model river hydrodynamics and fish habitat- introduction to depth averaged modeling and user's manual, university of Aliberta.
- [52] Jedrzejewski, F., 2001. « Introduction aux méthodes numériques », Springer – Verlag.
- [53] Jean Loup, R., 2003. « Eléments finis en hydrodynamique », université Ulaval , Canada.
- [54] Dhatt, G. & Touzot, G., 1984. « Une présentation de la méthode des éléments finis, collection université de Compiègne, deuxième édition.
- [55] Talamali, S., 2002. « L'hydrodynamique des rivières et systèmes d'information géographique », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique (ENP).
- [56] Hecht, F. & Saltel, E., Avril 1990. « EMC² un logiciel d'Édition de maillage et de Contours bidimensionnels », Rapport technique N°118, INRIA.
- [57] Frey, P., 2001. « Mesh visualisation tool », projet GAMMA -INRIA en Collaboration Avec SIMULOG

SITES WEB CONSULTÉS

<http://www.inria.fr>

<http://www.iaq.asso.fr>

<http://www.mapinfo.com>

<http://www.esrifrance.fr>

<http://www.geoconcept.com>

<http://www.unites.uqam.ca>

<http://www.fao.org>

<http://water.usgs.gov>

<http://www.scisoft-gms.com>

<http://www.cemagref.fr>

<http://www.ems-i.com>

<http://www.iaq.asso.fr>

<http://www.bossintl.co.uk>

<http://agora.gc.ca>

www.wmo.int

Annexe

ANNEXE

DESCRIPTION DETAILLEE DE LA COMPOSANTE LOGICIELLE UTILISEE

I. Présentation du logiciel de maillage Plan EMC²

EMC² est un logiciel portable, graphique et interactif d'édition de maillages et de contours en 2 dimensions, développé au sein de l'I.N.R.I.A¹. Il permet de générer interactivement des maillages bidimensionnels pour la méthode des éléments finis en définissant la géométrie, la discrétisation des contours et l'affectation des sous domaines et des numéros de référence (afin d'introduire un lien avec la physique : Conditions aux limites, propriétés des matériaux). Il est possible alors, d'éditer un maillage en ajoutant, supprimant, déplaçant les sommets, ... et en lui appliquant des transformations affines : symétrie, rotation, ... etc.

Le logiciel EMC² est divisé en trois applications principales [56]

1. L'application **CONSTRUCTION** : Cette application permet d'éditer et de créer la géométrie du domaine à l'aide de points, de segments, d'arc de cercle, de splines, de droite et de cercles. Dans notre cas la géométrie est représenté par un nuage de points.
2. L'application **PREP_MESH** : Cette application permet de définir la discrétisation sur les entités définissant le bord du domaine ainsi que les numéros de référence, sur les sous domaines, sur les lignes et sur les point en vue de faire entrer des données physiques différentes (conditions aux limites et initiales).
3. L'application **EDIT_MESH** : Cette application permet la création et édition d'un maillage triangulaire, ou quadrangulaire.

¹ Institut National de Recherche en Informatique et Automatique.

