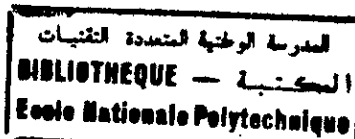


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Ecole Nationale Polytechnique

*Département d'Hydraulique*



Projet de Fin d'Etudes

**Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état**

Stage effectué à :

L'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique

**COUPLAGE D' UN SYSTEME  
D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE AVEC UN  
MODELE NUMERIQUE QUASI  
TRIDIMENSIONNEL DES ECOULEMENTS A  
SURFACE LIBRE**

Soutenu par :

M<sup>r</sup> DJEDOUR M.

Encadré par :

M<sup>r</sup> EL DABAGHI F.(INRIA)  
M<sup>lle</sup> BENMAMAR S.(ENP)

Promotion 2000 / 2001

# *Dédicaces*

*A mes parents ,*

*A ta mémoire Yemma Azzu,*

*A mes frères et à toute ma  
famille,*

*A mes amis*

## RESUME

Nous nous intéressons dans ce travail, à la modélisation des écoulements à surface libre, et particulièrement à la propagation des ondes de crue. Une grande partie est consacrée au couplage d'un système d'information géographique (SIG) avec un code de calcul quasi tridimensionnel des écoulements à surface libre. L'interface a pour but l'automatisation de l'ensemble du processus de simulation, depuis la saisie des données jusqu'à l'exploitation graphique des résultats retournés par le code calcul.

Mots clés : Hydraulique et Ressources en eau, SIG et ArcView, Modélisation physique et numérique, Calcul numérique et Eléments Finis, Unix, Windows, Langage C et Fortran, Génération de maillages et exploitation graphique des résultats.

## ABSTRACT

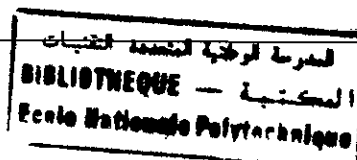
In this work, we are interested by the modeling of water flow surface in general and by the flow wave propagation in particular. A big part of this work will be devoted to the coupling of a geographic information system (GIS) with a quasi tridimensional numerical code. The interface has to automatize the whole process of the simulation since the striking of the data till the graphic exploitation of the results sent back by the arithmetic code.

Key words : Hydraulic and Water Supply, GIS and ArcView, Physical and Numerical Modeling, Numerical Computing and Finite Element, Unix, Windows, Langage C and Fortran, Mesh editing and graphical results exploitation.

## ملخص

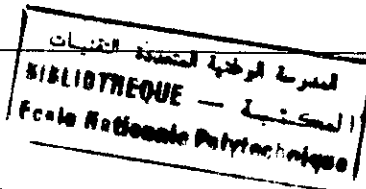
في عملنا هذا ، نهتم بتمثيل السيول الحرة على وجه العموم ، و خاصة بانتشار أمواج الفيضانات . القسط الأكبر من العمل يتمثل في الربط بين الجهاز الإعلامي الجغرافي مع البرنامج العددي ذو ثلاثة أبعاد للسيلان الحر . غرضنا هو آلية مجموع عناصر التشبيه ، منذ استعاب المعطيات حتى الاستغلال البياني لنتائج البرنامج العددي

الكلمات المفتاح الري و الاحتياطات المائية ، الجهاز الآلي الجغرافي أرك بيو ، التشبيه الفيزيائي و العددي ، الحساب العددي ، و العناصر المتناهية ، انيكس ونض وز ، فورترن ، تشكيل الشبكات و الاستغلال البياني للنتائج .



## SOMMAIRE

Sommaire.....	1
Introduction.....	3
<b>Chapitre I Projet WADI .....</b>	<b>5</b>
1. Introduction.....	5
2. Présentation du projet WADI.....	5
3. Objectifs du projet.....	7
4. Plan du projet.....	8
5. Architecture de la plate-forme ESIMEAU.....	11
6. Objet du PFE et ses motivations.....	13
<b>Chapitre II Modélisation des écoulements à surface libre.....</b>	<b>14</b>
1. Introduction.....	14
2. Notions préliminaires.....	14
2.1. Les canaux.....	14
2.2. Types d'écoulements.....	15
2.3. Répartition de la vitesse.....	16
2.4. Répartition de la pression.....	17
3. Modèle physique et position du problème.....	17
3.1. Equations générales de Navier- Stokes.....	17
3.2. Modèle St- Venant 2.5D.....	19
3.2.1. Hypothèses de base.....	19
3.2.2. Opérateur de moyenne.....	20
3.2.3. Transformation des différents termes.....	21
4. Modèle numérique.....	21
4.1. Présentation du modèle utilisé.....	26
4.2. Esquisse algorithmique.....	26
4.2.1. Discrétisation en temps.....	26
4.2.2. Discrétisation spatiale.....	27
4.3. Algorithme de résolution.....	28
4.3.1. Algorithme de Newton.....	28
4.3.2. Intégration numérique.....	29
4.3.3. Résolution de la jacobienne.....	29
<b>Chapitre III Environnement de travail.....</b>	<b>30</b>
1. Introduction.....	30
2. Interface principale.....	30
3. Interface Application Mère / SGBD.....	32
4. Interface Application Mère / EMC2.....	33
5. Interface Application Mère / SIG-ArcVew.....	35
6. Interface Application Mère / Simulation.....	36
7. Interface Application Mère / Exploitation des résultats.....	37

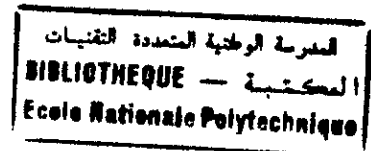


<b>Chapitre IV Outils de la simulation numérique</b> .....	39
1. Introduction.....	39
2. Interface $f$ .....	39
2.1. Préparation des données.....	39
2.2. Utilisation du logiciel EMC2.....	40
2.3. Utilisation du logiciel YAMS.....	41
2.4. Utilisation des utilitaires de la bibliothèque MODULEF.....	42
3. Interface $f^1$ .....	45
3.1. Méthodologie en vue d'une utilisation de VISU et MEDIT.....	45
3.1.1. Utilisation de VISU.....	46
3.1.2. Utilisation de MEDIT.....	48
3.2. Méthodologie en vue d'une utilisation de SMS.....	48
<b>Chapitre V Application SIG-ArcView</b> .....	49
1. Introduction aux SIG.....	49
1.1. Composants d'un SIG.....	49
1.2. Principe de fonctionnement.....	50
1.3. Principales fonctions d'un SIG.....	51
2. Présentation de ArcView.....	52
2.1. Eléments constitutifs de ArcView.....	53
2.2. Présentation du langage de développement Avenue.....	54
3. Interface utilisateur- ArcView.....	55
3.1. Lancement de la simulation.....	56
3.2. Création du maillage d'exploitation.....	56
3.3. Interpolation des résultats.....	58
3.4. Visualisation des résultats.....	62
3.4.1. Courbes temporelles simples.....	62
3.4.2. Courbes temporelles multiples.....	63
3.4.3. Interpolation sur un point quelconque.....	64
3.4.4. Interpolation spatiale.....	65
3.5. Visualisation sous VISU et SMS.....	67
<b>Conclusion</b> .....	70
<b>Bibliographie</b> .....	71
<b>Annexe I</b> Organisation des tables de la base de données ArcView.....	73
<b>Annexe II</b> Les types de fichier d'échange de données entre les différents modules.....	75
<b>Annexe III</b> Aperçu sur les logiciels utilisés.....	77

المركز الوطني للتقنية  
المستجبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

# INTRODUCTION

# INTRODUCTION



Bien avant l'antiquité, l'homme a éprouvé le besoin d'une certaine maîtrise des ressources en eau, dont les cours d'eau font partie intégrante. Ces cours d'eau, représentent aussi une part importante de la biosphère. Ils sont exploités pour les besoins humains (eaux potables et usées), l'agriculture (irrigation et drainage), le transport (navigation fluviale), la production de l'énergie, le contrôle des crues et de la pollution, la conservation du sol, ou encore comme frontière entre régions. On ajoutera à ces exploitations économiques les préoccupations écologiques dues à une prise de conscience accrue en matière d'environnement. L'hydraulique fluviale, qui étudie le comportement physique des cours d'eau naturels et artificiels, se révèle d'une importance majeure dans la compréhension du cycle de l'eau.

Les crues de rivières sont un cas des écoulements non permanents, décrits par des équations mathématiques complexes qui rendent le traitement analytique impossible sauf sur un nombre de cas très simplifiés, qui sont loin de reproduire la réalité des phénomènes observés. En outre, une description « admissible » doit tenir compte d'un nombre important de données souvent de type hétérogène. C'est la tâche de l'ingénieur de relever ce défi en cherchant les moyens lui permettant de trouver des solutions qui répondent à la fois aux requis scientifiques et techniques du problème. En restant dans le domaine des crues, il faut trouver les moyens de protéger les vallées contre les inondations ou, pour le moins, prévoir les surélévations dangereuses du niveau d'eau afin d'en avertir à temps, les intéressés. C'est là tout le problème de l'annonce des crues qui doit passer par une approche intégrée de l'information qui, seule offre une vision globale des composants de l'écosystème étudié.

Ce présent travail rentre dans le cadre des objectifs du projet WADI, à savoir, associer les modèles numériques aux outils les plus avancés du traitement numérique pour des applications liées aux écoulement de l'eau. Plus particulièrement, il aura pour but essentiel la réalisation d'une interface automatisant l'ensemble du processus de la simulation en partant de l'organisation des données de différent types jusqu'à l'exploitation graphique des résultats en sortie du code de calcul.

Le présent mémoire se limite à présenter en cinq chapitres de longueur inégale, la démarche suivie pour accomplir ce travail. Pour faciliter la compréhension du contexte, des illustrations ont couvert l'ensemble de ce mémoire. On trouvera en fin de ce document, une annexe assez détaillée comprenant un support à la compréhension des entités utilisées (logiciels et fichiers de données) ainsi qu'une bibliographie sommaire. Notre souci a été d'écrire chaque chapitre de manière autonome quitte hélas à parfois nous répéter. Au premier chapitre, nous présentons le projet WADI qui est le cadre de ce travail, ainsi que le type de problème qu'il s'assigne de traiter. Le deuxième chapitre commence par un bref rappel sur les concepts de base de l'hydraulique fluviale pour entamer par la suite le traitement mathématique et numérique des équations de Saint-Venant. Le troisième chapitre se propose de décrire l'environnement du développement de l'application, sont passés en revue tous les composants logiciels de celle-ci : le SGBD Access, le mailleur EMC2, le code de calcul, ainsi que les logiciels de visualisation des résultats. Nous avons consacré le quatrième chapitre à montrer la méthodologie suivie ainsi que les outils nécessaires à la simulation numérique. Ce sont deux interfaces symétriques de pré et post-traitement qui sont toujours associées à la simulation, dont la fiabilité est intimement tributaire d'un bon développement et d'une compréhension de tout le processus de la simulation.

L'application SIG représente la partie la plus importante de ce travail, nous l'avons délibérément présentée en dernier pour permettre une meilleure compréhension par les renseignements déjà fournis par les chapitres, précédents. Une autre raison est que cette partie est la résultante de tous les composants de l'application. En effet, sont reliés à cette application tous les modules du traitement : la saisie du domaine d'étude, l'enregistrement ou l'extraction des données de la base de données, le lancement du code de calcul en lui précisant ses entrées et pour finir la visualisation des résultats. Toute une gamme de procédés sont décrits en détail, agrémentés par des illustrations (copies d'écran) pour faciliter la compréhension de l'application.



# CHAPITRE I

## PRESENTATION DU PROJET WADI

# CHAPITRE I : PROJET WADI<sup>1</sup>

## § 1. Introduction

Le troisième millénaire portera sans doute les conséquences lourdes d'une gestion jusqu'alors fastidieuse de la ressource la plus chère à l'homme qu'est l'eau. L'un des effets déjà sensible est le déficit en eau potable, suite à la pollution des eaux de surface par l'activité de l'homme, d'une part et, à l'épuisement des ressources souterraines par une exploitation intensive d'autre part. Ce problème se pose encore avec plus d'acuité en régions semi-arides à arides que sont celles des pays du bassin méditerranéen.

Partant du fait que l'exploitation de la ressource aquifère suggère des coûts sûrement plus élevés et ne présentant qu'un recours palliatif aux éventuels déficits superficiels, ces pays concernés montrent, ces dernières années, un intérêt grandissant aux moyens permettant une gestion optimale de l'eau de surface. Cela passe inmanquablement par la maîtrise de « la science de l'eau », tenter de saisir les principes gouverneurs à son comportement qui, il faut le reconnaître, est le plus souvent soumis aux aléas de la nature.

L'eau ne pose pas seulement des problèmes par sa rareté pour ce qui est des pays sud-méditerranéens, elle peut aussi être à l'origine de catastrophes provoquant des pertes humaines et matérielles considérables. En effet, les grands changements climatiques survenus ces dernières années aussi bien au Nord qu'au Sud de la Méditerranée, marqués par des inondations (France, Italie, Allemagne,...) jamais connues par le passé, devrait inciter les acteurs vers une meilleure compréhension du phénomène « eau ».

## § 2. Présentation du Projet WADI [3]

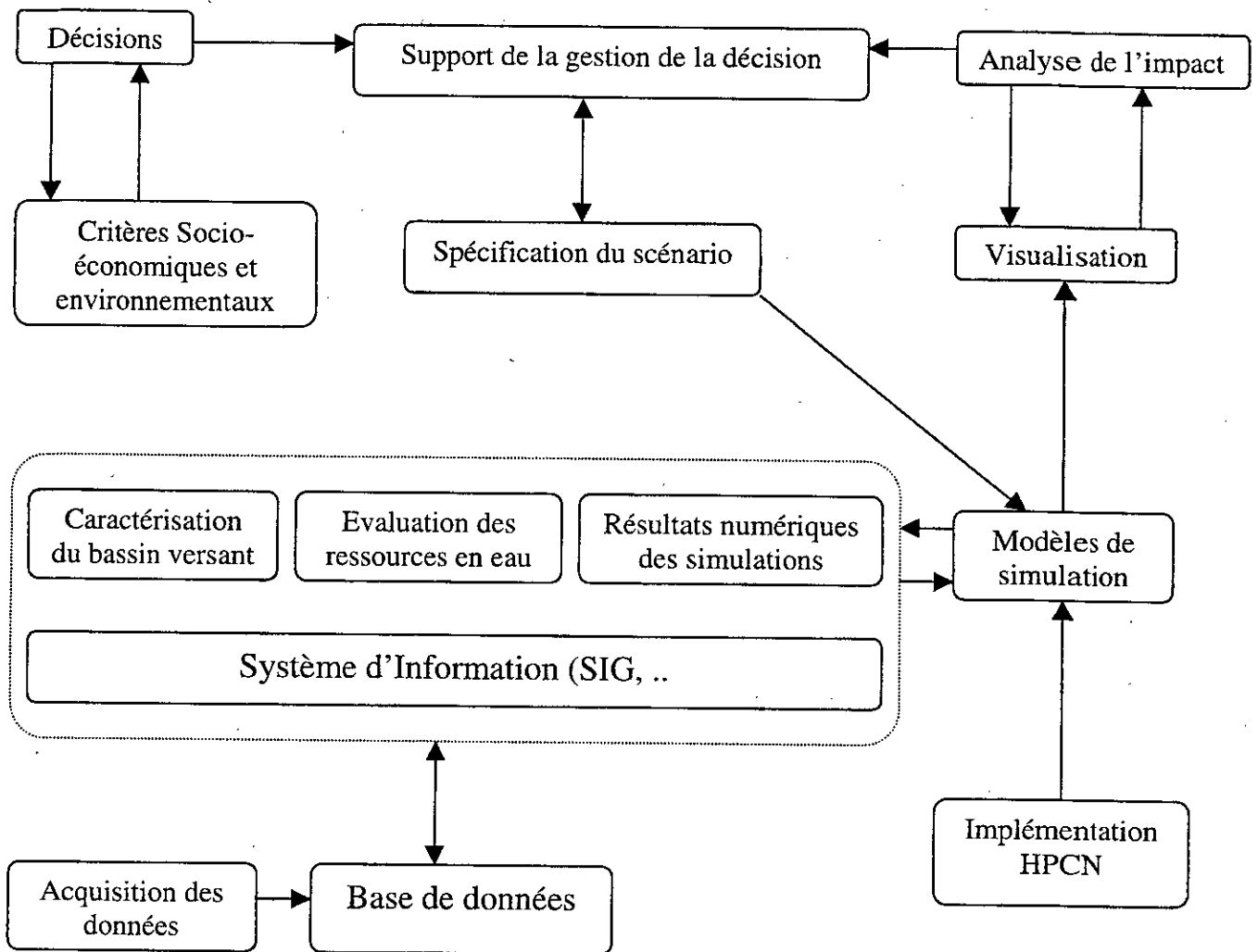
Il ressort de ce qui vient d'être dit plus haut, tout l'intérêt que l'on doit porter à l'élément hydrologique qui régit le comportement de l'eau de surface, je veux dire : le bassin versant. C'est sous l'impulsion des PTM<sup>2</sup>, directement touchés par ce problème, et répondant du même coup aux priorités de l'UE<sup>3</sup> en terme de préservation de l'environnement, que le Projet WADI a été lancé le 1 avril 2001 sous la direction de M. F.El Dabaghi.

Il s'agit de développer un système d'information intégré pour la régularisation et l'aménagement des bassins versants, permettant leur gestion, protection et leur restauration ainsi que de satisfaire la demande en eau potable dans le cadre d'une politique de développement durable. La stratégie conceptuelle du projet (figure I.1.) répond à un schéma d'interaction à la fois souple et dynamique d'un ensemble d'outils et de méthodes, pouvant fournir à tout décideur un support à la décision.

<sup>1</sup> Water supply watershed planning and management : an Integrated approach

<sup>2</sup> Pays Tiers- Méditerranéens

<sup>3</sup> Union Européenne



**Figure I.1. Les concepts du projet WADI**

Ce projet s'appuie sur un réseau de partenaires (voir tableau I.1), constitué dans le cadre de ESIMEAU<sup>4</sup>, un projet communautaire sur l'apport des technologies de l'information liée à la maîtrise des ressources en l'eau. Ce consortium sera élargi aux partenaires concernés par le problème des crues (Services de la météorologie, d'hydraulique, ..).

<sup>4</sup> Elaboration d'un système Intégré pou la Modélisation des ressources en EAU, contrat européen INCO/Esprit

N° du participant	Le nom du participant	Acronyme	Le rôle du participant	Pays
1	European Research Consortium for Informatic and Mathematic	ERCIM	Coordinateur	France
2	Institut National de Recherche en Informatique et Automatique	INRIA	Contracteur principal	France
3	Foundation for Research and Technology-Hellas	FORTH	Contracteur principal	Grèce
4	Ecole Nationale Polytechnique d'Alger	ENP	Contracteur principal	Algérie
5	Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth	ESIB	Contracteur principal	Liban
6	EUCLID-Jounieh	EUCLID	Contracteur principal	Liban
7	UC-University of Calabria	UC	Contracteur principal	Italie
8	Office National d'Eau Potable	ONEP	Contracteur principal	Tunisie
9	Ecole Mohammadia d'Ingénieurs de Rabat	EMI	Contracteur principal	Maroc
10	Centre Régional de l'Eau et de l'Environnement	CREEN	Contracteur Principal	Liban

**Tableau I.1 : Liste des participants**

### § 3. Objectifs du Projet [3]

Le principal objectif du Projet est de développer un système d'aide à la prise de décision pour une gestion rationnelle des bassins versants caractérisés par un déficit en eau. Cela débouchera vers une augmentation des volumes régularisés et par la suite vers une meilleure réponse à la demande. Le projet doit évaluer les moyens scientifiques et techniques pour la gestion des bassins versants, faisant part des contraintes environnementales, des aspects social et légal pour une politique de développement durable. La question de l'eau n'est pas nouvelle, elle a maintes fois fait l'objet de récentes études et soulignée en de nombreux rapports et analyses émanant aussi bien d'instances indépendantes (ESCWA<sup>5</sup>, Word Bank, UNESCO ) que d'agences et offices nationaux chargés de la gestion de la ressource.

Du projet WADI ressortiront les outils et les méthodologies quant à l'identification des bassins versants (lieu géographique, volume de l'eau, coût des infrastructures), les caractéristiques du bassin versant dans une optique intégrée qui prendra en charge les aspects socio-économique et environnemental en cas d'inondation ou de sécheresse. En outre, WADI développera les outils pour l'acquisition et le traitement des données à l'amont des modèles de simulation des crues, dimensionnement des réservoirs et, une complète optimisation du réseau hydrologique du bassin versant.

<sup>5</sup> Economic and Social Commission for Western Asia

## § 4. Plan du Projet [3]

Afin de mener à bien cette immense tâche et d'atteindre les objectifs escomptés, il faudra une implication totale des différents partenaires (PTM, UE), qui doivent évaluer leurs besoins à travers toutes les étapes du développement, ainsi WADI permettra :

- Une meilleure compréhension des problèmes relatifs aux bassins versants, il s'agit donc ici de bien poser le problème ;
- D'utiliser des données moyennant les récentes technologies en imagerie satellitaire induites en une base de données de type SIG<sup>6</sup> ;
- De développer des modèles pour simuler les différents aspects du problème : caractéristiques d'un bassin versant, évaluation de la ressource, évaluation de la demande etc. ;
- Le transfert des techniques SIG qui pourront aider les offices et autorités concernés de mieux gérer et aménager les bassins versants.

Il est donc prévu de subdiviser le travail en sept tâches à travers lesquelles les partenaires s'impliqueront :

### **Tâche 1- Caractérisation et inventaire des bassins versants et développement d'une base de données SIG**

Pour bien connaître un bassin versant, il est nécessaire en premier lieu d'avoir un DEM<sup>7</sup> qui sera ensuite complété par digitalisation et scanérisation de cartes, images satellite et autres données du terrain. D'un DEM on pourra ensuite tirer d'autres informations comme :

- Le réseau hydrographique ;
- Les limites des sous-bassins et bassins versants ;
- Les paramètres physiologiques du bassin (surface, périmètre, coefficient de compacité, ...).

Et surtout, le DEM permettra de faire l'inventaire des sites potentiels pour la construction des réservoirs (lieu, volumes, surface, ...).

### **Tâche 2 - Evaluation des ressources en eau**

Cette tâche est intimement liée à la précédente et suppose une connaissance du contenant (bassin versant) pour mieux évaluer le contenu. Quatre sous parties s'occupent chacune d'un aspect de la ressource :

- a- Système de gestion de bases de données hydroclimatologiques : qui s'occupera des données relevant de la qualité et de la quantité de l'eau. Ces données seront traitées sous un environnement SIG ;
- b- Evaluation des ressources en eau : où une plate-forme conviviale sera développée incorporant quelques codes hydrologiques déjà existants qui seront d'ailleurs adaptés pour tenir compte des spécificités d'une région.
- c- Prédétermination des crues : l'objectif étant d'intégrer des modèles statistiques utilisés en hydrologie, empiriques ou bien régionaux, pour mieux prédéterminer la crue et par suite bien dimensionner les ouvrages hydrauliques destinés à l'aménagement des bassins versants.

<sup>6</sup> Système d'Information Géographique

<sup>7</sup> Digital Elevation Model

- d- Erosion, sédimentation et transports solides : les transports solides ne sont guère désirables dans tout ouvrage hydraulique, les particules qui s'arrachent des rives (érosion) et du lit finissent en sédiments qui réduisent grandement le volume des retenues, d'où la nécessité de connaître des paramètres tels que le taux d'abrasion, la vitesse de sédimentation.

### **Tâche 3 - La demande en eau, aspects social et légal**

Pour ce qui est de la demande en eau, celle-ci peut revêtir plusieurs formes :

- Demande en alimentation en eau potable : le déficit à relever est de subvenir aux besoins de la population suivant son évolution dans l'espace et dans le temps et dans des conditions d'hygiène acceptable ;
- Demande en irrigation : avec les nouvelles techniques en imagerie satellitaire et les SIG, il est désormais possible de faire une cartographie détaillée des terrains cultivés ou même de ceux qui sont susceptibles de l'être ;
- Demande minimale d'écoulement : elle doit être assurée compte tenu des contraintes environnementales et en vue d'assurer l'auto curage des rivières ;
- Demande en énergie : pour la production de l'électricité sur barrages munis de stations hydroélectriques. Notons que c'est la seule demande qui restitue partiellement ou totalement la ressource à l'aval, une fois utilisée.

Quant aux aspects social et législatif, il s'agit de faire intervenir les différents opérateurs concernés dans toute décision relevant du bassin versant d'un coté, et d'un autre, de définir les lois qui prescriront les procédures relatives à la gestion des bassins versants et spécifier les rôles de tous les partenaires.

### **Tâche 4 - Modèles numériques hydrologiques et hydrauliques, aspects d'implémentation HPCN<sup>8</sup> pour l'onde de crue**

Ce travail est subdivisé en trois tâches :

- a- Régularisation : c'est pour optimiser le choix du type et du volume des réservoirs par des simulations dont les données seront fournies par la tâche 2-a. Le choix final est alors un compromis technico-économique basé sur le prix du mètre cube régularisé ;
- b- Prévision des crues et modélisation de l'onde de crue : nous distinguons les modèles stochastiques et les modèles déterministes. Il s'agit de modèles qui reproduisent le transfert pluie débit. La modélisation de l'onde de crue devra permettre :
  - L'évaluation de la surface inondée en dressant des cartes thématiques ;
  - D'avoir des figures sur les surfaces cultivées, le nombre de cités, d'industries et de citoyens affectés par l'inondation ;
  - Des évaluations socio-économiques relatives aux pertes humaines et matérielles.
- c- Aspects de l'implémentation HPCN pour l'onde de crue : où l'on s'occupera de l'utilisation de HPCN pour la modélisation et la simulation des crues. Cela permettra aux partenaires PTM d'augmenter leurs capacités en HPCN et calcul parallèle appliqués aux sciences de l'ingénieur, et aux autres (UE) d'étendre leurs champs de recherche en HPCN, habituellement réservé au domaine de la haute technologie.

<sup>8</sup> High Performance Computing Network

## **Tâche 5 - Outil de gestion et d'aménagement pour un développement durable**

Cette tâche est répartie comme suit :

- a- Considérations environnementales : où il sera tenu compte des répercussions sur l'environnement par une transformation de l'occupation du sol et de la topographie du terrain, transformation de l'écosystème ainsi que les changements sur la qualité de l'eau. La protection de l'environnement par une implication des agences locales en lançant des campagnes de sensibilisation, et en effectuant des contrôles sur l'occupation du sol.
- b- Infrastructures : il s'agit de tous les ouvrages hydrauliques (réservoirs, barrages, conduites, canaux, systèmes de drainage ) permettant soit, une gestion optimale de la ressource en cas de déficit, soit, la protection des populations contre les inondations dans le cas contraire.
- c- Outils de gestion et d'aménagement pour un développement durable : où l'on s'occupera d'établir les techniques pour un aménagement et une gestion tactiques et stratégiques, rendant le système (WADI) efficient. Le but étant d'établir une architecture détaillée( logiciel et matériel) et son implémentation.
- d- Cas d'études : l'objectif est d'appliquer le système sur deux sites pilotes choisis par le consortium afin de s'assurer que le système répond aux attentes des utilisateurs finaux. Le choix s'est porté sur deux bassins : le premier est au Maroc de 1200 Km<sup>2</sup> et recevant une pluie annuelle moyenne de 250 mm (cas déficitaire, risque de sécheresse), et le deuxième est au Liban, de 250 Km<sup>2</sup> et recevant 800 mm de pluie annuelle (cas excédentaire, risque d'inondation ).

## **Tâche 6 - Vulgarisation et transfert du savoir**

Organisée comme suit :

- a- Vulgarisation des connaissances : en plus des moyens de vulgarisation classique (brochures livrets, ...), il est prévu de lancer des actions spéciales comme la création d'un site Web, participation aux réunions de concertation de la commission européenne, une collaboration avec d'autres projets européens, encourager les publications communes et enfin assurer une large diffusion de WADI.
- b- Ateliers : afin de faire bénéficier les pays Sud des nouvelles technologies et du savoir-faire développé au Nord, on suggère l'organisation de trois ateliers qui s'occuperont des tâches suivantes :
  - SIG et ressources en eau ;
  - Modélisation, simulation et gestion des ressources en eau ;
  - Utilisation des systèmes de simulation WADI sur des applications.

## **Tâche 7- Direction et gestion du Projet**

Le manager du Projet M. F.El Dabaghi (INRIA – ERCIM) est assisté, sur le plan scientifique par un M. D.Ouazar (EMI – Maroc) et sur les aspects financiers M. B.LeDantec (ERCIM). Chaque tâche sera coordonnée par un responsable et un co-responsable, cette structure simple mais efficace est à même de permettre :

- ❑ Une prise de décision rapide et consensuelle ;
- ❑ Une communication à l'intérieur et vers l'extérieur ;
- ❑ Un efficace suivi technique et administratif.

## § 5. Architecture de la plate-forme ESIMEAU [8]

La gestion rigoureuse de l'eau implique la prise en compte d'un grand nombre de paramètres et d'informations de type souvent hétérogène. C'est dans ce sens qu'intervient le Projet ESIMEAU pour le développement d'une infrastructure ouverte et modulaire d'un système intégré d'aide à la prise de décision dans le domaine des ressources en eau, et la gestion des ressources hétérogènes et notamment la prédiction et la prévision par la simulation numérique.

Les modèles numériques et les simulations opèrent par l'intermédiaire de bases de données géographiques et d'outils de gestion de données. Les applications principales de ESIMEAU sont le traitement des problèmes des eaux de surface tel que l'eutrophisation et l'aménagement des bassins versants, l'estimation des transports des sédiments et la prévention contre les risques d'inondation. Les bénéficiaires directs sont les aménageurs et les décideurs qui trouveront à travers ce système des moyens opérationnels efficaces pour l'adoption des mesures relatives à l'eau, tant au niveau de la ressource que la protection contre les risques.

Pour ce qui est de la structuration verticale du Projet, les actions ont porté sur trois niveaux : un premier niveau, permettant à l'utilisateur sans connaissance approfondie d'accéder dans un environnement convivial à l'ensemble des modules opérationnels, à un niveau intermédiaire, les modules propres aux traitements de données, simulations numériques et prévision, et en dernier lieu, la réalisation d'une interface de visualisation. Quant à la répartition des tâches (organisation horizontale), le travail a été scindé en sept parties faisant intervenir les différents partenaires en termes d'échange et d'interaction des connaissances, de transfert de technologies et du savoir-faire en organisant des stages, ateliers et des mises à jour. Nous rappelons brièvement les tâches en question :

- Architecture du Projet ;
- Intégration sous le Web ;
- SIG, bases de données et interface
- Simulation numérique du phénomène de l'eutrophisation
- Aménagement des bassins versants.

Les composants logiciel de l'infrastructure de ESIMEAU sont :

- SGBD<sup>9</sup> Access : le choix est porté sur Access comme système de gestion de bases de données, pour sa facilité de manipulation et le vaste usage qui en est fait dans le domaine des utilisateurs PCs.
- Logiciel de maillage EMC2 : qui permet la génération de maillages bidimensionnels.
- Les codes de calcul numérique en éléments finis
- Système d'information géographique ArcView
- D'autres logiciels de visualisation VISU, Medit.

<sup>9</sup> Système de Gestion de Bases de Données



Nous reviendrons plus loin à propos des différents logiciels, pour donner d'amples détails quant à leur interaction mutuelle au sein de l'application mère où les interfaces ont été implémentées. [10]

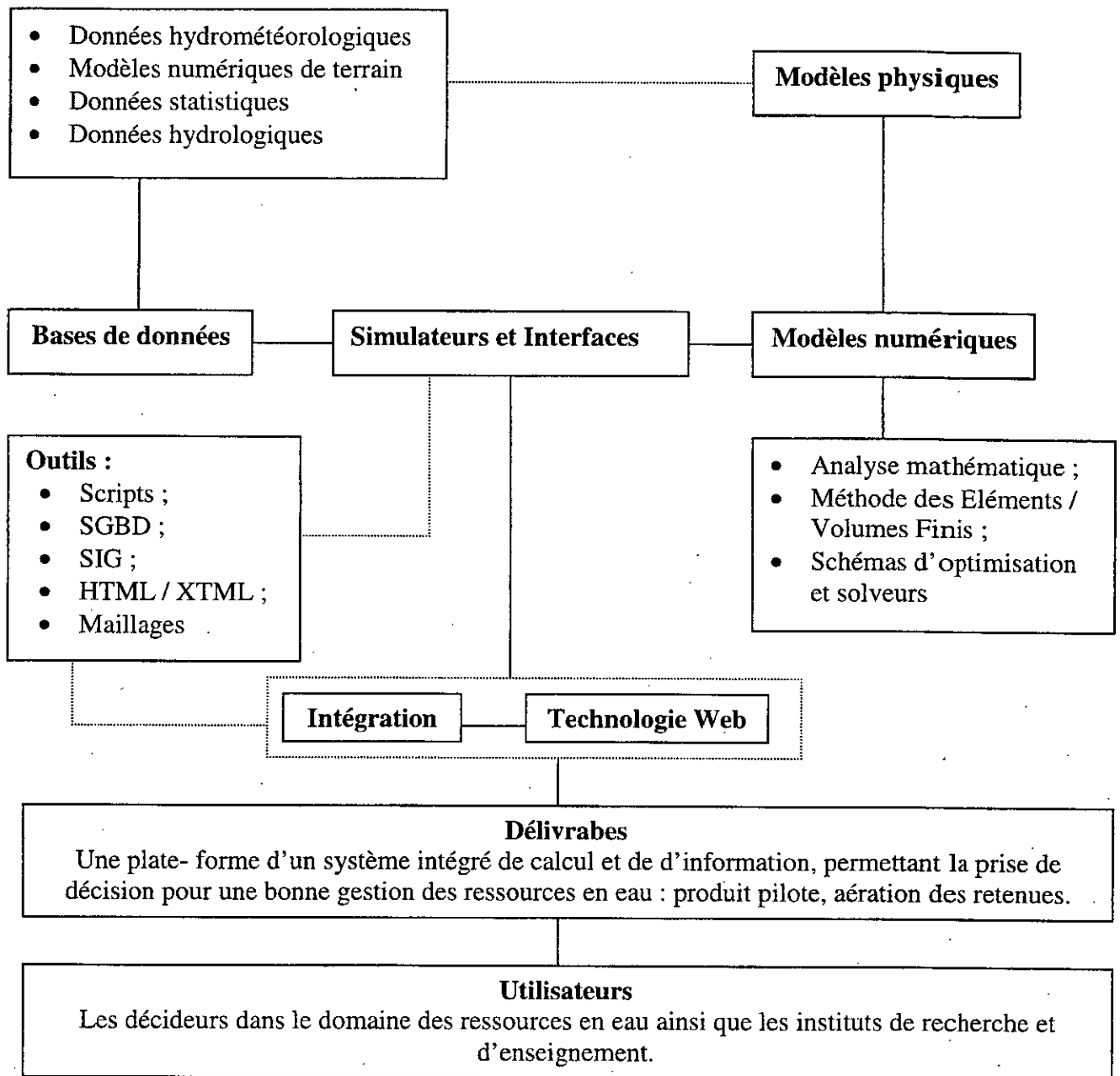


Figure I.2 : Organigramme fonctionnel de ESIMEAU

## § 6. Objet du PFE et ses motivations

La problématique de l'eau constitue un domaine prioritaire à tous les niveaux, en particulier dans la région méditerranéenne, où la diminution de la ressource associée à sa demande toujours grandissante, ainsi que les risques de son utilisation (pollution, inondation), nécessitent une meilleure conception et une exploitation optimale de l'hydro-système. Au sein de cette approche qui est celle du projet ESIMEAU, une partie de ce projet, la simulation numérique des crues a bénéficié d'une mesure d'accompagnement dans le cadre d'un autre

projet communautaire, CruCID<sup>10</sup> qui s'intéresse plus particulièrement aux aspects modélisation numérique et algorithmique parallèle des problèmes de type écoulements à surface libre.