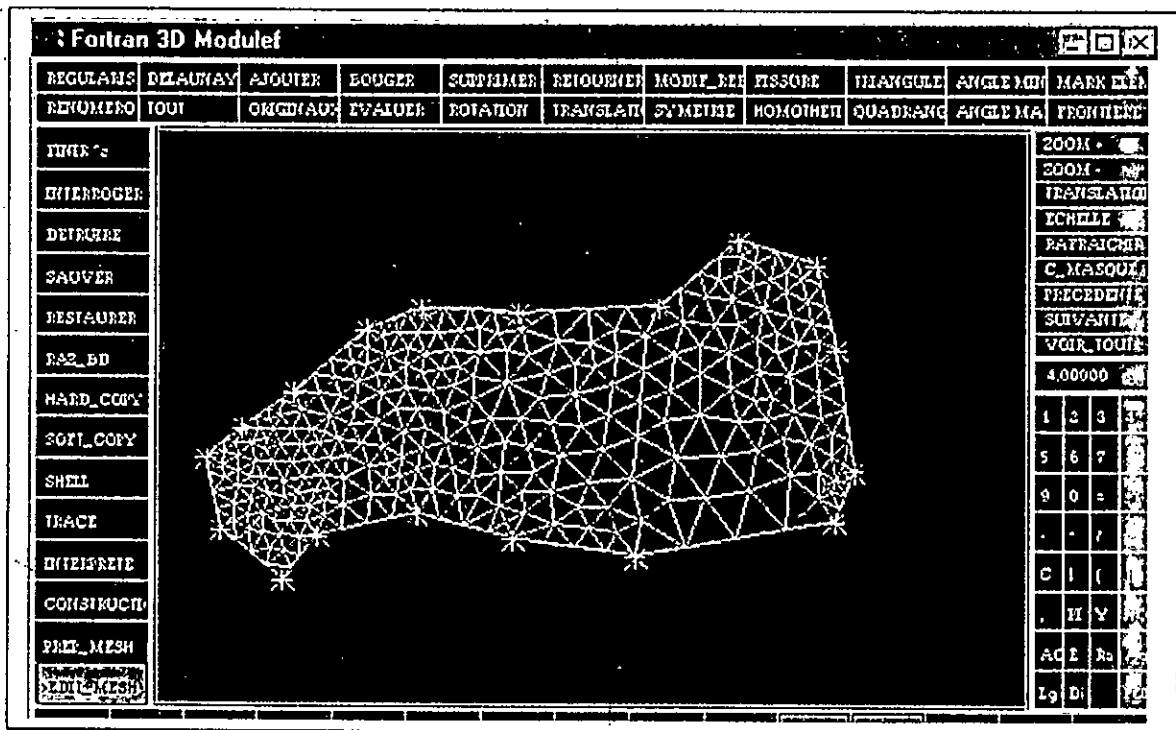


Figure I : Fenêtre du menu principal du logiciel EMC2

II. Le logiciel de remaillage YAMS

YAMS est un logiciel destiné au remaillage adapté des maillages de surface. La donnée est une triangulation de surface, sur laquelle sont appliquées des modifications topologiques et géométriques. Le but est d'obtenir un maillage simplifié (ou enrichi) correspondant à une carte de tailles donnée.

III. Le logiciel MEDIT

MEDIT est un logiciel qui permet de représenter tout maillage 2D, 3D ou de surface dans une fenêtre graphique qui lui est propre. En plus de sa possibilité à visualiser simultanément plusieurs maillages dans des fenêtres graphiques indépendantes, il permet aussi la création d'animations simplifiées (exemple : évolution d'un champ de solution). MEDIT peut présenter jusqu'à dix (10) maillages en même temps.

IV. Logiciel visu (Visualiseur)

C'est un logiciel qui permet la visualisation des résultats numériques. Les entrées de ce logiciel sont les entrées du mailleur EMC2 et les résultats du code numérique.

Il présente différents modules interactifs qui permettent :

1. De définir les paramètres de la visualisation 3D;
2. De différents types de base de données topologiques et de solutions et de les associer dans des fenêtres pour la visualisation ;
3. De définir la manière à voir les objets, de définir une coupe par plan ;
4. D'éditer une décoration : texte, trait, cadre, dégradé iso valeurs, axes.

ANNEXE

5. De définir le tracé des déformés pour des solutions vectorielles ;
6. De définir le tracé de tenseurs pour des solutions vectorielles ;
7. De définir le tracé des vecteurs, de points critiques, de lignes de courant pour des solutions vectorielles.