Les logiciels de simulation disponibles sont généralement basés sur des hypothèses simplificatrices sur le plan physique ou bien négligent les aspects bi- ou tri- dimensionnel de l'écoulement. En effet, on peut obtenir des modèles quasi 2D (St venant 1.5D), en intégrant suivant deux directions (hauteur et largeur) ou des modèles quasi 3D en intégrant suivant la hauteur (St venant 2.5D). Notre choix s'est porté sur le logiciel FESWMS<sup>11</sup> avec l'objectif de l'intégrer dans une plate forme plus conviviale aux utilisateurs potentiels avec un pré et post-traitement performants et beaucoup plus interactifs tant au niveau du maillage, que de la visualisation et exploitation graphique des résultats. Un effort a été porté dans ce sens, au sein du projet CruCID, attendu que le logiciel FESWMS par ses modules DINMOD et ANOMOD de pré et post-processing respectivement, présente des inconvénients en termes de convivialité et d'interactivité.

Afin de pallier aux dites lacunes, nous avons choisi d'utiliser les moyens développés à l'INRIA. Il s'agit de logiciels de pré et post processing très puissants et assez génériques. Nous avons porté une contribution pour ce qui est de l'exploitation graphique des résultats via ArcView qui facilite la structuration et l'interrogation des résultats en aval du code de calcul.

---

<sup>10</sup> modélisation des CRUes via le Calcul Intensif Distribué

<sup>11</sup> Finite Element Surface Water Modeling System

CHAPITRE II

MODELISATION  
DES  
ECOULEMENTS A  
SURFACE LIBRE

## CHAPITE II : MODELISATION DES ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE

### §1. Introduction

Les crues des cours d'eau sont un phénomène du plus grand intérêt pour l'ingénieur. Les crues constituent une forme du mouvement non permanent et leur étude pourrait être déduite de l'analyse des équations complètes de Saint-Venant. Dans ce cadre, un modèle 2.5D (quasi-tridimensionnel) a été utilisé, les solutions obtenues présentent des singularités dans certaines parties du domaine de calcul mais, les différents tests réalisés avec des maillages de différente taille montrent que l'erreur diminue lorsque la triangulation est plus fine en ces endroits. La question du choix du modèle à utiliser revient en fait à un compromis capacité / précision, car l'erreur pourrait bien diminuer d'une façon significative en utilisant un modèle 3D (Navier-Stokes) mais cela coûterait beaucoup plus en espace mémoire. Une option qui reste réalisable est celle d'essayer d'identifier les domaines sur lesquels un modèle 3D est nécessaire (par exemple, sur des domaines où de forts gradients sont observés, comme les voisinages des parois solides) et de le compléter par un 2.5D ou 1.5D (type Saint-Venant). Ce travail est en cours de réalisation au sein du projet WADI, vu l'intérêt de pouvoir décider du modèle qui conviendrait pour la description du problème et d'essayer d'allier au mieux capacité de traitement et précision des résultats.

Un autre volet de l'aspect numérique de l'approche utilisée, est la discrétisation du domaine d'étude. FESWMS utilise la méthode des éléments finis associée à l'algorithme de Newton pour traiter les termes non linéaires. Il est prévu au sein du même projet, d'utiliser la méthode des caractéristiques (qui revient à suivre les particules fluides sur des caractéristiques bien définies) pour linéariser les termes de convection. Les autres termes non linéaires seront explicités en second membre. Le système obtenu sera résolu par la méthode du bi-gradient conjugué. Contrairement à la méthode de Gauss utilisée actuellement dans FESWMS, qui est directe et requiert donc plus de capacité, cette méthode est itérative, donc moins gourmande en mémoire et plus simple à mettre en œuvre.

Dans le présent chapitre, on va présenter les crues dans la limite où certains aspects interviennent dans la définition des caractéristiques physiques et morphologiques contribuant à la genèse des crues et à leur mode de propagation. Aussi, par souci de clarté, nous avons jugé utile de commencer par donner un bref aperçu sur les écoulements dans les canaux, nous aborderons en seconde phase les équations de base régissant ces écoulements. Nous finirons par présenter le modèle numérique utilisé pour la résolution du système obtenu.

### §2. Notions préliminaires [13], [14]

#### 2.1 Les canaux

On appelle canal, un système de transport (naturel ou artificiel) dans lequel l'eau s'écoule et dont le surface libre est soumise à la pression atmosphérique. La section (transversale) d'un canal est une section plane normale à la direction de l'écoulement. La section ou la *surface mouillée*,  $S$ , (voir Figure II.1) est la portion de la section occupée par le liquide.

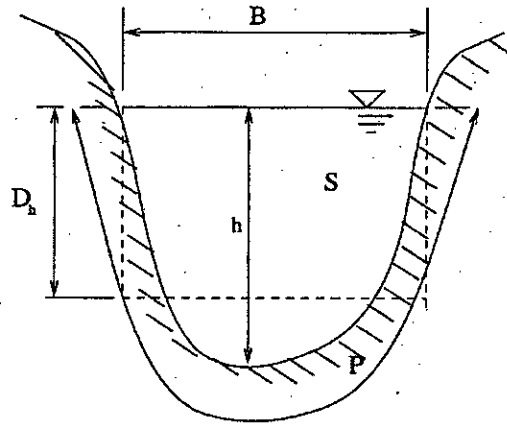


Figure II.1 : Eléments géométriques de la section

Un canal dont la section ne varie pas et dont la pente longitudinale et la rugosité restent constantes – la hauteur d'eau peut cependant varier – est appelé canal prismatique, sinon, on l'appelle canal non prismatique. Les éléments géométriques d'une section ou surface mouillée,  $S$ , sont les suivants :

- *Le périmètre mouillé,  $P$* , du canal, formé par la longueur de la ligne de contact entre la surface mouillée et le lit y compris les berges, mais ne comprenant pas la surface libre ;
- *Le rayon hydraulique,  $R_h$* , donné par le quotient de la surface mouillée,  $S$ , et du périmètre mouillé,  $P$ , d'où :  $R_h = \frac{S}{P}$ . Il est souvent choisi comme longueur de référence ;
- *La largeur superficielle,  $B$* , du canal à sa surface libre ;
- *La profondeur hydraulique,  $D_h$* , du canal définie par :  $D_h = \frac{S}{B}$  ;
- *La profondeur,  $h$* , où hauteur d'eau – à moins qu'elle ne soit définie autrement – est considérée comme la profondeur maximum.
- L'étude hydraulique des canaux prend également en considération les pentes longitudinales du canal, dont :
  - La pente de fond du canal,  $J_f$ ,
  - La pente piézométrique ou pente de la surface libre,  $J_w$ .

La valeur de la pente de fond dépend essentiellement de la topographie et de la constitution du terrain. Cette pente, généralement faible, peut être exprimée par :

$$J_f = \operatorname{tg} \alpha \cong \alpha$$

## 2.2 Types d'écoulements

Une classification des écoulements peut se faire selon la variation de la profondeur,  $h$  ou  $D_h$ , par rapport au temps et à l'espace :  $D_h = f(t, x)$

*Variabilité dans le temps* : le mouvement est *permanent* si les vitesses, moyenne  $U$ , et ponctuelle  $u$ , ainsi que la profondeur  $h$  ou  $D_h$  restent invariables dans le temps en grandeur en en direction. Par conséquent le débit est constant :  $Q = U.S$ , entre les diverses sections du canal sans apport latéral.

Le mouvement est *non permanent* si la profondeur,  $D_h$ , ainsi que les autres paramètres varient avec le temps. Par conséquent le débit n'est pas constant. Au sens strict, l'écoulement dans les canaux est rarement permanent, néanmoins, les variations temporelles sont souvent suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme permanent, du moins dans un intervalle de temps relativement court.

*Variabilité dans l'espace* : le mouvement est *uniforme*, si la profondeur  $D_h$ , ainsi que les autres paramètres, restent invariables dans les différentes sections du canal. La ligne de la pente de fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre et l'on a  $J_f = J_w$ . Le mouvement est *non uniforme* ou *varié* si la profondeur  $D_h$ , ainsi que les autres paramètres, changent dans les diverses sections du canal. La pente de fond diffère alors de celle de la surface libre,  $J_f \neq J_w$ . L'écoulement non uniforme peut être permanent ou non permanent. Le mouvement peut être accéléré  $dU/dx > 0$  ou décéléré  $dU/dx < 0$ , suivant que la vitesse croît ou décroît dans le sens du mouvement. Lorsque le mouvement est *graduellement* varié,  $D_h(x) \cong D_h$ , ainsi que les autres paramètres, ne changent que très lentement d'une section à une autre. On peut donc admettre que l'écoulement est quasi uniforme le long d'un petit tronçon et que la vitesse,  $U$ , reste quasiment constante. Lorsque le mouvement est *rapidement* varié, la profondeur  $D_h(x)$ , ainsi que les autres paramètres changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une discontinuité, telle qu'un déversoir, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque.

### 2.3. Répartition de la vitesse

Dans un écoulement le long d'une paroi, il y a une répartition de vitesse nulle à la paroi, la vitesse ponctuelle  $u$ , croît rapidement lorsqu'on s'en éloigne. La valeur maximale est souvent atteinte un peu en dessous de la surface libre. Le profil de vitesse est approximativement logarithmique. Un écoulement dépend généralement des trois variables  $x, y, z$  il est alors dit *tridimensionnel*. Si pour ce canal, la largeur  $B$  est importante par rapport à la profondeur  $h$ , - on prend habituellement  $B > 5h$  - l'écoulement est *bidimensionnel*, sauf pour une petite distance proche de la paroi.

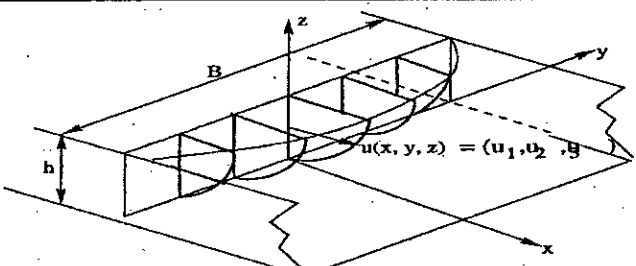
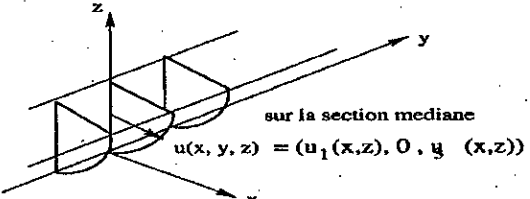
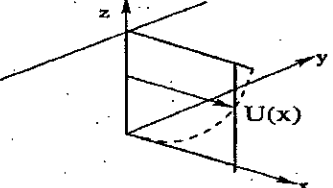
	<p><b>Écoulement 3D</b> si <math>B &lt; 3h</math></p>
	<p><b>Écoulement 2D</b> si <math>B &gt; 3h</math></p>
	<p><b>Écoulement 1D</b> si <math>B &gt; 5h</math>, si <math>L \gg B</math></p>

Figure II.2 : Répartition de vitesse

Les calculs hydrauliques sont considérablement facilités si l'on admet que l'écoulement est *unidimensionnel*. On exprime alors la vitesse moyenne  $U(x)$  par :

$$U = \frac{1}{h} \int_0^h u(x, z) dz \quad (\text{II.1})$$

ou :

$$U = \frac{1}{S} \int_0^B \int_0^h u(x, y, z) dz dy \quad (\text{II.2})$$

## 2.4. Répartition de la pression

Pour un écoulement uniforme, lorsque la vitesse moyenne  $U$ , est constante et les lignes de courant sensiblement rectilignes, la répartition de pression est *hydrostatique* dans la section droite du canal. Pour un écoulement à courant courbe, convergent ou divergent, il existe une accélération qui provoque des forces d'inertie dont l'effet s'ajoute ou se retranche aux forces de gravité selon la concavité du courant. La répartition n'est donc plus hydrostatique. En cas de courant convexe, les pressions peuvent même devenir inférieures à la pression atmosphérique, provoquant un décollement de la lame d'eau sur la paroi. [14], [15], [16]

## § 3. Modèle physique et position du problème [4]

Les estimations du temps d'arrivée des flots dévastateurs ainsi que des zones susceptibles d'être inondées à l'aval sont obtenues par le biais de la résolution des équations qui régissent la propagation des ondes de crues (aspect des écoulements à frontière libre). Ce dernier est régi par des systèmes d'équations aux dérivées partielles non linéaires généralement de type Navier-Stokes, dont la solution peut comporter des discontinuités pouvant conduire à des difficultés numériques et ce, quelle que soit la méthode de résolution utilisée. En ce qui nous concerne, une approche hydraulique nous semble la plus appropriée au type du problème qui nous intéresse. Basée sur les équations de Saint venant, elles-mêmes, issues des équations de Navier-Stokes intégrées sur la profondeur sous des hypothèses appropriées.

### 3.1. Equations générales de Navier-Stokes

Le domaine géométrique d'étude est généralement tridimensionnel, borné de frontière se composant de deux parties : le fond de la rivière et la surface libre. On note  $\mathbf{x} = (x, y, z)$ , les coordonnées d'un point de l'espace et  $t$  la variable temporelle. La surface de la rivière est une frontière libre qui dépend de divers paramètres, elle change au cours du temps. On note  $\Omega(t)$  le domaine d'étude et  $\Gamma(t)$  sa frontière, composée de  $\Gamma_b(t)$  au fond de la retenue et de  $\Gamma_H(t)$  à sa surface libre. En notant,  $u$  la vitesse,  $\rho$  la densité,  $P$  la pression,  $T$  la température,  $\tau$  le tenseur des contraintes et  $\varepsilon$  l'énergie totale, les équations classiques de conservation de la mécanique des fluides s'écrivent :

- *Equation de conservation de la masse :*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = M_G \text{ dans } \Omega \quad (\text{II.3})$$

- *Equation de conservation de la quantité de mouvement :*

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + F \text{ sur } \Gamma \quad (\text{II.4})$$

- *Equation de conservation de l'énergie :*

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) + \nabla \cdot k \nabla (T) - \nabla \cdot (\rho u) + \rho F \cdot u \text{ dans } \Omega \quad (\text{II.5})$$

avec, l'énergie totale  $\varepsilon$  donnée par :

$$\varepsilon = e + \frac{u^2}{2} \quad (\text{II.6})$$

où,  $e$  l'énergie spécifique interne et  $k$  est la conductivité thermique. On désigne par  $F$  les forces extérieures y compris celles de gravité et de Coriolis.  $M_G$  représente l'apport éventuel de sources extérieures ou de vidanges. Les forces de volume qui agissent sur un élément fluide limité par une surface fermée, sont deux types :

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

$$\vec{f}_g = \rho \vec{g} \quad \text{pour la force de gravité, et} \quad (\text{II.7})$$

$$\vec{f}_c = -2\rho \underline{\omega} \times \vec{u} \quad \text{pour la force de Coriolis} \quad (\text{II.8})$$

où, le signe  $\times$  désigne le produit vectoriel,  $\underline{\omega} = (\cos \varphi \vec{y} + \sin \varphi \vec{z})$  désigne le vecteur taux de rotation de la terre,  $\varphi$  la latitude de l'aire à modéliser ( $\varphi$  est positive dans l'hémisphère Nord, et négative dans l'hémisphère Sud) et  $\underline{\omega}$  ( $=7.27\text{E-5}$ ) la vitesse angulaire de la rotation de la terre.

Dans un système d'axes cartésiens  $(x, y, z)$  tel que les directions des axes  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$  et  $\vec{z}$  coïncident respectivement avec l'est, le nord et la verticale radiale. Ces densités volumiques de forces s'expriment :

$$\vec{f}_g = \rho g \vec{z} \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{f}_c = 2\rho \underline{\omega} [(v \sin \varphi - w \cos \varphi) \vec{x} - u \sin \varphi \vec{y} + u \cos \varphi \vec{z}] \quad (\text{II.10})$$

ce qui conduit, en négligeant, l'accélération de Coriolis suivant  $\vec{z}$  devant celle de la pesanteur (ce qui est généralement le cas) à :

$$\vec{f} = 2\rho \underline{\omega} (v \sin \varphi - w \cos \varphi) \vec{x} - 2\rho \underline{\omega} u \sin \varphi \vec{y} - \rho g \vec{z} \quad (\text{II.11})$$

- *Forces de surface :* en hydrodynamique des liquides parfaits, elles représentent les forces dues à la pression (tensions normales), auxquelles s'ajoutent en hydrodynamique des liquides réels les forces dues aux frottements (tensions tangentielles).

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

A ces équations, on rajoute d'une part, les équations constitutives de la mécanique qui donnent l'expression du tenseur des contraintes pour des fluides newtoniens :

$$\tau = 0 \text{ dans } \Omega \quad \text{pour un fluide parfait} \quad (\text{II.12})$$

$$\tau = \mu(\nabla u + \nabla u^T) - \left(\frac{2}{3}\mu - \lambda\right)(\nabla \cdot u)I \text{ dans } \Omega \text{ pour un fluide réel} \quad (\text{II.13})$$



où,  $\mu$  et  $\lambda$  sont la première et la deuxième viscosité du fluide. Les effets de  $\lambda$ , appelé viscosité volumique, ne sont sensibles que dans des conditions de déformations très rapides.

### 3.2. Modèle Saint - Venant 2.5D

#### 3.2.1 Hypothèses de base

Dans un grand nombre de cas d'écoulement à surface libre, la nature tridimensionnelle de l'écoulement est d'une importance secondaire. En effet, pour des canaux où la largeur est au moins cinq fois plus grande que la hauteur, l'écoulement peut être considéré comme bidimensionnel sauf, sur une petite distance proche des parois. Les rivières, les estuaires, etc. constituent des exemples de ce type d'écoulement. Les calculs seront d'autant plus simplifiés si l'on admet que l'écoulement est unidimensionnel, mais dans plusieurs cas, ce modèle sera mis en défaut, si le canal présente des singularités topographiques (expansion ou rétrécissement brusques,...) qui impliquent la prise en compte de la variabilité transversale des paramètres du modèle.

Dans les problèmes qui nous intéressent, les dimensions  $x$  et  $y$  sont beaucoup plus importantes que la profondeur de l'eau, nous pourrions alors utiliser l'approximation *shallow water* (eau peu profonde). Ainsi, les équations de Navier-Stokes seront remplacées par les équations de Saint- Venant. Auparavant, nous rappelons les hypothèses adoptées par Saint-Venant :

- La composante verticale de la vitesse  $w$ , ainsi que ses variations (spatiales et temporelles) sont faibles ;
- Les variations verticales des deux composantes  $u$  et  $v$ , sont faibles ;
- On néglige également dans la direction verticale, les termes du transport convectif et diffusif.

Ainsi sous ces hypothèses, les équations de moment de Navier-Stokes se réduisent dans un premier temps à :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + f_x \quad (\text{II.14.a})$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) + f_y \quad (\text{II.14.b})$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = f_z \quad (\text{II.14.c})$$

Avant de passer à l'intégration verticale des équations du mouvement, il est utile de rappeler certaines caractéristiques de la surface libre et du fond qui sont définis par les équations suivantes :

$$S(x, y, z, t) = z - Z_s(x, y, t) = 0 \quad \text{à la surface libre} \quad (\text{II.15})$$

$$F(x, y, z, t) = z - Z_f(x, y) = 0 \quad \text{au fond} \quad (\text{II.16})$$

La dernière équation suppose que le lit de rivière est immobile.

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

$$\bar{n}_s = \frac{\nabla S}{\|\nabla S\|} = \frac{\left(-\frac{\partial Z_s}{\partial x} \bar{x} - \frac{\partial Z_s}{\partial y} \bar{y} + \bar{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \quad (\text{II.17})$$

On construit de même le vecteur normal  $\bar{n}_F$  au fond, à partir du gradient de la fonction  $F(x, y, z, t)$  soit :

$$\bar{n}_F = \frac{\nabla F}{\|\nabla F\|} = \frac{\left(-\frac{\partial Z_F}{\partial x} \bar{x} - \frac{\partial Z_F}{\partial y} \bar{y} + \bar{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z_F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_F}{\partial y}\right)^2 + 1}} \quad (\text{II.18})$$

La condition cinématique pour la surface libre s'obtient en dérivant la fonction  $S(x, y, z, t)$  par rapport au temps :

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dz}{dt} - \frac{dZ_s}{dt} \quad (\text{II.19})$$

soit :

$$w = \frac{dz}{dt} = \frac{dZ_s}{dt} = \frac{\partial Z_s}{\partial t} + u \frac{\partial Z_s}{\partial x} + v \frac{\partial Z_s}{\partial y} \quad (\text{II.20})$$

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.

De même en dérivant la fonction  $F(x, y, z, t)$ , on obtient la condition sur le fond :

$$\frac{dF}{dt} = \frac{dz}{dt} - \frac{dZ_F}{dt} = w - u \frac{\partial Z_F}{\partial x} - v \frac{\partial Z_F}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.21})$$

c'est à dire qu'au fond, qui est une limite solide fixe, la vitesse verticale doit être nulle. L'équation (II. 21) s'écrit sous la forme classique :

$$\bar{u} \cdot \bar{n}_F = 0 \quad (\text{II.22})$$

L'équation du mouvement suivant la verticale se réduit à :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = f_z = -\rho g \quad (\text{II.23})$$

conduisant à une distribution hydrostatique de la pression :

$$p = \rho g (Z_s(x, y, t) - z) + p_a \quad (\text{II.24})$$

où,  $p_a$  désigne la pression atmosphérique.

### 3.2.2 Opérateur de moyenne

Afin d'obtenir un modèle ne faisant intervenir que les variables d'espace horizontales  $x$  et  $y$ , les deux premières équations de mouvement ainsi que l'équation de continuité sont affectées d'un opérateur de moyenne sur la hauteur d'eau, défini pour une fonction quelconque  $f(x, y, z, t)$  par :

$$\bar{f}(x, y, z, t) = \frac{1}{Z_S - Z_F} \int_{Z_F}^{Z_S} f(x, y, z, t) dz \quad (\text{II.25})$$

Les fluctuations  $f'$  de la fonction  $f$  autour de sa valeur moyenne sont alors définies par :

$$f'(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) - \bar{f}(x, y, z, t) \quad (\text{II.26})$$

En désignant par  $g(x, y, z, t)$  une autre fonction quelconque, cet opérateur de moyenne vérifie les relations classiques suivantes :

$$\overline{\bar{f}} = \bar{f} ; \quad \overline{fg} = \bar{f}\bar{g} ; \quad \overline{f+g} = \bar{f} + \bar{g} ; \quad \overline{f'} = 0 \quad (\text{II.27})$$

On rappelle la règle de Leibniz pour la dérivation sous le signe somme :

$$\frac{\partial}{\partial \eta_i} \int_{g_1(\eta_1, \dots, \eta_p)}^{g_2(\eta_1, \dots, \eta_p)} \frac{\partial f}{\partial \eta_i} d\xi = \int_{g_1(\eta_1, \dots, \eta_p)}^{g_2(\eta_1, \dots, \eta_p)} \frac{\partial f}{\partial \eta_i} + f(g_2(\eta_1, \dots, \eta_p), \eta_1, \dots, \eta_p) \frac{\partial g_2}{\partial \eta_i} - f(g_1(\eta_1, \dots, \eta_p), \eta_1, \dots, \eta_p) \frac{\partial g_1}{\partial \eta_i} \quad (\text{II.28})$$

Pour simplifier, on désigne désormais par  $h(x, y, t)$  la position de la surface libre et par  $H(x, y, t)$  la hauteur d'eau :

$$h = Z_S(x, y, t) \quad \text{et} \quad H = Z_S(x, y, t) - Z_F(x, y) \quad (\text{II.29})$$

Avec ces notations, et en appliquant la règle de Leibniz, on obtient les relations suivantes, pour les dérivées partielles par rapport aux variables  $x$ ,  $y$  et  $t$  :

$$H \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} = \frac{\partial H \bar{f}}{\partial x} + f(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} - f(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{II.30.a})$$

$$H \frac{\partial \bar{f}}{\partial y} = \frac{\partial H \bar{f}}{\partial y} + f(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} - f(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{II.30.b})$$

$$H \frac{\partial \bar{f}}{\partial t} = \frac{\partial H \bar{f}}{\partial t} - f(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{II.30.c})$$

Quant à la dérivée partielle par rapport à  $z$ , on obtient :

$$H \frac{\partial \bar{f}}{\partial z} = f(x, y, h, t) - f(x, y, Z_F, t) \quad (\text{II.30.d})$$

### 3.2.3. Transformation des différents termes

#### □ Equation de continuité

L'application de l'opérateur de moyenne (II.25) (pondéré par  $H$ ) à l'équation de continuité, donne :

$$H \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{II.31})$$

En notant  $U$ ,  $V$  et  $H$  les valeurs moyennes des composantes  $u$ ,  $v$  et  $w$  de la vitesse :

$$U = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} u dz \quad (\text{II.32.a})$$

$$V = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} v dz \quad (\text{II.32.b})$$

$$W = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_s} w dz \quad (\text{II.32.c})$$

et en utilisant la règle de Leibniz, l'équation de continuité (II.31) devient :

$$\begin{aligned} \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} + u(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} + v(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} - w(x, y, h, t) - u(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial x} \\ - v(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial y} + w(x, y, t) = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.33})$$

Tenant compte des conditions cinématiques à la surface libre (II.20) et sur le fond (II.21), et de l'équation (II.29), l'équation de continuité moyenne s'exprime finalement sous la forme :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.34})$$

#### □ Equation de la quantité de mouvement

Le même traitement est appliqué aux deux autres équations du mouvement pour les dérivées horizontales. Procédons par groupe de termes.

##### ◆ Termes de variation 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 du moment (II.14), on lui rajoute l'équation de continuité pondérée par  $u$  que l'on moyenne puis, en se servant de l'équation (II.30) et en utilisant les deux conditions caractérisant la surface libre et le fond (II.20 et II.21), on obtient :

$$H \left( \overline{\frac{\partial u}{\partial t}} + u \overline{\frac{\partial u}{\partial x}} + v \overline{\frac{\partial u}{\partial y}} + w \overline{\frac{\partial u}{\partial x}} \right) = \frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial H \overline{u^2}}{\partial x} + \frac{\partial H \overline{uv}}{\partial y} \quad (\text{II.35})$$

De même, on obtient pour la direction  $y$  :

$$H \left( \overline{\frac{\partial v}{\partial t}} + u \overline{\frac{\partial v}{\partial x}} + v \overline{\frac{\partial v}{\partial y}} + w \overline{\frac{\partial v}{\partial z}} \right) = \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial H \overline{uv}}{\partial x} + \frac{\partial H \overline{v^2}}{\partial y} \quad (\text{II.36})$$

Les équations (II.35 et II.36) s'écrivent encore :

$$H \left( \overline{\frac{\partial u}{\partial t}} + u \overline{\frac{\partial u}{\partial x}} + v \overline{\frac{\partial u}{\partial y}} + w \overline{\frac{\partial u}{\partial x}} \right) = \frac{\partial (HU)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{uu} HU^2) + (\beta_{uv} HUV) \quad (\text{II.37})$$

$$H \left( \overline{\frac{\partial v}{\partial t}} + u \overline{\frac{\partial v}{\partial x}} + v \overline{\frac{\partial v}{\partial y}} + w \overline{\frac{\partial v}{\partial x}} \right) = \frac{\partial (HV)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{vu} HVU) + (\beta_{vv} HV^2) \quad (\text{II.38})$$

avec,

$$\beta_{uu} = \frac{1}{HU^2} \int_{z_b}^{z_s} u^2 dz \quad (\text{II.39.a})$$

$$\beta_{uv} = \beta_{vu} = \frac{1}{HUV} \int_{z_b}^{z_s} uv dz \quad (\text{II.39.b})$$

$$\beta_{vv} = \frac{1}{HV^2} \int_{z_b}^{z_s} v^2 dz \quad (\text{II.39.c})$$

$\beta_{uu}$ ,  $\beta_{uv}$  et  $\beta_{vv}$  sont des termes correctifs qui résultent de l'intégration verticale des équations de transport de la vitesse ; ils traduisent l'action des fluctuations sur le mouvement moyen, c'est à dire, expliquent les variations verticales de  $U$  et  $V$  et ils sont utilisés pour corriger les termes du flux advectif de la vitesse verticalement intégrée. Ces coefficients de la correction du flux de la vitesse dépendent de la distribution de la vitesse verticale, et souvent sont supposés égaux à l'unité supposant, une distribution constante de la vitesse verticale.

◆ *Termes de pression*

Avec l'expression de la pression fournie par l'équation de mouvement suivant la verticale, les dérivées partielles par rapport à  $x$  et  $y$  donnent :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{et} \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{II.40})$$

Etant indépendantes de  $z$ , ces deux équations restent inchangées par l'opérateur de moyenne :

$$H \left( \frac{1}{\rho} \overline{\frac{\partial p}{\partial x}} \right) = H_g \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{et} \quad H \left( \frac{1}{\rho} \overline{\frac{\partial p}{\partial y}} \right) = H_g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (\text{II.41})$$

◆ *Forces de Coriolis*

Pour la direction  $x$ , on a :

$$H \left( \frac{1}{\rho} \overline{f_x} \right) = 2H \underline{\omega} (V \sin \varphi - W \cos \varphi) \quad (\text{II.42})$$

où, la valeur moyenne  $W$  de la vitesse  $w$  peut être négligée devant la valeur moyenne  $V$  de la vitesse horizontale  $v$  :

$$H \left( \frac{1}{\rho} \overline{f_x} \right) = 2H \underline{\omega} (V \sin \varphi) = \Omega H V \quad (\text{II.43})$$

et pour la direction  $y$ , on a :

$$H \left( \frac{1}{\rho} \overline{f_y} \right) = -2H \underline{\omega} (U \sin \varphi) = \Omega H U \quad (\text{II.44})$$

avec,  $\Omega$  le paramètre de Coriolis égal à  $2\omega \sin \varphi$ ,  $\omega$  la vitesse angulaire de la rotation de la terre ( $\omega = 7.27 \times 10^{-5}$  rd/s et  $\varphi$  la latitude de l'aire à modéliser). Pour la plupart des courants où la proportion de largeur sur la profondeur est grande (ce qui est le cas de l'écoulement sur presque toutes les rivières), l'effet de Coriolis sera petit donc négligé.

◆ *Termes de frottements visqueux*

On a :

$$\frac{H}{\rho} \left( \overline{\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}} \right) = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial H \overline{\tau_{xy}}}{\partial x} + \frac{\partial H \overline{\tau_{xy}}}{\partial y} \right) + \frac{\|\nabla S\|}{\rho} T_x(x, y, h, t) - \frac{\|\nabla F\|}{\rho} T_x(x, y, Z_F, t) \quad (\text{II.45})$$

$$\frac{H}{\rho} \left( \overline{\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}} \right) = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial H \overline{\tau_{yx}}}{\partial x} + \frac{\partial H \overline{\tau_{yy}}}{\partial y} \right) + \frac{\|\nabla S\|}{\rho} T_y(x, y, h, t) - \frac{\|\nabla F\|}{\rho} T_y(x, y, Z_F, t) \quad (\text{II.46})$$

où  $T_x$  et  $T_y$  désignent les composantes horizontales du vecteur contrainte  $T$  défini pour un vecteur normal unitaire  $\vec{n}$  par :

$$\vec{T} = \tau \vec{n} \quad (\text{II.47})$$

Pour un point appartenant à la surface libre, le vecteur normal extérieur est :

$$\vec{n}_s = \frac{1}{\|\nabla S\|} \left( -\frac{\partial h}{\partial x} \vec{x} - \frac{\partial h}{\partial y} \vec{y} + \vec{z} \right) \quad (\text{II.48})$$

Les composantes de  $T$  en ce point sont données par :

$$-T_x(x, y, h, t) \|\nabla S\| = \tau_{xx}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_{xy}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial y} - \tau_{xz}(x, y, h, t) \quad (\text{II.49})$$

$$-T_y(x, y, h, t) \|\nabla S\| = \tau_{yx}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_{yy}(x, y, h, t) \frac{\partial h}{\partial y} - \tau_{yz}(x, y, h, t) \quad (\text{II.50})$$

Pour un point appartenant au fond, le vecteur normal extérieur est :

$$\vec{n}_F = \frac{1}{\|\nabla F\|} \left( -\frac{\partial Z_F}{\partial x} \vec{x} - \frac{\partial Z_F}{\partial y} \vec{y} + \vec{z} \right) \quad (\text{II.51})$$

Les composantes horizontales de  $T$  en ce point sont donc données par :

$$-T_x(x, y, Z_F, t) \|\nabla F\| = \tau_{xx}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \tau_{xy}(x, y, h, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} - \tau_{xz}(x, y, Z_F, t) \quad (\text{II.52})$$

$$-T_y(x, y, Z_F, t) \|\nabla F\| = \tau_{yx}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \tau_{yy}(x, y, Z_F, t) \frac{\partial Z_F}{\partial y} - \tau_{yz}(x, y, Z_F, t) \quad (\text{II.53})$$

L'apparition des composantes horizontales du vecteur contrainte sur le fond, dans les équations moyennes, est très avantageuse. En effet, elle permet de prendre en compte le frottement exercé par le fond sur l'écoulement. Ceci est aussi valable à la surface libre pour la prise en compte de l'effet du vent ; cependant, cela n'est pas considéré dans notre étude. Les autres termes de frottement visqueux, faisant intervenir les valeurs moyennes des contraintes visqueuses, sont généralement négligés devant les termes du frottement au fond, néanmoins pour plus de généralité, on les conservera dans les expressions.

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

$$\vec{T}(x, y, Z_F, t) = -\rho c_f \|\vec{u}(x, y, Z_F, t)\| \vec{u}(x, y, Z_F, t) \quad (\text{II.54})$$

où,  $c_f$  est le coefficient de frottement, dont l'intensité dépend de la rugosité du fond. La détermination de  $c_f$  est généralement empirique, basée sur l'étude des écoulements stationnaires en canal. Le coefficient de frottement s'exprime en fonction du coefficient de Chézy  $C$  sous la forme :

$$c_f = \frac{gn^2}{H^{1/3}} = \frac{g}{c^2} \quad (\text{II.55})$$

$n$  étant le coefficient de Manning,  $H$  la hauteur normale et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

Avec ces définitions, les termes traduisant le frottement au fond dans les équations du mouvement moyen peuvent se mettre sous la forme :

$$\frac{\|\nabla F\|}{\rho H} T_x(x, y, Z_F, t) = -\tau_x^F \quad (\text{II.56})$$

$$\frac{\|\nabla F\|}{\rho H} T_y(x, y, Z_F, t) = -\tau_y^F \quad (\text{II.57})$$

où :

$$\tau_x^F = \|\nabla F\| \frac{g}{C_h^2} \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{H} \quad (\text{II.58})$$

$$\tau_y^F = \|\nabla F\| \frac{g}{C_h^2} \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{H} \quad (\text{II.59})$$

avec,

$$\|\nabla F\| = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_F}{\partial y}\right)^2 + 1} \quad (\text{II.60})$$

si  $\|\nabla F\| = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_F}{\partial y}\right)^2 + 1} \cong 1$  ceci revient à supposer que le fond présente une pente douce.

Récapitulons les équations moyennées :

□ *Equation de continuité*

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.61})$$

□ *Equation de la quantité de mouvement*

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HU)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{uu} HU^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{uv} HUV) + gH \frac{\partial Z_F}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} - \Omega HV \\ & + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_x^F - \tau_x^S - \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{xx}) - \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{xy}) \right] = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.62})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HV)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_{vu} HVU) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_{vv} HV^2) + gH \frac{\partial Z_F}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial y} - \Omega HU \\ & + \frac{1}{\rho} \left[ \tau_y^F - \tau_y^S - \frac{\partial}{\partial x}(H\tau_{yx}) - \frac{\partial}{\partial y}(H\tau_{yy}) \right] = 0 \end{aligned} \quad (\text{II.63})$$

## § 4. Modèle numérique [4], [23], [25], [26]

Sur le plan numérique, quelle que soit la méthodologie d'approximation et de résolution utilisée, la discrétisation spatiale est généralement faite en utilisant l'une ou la combinaison des méthodes numériques suivantes : différences finies, éléments finis et volumes finis. Pour les géométries complexes impliquant forcément des aspects tridimensionnels, un maillage sur la base de modèles numériques de terrains est nécessaire. En pratique, une approche intégrée est préférée et donne lieu soit aux modèles 1.5D, (quasi bi-dimensionnels) très répandus et disponibles dans le domaine public ou bien aux modèles 2.5D (quasi tri-dimensionnels), moins répandus et peu disponibles dans le domaine public et parmi quoi FESWMS-2DH, dont on présente ci-après la méthodologie utilisée ainsi qu'une analyse détaillée de l'algorithme numérique associé.

### 4.1. Présentation du modèle utilisé

Finite Element Surface Water modeling System (FESWMS-2DH) a été développé par le U.S. Geological Survey. Il est du domaine public et disponible sur Internet à l'adresse : <http://water.usgs.gov/software/feswms.html>.

FESWMS sert à simuler les écoulements à surface libre en quasi tridimensionnel (bidimensionnel intégré sur la profondeur) aussi bien en régime stationnaire que transitoire. Le modèle considéré est du type Saint-Venant gouverné par le système (II.61-II.63), et il est valable pour l'étude de rivières peu profondes, les plaines inondées, les estuaires ou les cotes marines. Il est écrit en FORTRAN et il tourne sous UNIX ou sous MS DOS. Les modules graphiques nécessaires GKS.FESWMS-2DH est un ensemble de programmes développés en vue de simuler l'écoulement à surface libre quand le mouvement est essentiellement horizontal et quand il est bien décrit par l'approximation bidimensionnelle. Il est plus particulièrement utilisé pour analyser l'écoulement au niveau des structures naturelles ou artificielles qui ont créé des conditions hydrauliques complexes : l'écoulement en présence des ponts, des canaux, des ouvertures (déversoirs).

Le modèle tient compte de l'effet du frottement au fond, des contraintes appliquées par le vent, des contraintes turbulentes et de la rotation de la terre. Cela dépend du problème à modéliser et à simuler. Ce système de modélisation peut être utilisé pour simuler le courant dans les rivières et lits majeurs et autres corps de la surface-eau où les accélérations verticales sont faibles en comparaison au mouvement horizontal.

### 4.2. Esquisse algorithmique

FESWMS résout les équations du mouvement et de continuité intégrées verticalement en utilisant une formulation  $(U, V, H)$ , vitesse moyennée sur la profondeur et profondeur d'écoulement. La discrétisation spatiale est du type éléments finis  $P^2$  pour la vitesse et  $P^1$  pour la hauteur. Il permet en outre de prévoir les temps d'arrivée de l'onde de crue/submersion. Les effets du frottement à la paroi et les contraintes turbulentes sont inclus, comme le sont optionnellement les contraintes de surface dues au vent et à la force de Coriolis.

#### 4.2.1. Discrétisation en temps

La discrétisation temporelle utilise un schéma de différences finies implicite suivant :

$$\frac{\partial U}{\partial t} \approx \frac{1}{\theta \Delta t} (U - U_0) - \frac{1-\theta}{\theta} \left( \frac{\partial U}{\partial t} \right)_0 \quad (\text{II.64})$$

où,  $\theta$  est un facteur de pondération compris entre 0.5 et 1 ;  $\Delta t$  le pas en temps ; et l'indice 0 indique l'instant initial.



On peut réécrire les dérivées en temps de  $U$ ,  $V$  et  $H$  d'une façon plus compacte en réarrangeant les termes comme suit :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha U - \beta_1, \quad \beta_1 = \alpha U_0 + \frac{1-\theta}{\theta} \left( \frac{\partial U}{\partial t} \right)_0 \quad (\text{II.65})$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \alpha V - \beta_2, \quad \beta_2 = \alpha V_0 + \frac{1-\theta}{\theta} \left( \frac{\partial V}{\partial t} \right)_0 \quad (\text{II.66})$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \alpha H - \beta_3, \quad \beta_3 = \alpha H_0 + \frac{1-\theta}{\theta} \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right)_0 \quad (\text{II.67})$$

où,  $\alpha = \frac{1}{\theta \Delta t}$ , pour  $\theta = 0.67$ , il a été démontré qu'une solution stable et précise existe même pour des pas de temps  $\Delta t$  relativement grands.

#### 4.2.2. Discrétisation spatiale

FESWMS utilise la méthode des résidus pondérés de Galerkin pour discrétiser le système d'équations (II.61-II.63). Le principe de la formulation variationnelle utilisée est le suivant : On cherche une solution  $U, V \in \mathbf{V}$  et  $H \in \mathbf{H}$  où  $\mathbf{V}, \mathbf{H}$  sont les espaces des champs de solutions admissibles respectivement pour la vitesse et pour la profondeur. On approxime  $\mathbf{V}, \mathbf{H}$  par des espaces vectoriels  $\mathbf{V}_I, \mathbf{H}_I$  de dimension finie. Soient  $(N_1, N_2, \dots, N_p)$  et  $(M_1, M_2, \dots, M_q)$  leur base respectivement. On peut ainsi approcher une solution  $(U, V)$  et  $H$  par  $(U^*, V^*) \in \mathbf{V}_I$  et  $H^* \in \mathbf{H}_I$  tels que :  $U^* = \sum U_i \cdot N_i$ ,  $V^* = \sum V_i \cdot N_i$  et  $H^* = \sum H_i \cdot M_i$  où  $U_i, V_i$  et  $H_i$  sont respectivement les valeurs approchées de  $U, V$  et  $H$  en un point du domaine discrétisé. Les équations de moment sont ensuite multipliées par une fonction test  $N_i$  et l'équation de continuité par  $M_i$  puis intégrées par parties moyennant le théorème de Green :

$$\int_A \psi \frac{\partial u}{\partial x} dA = - \int_A \frac{\partial \psi}{\partial x} u dA + \oint_S \psi u \eta_x dS \quad (\text{II.68.a})$$

$$\int_A \psi \frac{\partial u}{\partial y} dA = - \int_A \frac{\partial \psi}{\partial y} u dA + \oint_S \psi u \eta_y dS \quad (\text{II.68.b})$$

$\eta_x$  et  $\eta_y$  étant les composantes suivant  $x$  et  $y$  du vecteur normal extérieur à la surface  $S$  frontière d'un domaine  $A$ .

On aboutit aux expressions résiduelles des quantités  $U, V$  et  $H$  ci-dessous.

Les équations (II.62 et II.63) impliquent :

$$\begin{aligned} f_{U_i} = & \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i \left[ H \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial t} + gH \frac{\partial Z_F}{\partial x} - \Omega H V + \frac{1}{\rho} (\tau_x^F - \tau_x^S) \right] + \frac{\partial N_i}{\partial x} \left[ -\beta H U^2 - \frac{1}{2} g H^2 + 2\bar{\nu} H \frac{\partial U}{\partial x} \right] \right. \\ & \left. + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left[ -\beta H U V + 2\bar{\nu} H \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \right\} dA_e \quad (\text{II.69}) \\ & + \sum_e \int_{S_e} N_i \left\{ \left[ \left( \beta H U^2 + \frac{1}{2} g H^2 \right) \eta_x + \beta H U V \eta_y \right] - \left[ 2\bar{\nu} H \frac{\partial U}{\partial x} \eta_x + \bar{\nu} H \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \eta_y \right] \right\} dS_e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{v_i} = & \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i \left[ H \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial t} + gH \frac{\partial Z_f}{\partial y} - \Omega HU + \frac{1}{\rho} (\tau_y^F - \tau_y^S) \right] + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left[ -\beta HV^2 - \frac{1}{2} gH^2 + 2\bar{\nu}H \frac{\partial V}{\partial y} \right] \right. \\
& \left. + \frac{\partial N_i}{\partial x} \left[ -\beta HUV + 2\bar{\nu}H \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \right\} dA_e \\
& + \sum_e \int_{S_e} N_i \left\{ \left[ \left( \beta HV^2 + \frac{1}{2} gH^2 \right) \eta_y + \beta HUV \eta_x \right] - \left[ 2\bar{\nu}H \frac{\partial V}{\partial x} \eta_y + \bar{\nu}H \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \eta_x \right] \right\} dS_e
\end{aligned} \tag{II.70}$$

De même pour l'équation de continuité (II.61) :

$$f_{H_i} = \sum_e \int_{A_e} M_i \left[ \frac{\partial H}{\partial t} + H \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial H}{\partial y} \right] dA_e - Q_i \tag{II.71}$$

### 4.3. Algorithme de résolution

#### 4.3.1 Algorithme de Newton

La discrétisation de FESWMS, basée sur la méthode des éléments finis type Galerkin, conduit à un système non linéaire qui, avec les expressions résiduelles, est du type :

$$F(U, V, H) = (f_{U_i}, f_{V_i}, f_{H_i}) = (0, 0, 0) \tag{II.72}$$

Pour la résolution, on utilisera la méthode de Newton qui revient à résoudre le système :

$$\nabla F(U, V, H) (\Delta U, \Delta V, \Delta H) + F(U, V, H) \tag{II.73}$$

que l'on mettra sous la forme :

$$K(a)a = f \tag{II.74}$$

La stratégie de résolution combine la méthode totale de Newton ou la quasi-Newton et un schéma de résolution du système linéarisé. Cet algorithme itératif peut être résumé ainsi :

$$a_{i+1} = a_i - J(a_i)^{-1} R(a_i) \tag{II.75}$$

où,  $a_{i+1}$  est le nouveau vecteur solution à calculer,  $a_i$  est le vecteur solution connu 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 :

$$J(a_i)\Delta a_i = -R(a_i) \tag{II.76}$$

où,  $\Delta a_i$  est la valeur incrémentale de la solution. Une mise à jour est calculée par :

$$a_{i+1} = a_i + \omega_r \Delta a_i \tag{II.77}$$

avec,  $\omega_r$  un facteur de relaxation variant entre 0 et 2. Ce facteur permet souvent d'améliorer la vitesse de convergence et sa valeur optimale dépend du problème ; elle est déterminée par expérimentation numérique.

### 4.3.2. Intégration numérique

Pour calculer numériquement les différentes intégrales apparaissant dans la formulation variationnelle discrétisée, on utilise la méthode de Gauss à sept points :

$$\int_{A_e} f(x, y) dA_e \approx A_e \sum_{i=1}^k \omega_i f(x_i, y_i) \quad (\text{II.78})$$

$A_e$  étant la surface de l'élément d'intégration,  $f$  la fonction à intégrer,  $k$  le nombre de points d'intégration numérique et  $\omega_i$  leur poids respectif. La figure II.3 montre les différents points d'intégrations sur un élément de référence.

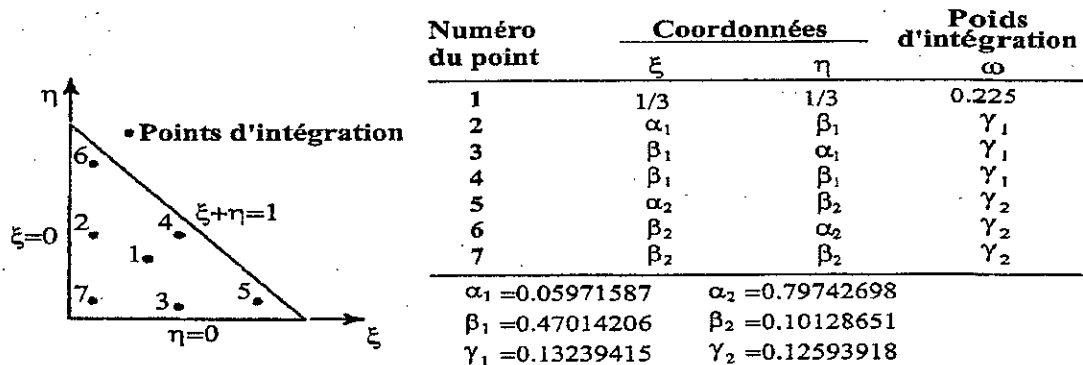


Figure II.3 : Les points d'intégration de Gauss

### 4.3.3. Résolution de la jacobienne

Pour résoudre le système d'équations (II.13) une méthode directe est utilisée où, à chaque itération, la matrice jacobienne est décomposée par la factorisation  $LU$  de Gauss en matrice triangulaire supérieure  $U$  et inférieure  $L$ . Elle est associée à une méthode de résolution dite frontale qui tire profit des particularités des systèmes linéaires associée à la méthode des éléments finis, à savoir l'assemblage des éléments et le caractère creux du système à résoudre. Cette méthode suggère de ne garder en mémoire centrale les grandeurs  $A_{ij}$  et  $b_i$  (matrice élémentaire et vecteur deuxième membre relatifs au nœud  $i$ ) que le temps nécessaire à leur calcul (durant lequel, on dit que le nœud  $i$  est activé), et après quoi, ils seront stockés dans une mémoire auxiliaire (on dit alors que le nœud  $i$  est désactivé) cédant la place à un nouveau nœud activé. Le front est l'ensemble des nœuds activés à un instant donné. Au cours du parcours de la triangulation, la taille du front (ou largeur du front) augmente, passe par un maximum puis décroît. La place mémoire nécessaire pour effectuer l'assemblage du système linéaire est déterminée par la taille maximale du front.

*Remarque* : la numérotation des nœuds n'a aucune influence sur la taille du front, par contre la numérotation des éléments est très importante, ainsi la largeur du front se réduit, et le stockage de la matrice  $A$  nécessite moins d'espace.

# CHAPITRE III

## ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

## CHAPITRE III : ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

### § 1. Introduction

La plate-forme de développement de ce présent travail fait partie du SII (Système d'Information Intégré) ESIMEAU. Les deux principaux éléments de cette plate-forme sont d'une part, les données (souvent de type hétérogène) qui sont stockées dans la base de données et qui peuvent être interrogées selon les besoins de l'utilisateur, et d'autre part les modèles numériques qui constituent un élément primordial de la plate-forme ESIMEAU. En effet, dans des problèmes traitant les ressources en eau, la résolution des équations nécessite des ressources informatiques étendues. Or, les utilisateurs extérieurs ne disposent pas toujours de ces capacités de traitement. Il y a donc besoin de fournir un moyen aux utilisateurs leur permettant d'accéder aux ressources de l'INRIA. La solution est de développer une application basée sur la technologie client/serveur à travers le Web. Ainsi, la consultation de la base de données sera locale et s'effectuera sur le poste client, alors que l'exécution des modèles numériques se fera au niveau du serveur de l'INRIA. le schéma ci-après illustre les flux d'information échangés entre le client et le serveur.

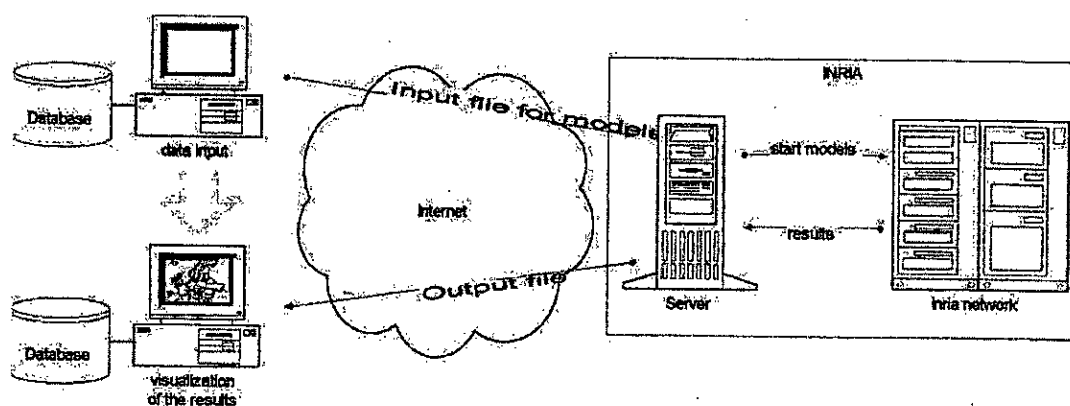


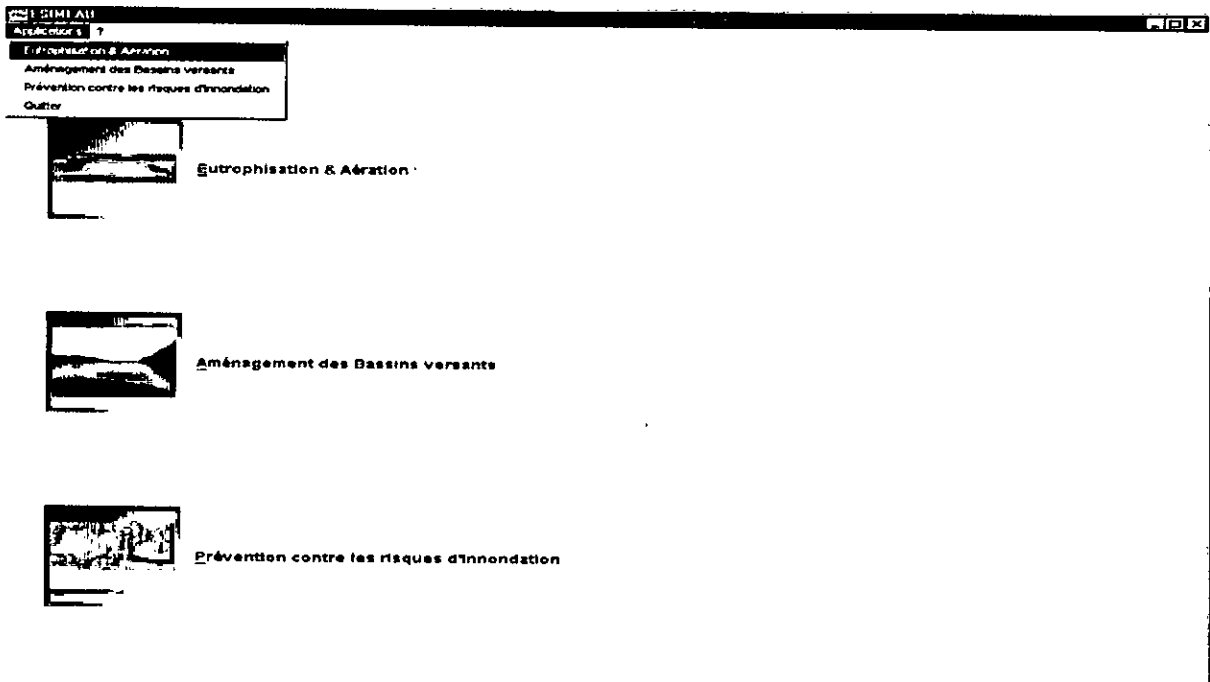
Figure III.1 : Environnement de travail

### § 2. Interface principale [9], [17], [22]

Le but de cette application est de fournir un environnement de travail convivial tout en permettant l'intégration des différents logiciels. L'application offre une interface principale (voir Figure III.2) qui permet à l'utilisateur de choisir à travers un menu déroulant l'une des applications suivantes :

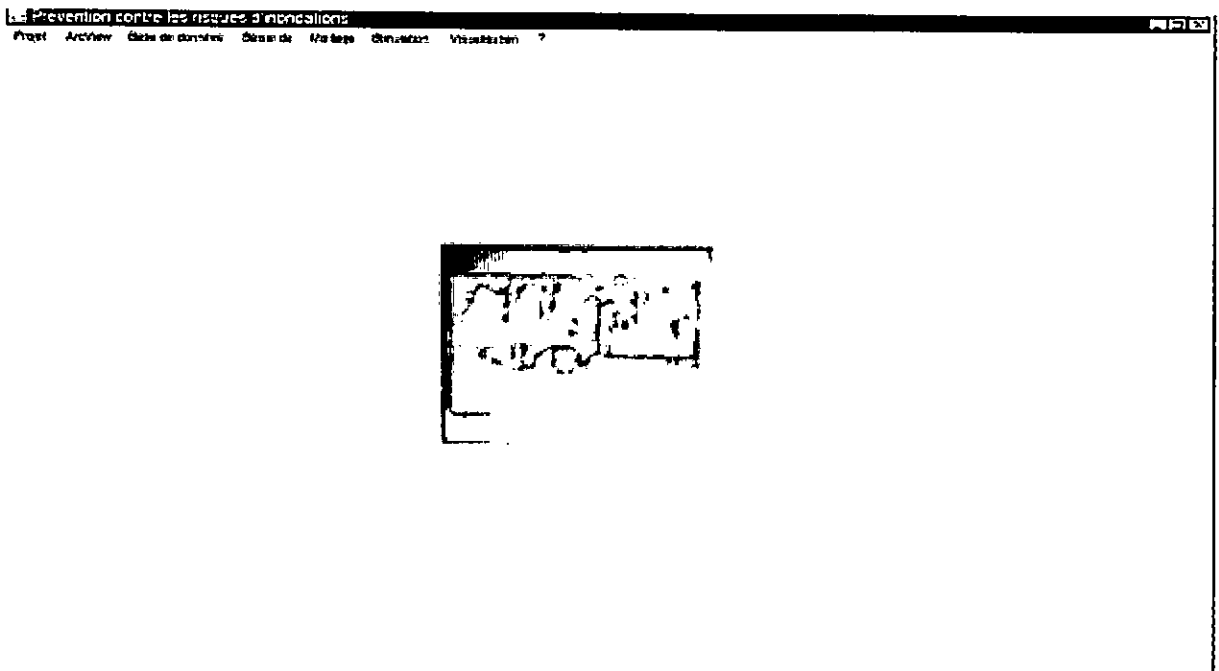
- Eutrophisation & Aération,
- Aménagement des bassins versants,
- Prévention contre les risques d'inondation.

A titre d'illustration, nous allons décrire en détails les différents composants de l'interface principale de l'application Eutrophisation. Les deux autres applications présentent les mêmes fonctionnalités et répondent à la même stratégie conceptuelle.



**Figure III.2 : Interface principale ESIMEAU**

Un simple clic sur le nom de l'application, l'interface ci-dessous (Figure III.3) s'affiche avec une barre de menus qui permet à l'utilisateur d'accéder à tous les logiciels intégrés et d'effectuer diverses opérations sur les données.



**Figure III.3 : Interface de l'application Prévention contre les risques d'inondations**

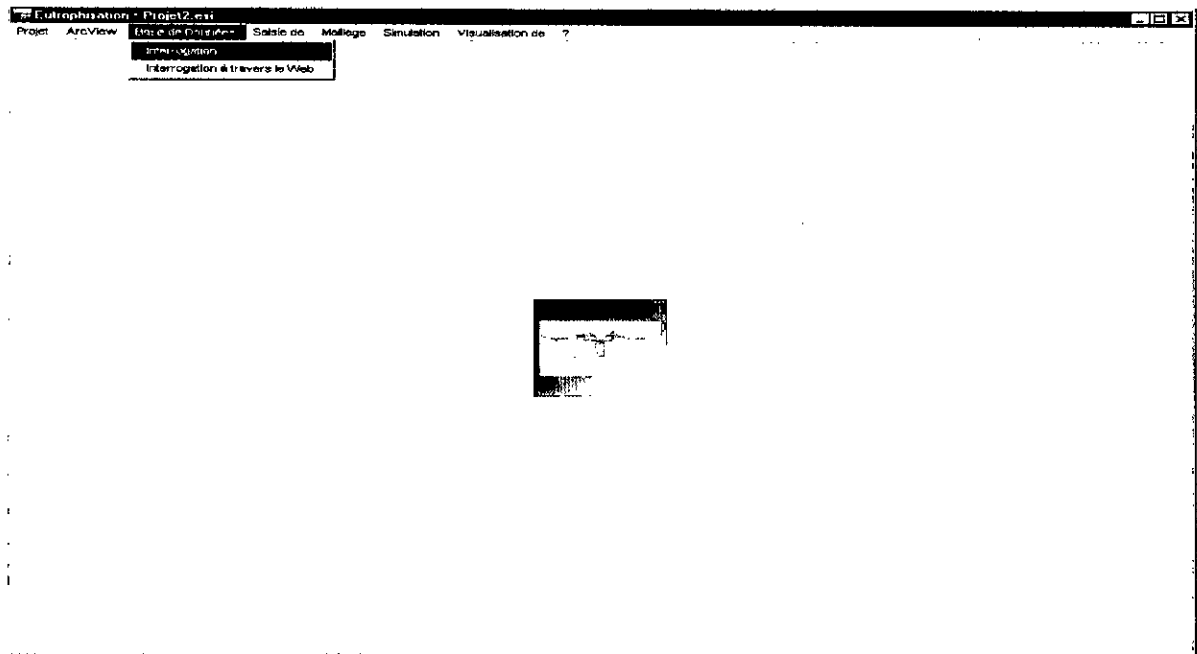
Les différents menus déroulants qui s'y présentent offrent les fonctionnalités suivantes :

- **Projet** : ce menu déroulant offre l'accès au projet de format \*.esi ainsi que toutes les manipulations les concernant :
  - **Nouveau** : permet d'ouvrir un nouveau projet d'extension « .esi » propriétaire du projet ESIMEAU ;
  - **Ouvrir** : permet d'ouvrir un projet existant de même extension ;
  - **Supprimer** : supprime un projet « \*.esi » ;
  - **Configurer** : permet de configurer l'application en précisant les chemins d'accès aux différents logiciels utilisés ;
  - **Fermer** : permet à l'utilisateur de quitter l'application en cours et de revenir à l'interface principale ;
  - **Quitter** : permet de fermer complètement l'application ;
- **ArcView** : ce menu offre l'accès au logiciel ArcView, il permet en outre d'ouvrir ou de fermer un projet de format « \*.apr » qui lui est propre.
- **Bases de données** : permet d'interroger la base de données en mode stand alone ou via le Web ;
- **Saisie** : offre à l'utilisateur la possibilité de saisir des données de divers type : la frontière du domaine d'étude, les données physiques, expérimentales, soit à partir du clavier, par l'intermédiaire d'un fichier texte ou bien à partir d'ArcView.
- **Maillage** : donne accès au logiciel de maillage « EMC2 » de manière interactive ou en background ;
- **Simulation** : permet d'exécuter le modèle numérique, sur le poste client ou sur le serveur, en lui transmettant les entrées nécessaires à son déroulement. L'exécution se fait en mode background, donc transparente à l'utilisateur. Les résultats retournés seront ensuite stockés dans la base de données.
- **Visualisation de** : ce menu permet à l'utilisateur de visualiser sous « VISU » ou « ArcView », les résultats en provenance du code numérique ou du mailleur « EMC2 ».
- **?** : comme la plupart des applications Windows, ce menu offre une aide en ligne à l'utilisateur qui trouverait des difficultés à manipuler l'application, il inclut aussi la version et les droits d'auteur.

### § 3. Interface Application Mère / SGBD [9], [17], [22]

Un système de gestion de bases de données (dBASE) est intégré au logiciel « ArcView ». Toutefois, la nature des données et les types de requêtes qui leur sont inhérentes, ainsi que les contraintes de modularité ont orienté le choix vers un SGBD (Système de Gestion d'une Base de Données) indépendant. L'intérêt étant de rendre accessibles les informations traitées par les différents composants du système. Le choix du SGBD pour la plate-forme Windows s'est porté sur Access, qui répond largement aux traitements à effectuer, et permet de faire les manipulations nécessaires sans recourir à un autre système plus lourd.

La base de donnée est accessible depuis l'interface de l'application mère pour l'interrogation, la saisie et les éventuelles modifications, et ce, localement ou à travers le Web comme l'illustre la figure III.4 :



**Figure III.4 : Interrogation de la base de donnée**

Les requêtes effectuées sur cette base de données ont été codées de façon à rendre sa manipulation facile, ainsi l'utilisateur s'affranchit des difficultés d'apprentissage du SGBD et de la programmation sous son environnement. Le SGBD communique avec l'application en utilisant la bibliothèque de liens dynamiques de Microsoft ODBC (Open Data Base Control), ces liens sont soit, de contrôle, de manipulation (ajout et retrait) ou de construction.

#### **§ 4. Interface Application Mère / EMC2 [9], [17], [21], [22]**

La méthode des éléments finis est très utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles. Néanmoins, cette méthode nécessite une étape de préparation des données, appelée maillage, qui consiste en une discrétisation du domaine géométrique étudié en éléments simples. La génération du maillage et son adaptation sont une partie incontournable pour toute modélisation numérique.

EMC2 (Edition de Maillage et de Contours en 2 dimensions) est un logiciel portable, graphique et interactif élaboré à l'INRIA. En définissant la géométrie du contour du domaine à mailler, il permet la génération interactive du maillage bidimensionnel formé de simplexes triangulaires ou quadrangulaires. Au cours de l'édition, l'utilisateur a la possibilité d'ajouter ou de supprimer des points ou de déplacer des sommets de telle sorte à adapter son maillage selon les spécifications du problème. Trois parties essentielles se succèdent lors d'une génération de maillage.

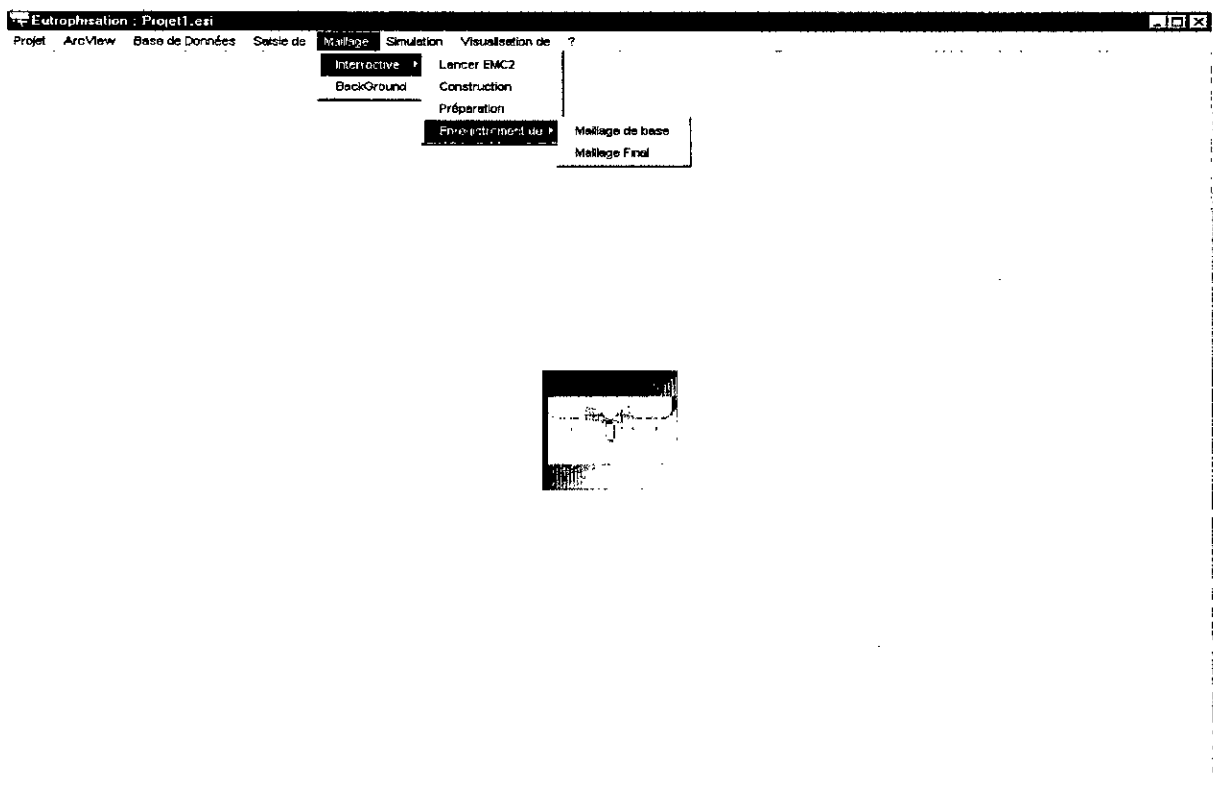
- *L'application CONSTRUCTION* : lors de cette application, le logiciel permet la saisie des contours géométriques du domaine formé par des points, des segments, des arcs ou des splines.
- *L'application PREP-MESH* : cette étape permet de définir la discrétisation des entités définissant la frontière du domaine et des sous domaines tout en leur affectant les références respectives : les sous-domaines, les lignes et les points en vue d'entrer des données physiques différentes.
- *L'application EDIT-MESH* : cette application permet de générer le maillage. En effet, pendant la commutation vers cette application, le logiciel permet de modifier la valeur par défaut de certains paramètres du mailleur. Il construit un maillage triangulaire ou



quadrangulaire des sous-domaines définis à l'étape **PREP-MESH** ou bien de tous les sous domaines si aucun n'a été défini. Un ensemble de fonctionnalités est offert à l'utilisateur pour :

- l'ajout de sommets internes aux sous-domaines ;
- la suppression de sommets ou de sous-domaines ;
- le retour des arêtes internes d'un quadrilatère ;
- le déplacement des sommets ;
- la modification des références des sommets, des arêtes ou des sous-domaines ;
- la sauvegarde ou la restauration d'un maillage sous différentes formes.