V. Logiciel de visualisation SMS (*Surface Water Modeling System*)

SMS est un environnement de maillage de surface et de courbes en 1D,2D,et 3D. c'est un

Pré et post processeur pour la conception ; l'analyse ; la modélisation des écoulements à surface libre. SMS est un utilitaire adapté au code de calcul FESWMS. Il inclut des outils de modélisation en éléments finis 2D, différences finies 2D, et en éléments finis 2.5D. Il est utilisé et pour le traitement et pour le post traitement. SMS est un pré et post processeur graphique pour les modèles numérique des écoulement à surface libre. En Ne disposons pour l'instant que de la version 'démó', SMS est limité seulement au prétraitement (génération du maillage) sans pouvoir le sauvegarder. SMS permet de lire des données du maillage de type P² et produit des profils et des traçages, en coupe, des traçages bidimensionnels de vecteur, des traçages variables dans le temps, des traçages couleur ombragés de découpe, et de l'animation dynamique. Cette dernière est nous permet de mieux comprendre et de mieux interpréter les solutions numériques. Son inconvénient réside dans le fait qu'il ne permet pas la visualisation en 3D.

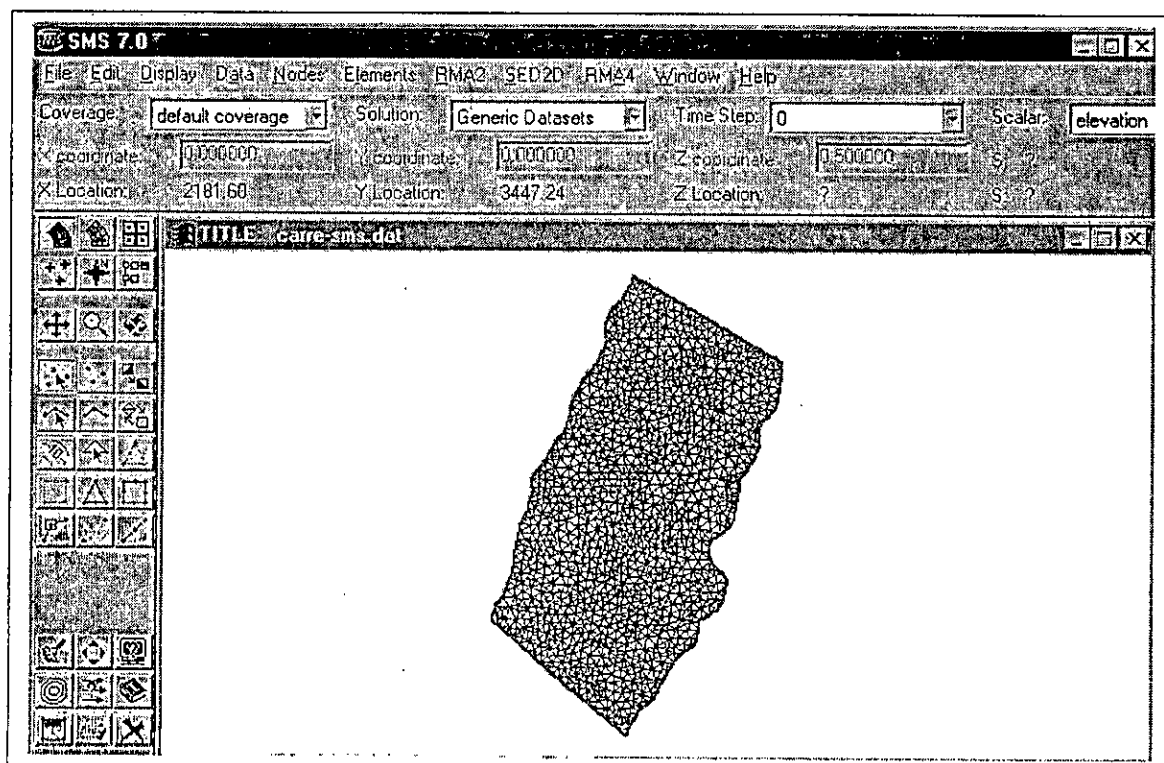


Figure II : Fenêtre du menu principal du logiciel SMS