EMC2 est accessible depuis l'Application Mère à partir du menu principal, il fonctionne selon le mode opérationnel choisi : interactif ou background comme l'illustre la figure III.5 :

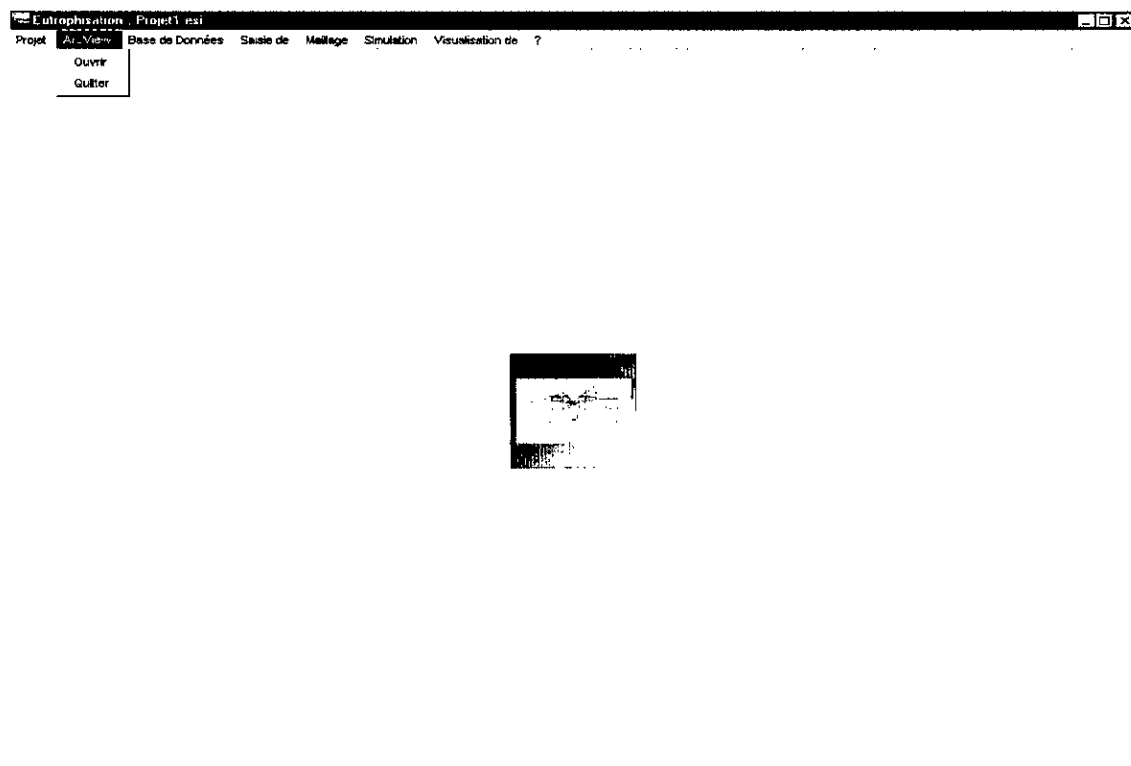


**Figure III.5 : Interface Application Mère / EMC2**

En mode interactif, EMC2 reçoit les informations concernant les points frontière délimitant le domaine d'étude et permet de les visualiser en mode *construction*, en affichant un contour formé de points joints par des segments. En commutant vers le mode *préparation*, on saisit, à travers une boîte de dialogue, le nombre d'intervalles voulu sur chaque segment. En background, par contre, EMC2 reçoit les points frontières puis génère automatiquement la triangulation sans l'intervention de l'utilisateur. Cette approche est rendue nécessaire par la lourdeur de manipulation des fichiers en aval de EMC2 qui sont de taille relativement grande.

## § 5. Interface Application Mère / SIG-ArcView [9], [17], [22]

Le logiciel ArcView est accessible depuis l'Application Mère à partir du menu principal ArcView. Il permet la saisie, la visualisation, la consultation et d'éventuelles opérations sur les données. L'appel d'ArcView à partir de l'Application Mère est présenté sur la figure III.6 ci-dessous.



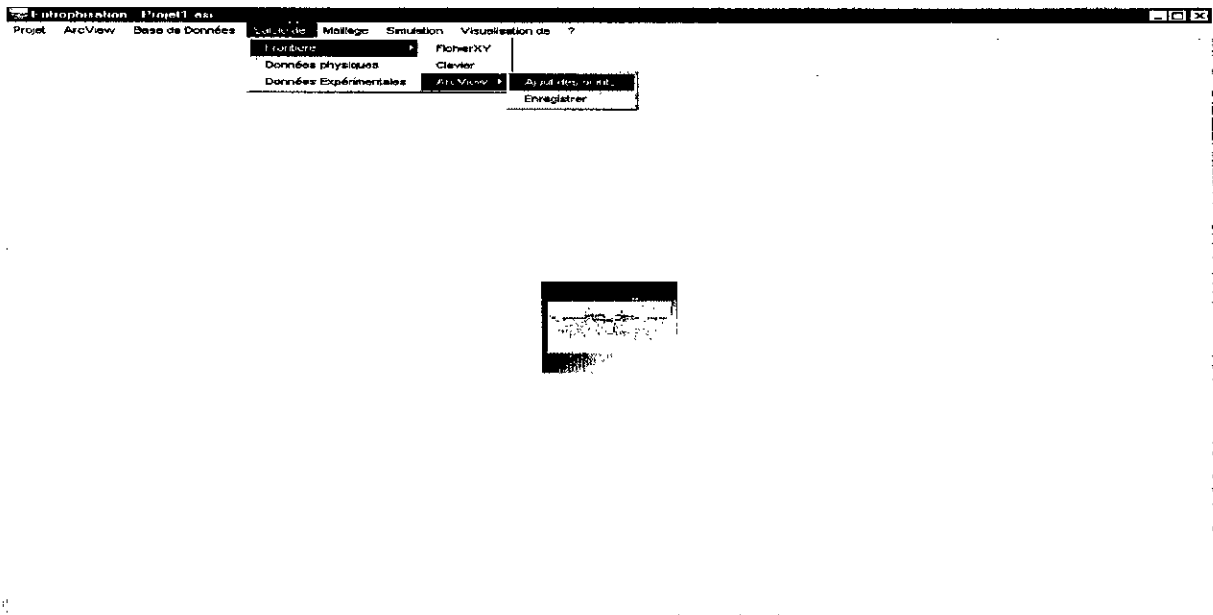
**Figure III.6 : Interface Application Mère / ArcView**

L'activation du bouton **ArcView** lance le logiciel en utilisant le protocole DDE (Data Dynamic Exchange) et permet d'ouvrir le projet en court de traitement. ArcView prend en charge l'échange dynamique des données et peut communiquer avec n'importe quelle autre application qui supporte également l'échange dynamique de données, tels que Visual Basic, Excel, Access, Lotus. L'échange dynamique des données comporte toutefois une limitation : les applications communicantes doivent être exécutées sur le même ordinateur. Le DDE ne prend pas en charge les réseaux.

Il existe trois façons différentes de dialoguer au cours d'une conversation DDE : **Execute**, **Request**, **Poke**. A l'aide de la commande **Execute**, le client demande au serveur d'exécuter une certaine fonction. La chaîne que le client envoie au serveur est généralement une directive dans le langage de commande du serveur. Si on est connecté à un serveur ArcView, la commande est donnée sous la forme d'un Script Avenue. Dans l'opération de demande **Request**, le client demande au serveur de renvoyer la valeur d'un élément.

A l'aide de l'instruction **Poke**, le client demande au serveur de mettre à jour l'un de ses éléments avec certaines données. Différents serveurs ou rubriques utilisent différentes méthodes pour identifier les éléments.

La fenêtre (figure III.7) suivante montre comment l'utilisateur peut ajouter ou supprimer des points de la frontière via ArcView, ainsi que leur enregistrement dans la base de données.



**Figure III.7 : Saisie de points et leur enregistrement**

La représentation graphique des résultats et leur visualisation montre le grand intérêt à l'utilisation des SIG en termes de facilité de lecture et d'interprétation. Une étude détaillée de toutes les fonctionnalités offertes par ArcView, ainsi qu'une introduction aux systèmes d'information géographique feront l'objet du chapitre IV.

## § 6. Interface Application Mère / Simulation [9], [17], [22]

L'une des caractéristiques des systèmes d'aide à la décision est l'interaction entre trois modules relatifs aux:

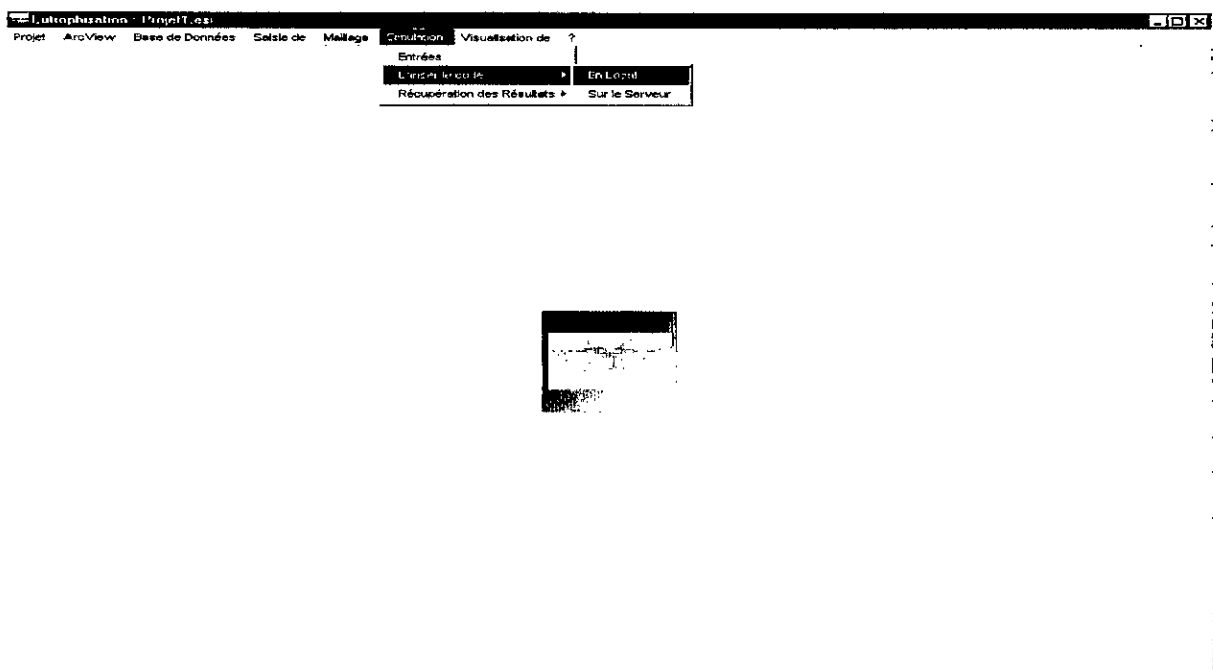
- données mathématiques qui expriment en termes mathématiques notre compréhension du monde physique ;
- données d'entrée qui représentent l'information réelle et sa nécessité pour piloter les modèles mathématiques ;
- données de sortie qui sont produites par le modèle mathématique et représentant les informations sur lesquelles les décideurs s'appuieront pour prendre des décisions intelligentes.

Ces trois parties indépendantes, doivent fonctionner d'une façon transparente vis à vis des décideurs. Les utilisateurs doivent préparer les données d'entrée selon les formats prescrits par les créateurs des modèles puis essayer de récupérer les données de sortie, qui sont en général, difficiles à interpréter par les utilisateurs.

FESWMS est un code de calcul qui simule les écoulements surfaciques dans différents systèmes hydrauliques tel que les canaux. Pour exécuter ce code, nous avons besoin du module d'introduction des données et de mise en œuvre du maillage. Certes, ce code est complet et ces deux modules lui sont rattachés, il s'agit de DINMOD pour la préparation des données et ANOMOD pour la visualisation des résultats, sauf que ces derniers présentent l'inconvénient d'être peu interactifs. Pour pallier à ce problème de pré et post-traitement, nous

avons choisi d'utiliser les moyens développés à l'INRIA. Il s'agit de logiciels de pré et post-processing très interactifs. Seulement, certains de ces logiciels présentent l'inconvénient de n'être adaptés qu'aux maillages  $P^1$ , alors que le code de simulation FESWMS est un code  $P^2$ . Dans le chapitre suivant, nous allons expliciter en détail les deux interfaces rattachées à la simulation, à savoir, le pré et post-traitement. Par ailleurs, et compte tenu du fait que les partenaires du projet qui vont bénéficier des résultats des recherches ne disposent pas de machines assez puissantes pour lancer ce type de codes, il a été envisagé de laisser aux puissantes machines de l'INRIA les tâches de calculs très lourdes. L'accès à ces machines se fera via une page Web qui intégrera l'ensemble des composants du projet. L'accès à cette page est limité aux personnes autorisées et il est protégé par un login et un mot de passe sur le serveur de l'INRIA.

L'activation du bouton de menu Simulation nous permet de lancer le code numérique soit en local ou en serveur, tout en lui précisant comme entrée, la structure du maillage final, les données hydrauliques et hydrométéorologiques contenues dans la base de données où les résultats retournés y seront stockés également.

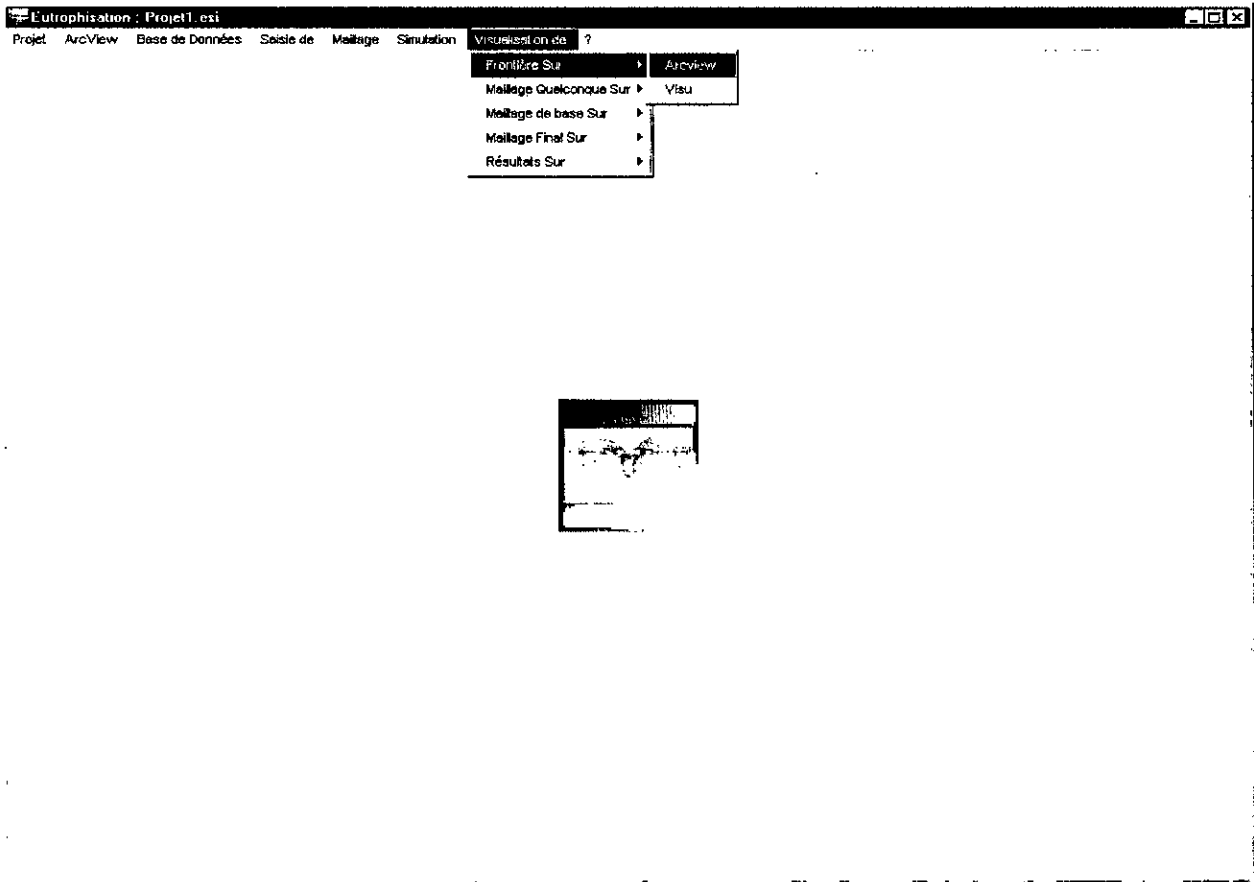


**Figure III.9 : Interface Application / Simulation**

## § 7. Interface Application / Exploitation des résultats [9], [17], [22]

Les résultats finaux de simulation peuvent être exploités sous ArcView sous forme de thèmes associés au maillage de visualisation ou par des courbes temporelles et spatiales. VISU et MEDIT offrent d'autres possibilités pour explorer les résultats en fusionnant la solution sur le maillage de calcul, ce qui permet d'avoir une vue globale sur la solution (localisation des extremums par exemple).

La fenêtre ci-dessous (Figure III.10.) présente à l'utilisateur l'option « Frontière sur ArcView » du menu « Visualisation » qui lui permettra de visualiser avec ArcView : la frontière, le maillage de base (servant à la visualisation), le maillage final (servant au calcul), les résultats fournis par le modèle numérique, et éventuellement un maillage quelconque.



**Figure III.10 : Interface Application Mère / Visualisation**

# CHAPITRE IV

## OUTILS DE LA SIMULATION NUMERIQUE

# CHAPITRE IV : OUTILS DE LA SIMULATION NUMERIQUE

## § 1. Introduction

Comme pour tout un logiciel de simulation numérique, FESWMS nécessite quatre étapes pour la simulation d'un cas :

- Acquisition des données ;
- Génération du maillage ;
- Test du modèle ;
- Visualisation et application pour la prédiction.

Les données sont de type topographique et hydraulique. Les données topographiques décrivent la géométrie du domaine physique de l'écoulement. Une estimation des coefficients de rugosité est nécessaire pour évaluer les frottements au fond. Les données hydrauliques incluent les mesures de niveau et l'hydrogramme de débit, quelques marques des niveaux laissées par les crues, les courbes d'étalonnage, les limites d'inondation et la mesure du vent. Ces données sont utilisées d'une part, pour établir les conditions initiales et aux limites du modèle, et d'autre part pour calibrer et tester le modèle.

Pour l'exploitation graphique des résultats, on va utiliser une combinaison de moyens : ArcView, le logiciel MEDIT, le visualiseur VISU rappelés en annexe. Certes ces outils de visualisation sont très interactifs, mais les deux derniers sont de nature  $P^1$ . Toutefois, cet aspect ne pose pas de vrai problème puisque, et de là l'intérêt majeur de la disposition choisie pour les nœuds, comme il sera expliqué plus loin, on récupère à partir du maillage  $P^2$ , uniquement l'information sur les nœuds  $P^1$ , et c'est celle-ci qu'on se contentera de représenter moyennant MEDIT ou encore VISU.

Une toute autre méthodologie a été utilisée pour le cas d'ArcView. Il sera question (chapitre suivant) d'interpoler les résultats du maillage de calcul sur un maillage de visualisation, puis d'exploiter les résultats, soit par des courbes temporelles ou spatiales. On se contentera pour ce chapitre, de donner la stratégie suivie et les outils mis en œuvre pour la préparation des données en aval de FESWMS, ainsi que les traitements des résultats retournés, en vue d'une utilisation de VISU ou MEDIT.

## § 2. Interface $f$ [15], [18], [20], [23]

### 2.1. Préparation des données

Les données de type topographique nous parviennent de modèles numériques du terrain ( NMT ) ou de systèmes d'information géographique, etc. Ces données topographiques seront enregistrées dans un fichier 'xxx'(xxx, étant le préfixe des noms de fichier), il contiendra donc, des points particuliers de la géométrie décrits par leurs coordonnées  $(x, y, z)$ .

Un autre ensemble de données sera contenu dans un fichier qu'on appellera 'data'. Ce dernier inclut :

- le préfixe du nom de fichier (tous les fichiers générés au cours de cette interface auront le même préfixe) ;
- le nombre de points élémentaires décrivant la géométrie du domaine ;

- la pondération suivant  $x$ ,  $y$ , et  $z$  : ce sont des facteurs d'échelle adaptatifs ;
- le nombre de coins et leur numéro ;
- l'élévation de l'eau à l'entrée et à la sortie, la longueur de la rivière et la tolérance sur la hauteur ;
- la métrique de la zone mouillable  $m_1$ , et de la zone mouillable  $m_2$
- l'abscisse d'entrée et de sortie.

Les programmes qui, progressivement, vont être appelés au cours de cette interface, utiliseront une ou plusieurs informations contenues dans le fichier 'data'. On explicitera l'intérêt au fur et à mesure que ces données seront utilisées.

## 2.2. Utilisation du logiciel EMC2 [21]

L'étape suivante consiste à générer une première triangulation de la surface étudiée. Celle-ci va être faite en appelant le logiciel EMC2. Cependant, on voudrait généraliser le processus de l'interface de façon à pouvoir créer aussi bien des maillages réguliers et isotropes qu'anisotropes. Pour cela, on appliquera avant d'appeler EMC2, une échelle aux coordonnées des points contenues dans le fichier 'xxx' en faisant appel au programme **echellemc2**. Celui-ci créera le fichier 'xxx-E' où les points  $(x, y, z)$  sont pondérés par l'échelle spécifiée en 'data' et le fichier 'xxx-E-z' identique au précédent hormis le fait qu'on n'affiche pas la cote  $z$ . C'est ce dernier qui sera saisi par EMC2.

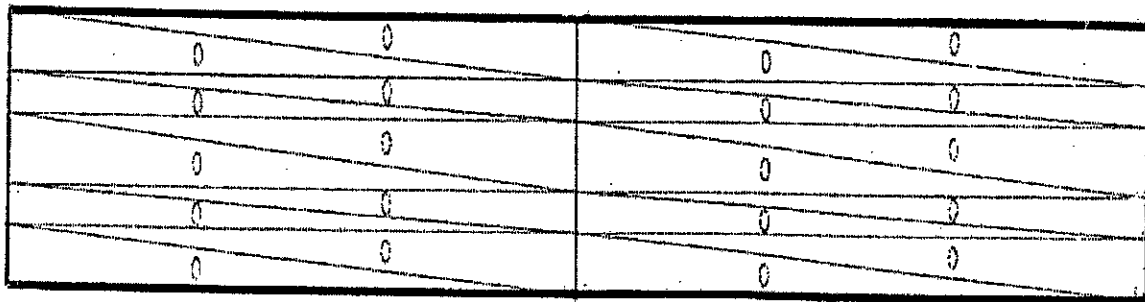


Figure IV.1. Le maillage initial généré par EMC2

EMC2 permet de construire un maillage triangulaire de nom 'xxx-E.amdba' (voir Figure V.1.). Dans notre cas, nous avons procédé de façon à ne créer aucun point supplémentaire. La raison est que, EMC2 n'étant pas un mailleur de surface 3D et ne disposant pas de fonction générique d'interpolation de la composante  $z$  ; nous voudrions garder les points de base pour pouvoir leur affecter la cote  $z$  et ainsi avec le maillage résultant, retracer la géométrie en faisant appel au logiciel de remaillage de surface 3D, YAMS décrit en annexe III.

Cependant, l'éditeur de maillage EMC2 est, comme son nom l'indique, un éditeur de maillage et de contour en 2D, or, les problèmes traités par le code FESWMS sont de nature 2.5D et on a besoin de maillage de surface courbe tridimensionnelle. C'est pourquoi, partant d'un maillage plan généré par EMC2, on affecte aux différents points la cote  $z$  : ceci sera réalisé par le programme **maillpascal** qui, partant du fichier 'xxx-E.amdba' et du fichier 'xxx-E' affecte la composante  $z$  appropriée à chaque nœud d'une part, et associe à chaque sommet une métrique spécifiée dans 'data', pour donner lieu au fichier 'xxx-E.bb' d'autre part. Ces deux fichiers, maillage initial et métrique associée vont servir d'entrée au logiciel de remaillage de surface 3D, YAMS, afin d'obtenir le maillage définitif destiné au code numérique.



### 2.3. Utilisation du logiciel YAMS

Le logiciel YAMS aura la tâche de remailler la géométrie donnée par '*xxx-E.mesh*' tout en respectant la métrique imposée dans le fichier '*xxx-E.bb*'. On appellera YAMS en lui précisant le fichier à traiter et les options voulues :

```
Yams xxx-E [-h] [-f] [-v level] [-m mégas] [...]
```

YAMS cherchera d'abord le fichier de la géométrie représentée soit par le format '*.mesh*' ou le format '*.msh2*' et celui de la métrique '*.bb*' (ce qui conditionne la taille des éléments). S'il ne trouve pas un fichier de métrique associée, il fera la triangulation suivant une métrique par défaut. Sur le plan pratique, à partir des quelques points géométriques de départ, YAMS aura pour but de retracer le domaine avec toutes les particularités ou singularités éventuelles. Donc, la première opération de YAMS consiste en un enrichissement de la surface à mailler. Ceci se fera par la ligne de commande :

```
Yams xxx-E -O 1 -msh2 -bb -m 100 [...]
```

où, l'option *-O 1* sert à l'enrichissement. On récupère dans un premier temps le fichier '*xxx-E.d.mesh*' ou {'*xxx-E.d.points*', '*xxx-E.d.faces*'}. Ce fichier de sortie aura besoin d'être retraité pour une meilleure représentation du domaine (la majorité des éléments doivent avoir une taille ou un rapport d'aspect admissible, etc.), c'est pourquoi on fait repasser le fichier de sortie par la commande :

```
Yams xxx-E.d -O 1 -msh2 -bb -m 100 [...]
```

si on veut ajouter des points, ou ;

```
Yams xxx-E.d -O -1 -msh2 -bb -m 100 [...]
```

si on veut avoir moins.

- L'option *-msh2* précise au logiciel le format du fichier de sortie ; on a choisit le format '*.msh2*' (*.points* et *.faces*) pour des raisons de simplicité par la suite.
- L'option *-m 100*, nous permet de disposer d'une plus grande marge en mémoire (plus de nœuds et d'éléments à toute fin utile).
- Plus d'autres options utilisables selon les besoins (voir annexe).

A présent, nous allons remettre l'échelle pour revenir à l'état initial en utilisant le programme **visu-yams** et cet avant de passer à la génération du maillage  $P^2$ . Ce programme va créer à partir du fichier '*xxx-E.d.points*' un fichier de sortie '*xxx.d.points*'. Le fichier '*xxx-E.d.faces*' ne subira aucune transformation mais, pour garder les mêmes notations, il sera renommé '*xxx.d.faces*'.

Un exemple de maillage traité par YAMS est donné dans la figure IV.2:

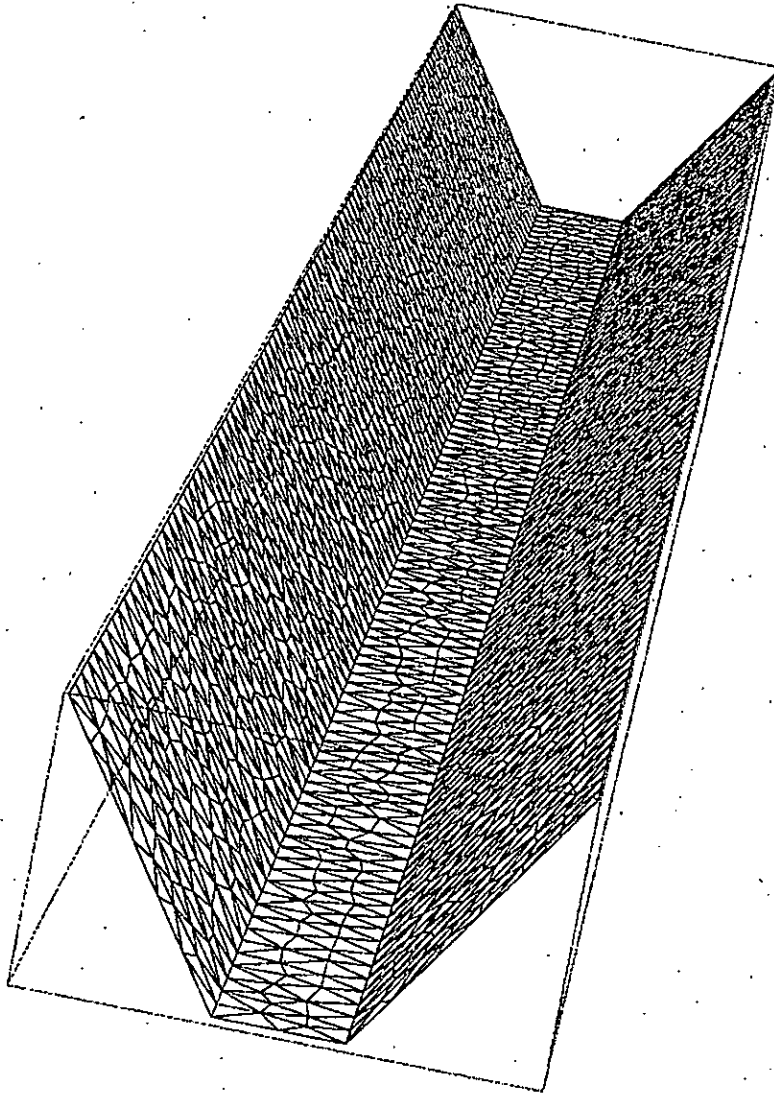


Figure IV.2 : Maillage fin généré par YAMS

En deuxième temps, il nous faut, à partir du maillage  $P^1$  générer un maillage  $P^2$  selon le format accepté par le noyau de calcul FLOMOD. On aura alors recours à quelques unes des sous-routines de la bibliothèque *MODULEF* (voir Annexe III) pour passer d'un maillage  $P^1$  à un maillage  $P^2$ .

#### 2.4. Utilisation d'utilitaires de la bibliothèque *MODULEF* [4]

La sous-routine de *MODULEF* qui crée un maillage  $P^2$  à partir d'un maillage  $P^1$  nécessite comme fichier d'entrée, un fichier de format *nopo*. Cependant, à ce stade on ne dispose que du format *.msh2*, c'est à dire *.points* et *.faces*. C'est le rôle de la sous-routine *wrnox* de *MODULEF* qui justement, à partir du format *.msh2*, crée le *.nopo*. Ainsi, *wrnox* prendra les fichiers *xxx.d.points* et *xxx.d.faces* issus de YAMS et moyennant une remise à l'échelle créera le fichier *xxx.nopo*.

Ayant le maillage  $P^1$  sous le bon format, on appellera le programme *apn3xx*. Ce programme fait appel à plusieurs sous-programmes pour répondre à une large gamme de traitements des données selon l'objectif visé et qui sont introduits en interactif lors de l'exécution de *apn3xx*. En ce qui nous concerne, le but principal derrière l'appel de ce

programme est la génération des nœuds non sommets (milieu des arêtes). Cependant, le noyau de calcul FLOMOD, utilise dans la résolution du système d'équations une technique particulière qui est la méthode frontale. Celle-ci requiert une numérotation optimale, en particulier des éléments. Toutefois, le sous-programme de renumérotation de MODULEF appelé `apn3xx` re-numérote et les nœuds et les éléments, or, et pour des raisons pratiques de visualisation sur un maillage  $P^1$ , on voudrait pouvoir re-numéroter les éléments sans toucher à la numérotation des nœuds. Ceci est possible en passant par la table de correspondance qui est écrite lors de l'exécution du sous-programme de re-numérotation sauf qu'elle ne s'affiche pas dans un fichier indépendant. C'est pourquoi, on a interagit directement sur cette subroutine de re-numérotation pour récupérer le fichier de la table de correspondance, par le biais de quoi on pourra rétablir l'ancienne numérotation des nœuds tout en gardant la nouvelle numérotation des éléments intacte.

Le programme `apn3xx` part d'un fichier type `.nopo` et crée un fichier de même type, qui contient le maillage  $P^2$  (la liste des nœuds et leurs coordonnées, les éléments de la triangulation). Nous tenons toutefois à faire remarquer qu'à ce stade :

- les nœuds  $P^2$  ont leur nouvelle numérotation, et par suite, on ne distingue plus les sommets des milieux. En utilisant la table de correspondance, on va pouvoir réordonner les nœuds de façon à avoir les nœuds  $P^1$  (les sommets) suivis des nœuds milieux, ceci offre une facilité par la suite pour le post-processing ;
- `apn3xx`, lors de la génération des nœuds  $P^2$ , définit les éléments par la connectique suivante :

élem  $S1 S2 S3 M1 M2 M3$

où,  $S$  désigne un numéro d'un nœud sommet et  $M$  celui d'un nœud milieu.

Or le fichier contenant le maillage  $P^2$  et destiné pour le code de calcul FESWMS a une connectique différente :

élem  $S1 M1 S2 M2 S3 M3$ .

Cette organisation (réordonnement des nœuds et de la connectique des éléments) sera représenté par le fichier de format `.géo` qui servira d'input pour le code de calcul FESWMS.

On créera parallèlement, le fichier du maillage  $P^1$  sur lequel on représentera la solution. Il sera appelé `xxx-P1.mesh`.

Ces deux étapes s'accompliront par le biais de la subroutine de MODULEF à laquelle on a apporté quelques modifications, `clnoxxcoresp-I6` qui, à partir de `xxx.nopo` créera les fichiers `xxx.géo` et `xxx-P1.mesh`. L'organigramme de la figure ci-devant (Figure V.3) reprend toutes les étapes du traitement de l'interface  $f$ .

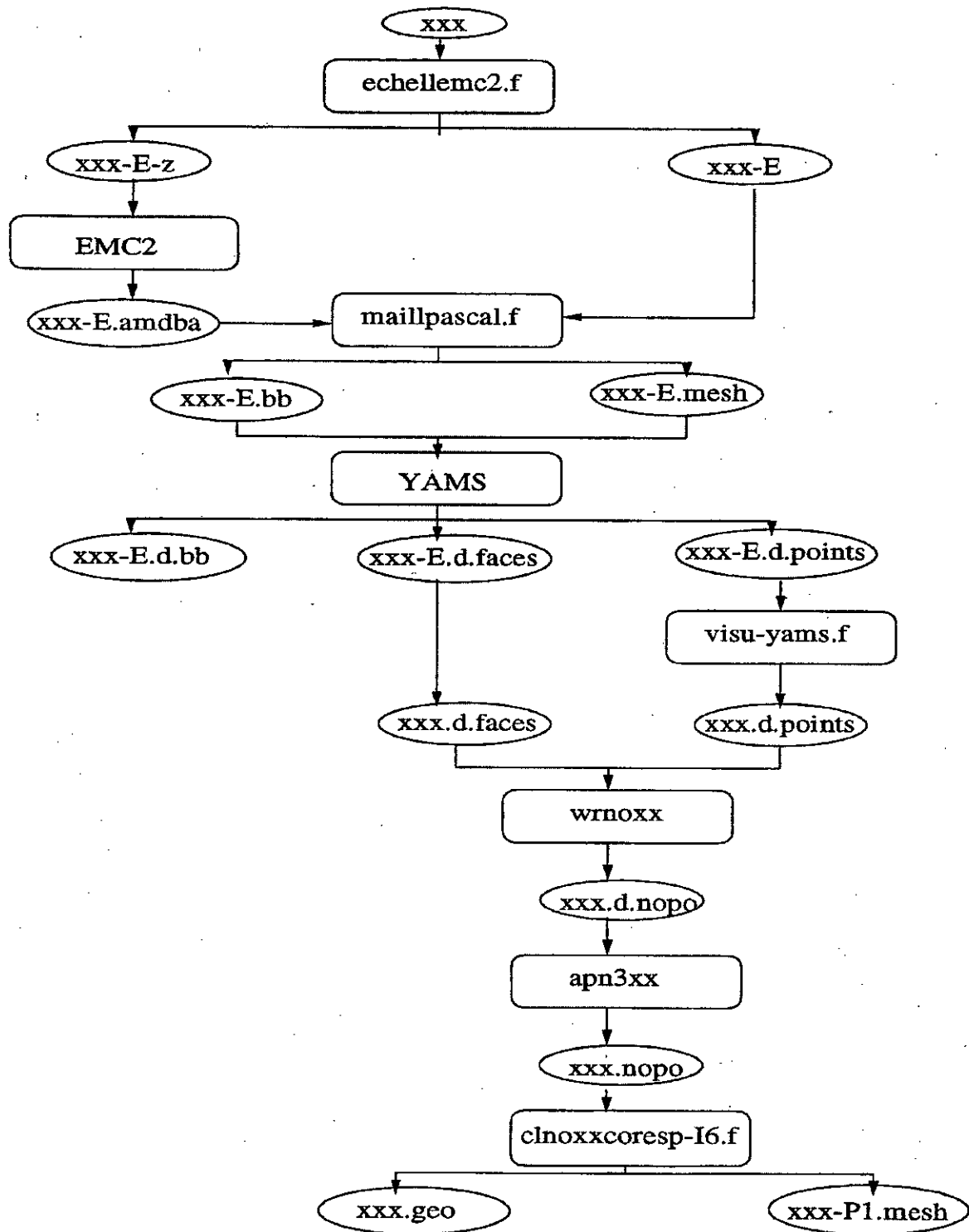


Figure V.3. Les différentes étapes de l'interface *f*

### § 3. Interface $f^{-1}$ [15], [18], [20], [23]

En sortie du noyau de calcul FLOMOD, nous récupérons la solution  $(U, V, H)$  des équations du mouvement et de continuité intégrées en hauteur dans un fichier nommé '*xxx.flw*'. L'étape précédente servait de préparation des données relatives au maillage. Nous abordons maintenant la visualisation graphique des résultats.

#### 3.1. Méthodologie en vue d'une utilisation de VISU et MEDIT [4]

Moyennant VISU ou MEDIT, deux choix sont possibles pour la représentation graphique des résultats :

- soit récupérer la solution  $U, V, H$  sous forme d'information scalaire, c'est à dire, associer l'information à chaque nœud, ceci dans un fichier *.bb*, cela permet en fait d'avoir la répartition spatiale de la solution sous divers aspects (dégradé de couleur, lignes iso valeurs, etc.) ;
- soit représenter la solution sur un maillage déformé, en particulier très utile pour  $H$ , c'est à dire, partant du maillage  $P^1$  avec les nœuds définis par les coordonnées  $(x, y, z)$  on génère les maillages  $(x, y, U)$ ,  $(x, y, V)$  et  $(x, y, H)$ .

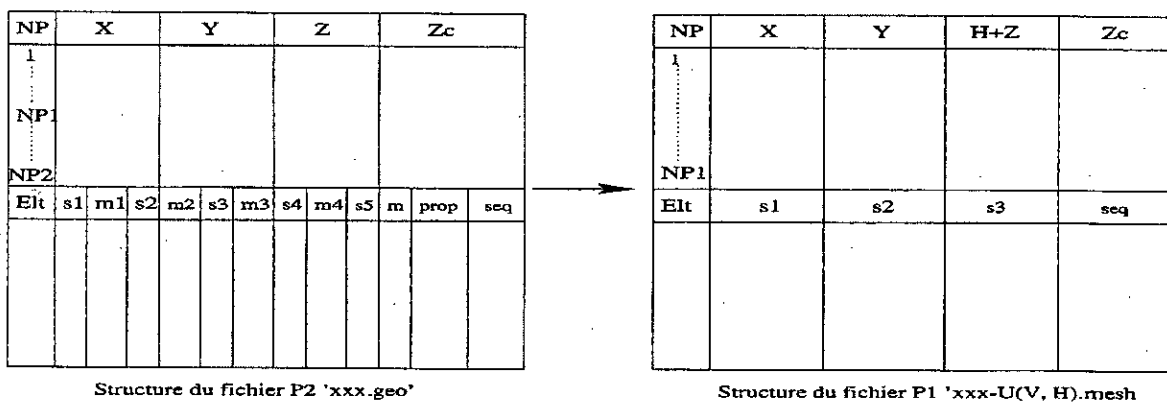


Figure IV.4 : Passage du géo au mesh

Ainsi le programme **interf-1** créera à partir des résultats contenus dans *xxx.flw* deux types de fichiers et ce pour chaque composante  $U, V$  et  $H$  : un fichier de métrique *xxx-U.bb*, *xxx-V.bb* et *xxx-H.bb* et un fichier contenant le maillage *xxx-U.mesh*, *xxx-V.mesh* et *xxx-H.mesh* de nature  $P^1$ . Pour ce faire le programme à besoin de connaître :

- le nombre de sommets (les nœuds  $P^1$ ) qui va être lu à partir du fichier *xxx.d.points* ;
- le fichier du maillage  $P^2$  *xxx.géo* ;
- le fichier résultat en sortie du code *xxx.flw*.

Comme la simulation numérique se fait sur un nombre d'intervalles en temps, le code affiche pour des pas de temps demandés, toute l'information contenue dans le fichier *xxx.flw*. Par ailleurs, le programme **interf-1** génère les fichiers de visualisation relatifs à chaque pas de temps. Ainsi il créera les fichiers *xxx.ti-U.bb*, *xxx.ti-V.bb*, *xxx.ti-H.bb* pour la solution à l'instant  $ti$ , et *xxx.ti-U.mesh*, *xxx.ti-V.mesh*, *xxx.ti-H.mesh* pour le maillage au même instant.

La figure (IV.5) ci-dessous schématise les composants de l'interface  $-f$

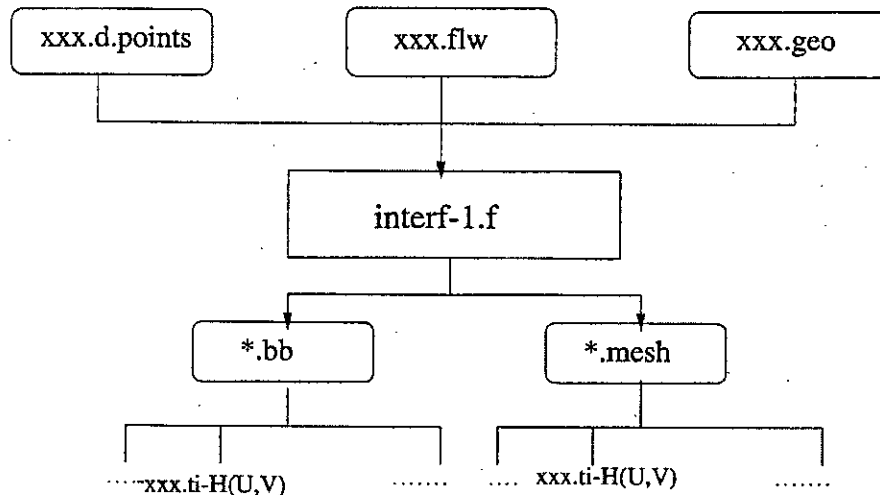


Figure IV.5 : Interface -f

Dans ce qui suit, on illustrera l'utilisation de VISU et MEDIT en utilisant l'information sur  $H$ .

### 3.1.1. Utilisation de VISU

Par VISU, on peut représenter la solution de deux manières mais tout d'abord, il faut saisir le maillage  $P^I$  sur lequel on va visualiser les résultats, il s'agit de  $xxx-PI.mesh$ .

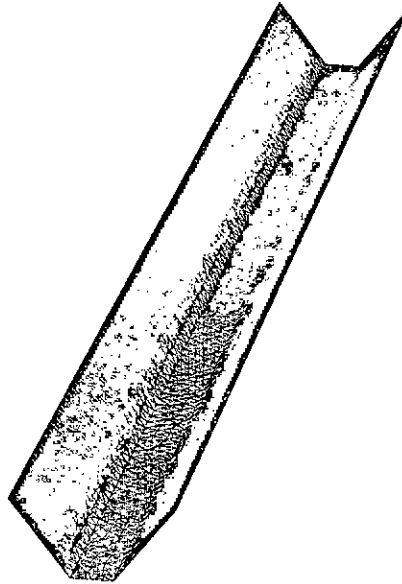
1. Soit on représente sur la géométrie (fichier  $xxx-PI.mesh$ ) la solution scalaire  $xxx.ti-H.bb$  qui retrace le niveau de la surface libre. Suivre alors les instructions :

- lancer VISU ;
- à gauche de la fenêtre ouverte, cliquer sur **lire objet** ;
- choisir le format *.mesh* puis taper le nom de fichier du maillage  $xxx-PI$  ;
- cliquer sur le format *.bb* puis saisir le nom de fichier de la métrique  $xxx.ti-H$ , cliquer sur **return**, puis sur **isovaleurs** et faire **rafraîchir fenêtre marquée** : la solution scalaire s'affiche sur le maillage (voir Figure IV.6).

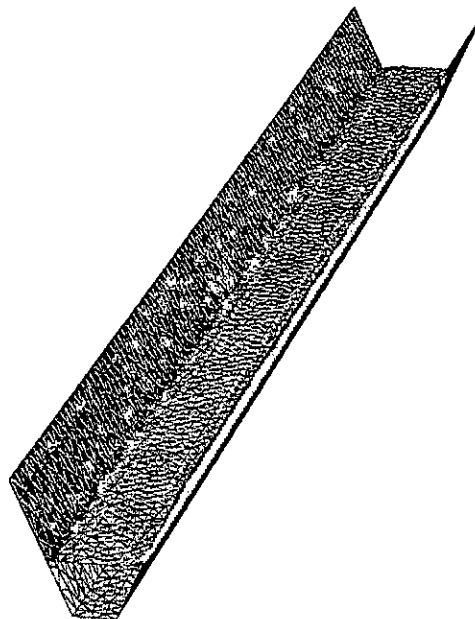
2. Ou bien superposer dans un premier temps le maillage initial (la géométrie du domaine) avec le maillage qui représente la surface de l'eau  $xxx.ti-H.mesh$ , puis ajouter la solution scalaire contenue dans  $xxx.ti-H.bb$ . Ce type de visualisation est plus expressif :

- lancer VISU ;
- à gauche de la fenêtre ouverte, cliquer sur **lire objet** ;
- choisir le format *.mesh* puis taper le nom de fichier de maillage  $xxx-PI$  ;
- cliquer sur **rafraîchir fenêtre marquée**: le maillage apparaît ;
- choisir encore le format *.mesh* puis taper le nom de fichier du maillage de la surface de l'eau  $xxx.ti-H$  ;
- cliquer sur **rafraîchir fenêtre marquée** : les deux maillages superposés apparaissent ;

- ensuite cliquer sur le format *.bb* puis saisir le nom de fichier de la métrique *xxx.ti-H*, cliquer sur **return** puis sur **isovaleurs** et faire **rafraîchir fenêtre marquée** : la solution scalaire s'affiche sur le maillage résultant (voir Figure IV.7).



**Figure IV.6. illustration de la solution scalaire sur le maillage réel**



**Figure IV.7. Illustration de la solution scalaire sur la surface de l'eau**

### 3.1.2. Utilisation de MEDIT

De même pour MEDIT, la solution peut être représentée de deux manières : la première est analogue à celle adoptée pour VISU, c'est à dire que sur la géométrie du domaine *xxx-Pl.mesh*, on représente un champ de solutions scalaires associé aux nœuds. Pour ce faire :

- donner un même préfixe aux deux fichiers, c'est à dire changer leur appellation par exemple : *xxx1.mesh* et *xxx1.bb* ;
- lancer *médit* en lui précisant comme argument le préfixe du nom des fichier.

Une autre façon de faire est d'appeler **fondre** qui comme son nom l'indique, permet de superposer deux maillages. Dans notre cas, il s'agit de *xxx-Pl.mesh* et *xxx.ti-H.bb*. Le maillage résultant sera du même format (*.mesh*). **Fondre** est une technique qui permet, en outre de superposer deux maillages, d'appliquer des transformations sur un maillage : dilatation, translation, rotation, etc.

### 3.2. Méthodologie en vue d'une utilisation de SMS [25], [26]

SMS est un environnement de maillage et de visualisation. C'est un pré et post-processeur (adapté au code FESWMS) pour la conception, l'analyse et la modélisation des écoulements des eaux de surface. Toutefois, et ne disposant que de la version '*Demo*' pour l'instant, le pré-traitement est limité à la génération de maillage sans pouvoir le sauver et de ce fait, on utilise SMS que pour la visualisation des résultats.

SMS permet de lire des données de type  $P^2$  et produit des profils et des traçages en coupe, des traçages bidimensionnels de vecteurs, des traçages couleur-ombragée de découpe, des traçages variables dans le temps, et de l'animation dynamique, ce qui permet de faciliter la compréhension et l'interprétation des solutions numériques. Son inconvénient réside dans le fait qu'il ne permet aucune visualisation 3D.

L'interface *-f* au sujet de SMS, consiste seulement en une adaptation des fichiers de données (*xxx.in*, *xxx.geo*, etc.) et de résultats (*xxx.flw*) du code FESWMS en des fichiers compatibles par leur format au module SMS (fichier de données *xxx.dat*, *xxx.net*, etc.) et de résultats (*xxx.flo*) respectivement. Ces transformations se font par l'appel au programme **Geo2net**.



## CHAPITRE V : APPLICATION SIG-ARCVIEW

### § 1. Introduction aux SIG [1], [10], [11]

Les enjeux majeurs auxquels nous devons faire face aujourd'hui (environnement, démographie, santé publique, etc.) ont tous un lien étroit avec la géographie. D'autres domaines tels que la recherche, l'étude de l'impact d'une construction, l'organisation du territoire, la gestion des réseaux, sont aussi directement concernés par la puissance des SIG pour créer des cartes, intégrer tout autre type d'information pour mieux visualiser les différents scénarii, pour mieux présenter les idées et appréhender l'étendue des solutions possibles.

Les professionnels dans leur très grande majorité sont directement concernés par les apports de la dimension géographique dans leur travail quotidien. Enfin, l'avènement des SIG a également permis un accès à l'information à un public beaucoup plus large.

Il existe plusieurs définitions d'un système d'information géographique, et si nous devons résumer cette multitude d'énonciations nous dirons : un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnel capable de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes forme d'information géographiquement référencée.

Une autre définition moins commune pourrait s'énoncer comme suit : un SIG est un système informatique qui permet de manipuler des fichiers numériques multi- sources et multi- formats dont la seule information commune est le lieu physique qu'il représente. Son but est de rationaliser l'intégration de différentes couches d'informations ( une couche étant un ensemble d'informations de nature homogène pouvant être traité et analysé de façon globale), pour des processus d'identification, d'extraction ou d'aide à la décision.

La représentation du monde réel est extrêmement complexe. Il est la combinaison d'un ensemble de phénomènes le plus souvent indépendants les uns des autres. Le monde réel est constamment en évolution et cette évolution est rapide. Or, tous les phénomènes qui connaissent un fort développement réclament aussi une planification. Le gros volume des données nécessite la gestion et l'interaction. Les SIG ont été conçus pour offrir toutes les possibilités des bases de données ( telles que les requêtes et analyse statistique) et ce, au travers d'une visualisation unique et d'analyse géographique propre aux cartes. Ces capacités spécifiques font du SIG un outil unique, accessible à un public très large et permettant la réalisation d'une très grande variété d'applications.

#### 1.1 Composants d'un SIG

Un système d'information géographique est constitué de cinq composants majeurs :

- *Matériel* : le SIG fonctionne aujourd'hui sur une large gamme d'ordinateur, des serveurs de données aux ordinateurs de bureaux connectés en réseau ou utilisés de façon autonome.
- *Logiciel* : les logiciels des SIG offrent les outils et les fonctions pour stocker, analyser et afficher toutes les informations. Les principaux composants logiciel d'un SIG sont :

- Outils de saisie et de manipulation de données géographiques ;
  - Systèmes de gestion des bases de données ;
  - Outils géographiques de requêtes, analyse et visualisation des résultats ;
  - Interface graphique utilisateur, pour une utilisation facile.
- *Données* : Elles sont certainement les composantes les plus importantes d'un SIG. Les données géographiques et les données tabulaires qui leur sont associées peuvent, être constituées en interne ou acquises auprès des producteurs de données.
  - *Utilisateurs* : Un SIG est avant tout un outil, c'est donc son utilisateur qui permet d'en exploiter la quintessence. Un SIG s'adresse à une large gamme d'utilisateurs, depuis ceux qui créent et maintiennent le système, jusqu'aux personnes utilisant dans leur travail quotidien les données géographiques.
  - *Méthodes* : la mise en œuvre et l'exploitation d'un SIG ne peut s'envisager que sous le respect de certaines règles et procédures propres à chaque organisation.

## 1.2. Principe de fonctionnement

Un SIG stocke l'information sous forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie. Ce concept, à la fois simple et puissant a prouvé son efficacité pour résoudre de nombreux problèmes concrets (Fig. VI.1.)

L'information géographique contient soit une référence géographique explicite : latitude et longitude, grille de coordonnées, etc...ou une référence implicite : adresse, code postal, nom de route, etc. Le géocodage, processus automatique, est utilisé pour transformer les références implicites en références explicites et permettre ainsi de localiser les objets et les événements sur la terre afin de les analyser.

Une autre décomposition est souvent utilisée : l'information spatiale qui décrit la localisation et la forme des objets géographiques, et l'information descriptive qui renseigne sur la nature et les caractéristiques des objets géographiques.

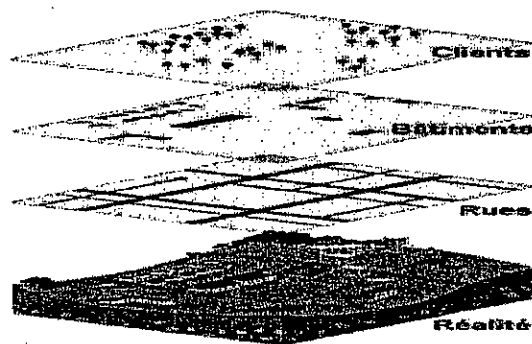


Figure V.1 : Concept de couche thématique

On distingue trois types d'entités :

- **Point** : les points définissent des localisations discrètes pour des objets géographiques trop petits pour être représentés par des lignes ou des surfaces ou qui n'ont pas de surfaces réelles comme les points cotés
- **Ligne** : les lignes représentent des objets géographiques trop étroits et étirés pour être représentés par des surfaces (cours d'eau, routes, etc.) ou des objets qui ont une longueur mais pas de surface comme les courbes de niveaux.

- **Aire** : les aires représentent la forme et la localisation des objets géographiques homogènes comme des pays, des parcelles, leurs frontières étant des lignes.

Les Systèmes d'Information Géographiques exploitent deux différents types de modèles géographiques :

- Le modèle **vecteur** : dans le modèle vecteur, les informations sont regroupées sous la forme de coordonnées  $x, y$ . Les objets de type ponctuel sont dans ce cas représentés par un simple point. Les objets linéaires (routes, fleuves...) sont eux représentés par une succession de coordonnées  $x, y$ . Les objets polygonaux (territoires géographiques, parcelles...) sont, quant à eux, représentés par une succession de coordonnées délimitant une surface fermée. Le modèle vecteur est particulièrement utilisé pour représenter des données discrètes.
- Le modèle **raster** : le modèle raster quant à lui, est constitué d'une matrice de points pouvant être différents les uns des autres. La réalité est décomposée en une grille régulière et rectangulaire organisée en lignes et en colonnes. C'est le cas des images satellite, des orthophotoplans numériques, des cartes scannées, de certains modèles numériques de terrains...L'information peut être stockée de manière numérique, alors le raster est créé automatiquement, comme il peut être saisi à l'aide d'un numériseur à plat scanner, le raster est caractérisé par la grande taille du fichier associé.

Pour gérer les différentes couches du SIG de façon simultanée, il est nécessaire de convertir les données du mode raster au mode vecteur ou vis versa.

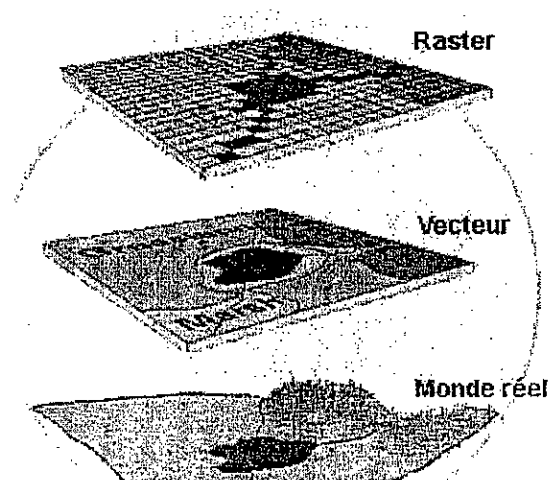


Figure V.2 : Mode Vecteur et mode Raster

### 1.3. Principales fonctions d'un SIG

Le traitement de l'information géographique au travers d'un SIG passe par les quatre étapes suivantes :

- **Saisie** : avant d'utiliser des données papier dans un SIG, il est nécessaire de les convertir dans un format informatique. Cette étape essentielle depuis le papier vers l'ordinateur digitalisation. Les SIG modernes sont capables d'automatiser complètement ces tâches pour des projets importants en utilisant la technologie des scanners. D'autres projets moins importants peuvent se contenter d'une phase de digitalisation manuelle (table à digitaliser). Aujourd'hui de nombreuses données

géographiques sont disponibles dans des formats standards lisibles par les SIG. Ces données sont disponibles auprès de producteurs de données et peuvent être directement intégrées à un SIG.

- **Manipulation** : les sources d'informations (comme celles décrites précédemment) peuvent être d'origines très diverses. Il est donc nécessaire de les harmoniser afin de pouvoir les exploiter conjointement (c'est le cas des échelles, du niveau de détail, des conventions de représentation...). Les SIG intègrent de nombreux outils permettant de manipuler toutes les données pour les rendre cohérentes et ne garder que celles qui sont essentielles au projet. Ces manipulations peuvent, suivant le cas n'être que temporaires afin de se coordonner au moment de l'affichage ou bien être permanentes pour assurer alors une cohérence définitive des différentes sources de données.
- **Gestion** : si pour de petits projets il est envisageable de stocker les informations géographiques comme de simples fichiers, il en est tout autrement quand le volume de données grandit et que le nombre d'utilisateurs de ces mêmes informations devient important. Dans ce cas il est essentiel d'utiliser un SGBD (Système de Gestion de Bases de Données) pour faciliter le stockage, l'organisation et la gestion des données. Il existe de nombreux types de SGBD, mais en Système d'Information Géographique, le plus utilisé est le SGBDR (Système de Gestion de Bases de Données Relationnel). Les données y sont représentées sous forme de tables utilisant certains champs comme lien. Cette approche qui peut paraître simpliste offre une souplesse et une flexibilité sans équivalent permettant aux SIG de s'adapter à tous les cas de figure.
- **Interrogation et analyse** : ce n'est qu'à travers cette phase que l'utilisateur pourra générer de nouvelles informations. Résoudre des problèmes par l'exécution de toutes sortes de requêtes telles que la sélection d'entités sur une carte pour les identifier, la recherche d'emplacements répondant à des critères de sélection ou l'analyse des relations spatiales entre différents phénomènes pour savoir comment ils s'influencent mutuellement.

Si les Systèmes d'Information Géographique semblent proches d'autres technologies telles que la CAO ( Conception Assistée par Ordinateur) ou le traitement d'image et la gestion de bases de données, ils demeurent les seuls outils adaptés à la visualisation et l'analyse des données géographiques.

## § 2. Présentation de ArcView [1], [10], [11]

ArcView est un puissant SIG, d'utilisation très simple. Avec ArcView, on peut visualiser, explorer, interroger et analyser spatialement les données et on peut consulter simultanément la 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 Environmental Systems Research Institute ESRI, qui a développé aussi Arc/Info, le principal logiciel de systèmes d'information géographiques.

Il n'est pas nécessaire de savoir comment créer des données géographiques pour pouvoir utiliser ArcView. Il est fourni avec une série d'échantillons de données prêtes à l'emploi. En outre, si l'on dispose de données dans un format arc/Info, on peut accéder directement à toutes ces ressources à partir de ArcView, ceci pour les différentes formes de données, qu'il s'agisse de couverture de vecteurs, de bibliothèques de cartes, de grilles ou d'images.

## 2.1. Eléments constitutifs de ArcView

ArcView peut être utilisé par quiconque voulant travailler sur des données spatiales. Une des caractéristiques principales de ArcView est la simplicité avec laquelle il est possible de charger des données tabulaires, tels que des fichiers dBASE ou des données provenant de serveurs de bases de données (Oracle, Access, Sybase...) pour afficher, interroger, récapituler et organiser ces données géographiquement. On peut accéder à ces bases de données par l'intermédiaire des instructions *SQL*, on chargera facilement les tables de la base de données Access directement à partir de ArcView, comme on peut les transférer à l'aide d'un script écrit dans Avenue. Les différentes entités utilisables dans ArcView sont :

- **Vues** : avec ArcView, il est possible de travailler avec des données géographiques sur des cartes interactives appelées vues. Chaque vue contient une *table de matière*, qui simplifie la compréhension et la gestion des éléments affichés. Une carte se compose de plusieurs couches d'informations géographiques. Chaque couche est un ensemble d'entités géographiques, telles que les rivières, lacs, pays, villes..., on les appelle dans ArcView des *thèmes*. Dans la vue, on peut faire un zoom sur la carte, étiqueter la vue, identifier simultanément des entités sur la carte par l'affichage des attributs de ces entités dans une boîte de dialogue, en cliquant sur la souris au point où l'on veut connaître l'information associée sur une table d'identification.
- **Tables** : avec les données tabulaires, l'exploitation en est facilitée en traçant des diagrammes de différents styles suivant le type de données à visualiser. Cliquer sur des entités sur la vue dans une vue et les enregistrements correspondant dans la *table attributaire* sont mis en valeur, affichant ainsi leurs attributs. En sélectionnant des enregistrements dans la table, les entités correspondantes sont mises en valeur dans la vue par une couleur différente pour qu'elles soient visibles dans la vue. Les tables de ArcView possèdent également une gamme complète d'entités permettant d'obtenir des statistiques récapitulatives, de trier ou d'interroger.
- **Diagrammes** : les diagrammes peuvent représenter de manière attrayante et facile à comprendre des informations provenant de tableaux de chiffres complexes, ils sont une fonction importante et puissante dans ArcView, car ils permettent de mieux documenter les informations représentées sur une carte. Ils peuvent fournir des renseignements complémentaires sur les entités géographiques de la carte ou illustrer les mêmes données sous une forme différente. Ils sont associés par des liens dynamiques aux vues et aux tables ArcView. Il suffit de cliquer sur des entités d'une vue pour les ajouter au diagramme. ArcView permet de travailler simultanément sur des représentations géographiques, tabulaires et en diagrammes de vos données.
- **Mises en page** : avec des données présentées sur une vue, ayant fait le choix des symboles à utiliser et précisé toutes les informations nécessaires, il ne reste plus qu'à imprimer le document avec un titre, une barre d'échelle, une légende, une flèche d'orientation et quelques commentaires : on dispose alors d'un document complet. Les mises en page ArcView permettent de créer des cartes en couleurs de grande qualité en organisant à l'écran les divers éléments graphiques de la façon souhaitée. On obtient des résultats excellents sur un grand nombre d'imprimantes et de traceurs. Les mises en page présentent le grand avantage d'avoir un lien direct avec les données qu'elles représentent.

Lorsqu'on imprime une mise en page, les modifications apportées aux données sont automatiquement intégrées. On peut donc être certain que la carte sera mise à

jour. On peut placer plusieurs vues dans une même mise en page, accompagnées de diagrammes et de tables appartenant au projet, on peut créer des représentations standard par le biais de scripts écrits sous Avenue.

- **Scripts** : les scripts ArcView sont des macros écrites dans Avenue, le langage de programmation et l'environnement de développement de ArcView. Avenue permet de personnaliser presque tous les aspects de ArcView, de l'ajout d'un bouton pour exécuter le script, à la création de toute une application dans l'interface utilisateur ArcView.
- **Projets** : pour plus de commodité, tous les éléments d'une session ArcView : vues, tables, diagrammes, mises en page et scripts sont stockés dans un même fichier appelé *projet*. La fenêtre du projet ArcView affiche l'index du projet et facilite la gestion globale de votre travail.

## 2.2. Présentation du langage de développement Avenue

Avenue est le langage de programmation et l'environnement de développement de ArcView. Il est totalement intégré à ArcView et le travail pourra donc s'exécuter sur toutes les plates-formes pour lesquelles ArcView est disponible. Il peut servir à de nombreuses utilisations : personnaliser la façon de travailler avec ArcView, demander à ArcView d'effectuer une tâche spécifique que nous devons accomplir. Enfin, nous pouvons développer une application complète fonctionnant avec l'interface utilisateur de ArcView.

ArcView fournit tous les outils de personnalisation et un environnement de langages faciles à utiliser, de sorte que nous pouvons travailler avec Avenue et juger immédiatement des résultats. On peut créer l'interface utilisateur graphique dont on a besoin, établir des propriétés initiales pour les commandes graphiques dont se servira l'utilisateur, définir avec précision l'effet et l'apparence de ces commandes et écrire le code Avenue qui répond aux actions de l'interface qu'on veut créer. En outre, on peut lier les scripts écrits sous Avenue à des événements tels que l'ouverture ou la fermeture d'un projet.

Avenue est un langage orienté objet. Comme dans tous les systèmes orientés objet, le plus important dans Avenue est l'identification des objets, puis l'envoi de messages sous forme de requêtes à ces objets. On peut considérer un objet comme un ensemble étroitement imbriqué de données/fonctionnalités. Cette méthode peut être opposée aux pratiques de programmation procédurale dans lesquelles le langage met l'accent sur la fonction (procédure). Dans Avenue, au lieu d'appeler explicitement des fonctions à l'aide d'arguments, on envoie un message à un objet. Lorsque l'objet reçoit le message, il effectue une action. Les objets ArcView appartiennent à une hiérarchie de classes organisées en catégories fonctionnelles associées à tous les aspects de l'application.

Les instructions de Avenue permettent d'organiser et de structurer quand et comment sont faits les messages. Les messages dans Avenue correspondent aux traditionnels appels de fonctions. A chaque appel de fonction correspond une et une seule action, tandis qu'un message est susceptible de déclencher une méthode parmi plusieurs. Un message spécifie ce qu'une instance d'une classe donnée va faire, et une méthode indique comment. C'est pourquoi la programmation dans Avenue est beaucoup plus une rédaction de messages à des objets que l'appel de fonctions. En envoyant un message à un objet, on active une méthode appropriée à la classe dont l'objet est une instance. Dans Avenue, un objet répond toujours à un message en retournant un objet, dans certains cas, le message crée un nouvel objet et dans d'autres, le message original retourne un objet existant.

Dans les langages procéduraux, l'écriture d'un code consiste à établir des routines appelant d'autres routines. L'état du programme est entretenu par des variables (types ou structures de base de portée globale ou locale) et ces routines opèrent sur l'état de ces variables. Dans Avenue, l'état du système est entretenu dans les objets mis en instance. [2], [11], [12]

### § 3. Interface utilisateur- ArcView [1], [2], [17], [20], [22]

Dans une première approche, les solutions proposées dans le cadre de ce travail, consistent à exploiter les résultats via la plate-forme ArcView par des différents aspects de la visualisation offerts par ArcView : couches de thèmes, tables attributaires, courbes temporelles, courbes spatiales (distribution d'une grandeur suivant une ligne d'exploitation quelconque). Par l'interpolation des résultats que nous expliciterons par la suite, nous pourrons tracer des coupes transversales au canal, tracer la ligne d'eau suivant sa longueur, connaître les variations temporelles de toutes les grandeurs sur un point quelconque du maillage etc.

D'autres logiciels de visualisation ont été intégrés à l'interface ArcView : VISU, MEDIT et SMS afin d'avoir une information complète et exhaustive sur chaque point du domaine étudié. Ceci ne diminue en rien la puissance de ArcView devant ces logiciels pourtant très performants. En effet, ces derniers offrent des possibilités de visualisation très élaborées, néanmoins, l'information est traitée de façon globale, contrairement au SIG qui, en plus d'une visualisation d'ensemble, extrait l'information locale de façon interactive ce qui aide mieux à l'interprétation et à la prise de décision.

On appelle ArcView depuis l'interface de l'Application Mère, la fenêtre s'affiche à l'utilisateur (figure V.3.). C'est par le biais de cette interface que l'utilisateur pourra lancer une simulation, visualiser ses résultats, appeler les logiciels de maillage et d'exploitation, charger ou importer toutes les données à partir ou vers la base de données.

Nous allons traiter dans cette partie les différentes interfaces et expliquer le déroulement de toutes les étapes dans un ordre chronologique, rendant ainsi la compréhension plus facile.

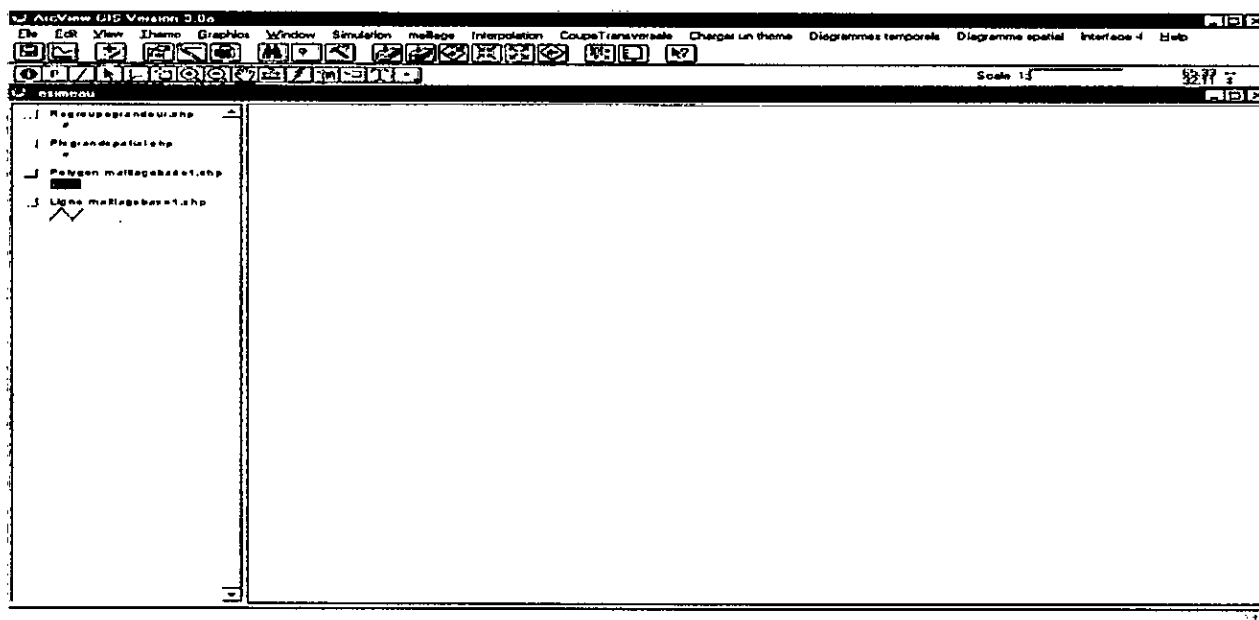


Figure V.3 : Interface utilisateur- ArcView

### 3.1. Lancement de la simulation

L'utilisateur peut accéder à la simulation numérique à partir de l'interface utilisateur ArcView, par un menu déroulant **Simulation**. Auparavant, l'interface *f* nous servait de pré-traitement pour la génération du maillage de calcul. En sortie, nous récupérons un maillage type  $P^2$  de format \*.geo. Initialement c'est le format qui servait d'entrée au module de calcul FLOMOD sous UNIX. Pour notre application nous avons utilisé une version tournant sous MS-DOS qui nécessite quelques modifications du format du \*.geo en format compatible \*.net. Ceci est possible en cliquant sur **geo/net** du menu principal. Les données hydrauliques ainsi que tous les paramètres numériques de la simulation sont contrôlés par un fichier de format \*.dat. Ayant le maillage sous le bon format, nous pourrons alors lancer le code numérique en cliquant sur **Executer\_FESWMS** se trouvant dans le même menu. Une fenêtre DOS apparaît à l'utilisateur lui montrant que le code est en train de s'exécuter.

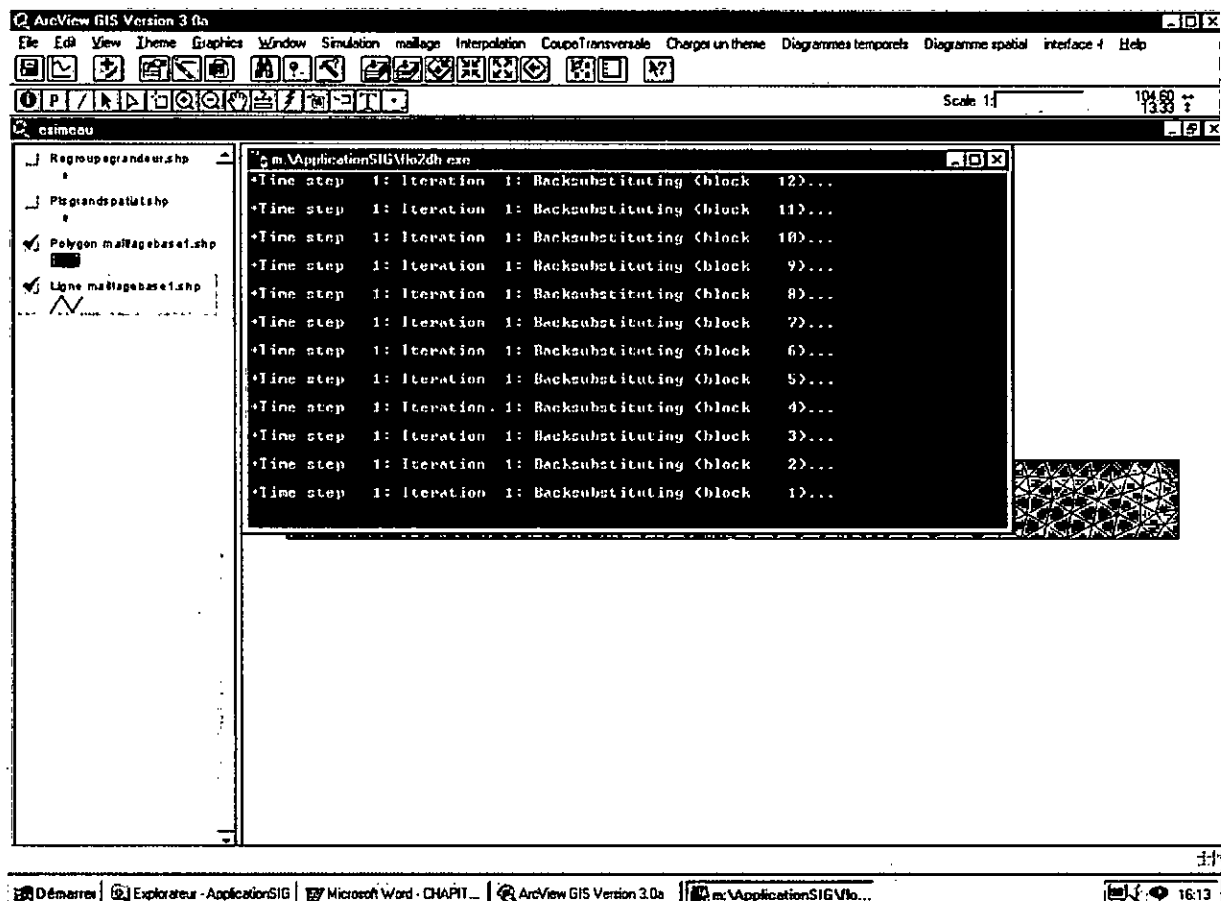


Figure V.4 : Lancement de la simulation

### 3.2. Création du maillage d'exploitation

Nous avons montré au chapitre IV, qu'une bonne utilisation de la méthode des éléments finis requiert des maillages très lourds. Aussi, pour une manipulation raisonnable des données qui lui sont associées, nous avons opté pour l'idée d'un maillage de visualisation de taille beaucoup moins importante, et rendant la manipulation plus souple.

Ayant les données des points frontières, on commencera par lancer EMC2 et saisir le nom du fichier nommé qui contient les coordonnées ( $x, y$ ) des points frontières. On construira le contour constitué de segments, puis en commutant vers le mode *prep* on discrétise la frontière en spécifiant pour chaque segment le nombre d'intervalles voulus. La dernière étape consiste à générer le maillage en commutant vers le mode *edit* et faire rentrer les quatre

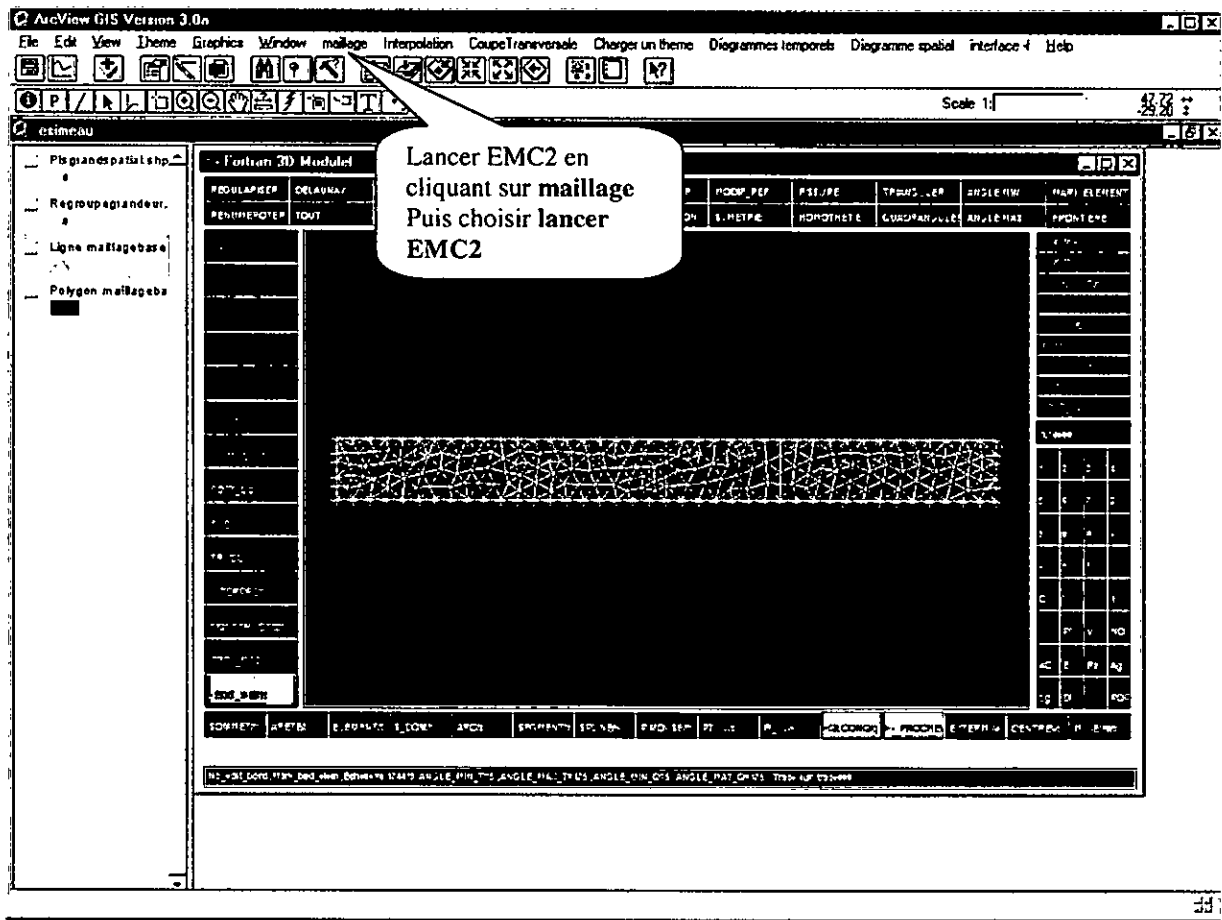


paramètres par défaut du maillage (voir annexe III). Le maillage obtenu aura l'aspect montré sur la figure V.5.

Il ne reste plus qu'à sauver le maillage sous un profil *amdba* ( pour les formats des maillages EMC2, voir l'annexe III, pour plus de détails), et lui donner un nom.

Il nous faut maintenant stocker les données de ce maillage dans la base de données. Ceci est possible en cliquant sur le même menu déroulant **maillage** et choisir **enregistrer maillexp**. Une connexion SQL s'établit alors entre ArcView et le SGBD Access, les données seront enregistrées dans deux tables :

- **Maillagebase1** : elle contient les numéros des éléments et leur connectivité, ainsi qu'un numéro de référence ;
- **Maillagebase2** : elle contient les numéros des nœuds, leurs coordonnées (x, y) et un numéro de référence pour l'introduction des conditions aux limites.



**Figure V.5 : Maillage d'exploitation généré par EMC2**

Il est désormais possible de visualiser le maillage d'exploitation sous ArcView (figure V.6). Le but n'étant pas de le substituer à EMC2 mais, l'intérêt est d'avoir une couche sur quoi d'autres couches thématiques viendront superposer pour des processus d'identification, de sélection, d'extraction, etc. Pour ce faire, choisir **visualiser maillexp** dans le menu **maillage**, un script Avenue s'exécute et aura pour tâche de lire les enregistrements des tables **maillagebase1** et **maillagebase2** et de les transformer en deux thèmes : *ligne* et *polygone*. Nous ne disposons pas encore des résultats interpolés sur le maillage d'exploitation, c'est pourquoi, nous n'avons aucun intérêt à charger dès à présent le thème *point*.

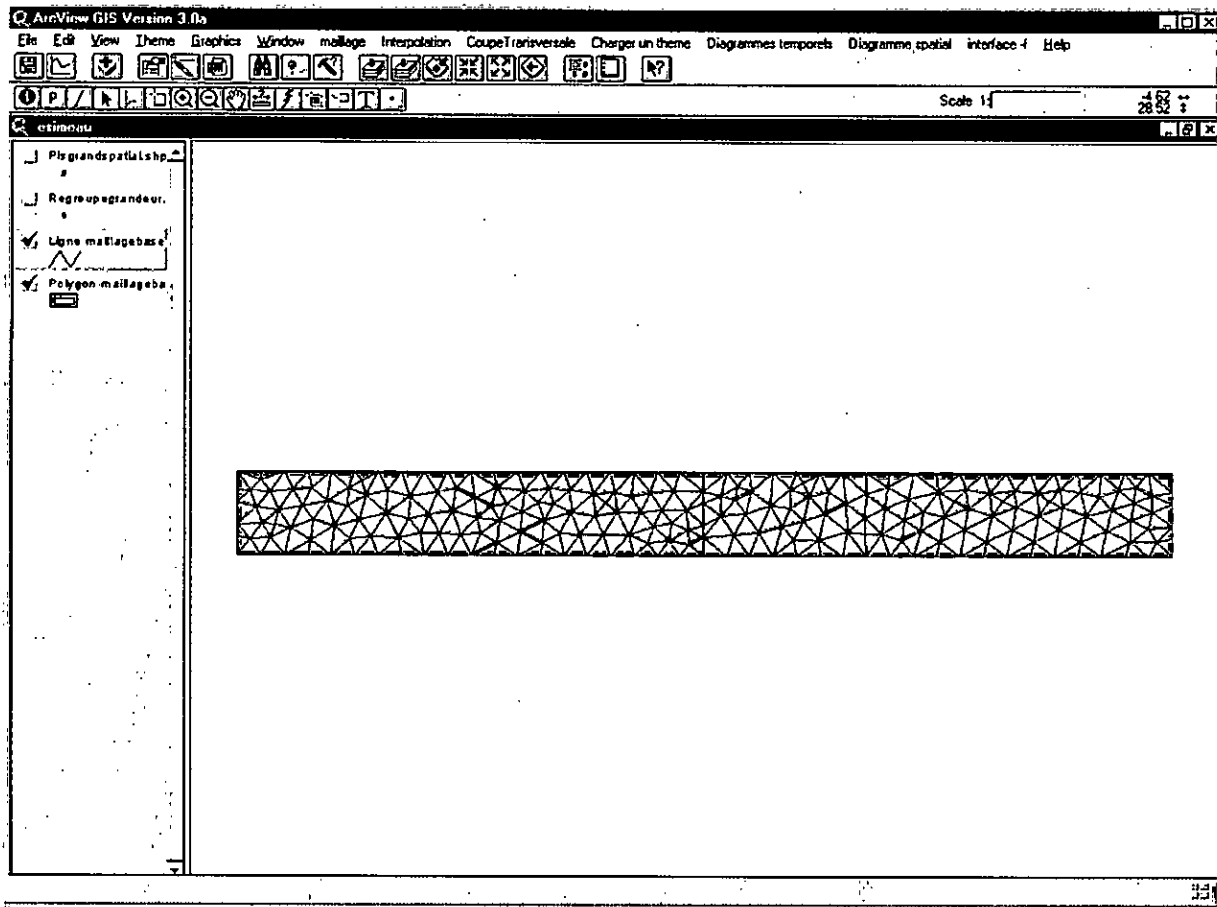


Figure V.6 : Le maillage d'exploitation vu par ArcView

### 3.3. Interpolation des résultats

L'interpolation des résultats du code numérique revêt deux aspects :

- Une première approche consiste à interpoler les résultats sur le maillage d'exploitation, cette façon de faire va nous permettre de disposer d'une distribution spatiale et temporelle des grandeurs à visualiser. Nous pourrions alors les exploiter par tous les outils mis en œuvre à cette fin : identification, courbes temporelles simples ou multiples, etc.
- Une autre façon de faire, à caractère local, consiste à choisir un point quelconque du domaine, ceci déclenchera le code d'interpolation sur ce point d'intérêt seulement, et un script Avenue retournera les diagrammes illustrant les variations dans le temps des grandeurs à visualiser. Cette option donne plus de liberté à l'utilisateur à choisir un point d'exploitation qui n'est pas forcément un nœud du maillage d'exploitation.

Mais avant de monter les résultats de visualisations, commençons par expliciter la démarche suivie pour faire l'interpolation.

Remarquons d'abord, que du fait que le maillage de calcul est beaucoup plus fin que celui de l'exploitation, un seul nœud de ce dernier n'est contenu que par un seul élément (triangle) du maillage fin. Ceci a pour conséquence d'imbriquer deux boucles :

- Une première boucle faisant défiler tous les nœuds du maillage d'exploitation ;

- Pour chaque nœud du maillage d'exploitation parcourir la boucle des éléments du maillage fin. Un test passera le contrôle à l'un des conteurs selon que le nœud est à l'intérieur ou à l'extérieur de l'élément. L'algorithme est représenté sur la figure V.7 ci-dessous.

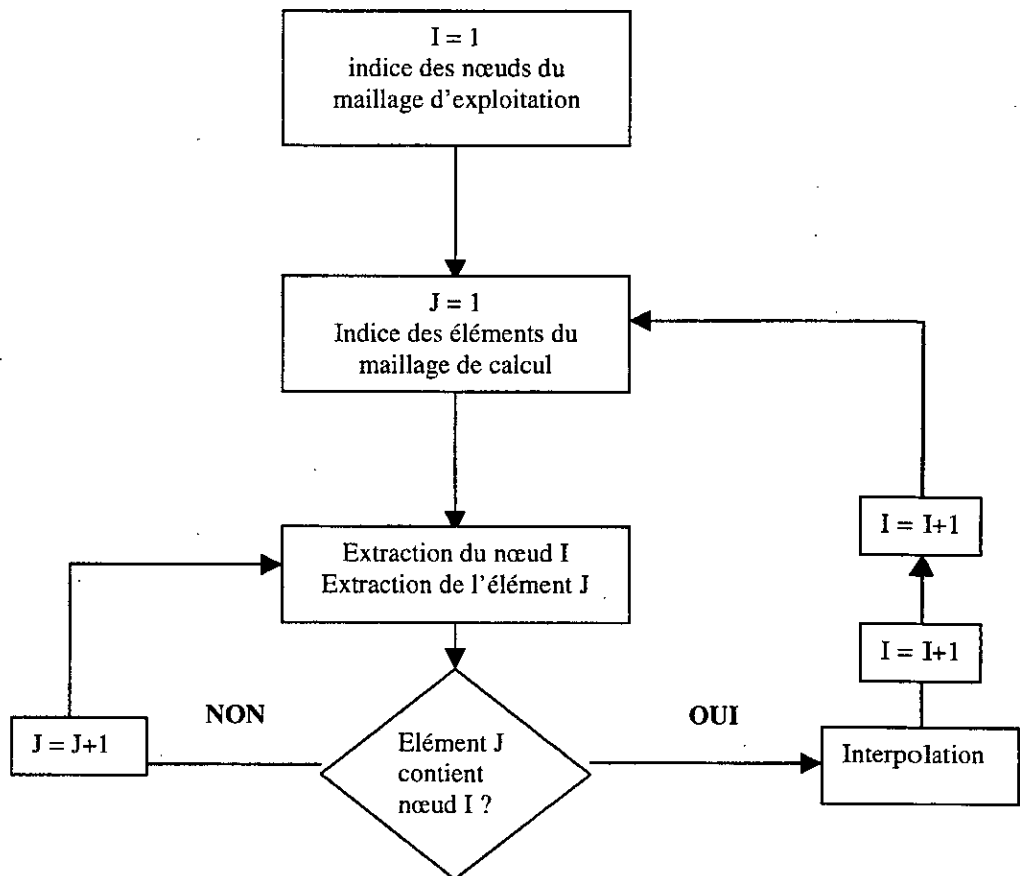


Figure V.7 : Diagramme de l'interpolation

Une condition nécessaire et suffisante pour qu'un point soit à l'intérieur d'un triangle est de vérifier que les produits vectoriels formés des couples de vecteurs  $(V_{S_i,P}, V_{S_i,S_{i+1}})$  soient positifs ou nuls.  $V_{S_i,P}$  est le vecteur ayant pour extrémités le sommet  $S_i$  et le point d'interpolation  $P$ , et  $V_{S_i,S_{i+1}}$  est le vecteur d'extrémités les sommets  $S_i$  et  $S_{i+1}$ . (figure V.8).

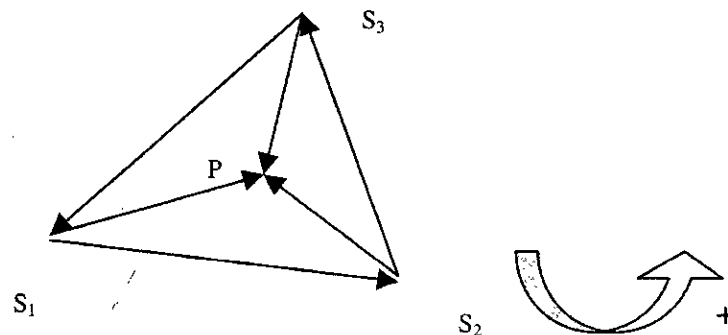


Figure V.8 : Sens de parcours choisi pour le produit vectoriel

Cependant, comme déjà dit plus tôt, les éléments utilisés sont de type  $P^2$ , c'est à dire qu'en outre des nœuds sommets, nous avons les nœuds milieux, qui rendrait l'interpolation

linéaire plus ardue. Nous avons donc opté pour une interpolation quadratique. Nous rappelons brièvement les fonctions d'interpolation sur un élément de référence utilisé dans ce cas.

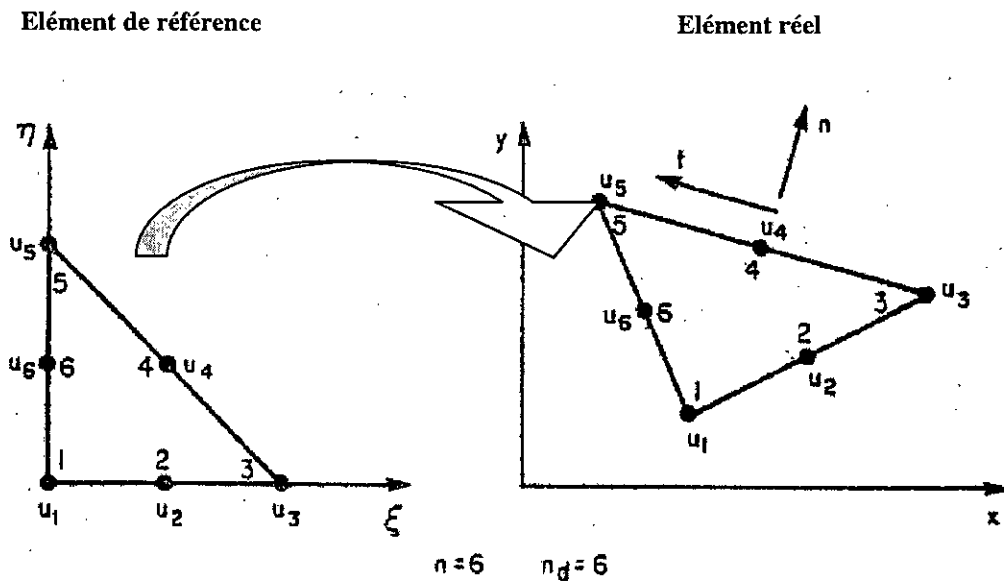


Figure V.9 : Elément quadratique à six nœuds

Dans un système d'axes  $(\xi, \eta)$  les fonctions d'interpolation  $N$  s'écrivent :

$$N_1 = -\lambda(1 - 2\lambda) \tag{V.1}$$

$$N_2 = 4\xi\lambda \tag{V.2}$$

$$N_3 = -\xi(1 - 2\xi) \tag{V.3}$$

$$N_4 = 4\xi\eta \tag{V.4}$$

$$N_5 = -\eta(1 - 2\eta) \tag{V.5}$$

$$N_6 = 4\eta\lambda \tag{V.6}$$

avec,

$$\lambda = 1 - \xi - \eta \tag{V.7}$$

Chaque point  $P(x, y)$  de la configuration réelle sera transformé en un point  $Q(\xi, \eta)$  de la configuration de référence, ses coordonnées seront exprimées de façon unique, en fonction des coordonnées des points sommet du triangle par les expressions :

$$\xi = ((x - x_1)(y_3 - y_1) - (y - y_1)(x_3 - x_1)) / \Delta \tag{V.8.a}$$

$$\eta = ((x_2 - x_1)(y - y_1) - (y_2 - y_1)(x - x_1)) / \Delta \tag{V.8.b}$$

avec,

$$\Delta = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) \tag{V.9}$$

où, l'indice sur les coordonnées indique le numéro des nœuds sommets.

Une grandeur  $G$  qu'on souhaite interpoler au point  $P$  en fonction de ses valeurs déjà connues aux six nœuds s'écrira alors :

$$G(P) = N_1G(P_1) + N_2G(P_2) + N_3G(P_3) + N_4G(P_4) + N_5G(P_5) + N_6G(P_6) \tag{V.10}$$

L'indice sur  $P$  indique le numéro du point (figure V.9).

Pour lancer l'interpolation depuis l'interface SIG, cliquer sur le menu déroulant **Interpolation**, puis choisir **sur un maillage**, une fenêtre DOS apparaît, demandant à l'utilisateur de donner le nombre d'intervalles (introduire le nombre d'itération en temps, voir figure V.10.).

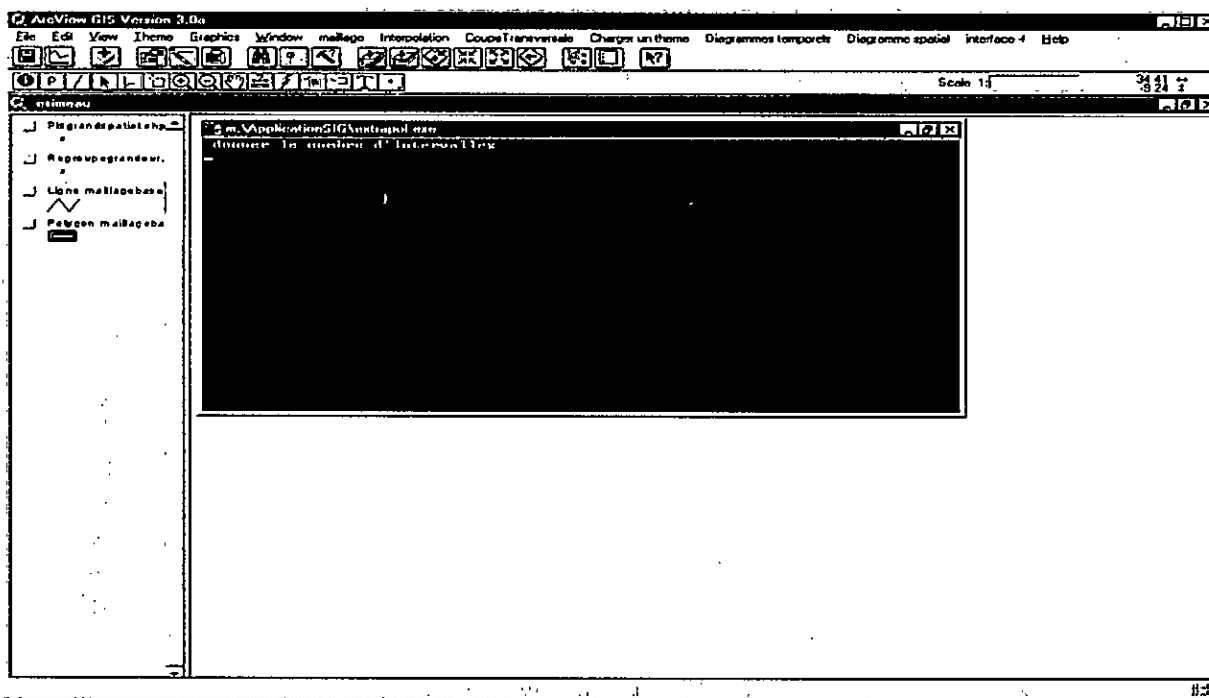


Figure V.10 L'interpolation des résultats

Une fois l'interpolation achevée, on enregistre ses résultats dans la base de données dans la table **Résultats numériques**. Chaque enregistrement contient le numéro du nœud, ses coordonnées, puis les résultats interpolés sur le nombre d'itérations en temps (figure V.11.).

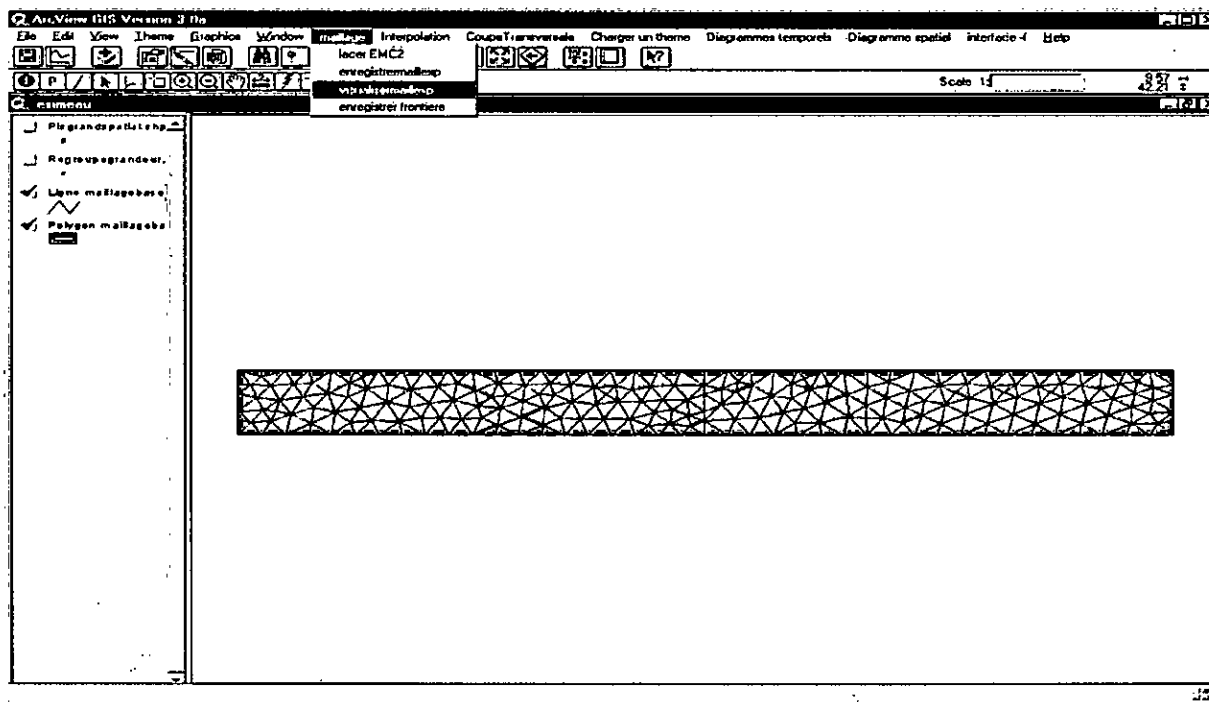


Figure V.11 : Enregistrement des résultats dans la base de données

#### 4.4. Visualisation des résultats

La structure des courbes dans ArcView n'offre pas la possibilité pour une représentation simple et interactive, par contre elle permet une liaison dynamique du diagramme avec les deux autres composants de ArcView : la vue et les tables attributaires des thèmes de la vue, ce dernier avantage facilite beaucoup plus la gestion des données stockées dans la base de données. Il suffit de créer un diagramme correspondant à une grandeur physique donnée pour une entité géométrique sélectionnée dans le domaine, on aura directement la courbe associée sur le diagramme. Signalons aussi, la difficulté à représenter des courbes associées à plusieurs grandeurs sur le même diagramme du fait que, chaque diagramme est associé un seul enregistrement de la table, on ne peut pas associer les enregistrements de plusieurs tables sur le même diagramme. Pour cette dernière application, nous étions obligés de passer par script Avenue qui puissent regrouper en un seul enregistrement les différentes grandeurs à visualiser.

##### 3.4.1. Courbes temporelles simples

En disposant d'une table attributaire d'un thème de la vue, on peut faire une gestion de ces données pour la création d'une courbe simple (à une seule grandeur), d'abord, pour l'axe des abscisses on doit spécifier les champs qui doivent figurer sur l'axe temporel. Pour étiqueter la courbe correspondante à un point donné, on doit choisir un champ à utiliser pour étiqueter les données dans la légende du diagramme. Si par exemple, les enregistrements représentent les données de la vitesse sur les points, on doit choisir le champ contenant le numéro des points comme champs d'étiquette. Ainsi, on peut tracer la même grandeur en plusieurs enregistrements (points) de la table. Cette approche est la même pour l'exploitation par des courbes multiples (à plusieurs grandeurs).

Le processus d'association du lieu géographique à l'information à traiter s'appelle *chargement du thème*. Une information ne peut être exploitable que si l'on crée un thème qui lui est associé. Dans ArcView, un thème est un fichier de format \*.shp.

Pour charger un thème, cliquer sur le menu déroulant « **Charger un thème** », puis choisir « **Simple temporel** » pour visualiser une seule grandeur. Deux boîtes de dialogue Avenue apparaissent pour saisir le nombre d'itération en temps et la grandeur choisie. Le script charge ensuite la table attributaire et affiche *point* qui lui est associé. L'étape suivante consiste à tracer le diagramme de la variation temporelle de la grandeur, commencer par activer le thème à exploiter sur la vue, puis cliquer sur le menu « **Diagrammes temporels** », choisir enfin « **simple sur un point du maillage** », le diagramme s'affiche à l'écran. L'utilisateur pourra alors afficher toutes les fenêtres en mosaïque : table attributaire, vue, et diagramme. Ceci lui permettra de choisir à sa guise un point sur la vue (un point du maillage), provoquant la mise à jour du diagramme et la mise en valeur de l'enregistrement sur la table.

Il est bien sûr possible de tracer sur un même diagramme les courbes temporelles associées à plusieurs points choisis dans la vue. Activer l'outil de sélection puis pointer sur plusieurs points du maillage en gardant la touche **Shift** enfoncée. A chaque fois qu'un point est sélectionné, une nouvelle courbe est ajoutée au diagramme avec une couleur différente et une légende qui porte le nom de la grandeur et le numéro du point sélectionné.

La figure VI.12 ci-après montre toutes les fenêtres arrangées en mosaïque pour l'exploitation de la grandeur vitesse (sa composante suivant *x*).

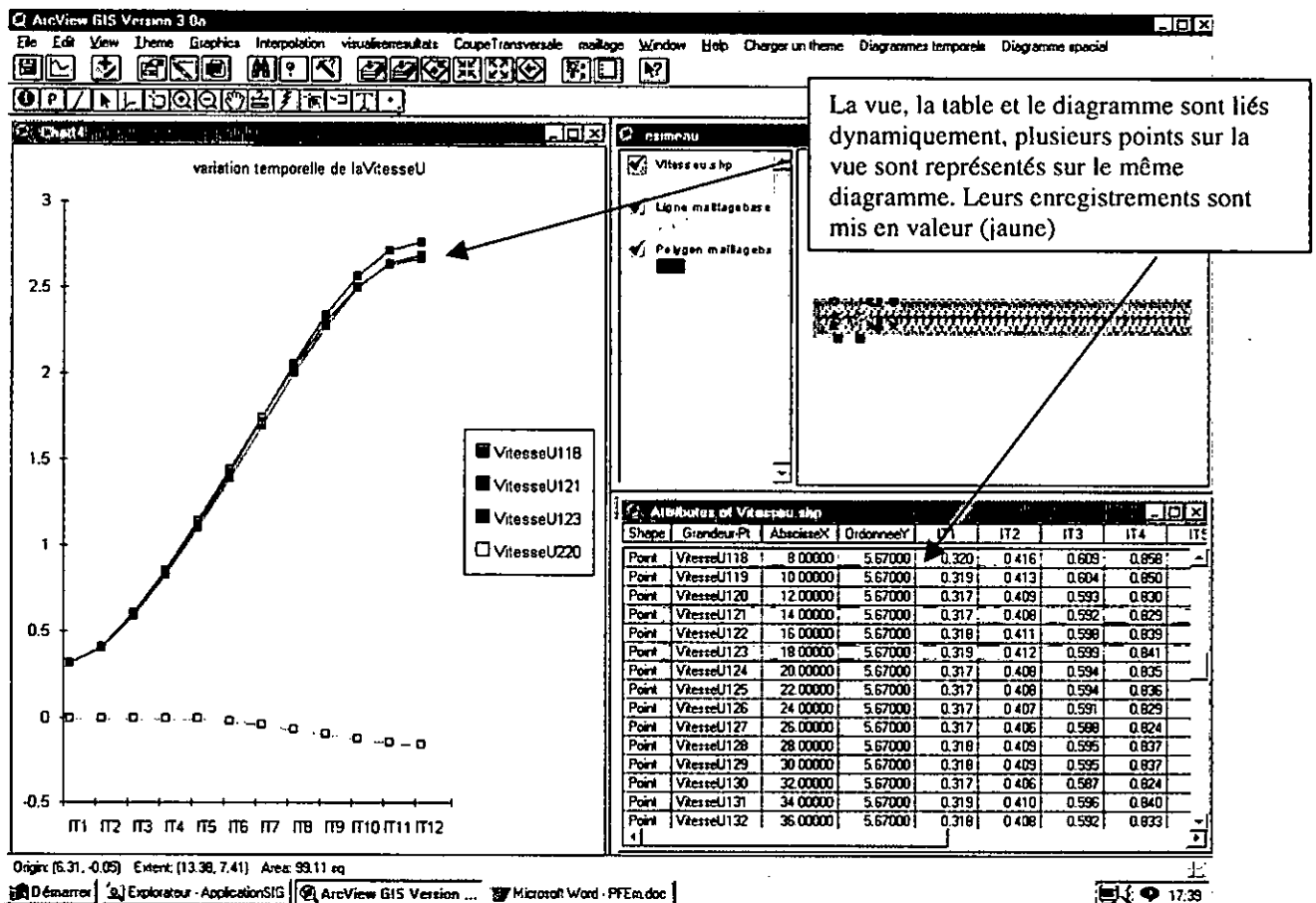


Figure V.12 : Courbe temporelle simple

### 3.4.2. Courbes temporelles multiples

L'exploitation des résultats de plusieurs grandeurs physiques pour une entité géométrique donnée sur un même diagramme (utile pour les grandeurs de même nature telles que les composantes horizontales de la vitesse) exige la création d'un nouveau thème regroupant les différents thèmes des grandeurs physiques associées, puisque chaque diagramme est couplé avec une seule table attributaire d'un thème. Vu la structure avec laquelle ArcView peut générer ces courbes, et afin de résoudre le problème d'association de grandeurs sur le même diagramme, on est amené à créer un nouveau thème contenant toutes ces grandeurs et par suite les regrouper dans une même table de thème. Par la création de cette table, on peut tracer chaque grandeur séparément comme on peut les associer sur le même diagramme à condition d'associer toutes les grandeurs de la table, sinon on doit sélectionner les grandeurs auxquelles on s'intéresse à partir de leur tables attributaires.

Pour résoudre le problème du choix du champ à utiliser pour étiqueter les séries de données dans la légende du diagramme, le scripte permet l'affichage d'un message à l'utilisateur pour saisir le nom associé à chaque grandeur.

La procédure suivie pour charger le thème multiple et la création du diagramme associé à un point donné est analogue à celle déjà développée au paragraphe précédent. Il suffit de choisir « **thème multiple** » dans le menu « **Charger un thème** » et de lancer le traçage des courbes en choisissant « **multiple sur un point du maillage** » dans le menu déroulant « **Diagrammes temporels** ».

Les courbes s'affichent avec une couleur propre à chaque grandeur et une légende portant les noms des grandeurs ainsi que le numéro du point sélectionné. Arranger toutes les fenêtres en mosaïque permet comme précédemment de balayer tout le maillage, et voir les diagrammes multiples associés en chaque point sélectionné. La figure ci-dessous illustre le résultat de la visualisation.

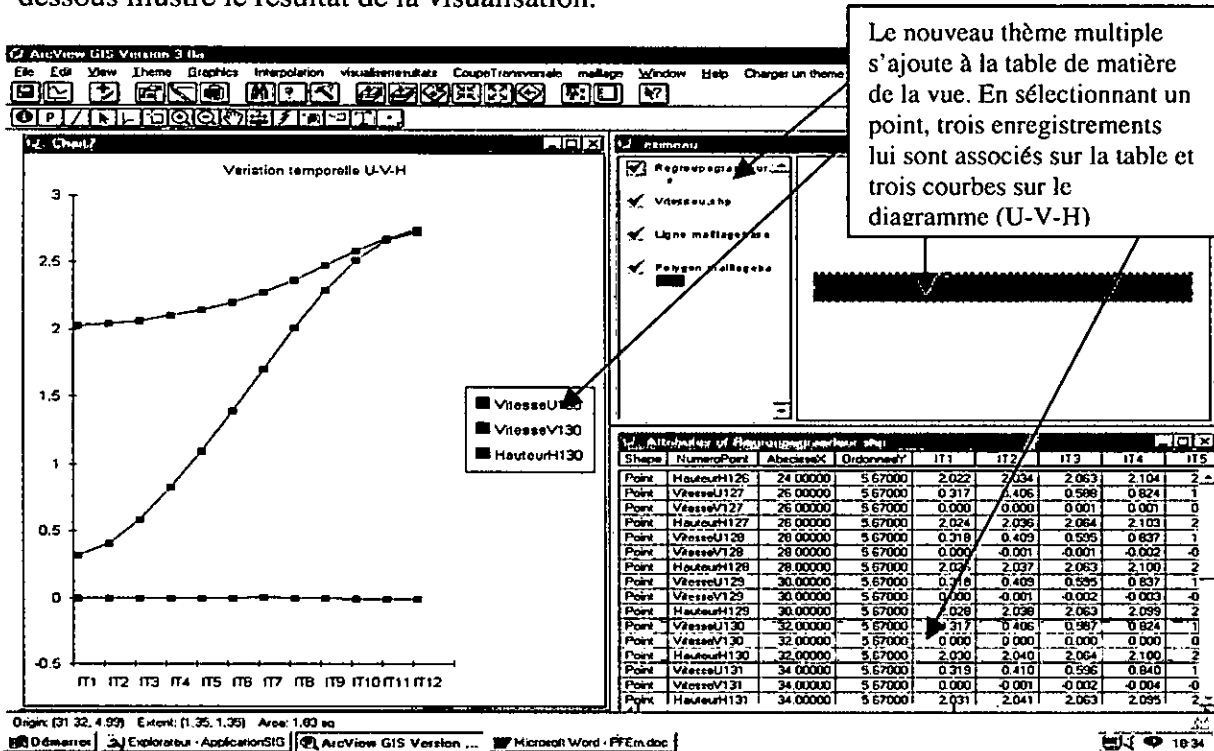


Figure V.13. Courbe temporelle multiple

### 3.4.3. Interpolation sur un point quelconque

Nous avons fait remarquer en début de ce chapitre l'intérêt de pouvoir faire une interpolation des résultats numériques sur un point quelconque du domaine. Une première approche pourrait consister à interpoler sur le maillage d'exploitation, ceci étant possible car ArcView est capable d'identifier le polygone contenant le point sélectionné puis de faire l'interpolation sur les valeurs déjà disponible aux sommets du triangle. Cette option est à éviter pour au moins deux raisons:

- Le script Avenue permettant l'identification du polygone contenant le point, par la requête *contain*, s'exécute en temps relativement long, ce qui est un handicap pesant sur l'interactivité, alors qu'un simple programme retourne les résultats en quelques secondes ;
- Les données disponibles sur les nœuds du maillage d'exploitation, sont déjà interpolés, ce qui rend les résultats encore de plus faible fiabilité.

Nous avons donc opté pour l'interpolation des résultats sur un point quelconque en utilisant les données en sortie du code numérique, gagnant ainsi en temps et en précision.

La procédure est la suivante : en activant l'outil « **sélectionne un point** » disponible sur la barre des tâches, cliquer sur n'importe quel point du domaine, un script Avenue permet de saisir ses coordonnées et de les enregistrer dans un fichier ASCII. Le code d'interpolation sera lancé automatiquement et commencera par lire les coordonnées du point sélectionné sur la vue, il suit une algorithmique semblable à celle présentée précédemment pour l'interpolation sur un maillage.



En cliquant sur le menu « **diagrammes temporels** » puis choisir « **multiple sur un point quelconque** », le diagramme représentant les trois grandeurs (composantes de la vitesse et la hauteur d'eau) s'affiche, sauf que maintenant, il n'est plus possible de lier dynamiquement la vue et le diagramme puisque l'interpolation se fait en deux temps.

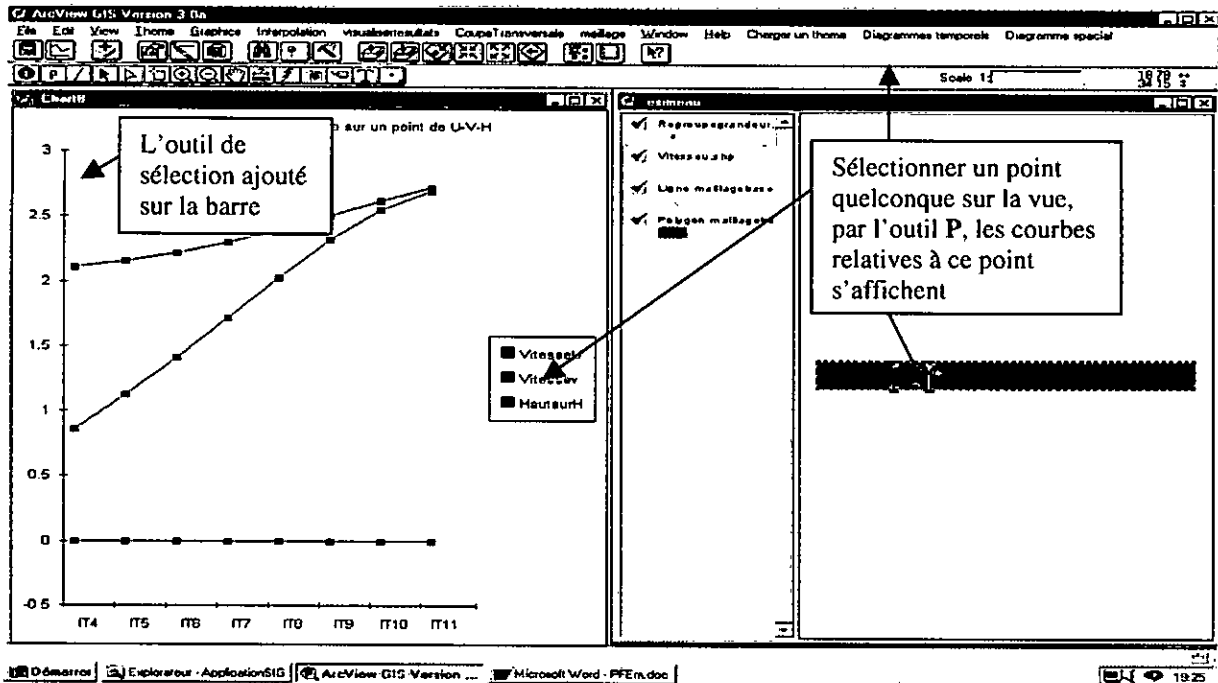


Figure V.14 : Interpolation sur un point quelconque

Signalons enfin, qu'il n'est pas nécessaire de créer une table attributaire pour cette application puisque, l'information ne concerne qu'un seul point. Toutefois, pour tracer le diagramme, il a été nécessaire de regrouper les résultats de l'interpolation dans une table virtuelle permettant ainsi au script de lire les différents champs qui servent à étiqueter l'axe des abscisses et saisir les séries de données à représenter en diagramme.

### 3.4.4. Interpolation spatiale

On s'intéresse à présent, de connaître la distribution d'une grandeur physique suivant une droite d'exploitation. Il est donc nécessaire de préciser l'instant de cette configuration, pour pouvoir tirer les informations qui lui sont relatives. D'une grande utilité pour la hauteur d'eau, cette approche nous permettra de visualiser une coupe transversale sur le canal ou même connaître l'allure de la courbe de remous si la droite est tracée le long du canal. Ceci est aussi non sans intérêt pour les deux autres grandeurs qui nous intéressent, à savoir les composantes horizontales de la vitesse. En effet, en choisissant des droites transversales au canal, nous pourrions tirer les profils horizontaux de vitesse à la surface de l'écoulement. C'est à montrer tout l'intérêt de l'utilisation des SIG, même comparés aux puissants visualiseurs tels que VISU ou MEDIT.

Pour revenir à ce qui nous intéresse, l'utilisateur doit commencer par choisir la grandeur qu'il désire traiter par des courbes spatiales en activant le thème qui lui est associé sur la table des matières. Activer ensuite l'outil « **tracer une droite** » disponible sur la barre des outils puis tracer la droite sur la vue. Le script a pour but de saisir les points extrémités de la droite qu'il stockera dans un fichier ASCII. Ces données serviront d'entrées au code d'interpolation spatiale en plus de celles à saisir inter activement : l'instant de visualisation et le nombre d'intervalles à créer le long de la droite d'exploitation. Le lancement du code se fait en cliquant sur le menu « **Diagramme spatial** » et choisir « **interpoler sur une droite** ».

Pour la visualisation d'une coupe transversale, nous avons créé un module qui ne prend en considération que la hauteur d'eau pour tracer le profil de la surface libre. La coupe consiste en la superposition de deux thèmes *ligne*. Le premier, représentant une coupe du fond du canal et l'autre représentant la ligne transversale de la surface libre. Cliquer sur le menu déroulant « **Coupe transversale** », puis choisir « **lancer une coupe** » pour exécuter le code qui fait la coupe. C'est un programme d'interpolation spatiale, l'utilisateur doit saisir sur la fenêtre DOS qui apparaît, l'instant de coupe et la distance (à compter à partir de l'origine des abscisses) de la coupe. Il est possible à présent d'afficher les deux thèmes en choisissant « **visualiser la coupe** » dans le même menu (figure V.17).

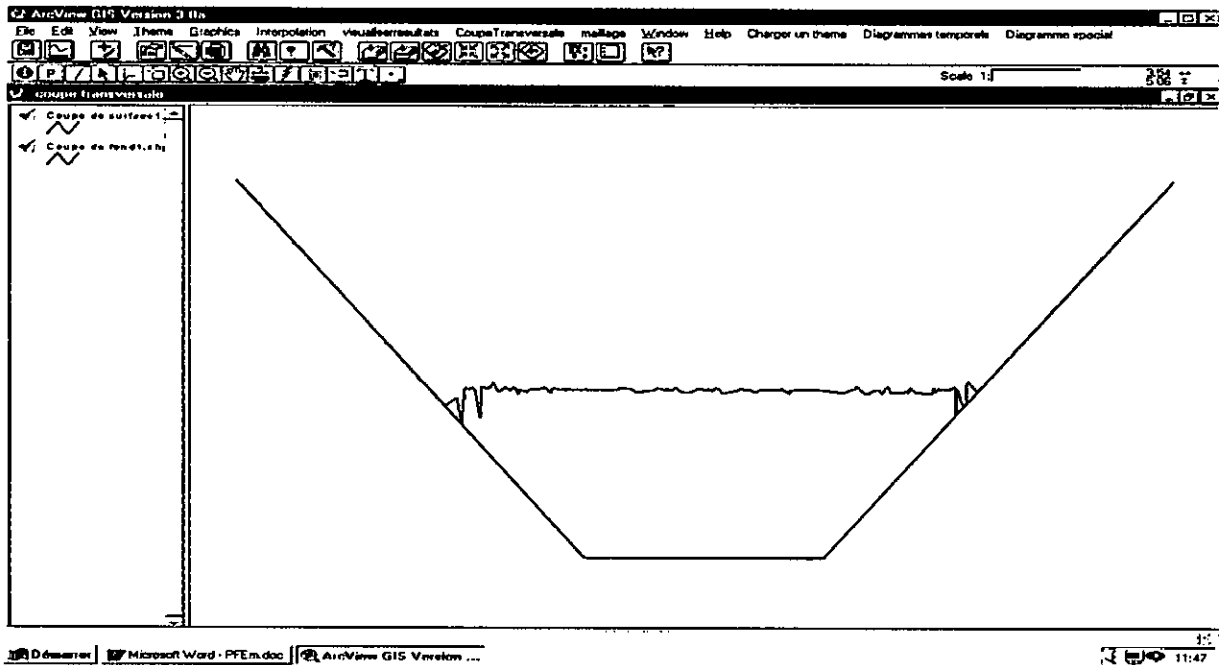


Figure V.17 : Coupe transversale au canal

### 3.5. Visualisation sous VISU et SMS

Nous avons choisi pour cette application de visualiser sous VISU la solution par un maillage déformé pour les trois grandeurs physiques qui nous intéressent. Le maillage de visualisation est de nature  $P^1$  c'est à dire que, les nœuds des milieux des arêtes et les solutions qui leurs sont affectées ne s'afficheront pas. La visualisation reste comme même pertinente et laisse appréhender le champ de solution dans sa globalité, en particulier pour la hauteur d'eau en traçant carrément la surface libre en un temps considéré.

Avant de commencer l'exploitation des résultats par VISU, il faut d'abord lui préparer ses entrées par la construction des fichiers de maillage d'extension \*.mesh et ceux de la solution associée de format \*.bb. Ceci est possible à partir de l'interface ArcView en cliquant sur le menu déroulant **interface -f** et choisir **interf-1**, la fenêtre DOS apparaît à l'utilisateur pour saisir le nombre d'itérations en temps et les coefficients de visualisation (ce sont des facteurs de pondération suivant les directions  $x, y, z$ ).

Pour lancer VISU à partir de l'interface ArcView, cliquer sur le menu « **Visualiser résultats** » puis choisir « **visu** » pour lancer VISU (se rapporter au paragraphe 3.1.1. pour la procédure de lecture de fichiers par VISU) (figures V.18, V.19 et V.20).

SMS, comme il a été vu auparavant, ne fournit pas de visualisation en trois dimensions, mais il permet contrairement à VISU une visualisation du maillage  $P^2$  ainsi que

la solution qui lui est associée. Il est possible de représenter la surface de l'eau ou sa profondeur au fond, par un dégradé de couleurs avec une échelle associée. Pour le champ de vitesse, SMS permet une représentation en vecteurs rendant ainsi la lecture plus aisée (figure V.20). SMS se lance de la même manière que pour VISU.

Comme input, SMS doit lire un fichier de format \*.fil où sont enregistrés tous les noms de fichier utilisés par le logiciel, parmi quoi le fichier des résultats de format \*.flo et celui du maillage \*.net. Il est maintenant possible de lire le maillage et la solution par SMS en ouvrant le fichier \*.fil, SMS affiche le maillage  $P^2$ . Pour visualiser la solution, il faut alors ouvrir le fichier \*.flo, la solution s'affiche en superposé sur le maillage, toute une gamme d'options sont offertes à l'utilisateur pour choisir le mode d'affichage, les solutions à visualiser (vitesses, hauteur d'eau, surface d'eau) etc.

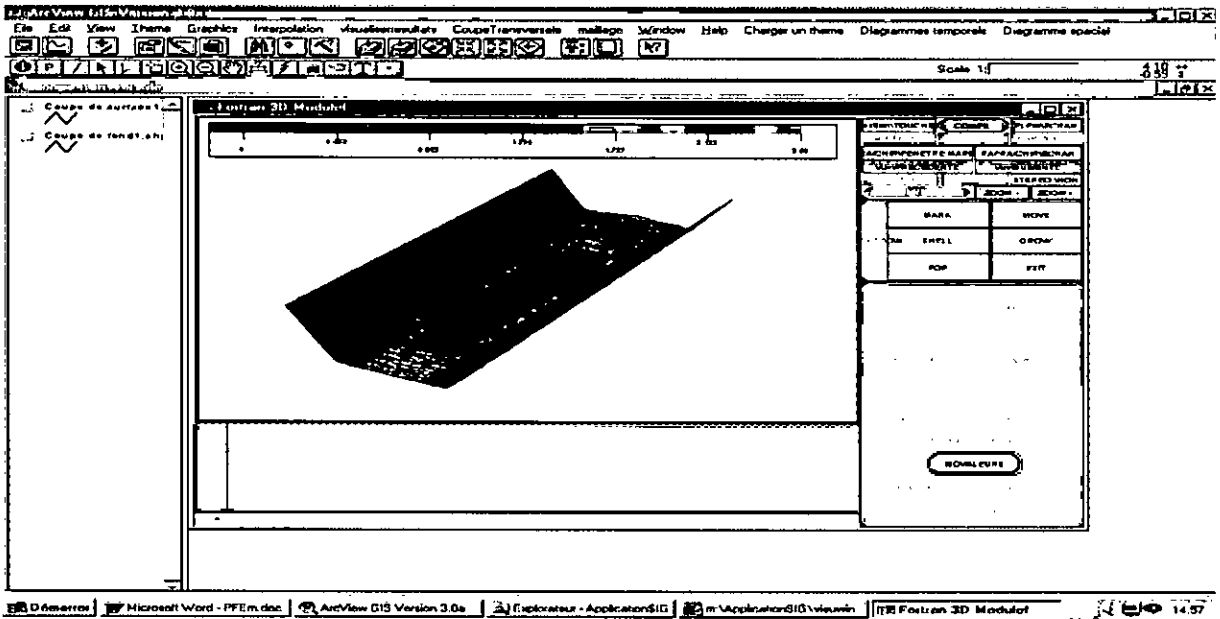


Figure V.18 : Visualisation de la hauteur d'eau par VISU

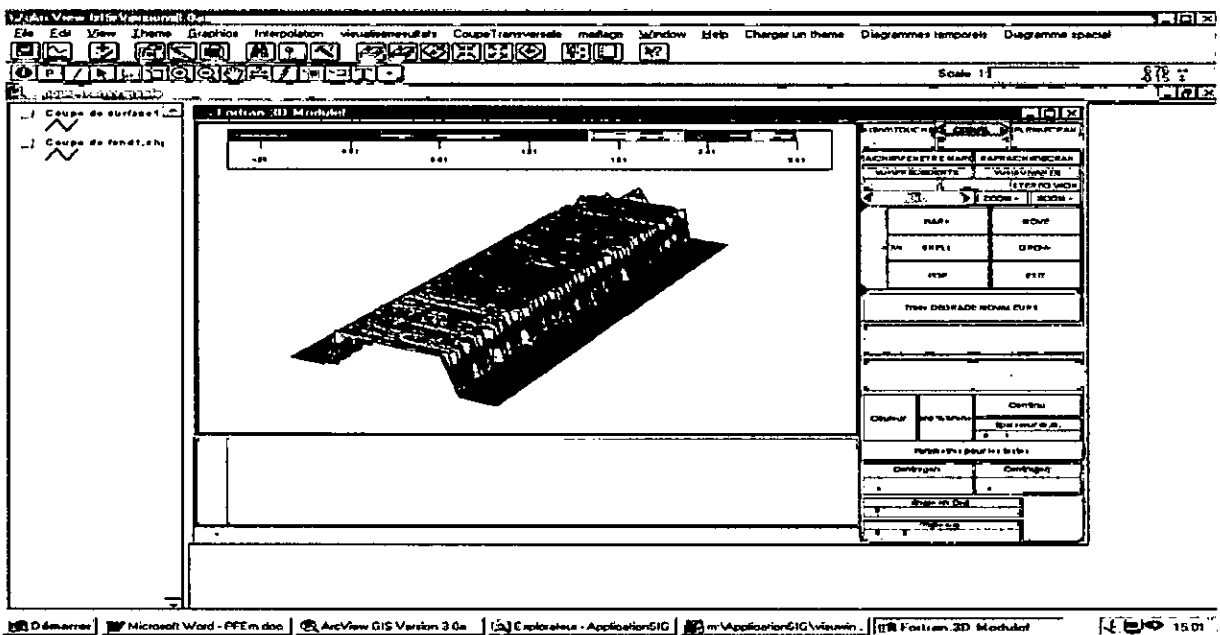


Figure V.19 : Visualisation de la composante U de la vitesse par VISU

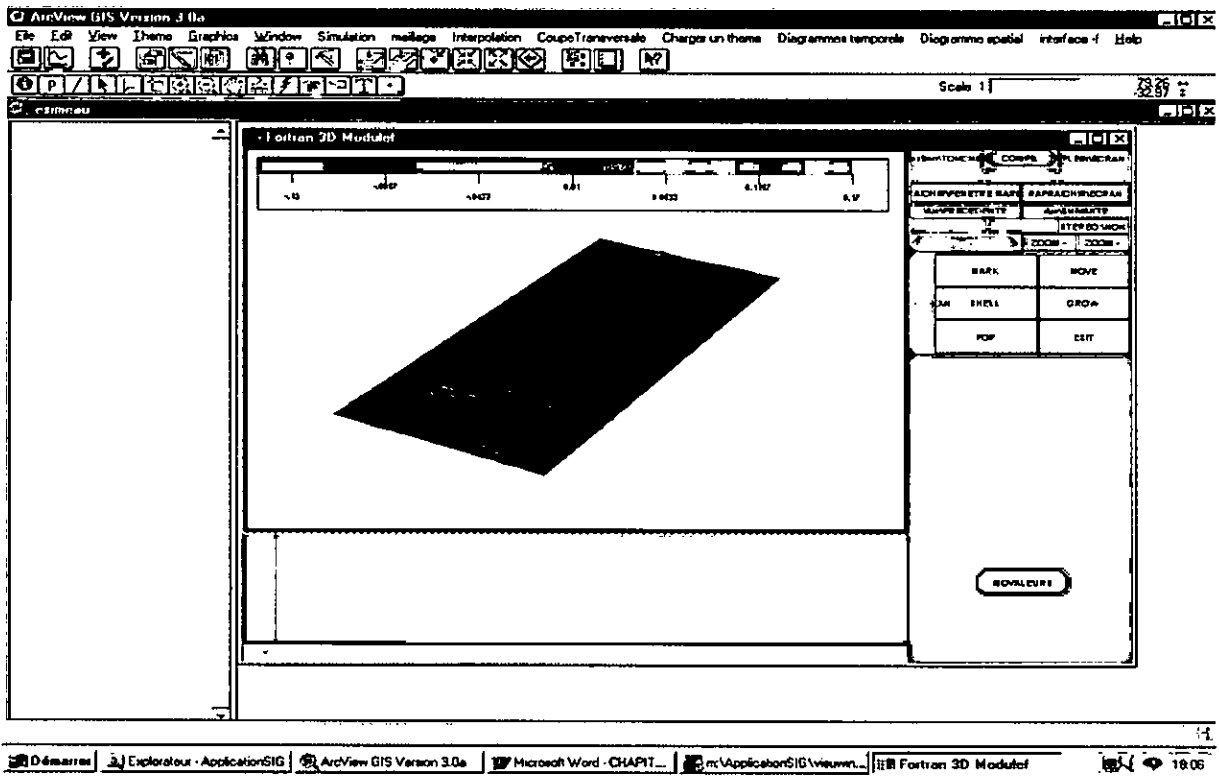


Figure V.21 : Visualisation de la composante V de la vitesse par VISU

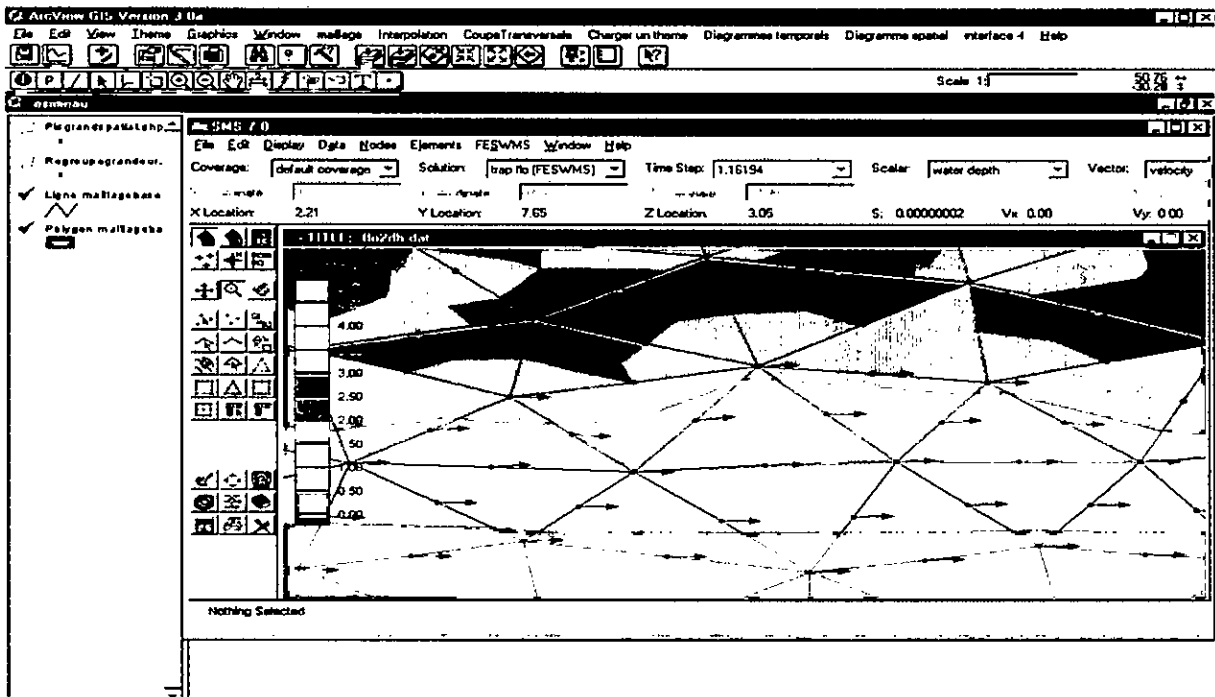


Figure V.20 : Zoom sur le maillage et représentation de la solution par SMS

# CONCLUSION

## CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet, l'idée motrice consiste à rassembler les outils d'aide à la prise de décision pour le traitement des problèmes liés à l'eau en réalisant un environnement de travail interactif et convivial. De tels outils aident beaucoup à une meilleure compréhension des phénomènes étudiés en rendant l'information maniable et accessible à tous les niveaux du traitement. Une majeure partie de ce travail a été consacrée à la préparation des données et à l'exploitation des résultats retournés par le code numérique ; en première approche, on a utilisé des moyens ou une combinaison d'outils développés à l'INRIA rendant cette partie du traitement facile et interactive. L'application réalisée sur ArcView permet une exploitation optimisée des données à l'aval du code de calcul, par l'affichage des thèmes associés aux différentes grandeurs physiques en utilisant soit, des fonctions existantes déjà dans ArcView, soit d'autres fonctionnalités créées en utilisant le langage Avenue, pour mieux répondre aux spécifications de l'application, sans toutefois la figer au problème que nous avons traité. L'application peut en effet, être couplée avec n'importe quel code de calcul ayant le même format de sortie, ou à plus forte raison, l'utilisateur n'a qu'à adapter les formats des fichiers de données d'échange.

La problématique des crues est un phénomène persistant qui ne cesse de faire des ravages sur tout le globe. Ce sujet ne peut être clôt puisqu'il s'agit d'une thématique qui de part sa nature, est assez complexe à cerner. En effet, la modélisation des écoulements à surface libre reste un domaine à défricher tant du point de vue de la modélisation physique que de celui de la représentation ou de la simulation numérique. Le couplage des techniques de visualisation / traitement des données au sens large et des méthodes de simulation numérique devrait permettre une meilleure compréhension de cette thématique, en particulier, pour améliorer les MNT et surtout, pour disposer d'un jeu de données permettant de prescrire des conditions aux limites et initiales assez réalistes. L'objectif à terme de ce type d'études est de développer des systèmes interactifs d'aide à la décision pour la planification rationnelle des ressources en eau et de ses risques inhérents dans les bassins versants. La finalisation de l'interface et l'analyse paramétrique du code devrait permettre en effet, une exploitation efficace et optimale des capacités du noyau de calcul du code FESWMS en lui associant des pré et post-processeurs puissants et interactifs.

# BIBLIOGRAPHIE

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Bouhachem F., Couplage d'un SIG et d'un code numérique éléments finis pour la simulation du phénomène d'eutrophisation et des écoulements à surface libre, (PFE EMI- Maroc, INRIA- France), 1999.
- [2] Datt G., Touzot G., Une présentation de la méthode des éléments finis, Collection Université de Compeigne, 2ème édition, 1983
- [3] El Dabaghi F., WADI Water supply watersned planing and management : an Integrated approach, project program, INCO MED II, The Fifth framework program, 2000.
- [4] El Dabaghi F., CruCID Modélisation Numérique des Crues via le Calcul Intensif Distribué, project program 973070, INCO-DC/ESPRIT Programme, 1998
- [5] El Dabaghi F., Kaiss M., Ouazar D., Bassins Versants et Crues : Données /SIG / Modèles scalaires, CruCID contract, report D4.1, INRIA, décembre 1999.
- [6] El Dabaghi F., Kaiss M., Ouazar D., Watersheds Physical and Numerical modeling aspects, ESIMEAU contract, report D.19, INRIA, décembre 1999.
- [7] El Dabaghi F. et Pironneau O., Stream Vectors in three dimensional aerodynamics, Numer.Math. 48, pp. 561-589, 1986
- [8] El Dabaghi F. ESIMEAU Information technologies for water ressources management and modeling in semi-arid areas, project program, INCO-DC/Esprit, 1997.
- [9] El Dabaghi F., Ouazar D., Hasnaoui D., Karfal Z. et Rizk A., Web-Internet Access, ESIMEAU Contract, report D.20, 2000.
- [10] ESRI, ArcView, GIS The Geographic Information System for Everyone , édition 1995.
- [11] ESRI, Avenue, Customization and Application Developement for ArcView, édition 1995.
- [12] Graf Walter H. & Atlinakar M.S., Hydrodynamique, Eyrolles, Paris, 1991
- [13] Graf Walter H. & M.S., Atlinakar Hydraulique fluviale, Tome 1, Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1993
- [14] Graf Walter H. & Atlinakar M.S., Hydraulique fluviale, Tome 2, Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1993



- 
- [15] Handizi K., Réalisation d'interface pour un modèle numérique de la propagation d'onde de crues, (PFE EMI-Maroc, INRIA-France), 2001.
- [16] Joly P., Vidrascu M., Quelques méthodes classiques de résolution de systèmes linéaires Exemples d'application dans la bibliothèque MODULEF-INRIA, Rocquencourt, novembre 1994.
- [17] Karfal Z., Conception et développement d'une application d'intégration en Java (Mémoire DESA EMI-Maroc, INRIA-France), 2001.
- [18] Karrakchou S., Analyse d'un modèle numérique pour la propagation d'ondes de crues, (PFE EMI-Maroc, INRIA-France), juin 2000.
- [19] Monro, Donald M., Arnold E., FORTRAN 77, 1982.
- [20] Nakhlé B. Modélisation numérique des écoulements d'eau à frontière libre, (Mémoire de DEA ESIB-Liban, INRIA-France), décembre 2000.
- [21] Saltel E. et Hecht F., EMC2 un logiciel d'édition de maillage de contours bidimensionnels INRIA, Rocquencourt, France, 1995.
- [22] Souissi N., Mise en place d'un système intégré lançant et gérant des tâches à travers le Web (PFE EMI-Maroc, INRIA-France), 2001.
- [23] Talamali S., Thèse de Magistère (ENP-Algérie, INRIA-France) à paraître en 2002.
- [24] Théodor R., Initiation à l'Analyse Numérique CNAM cours A, 2ème édition, Masson, 1986.
- [25] U.S Department of transpotation FESWMS : Finite Element Surface Water modeling System Two Dimensional Flow in Horizontal Plane, Users Manuel, Virginia, 1989.
- [26] U.S Department of transpotation FESWMS : Finite Element Surface Water modeling System Two Dimensional Flow in Horizontal Plane, Users Manuel, Virginia, 1991.
- [27] Zienkiewicz, Olgierd Méthode (La) des éléments finis McGraw- Hill, 1979.

# ANNEXES

## ANNEXE I

## ORGANISATION DES TABLES DE LA BASE DE DONNEES ARCVIEW

## 1. Organisation des tables du maillage

## a. Table du thème POINT

Shape	Npoint	Xpoint	Ypoint	Rpoint
Point	1			
Point	2			
Point	3			
Point	4			

## b. Table du thème LIGNE

Shape	Nligne	Sommet1	Sommet2	Rligne
Polyline	1			
Polyline	2			
Polyline	3			
Polyline	4			

## c. Table du thème POLYGONE

Shape	Npolygon	Sommet1	Sommet2	Sommet3	Rpolygone
Polygon	1				
Polygon	2				
Polygon	3				
Polygon	4				

## 2. Organisation des tables des résultats du code numérique

### a. Table du thème simple temporel sur un maillage

Shape	Grandeur	AbscisseX	OrdonnéeY	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5
Point	HauteurH1							
Point	HauteurH2							
Point	HauteurH3							
Point	HauteurH4							

### b. Table du thème multiple temporel sur un maillage

Shape	NumeroPoint	AbscisseX	OrdonneeY	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5
Point	VitesseU1							
Point	VitesseV1							
Point	HauteurH1							
Point	VitesseU2							
Point	VitesseU2							
Point	HauteurH2							

### c. Table du thème multiple spatial sur une droite

Shape	NumeroPoint	AbscisseX	OrdonneeY	VitesseU	VitesseV	HauteurH
Point	1					
Point	2					
Point	3					
Point	4					

### d. Table du diagramme simple spatial sur une droite

Grandeur	NP1	NP2	NP3	NP4	NP5	NP6	NP7	NP8
VitesseU								

### e. Table du diagramme multiple spatial sur une droite

Grandeur	NP1	NP2	NP3	NP4	NP5	NP6	NP7	NP8
VitesseU								
VitesseV								
HauteurH								

### f. Table du diagramme multiple temporel sur un point quelconque

Grandeur	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
VitesseU								
VitesseV								
HauteurH								

## ANNEXE II

LES TYPES DE FICHIER D'ECHANGE DE DONNEES ENTRE LES  
DIFFERENTS MODULES**1. Fichiers texte du type \*.amdba**

Ce type de fichier propre à EMC2 sert à donner la table des points et leurs coordonnées ainsi que la table des éléments et leur connectivité.

Numéro du point	Abscisse	Ordonnée	Référence
1	...	...	...
2	...	...	...
3	...	...	...
4	...	...	...
5	...	...	...
.	...	...	...
.	...	...	...
.	...	...	...

**2. Fichier texte du type \*.mesh**

Ce type de fichier, encore plus riche que le précédent, permet de donner en plus des tables des points et des connectivités des éléments, la table des points et des arêtes frontières.

MeshVersionFormatted

Dimension

2

Vertices

Nombre de points

Abscisse	Ordonnée	Référence
----------	----------	-----------

...	...	...
-----	-----	-----

...	...	...
-----	-----	-----

...	...	...
-----	-----	-----

Edges

Nombre d'arêtes

Numéro du sommet 1	Numéro du sommet 2	Référence
--------------------	--------------------	-----------

...	...	...
-----	-----	-----

...	...	...
-----	-----	-----

...	...	...
-----	-----	-----

Triangles

Nombre de polygones

Numéro du sommet 1	Numéro du sommet 2	Numéro du sommet 3	Référence
--------------------	--------------------	--------------------	-----------

...	...	...	...
-----	-----	-----	-----

...	...	...	...
-----	-----	-----	-----

...	...	...	...
-----	-----	-----	-----

end

**3. Fichier de sortie du modèle numérique \*.flo**

Nom du travail

SI

Temps 1      nombre de points

Numéro du point	U	V	H	$\partial U/\partial t$	$\partial V/\partial t$	$\partial H/\partial t$
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...

Temps 2      Nombre de points

Numéro du point	U	V	H	$\partial U/\partial t$	$\partial V/\partial t$	$\partial H/\partial t$
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...

**4. Fichier de sortie de l'interpolation sur un maillage \*.res**

Numéro du point	itération 1	itération 2	itération 3	....	....	....
1	...	...	...	....	....	....
2	...	...	...	....	....	....
3	...	...	...	....	....	....
...	...	...	...	....	....	....
...	...	...	...	....	....	....
...	...	...	...	....	....	....

**5. Fichier de sortie de l'interpolation sur une droite \*.res**

Numéro du point	Abscisse	Ordonnée	U	V	H
1	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...

**6. Fichier de sortie de l'interpolation sur un point quelconque \*.res**

Grandeur	itération 1	itération 2	itération 3	....	....	....
VitesseU	...	...	...	....	....	....
VitesseV	...	...	...	....	....	....
HauteurH	...	...	...	....	....	....

## ANNEXE III

### APECU SUR LES LOGICIELS UTILISES

Dans ce qui suit, on présente un bref aperçu sur les logiciels utilisés tout en renvoyant vers les références indiquées pour une meilleure compréhension et en vue d'une meilleure utilisation si besoin est.

#### 1 Logiciel EMC2

EMC2 est un logiciel d'édition de maillages et de contours en deux dimensions. Il permet de générer inter activement des maillages bidimensionnels pour la méthode des éléments finis en définissant la géométrie (D.A.O), la discrétisation des contours, les sous-domaines et les numéros de référence (afin d'introduire un lien avec la physique : Conditions aux limites, propriétés des matériaux, etc.). Il est possible d'éditer un maillage en ajoutant, supprimant ou déplaçant des sommets, etc. et en lui appliquant des transformations affines : symétrie, rotation, etc.).

Le logiciel est divisé en trois applications (exclusives) :

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

L'application construction permet de définir les contours géométriques d'un domaine à l'aide de points, arcs de cercle et des splines. On a de plus, introduit deux autres entités de construction qui sont utiles dans certains cas : les droites et les cercles. Ces deux dernières entités ne servent d'ailleurs que dans cette application.

On peut construire toutes les entités exceptées les splines, à l'aide des théorèmes de géométrie élémentaire ; quand les solutions sont multiples, les ambiguïtés sont levées en utilisant l'heuristique suivante : les points de désignation sont proches des points de tangence des courbes. Une spline est définie comme une courbe  $C^1$  passant par une liste de points. Elle sera fermée si le premier et le dernier point sont confondus.

On peut dupliquer toutes ces entités à l'aide de transformations affines suivantes : symétrie, rotation, homothétie, translation. De plus, on peut :

- Arrondir les angles ;
- Couper les segments, arcs, splines par des points, segments, arcs et splines ;
- Détruire des entités à l'aide du menu **GENERALITES**.

Au niveau de l'application prep-mesh, les composantes connexes des bords des sous-domaines sont connues. On appellera ces composantes connexes des composantes. Cette application permet de définir la discrétisation sur les entités définissant le bord du domaine et des sous-domaines (frontières des matériaux), ainsi que des numéros de référence sur les

sous-domaines, sur les lignes, sur les points ; en vue d'entrer des données physiques différentes ( plusieurs conditions aux limites pour plusieurs matériaux, par exemple). Elle permet aussi de créer un fichier de données en vue d'interfacer le mailleur de **MODULEF** : **apnoxx**, en définissant les sous-domaines comme une liste de composantes ou la première est la composante extérieure (les autres composantes étant les composantes des trous), plus des lignes internes, et des points internes à forcer.

Au moment de la commutation vers l'application edit-mesh, on peut modifier la valeur par défaut de certains paramètres du mailleur. Le programme construit un maillage triangulaire (ou quadrangulaire) des sous-domaines définis à l'étape précédente, ou bien de tous les sous-domaines si aucun n'a été défini.

A ce niveau on peut éditer le maillage :

- Ajouter des sommets internes au sous-domaines ;
- Supprimer des sommets des sous-domaines ;
- Retourner des arêtes internes d'un quadrilatère ;
- Bouger des sommets ;
- Régulariser ou rendre de *Delaunay* le maillage ;
- Quadranguler le maillage ;
- Transformer des sous-domaines avec des symétries, rotations, homothéties, translations ;
- Modifier les références des sommets, des arêtes, des sous-domaines (régions) ;
- Sauver ou restaurer un maillage ( sous différentes formes : structure *mesh* propre à EMC2, structure *nopo* de MODULEF, structures simplifiées, etc.) ;
- Fissurer des lignes du maillage (les points extrémité de la ligne sont dupliqués) ;
- Renommer en vue de diminuer la taille du profil des matrices éléments finis  $P^I$  ou  $Q^I$ .

Si *xx* est un nom de fichier donné par l'utilisateur, ces noms de fichier peuvent être créés à partir de *xx* en sortie de EMC2 :

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| • traceNNN.emc2-trace | trace des actions (ce nom est généré automatiquement)     |
| • xx.emc2_trace       | trace des actions ( nom spécifié par user)                |
| • xx.emc2_bd          | sauvetage en mode <i>construction</i> ou <i>prep-mesh</i> |
| • xx.bak.emc2_bd      | fichier .bak du précédent                                 |
| • xx.data             | fichier pour le module apnopo (qui génère xx.nopo)        |
| • xx.nopo             | fichier généré par <i>edit-mesh</i>                       |
| • xx.mesh             | fichier généré par <i>edit-mesh</i>                       |
| • xx.am               | fichier généré par <i>edit-mesh</i>                       |
| • xx.am_fmt           | fichier généré par <i>edit-mesh</i>                       |
| • xx.amdba            | fichier généré par <i>edit-mesh</i>                       |
| • xx.set              | pour liaison avec le logiciel VISIL                       |
| • xx.bas              | pour liaison avec le logiciel VISIL                       |

A titre d'illustration, nous allons mailler par EMC2 un carré unité avec des entités forcées à l'intérieur : un cercle trou, un arc, une spline et deux segments. Il faut donc construire ces formes (voir figure 1), puis définir la discrétisation sur ces éléments (figure 2) et enfin construire le maillage (figure 3). Ces trois phases correspondent aux trois applications *construction*, *prep-mesh*, et *edit-mesh*



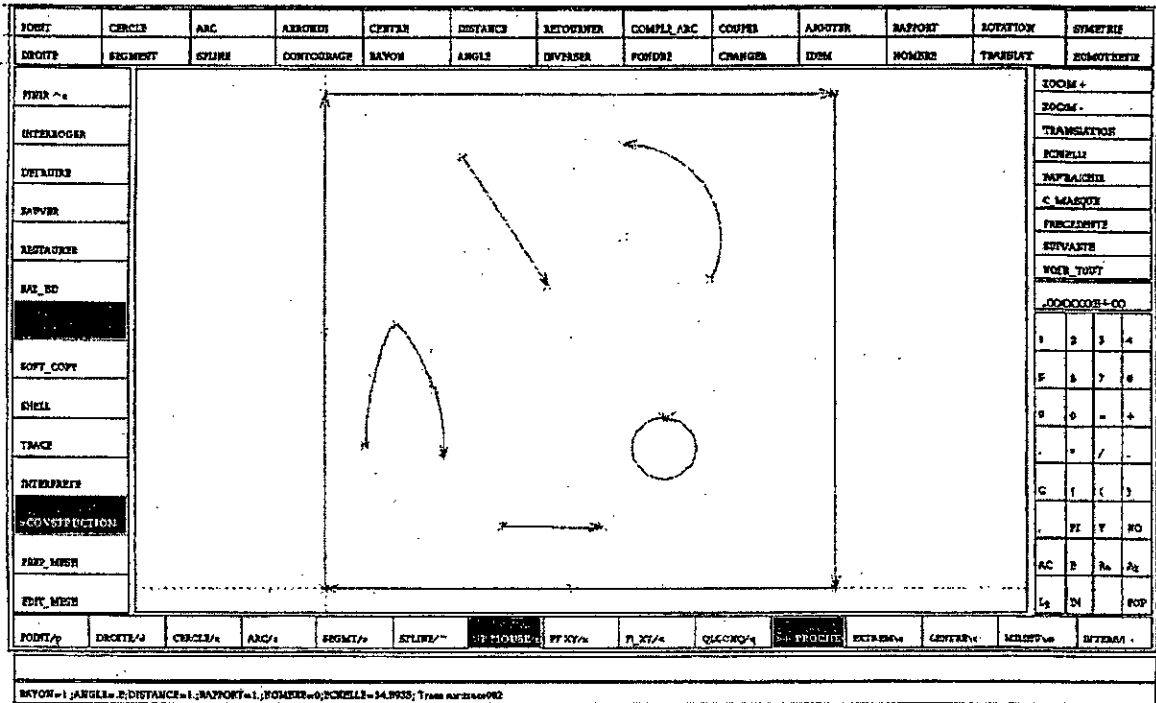


Figure 1 : le carré unité

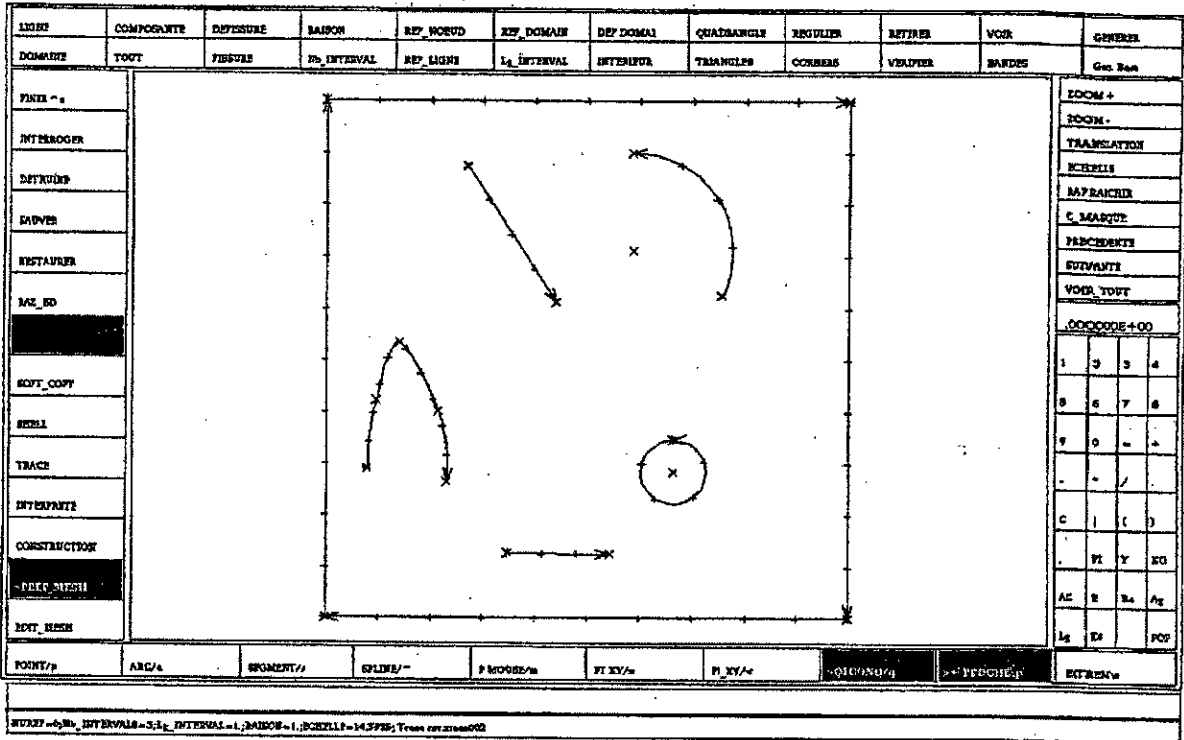


Figure 2 : le carré unité discrétisé

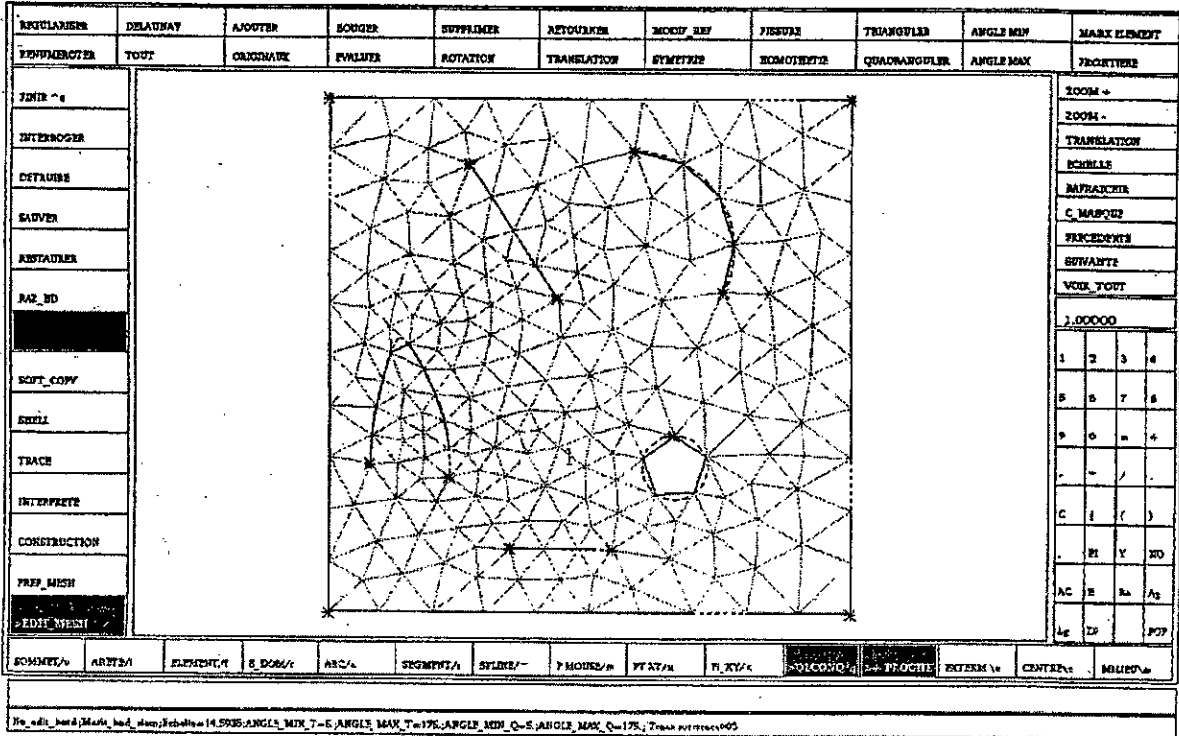


Figure 3 : le carré unité maillé

## 2. Logiciel YAMS

YAMS est un logiciel destiné principalement à la *simplification contrôlée* des triangulations de surfaces 3D. A partir d'un maillage initial de surface (composé de triangles et / ou de quadrangles) fourni par l'utilisateur, l'objectif est de générer un maillage, si possible simplifié (*i.e.*, comportant éventuellement moins d'éléments que la donnée initiale), qui représente une approximation linéaire par morceaux de la surface conforme à une tolérance géométrique donnée. La génération du maillage est gouvernée par des requis de tailles et de qualité des triangles. Parmi les domaines d'application concernés, citons la visualisation, la simulation numérique par la méthode des éléments finis, la transmission des données discrètes, etc. Les contraintes de qualité (aspect de forme) des éléments étant liées à l'application envisagée, le logiciel offre plusieurs options de remaillage.

L'objectif visé est d'extraire à partir d'une triangulation<sup>1</sup>, un maillage qui est une approximation géométrique (linéaire par morceaux) de la surface et qui comporte éventuellement moins d'éléments (si possible) que la donnée initiale. Les domaines d'application concernés sont multiples et vont de la visualisation graphique (maillages *géométriques*) à la simulation numérique par la méthode des éléments finis (maillages *de calcul*). Comme les contraintes en termes de qualité (aspect ratio) des éléments et de taille (nombre d'éléments) du maillage résultant dépend généralement de l'application envisagée, le logiciel propose plusieurs options de simplification et / ou d'enrichissement.

Quelle que soit l'application visée, un contrôle rigoureux de l'écart entre le maillage et la surface sous-jacente est une clé de la modélisation géométrique. Cet écart correspond localement (pour un triangle) à la distance maximale de cet élément à la surface. Un maillage *géométrique* est donc un maillage satisfaisant cette contrainte. Ici, on suppose que la surface est représentée uniquement par une triangulation initiale, éventuellement munie de spécifications géométriques (arêtes vives, normales, etc.).

- a. **Simplification** : en principe, la simplification d'un maillage est gouvernée par les propriétés intrinsèques de la surface sous-jacente et éventuellement par une métrique (isotrope). Celle-ci correspond à un champ de tailles scalaire associé aux sommets de la triangulation initiale. L'appauvrissement de la triangulation est une opération itérative qui consiste essentiellement à supprimer les arêtes jugées trop petites (au regard de la carte des tailles), couplée avec une procédure de bascule d'arêtes et de bougé de points. Dans cette approche, l'opération de réduction d'une arête n'est effectuée que si la qualité et la régularité du maillage courant sont préservées (ou pas trop altérées).
- b. **Enrichissement** : dans certains cas, la carte des tailles ou la métrique associée à chaque point (spécifiée ou intrinsèque) indique que la densité des éléments est localement insuffisante. Il s'avère donc nécessaire d'*enrichir* le maillage en ajoutant des sommets (*i.e.*, en subdivisant les arêtes jugées trop grandes). YAMS, permet de réaliser ce traitement. Pour cela, un support géométrique est construit de manière interne de façon à définir une surface  $\Sigma$  globalement de continuité  $G^1$ . Ce support va servir à émuler le rôle d'un modéleur géométrique, et en particulier va servir à répondre aux tâches suivantes :

<sup>1</sup> Ou d'un maillage hybride (*i.e.*, composé de triangles et / ou de quadrangles)

- étant donné un point et une direction, trouver le point de  $\Sigma$  le plus proche ;
- trouver la normale en un point de  $\Sigma$  .

Dans l'approche retenue, on définit un réseau de courbes frontières aux triangles ainsi que les plans tangents transversaux à celui-ci, indépendamment les uns des autres, par interpolation des normales à la surface aux point.

- c. **Optimisation** : enfin YAMS peut être utile pour *optimiser* un maillage donné. Pour cela, il suffit de fournir en entrée un maillage de surface (par exemple généré par YAMS), l'algorithme cherchant alors à optimiser les qualités en forme et en taille de celui-ci. Le traitement consiste dans ce cas à appliquer de manière itérative, des bascules d'arêtes, des bougés de points et, marginalement, à supprimer ou subdiviser des arêtes.

Deux formats de fichiers permettent de décrire une triangulation de surface en entrée de YAMS, le format *msh2* (simple) et le format *mesh*

Le format *msh2* permet de décrire un maillage de surface de manière très succincte. Il se compose de deux fichiers, un fichier *xxx.points* (*xxx* étant de fichier valide) relatif à la géométrie (*i.e.*, contenant les coordonnées des sommets) et un fichier *xxx.faces* relatif à la topologie (*i.e.*, les faces, en termes de sommets) du maillage. Ce format est uniquement ascii.

- Fichier *\*.points*
  - enregistrement 1 : *NP* le nombre de points ;
  - enregistrement *i* ( $i=2, \dots, NP+1$ ) : les trois coordonnées des sommets et un entier correspondant à la propriété physique du point  $i-1$ .
- Fichier *\*.faces*
  - enregistrement 1 : *NF* le nombre de faces ;
  - enregistrements suivants *i*, ( $i=2, \dots, NF+1$ ) : le *type* (degré de la face, 3 pour un triangle et 4 pour un quadrangle) et *type+1* entiers correspondant aux propriétés physiques associées à la face  $i-1$  et *type* entiers relatifs aux arêtes de la face *i*

Ainsi le triangle est une face de *type* 3, c'est à dire à trois sommets. Les faces de *type* supérieur à 4 ne sont pas prises en compte dans la version actuelle de YAMS. Noter qu'un quadrangle est automatiquement en deux triangles.

Dans certaine applications, il est nécessaire (voir indispensable) d'ajouter des informations à la triangulation de surface. C'est le cas par exemple des entités contraintes qui doivent être préservées dans le maillage résultant. C'est également le cas si l'utilisateur a accès à un modeleur géométrique et qu'il désire indiquer les normales (tangentes) aux sommets de la triangulation. Pour répondre à ces besoins, un format d'entrée *étendu* est prévu. Il s'agit du format *mesh* dont l'aspect est présenté en annexe II. Ce format est indifféremment binaire ou ascii.

YAMS sauvegarde les maillages résultants au formats *mesh* (binaire ou ascii) et éventuellement un fichier *xxx.bb* correspondant aux tailles associées aux sommets du maillage final.

YAMS est écrit en langage C (ANSI). Il a été développé initialement sur des stations de travail HP sous Unix. Mais, il a été testé sur diverses architectures (Sun, SGI, Apple, PC, etc.) et systèmes d'exploitation (Unix/Lunix, MacOS, WinNT/SDK, etc.). La manière habituelle de lancer le programme est de taper la commande suivante (dans la fenêtre active) :

Yams [-h] [-f] [-v level] [-m megas] [...] [PrefixeFile] OutputFile].

L'option [-h] permet de connaître la signification de quelques options du code. Par défaut, le nom du fichier en sortie correspond au préfixe du fichier d'entrée suivie de l'extension *.d*. Par exemple, si *base* est spécifié en entrée, le fichier *base.d.mesh* est créé en sortie. Il est toutefois possible de donner un nom de fichier particulier OutputFile dans la ligne de commande. Le logiciel supporte les options suivantes :

- **-h**                    donne la liste des options ;
- **-v level**            niveau d'impression des messages ([-10..10], 0 = pas de sortie) ;
- **-m megas**            indique le nombre de mots mémoire (en millions) alloués ;
- **-c x**                sauvegarde la  $x^{\text{ième}}$  composante connexe (de surface) uniquement
- **-e**                    fichier de sortie étendu (normales, tangentes, arêtes vives, etc.) ;
- **-f**                    fichier de sortie ascii ;
- **-ns**                pas d'optimisation (bougé de points) ;
- **-nm**                les points sont créés dans les plans des triangles ( pas de « mapping »).

Actuellement, trois niveaux d'options sont disponibles. Deux options de simplification peuvent être spécifiées (choix -1 et -2 à la question OPTION ?). Elles correspondent respectivement aux approches I et II de simplification (voir ci-dessus).

- Option -1, la triangulation est simplifiée par rapport aux paramètres spécifiés et à la carte des tailles intrinsèque calculée par le programme.
- Option -2, la triangulation est simplifiée en tenant compte des écarts entre les triangles du maillage final et ceux de la triangulation initiale.
- Option 0, permet à la fois de simplifier une triangulation (dans les régions où ce traitement est nécessaire) et de l'enrichir par ajout de points. Cette option se place dans le contexte de l'approche I (carte des tailles).

## 2. Logiciel de visualisation MEDIT

Medit permet de représenter des maillages 2D, 3D ou de surface, conformes (au sens des éléments finis) ou non, dans une fenêtre graphique qui lui est propre. L'utilisateur a le loisir d'agir sur cet objet graphique soit en modifiant son apparence (filaire, faces cachées, plan de coupe,...), soit en lui appliquant des transformations (rotations, translations, zoom,...) à l'aide de la souris. La visualisation simultanée de plusieurs maillages dans des fenêtres graphiques indépendantes est également possible. Par ailleurs, ce logiciel autorise la création d'animations simplifiées (par exemple basée sur l'évolution d'un champs de solutions ou l'adaptation de maillages).

La géométrie du maillage est décrite dans un fichier de format *mesh* (celui-ci donnant plus d'informations sur la géométrie) ou éventuellement au format *msh2* (voir paragraphe ci-dessus). Outre la géométrie et la topologie du maillage, un champs de solutions scalaires peut

également être associé aux nœuds et aux éléments du maillage. Ceci est possible grâce à un fichier *xxx.bb* associé au *xxx.mesh*.

La manière habituelle d'appeler le programme est de taper la commande suivante :

```
medit      [InputFile 1] [InputFile 2]...[InputFile n]
```

Medit peut représenter jusqu'à dix différents maillages en même temps. Il peut être manipulé soit par la souris ou par le clavier. Pour une interaction avec le clavier, voici quelques touches de raccourci :

- Aspect

**c** couleur  
**f** facettes / lignes  
**g** entités contraintes  
**l** bords (wireframe)

- Mouvement

**a** animer  
**i** recentrer le maillage (revenir à la position précédente)  
**z/Z** augmenter / diminuer le champs de visualisation  
**+/-** rapprocher / éloigner l'objet

- Fonction

**F1** activer un plan de coupe  
**F2** éditer le plan de coupe  
**F3** geler le plan de coupe  
**F5** mode de rétrécissement  
**F6/F7** augmenter/diminuer le coefficient de rétrécissement.

### 3. Logiciel VISU

VISU est un logiciel de visualisation des résultats numériques. Il présente différents menus de interactifs qui permettent :

- De définir les paramètres de visualisation 3D ;
- De lire différents types de base de données topologiques et de solutions et de les associer dans des fenêtres pour la visualisation :
  1. De créer des solutions associées :
    - carte des *h* locaux ;
    - carte des qualités des éléments ;
    - carte des références aux sommets ou aux éléments.
  2. De définir des fonctions courbes ou surfaces en 2D ou 3D avec différents types de paramétrisations .
- De définir comment voir les objets (shrink, coplanarité, etc.), de définir une coupe sur un plan ;
- D'éditer une « décoration » : texte, trait, cadre, dégradé isovaleurs, axes ;
- De définir le tracé d'isovaleurs pour des solutions scalaires ;
- De définir le tracé des vecteurs, de points critiques, de lignes de courants pour des solutions vectorielles ;

- De définir le tracé de tenseurs pour des solutions vectorielles ;
- Etc.

#### 4. La bibliothèque MODULEF

La bibliothèque est écrite en Fortran 77. Ses modules sont destinés à résoudre par la méthode des éléments finis, différents types de problèmes modélisés à l'aide d'équations aux dérivées partielles. Parmi les domaines abordés, on peut citer :

- la thermique stationnaire et transitoire, linéaire ou non, bi ou tridimensionnelle ;
- l'élasticité bi ou tridimensionnelle dans l'hypothèse des petites et grandes déformations ;
- les matériaux nouveaux ;
- l'écoulement bidimensionnel de fluides ;

Le logiciel est très riche du point de vue algorithmique ; il comporte entre autres :

- plusieurs algorithmes de maillage en dimension 2 et 3 ;
- des méthodes d'éléments finis directes ou duales (hybrides, mixtes)
- plusieurs techniques de résolution de systèmes linéaires par des méthodes directes ou itératives ;
- des techniques de décomposition de domaines.

La conception de cette bibliothèque de programmes résulte de la combinaison d'une approche abstraite et d'une programmation modulaire. En utilisant une analyse descendante, chaque formulation mathématique est décomposée en une succession d'opérateurs. La plupart de ces opérateurs existent déjà dans le code MODULEF et seuls les nouveaux opérateurs sont à incorporer dans le code sous la forme de modules. Cette approche entraîne un gain de temps important pour l'utilisateur qui peut se limiter uniquement à la conception des opérateurs associés à la partie novatrice de son étude.

Grâce à la nature modulaire choisie pour l'organisation de la bibliothèque, les sous-routines existantes peuvent être modifiées et il est possible d'ajouter facilement de nouvelles sous-routines. De plus, il est facile de calculer la solution d'un problème donné par plusieurs méthodes, et ainsi de comparer les différentes approches. Un système interactif de création des données facilite la génération des maillages, la définition des conditions aux limites, le calcul des matrices, etc., et permet en particulier, l'utilisation de la bibliothèque dans le cadre de l'enseignement.

La bibliothèque MODULEF comprend quelques 3000 procédures écrites en Fortran 77 et conçues de façon très portable. Pour un utilisateur qui désire appeler des modules, MODULEF ressemble à une bibliothèque de sous-programmes Fortran classiques. Un module est un ensemble de sous-routines traduisant le calcul correspondant à un processus logique ou à une étape d'un enchaînement. Les modules communiquent entre eux via des structures de données (S.D), ensemble de tableaux contenant les résultats de l'étape de calcul considéré. La bibliothèque MODULEF est un outil fiable, relativement facile à utiliser et permet de résoudre numériquement des problèmes assez diverses.