

*Équipe Cosivie*

*COuplage de modèles pour la SIMulation  
numérique de problématiques  
en VironnementalEs*

*Rocquencourt*

THÈME 4B

*R* *apport*  
*d'Activité*

2002



# Table des matières

<b>1. Composition de l'équipe</b>	<b>1</b>
<b>2. Présentation et objectifs généraux</b>	<b>1</b>
<b>3. Fondements scientifiques</b>	<b>3</b>
3.1. Introduction	3
3.2. Modélisation et simulation numériques	4
3.3. Techniques algorithmiques et calcul intensif	4
3.4. Architecture Logicielle et Système intégré	5
<b>4. Domaines d'application</b>	<b>6</b>
<b>5. Logiciels</b>	<b>6</b>
<b>6. Résultats nouveaux</b>	<b>8</b>
6.1. Introduction	8
6.2. Méthodes numériques pour les équations de Navier-Stokes	8
6.3. Simulation numérique du traitement mécanique de l'eutrophisation	10
6.4. Simulation numérique d'écoulements fluviaux et torrentiels	12
6.5. Algorithmes parallèles et calcul intensif	17
6.6. Intégration d'outils et de données	18
<b>7. Contrats industriels</b>	<b>21</b>
7.1. Action ESIMEAU	21
7.2. Action CruCID	21
7.3. Action WADI	21
<b>8. Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>21</b>
8.1. Actions nationales	21
8.2. Actions européennes	21
8.2.1. ESIMEAU	22
8.2.2. CruCID	22
8.2.3. WADI	23
8.3. Actions internationales	23
8.3.1. Méditerranée	23
8.4. Accueil de chercheurs étrangers	24
<b>9. Diffusion des résultats</b>	<b>24</b>
9.1. Animation de la communauté scientifique	24
9.2. Actions d'enseignement	25
9.3. Autres Enseignements	25
9.4. Participation à des colloques	25
<b>10. Bibliographie</b>	<b>25</b>



# 1. Composition de l'équipe

## Responsable scientifique

Fadi El Dabaghi [CR]

## Assistante de projet

Maryse Desnous [TR, en commun avec MACS, M3N et Gamma ]

## Conseillers scientifique

Mohamed Amara [ Professeur, Université de Pau]

Antoine Gharbi [Directeur du Service Informatique, PLJ - Paris]

## Chercheur invité

Driss Ouazar [Professeur, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs-Maroc, Mars-Aôut 2002]

## Post-doctorants

Nachida Guelmi [Université des Sciences et de la Technologie Haouarai Boumediene, Alger, ERCIM, jusqu'en Aôut 2002]

Abdallah El Kacimi [EMI-Maroc, depuis Février 2002]

## Doctorants

Mohamed Abdelwahed [boursier INRIA, jusqu'en Décembre 2002, Université de Pau]

Bassam Nakhle [boursier, Co-tutelle Université de Pau - Université Saint-Joseph de Beyrouth]

Chakib Kada Kloucha [boursier BGF, Université de Pau, depuis Octobre 2002]

Maatoug Hassine [boursier, ENIT Tunisie, jusqu'en Décembre 2002]

Nissrine Souissi [boursier Université Paris XII, depuis Septembre 2002]

Souad Talamali [boursier, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, jusqu'en Octobre 2002]

## Stagiaires

Salim Benziada [Maître de conférence, ENP-Alger, Stage CMEP, Oct-Déc 2002]

Houcine Henine [PFE, ENP-Alger, Stage CMEP, Mai-Sep 2002]

Karim Ider [Magister, EN-Alger, Stage CMEP, Juin-Aôut 2002]

Ouafa Jaouhari [PFE, ENSIAS-Maroc, Fév-Mai 2002]

# 2. Présentation et objectifs généraux

Créée en 2000, l'action COSIVIE s'intéresse à la modélisation et la simulation numérique de problèmes d'écoulements d'eau. Elle s'attache principalement au développement, à la justification théorique et à la mise en oeuvre numérique de méthodes d'approximation adaptées à ces problèmes. On s'intéresse en outre, au couplage de ces modèles au sein d'un système d'information intégré sous WEB, avec les outils les plus récents en visualisation, traitement, consultation, indexation et structuration de données, etc... Ce système d'information intégré avec les codes de simulation ainsi obtenus font l'objet de validation sur des cas réels en liaison avec des professionnels du secteur.

Ces problématiques de l'eau constituent un domaine prioritaire caractérisé par la diminution de cette ressource, son utilisation intensive ainsi qu'aux divers risques qui lui sont liés (pollution, inondation, etc.). Qu'il s'agisse de préserver l'eau pour l'irrigation, d'aménager un bassin versant, de construire un barrage pour le stockage de l'eau ou pour diminuer les risques d'inondation, de vouloir oxygéner un lac eutrophe, de recharger une nappe phréatique ou de la dépolluer, tout effort de compréhension fine de ces problématiques passe par une approche intégrée de l'information qui seule, offre une vision globale des divers composants de l'écosystème étudié :

- modélisations physique et numérique,
- simulation numérique (analyse EDP<sup>1</sup>, solveurs algébriques, MNT<sup>2</sup> et maillages, HPCN<sup>3</sup>),

<sup>1</sup>Equations aux dérivées partielles

<sup>2</sup>Modèle Numérique du Terrain

<sup>3</sup>High Performance Computing Network

- SGBD<sup>4</sup>, SIG<sup>5</sup>, vision, données expérimentales,
- évaluations d'impact, données socio-économiques et indicateurs, etc...

Chacun de ces domaines est un gisement d'études et de recherches potentielles. Néanmoins dans le cadre de cette action Cosivie, nous nous intéressons, du point de vue Recherche, uniquement aux aspects Modélisation Numérique, Algorithmique et concept d'un système d'information intégré. Les autres aspects sont considérés comme des outils à maîtriser et à utiliser pour une meilleure valorisation des logiciels développés. L'objectif est ainsi d'associer, dans le cadre d'architectures intégrées, les modèles de simulation numérique existants ou à développer avec les outils les plus avancés de pré et post traitement de données. Il s'agit de tendre vers la construction de simulateurs virtuels de systèmes physiques aptes à rendre compte de toute la complexité des phénomènes modélisés. La validation et la calibration de ces simulateurs constituent aussi une des tâches à assurer. Ce volet implique une collaboration avec les professionnels du secteur, détenteurs des mesures de terrain. Les informations extraites de ces données « mesures » du monde réel caractérisant le phénomène physique permettent de corroborer les réponses de la simulation numérique avec la réalité.

Sur la thématique des ressources en eau, nous nous intéressons aux problèmes du type écoulement de surfaces (crues, inondations, retenues d'eau, régimes fluviaux et torrentiels, régimes estuariens), infiltration (milieu poreux, nappes aquifères, pollution). Ces problèmes sont principalement régis par des équations aux dérivées partielles non linéaires instationnaires dans des domaines tridimensionnels pouvant être à frontière libre. Ces modèles prennent en compte des données géométriques, morphodynamiques, hydrométéorologiques, etc. Outre les aspects modélisation mathématique et numérique de ces problèmes, se pose ainsi la question du traitement de données pour la modélisation des bassins versants, les modèles numériques de terrain, etc. Le couplage interactif entre les modèles de simulation numérique développés et les outils de pré et post traitement de données, existants ou à adapter, y apporte une réponse appropriée.

Les travaux de l'action Cosivie porte ainsi sur les thèmes suivants :

- Modélisation mathématique et numérique, basée sur une connaissance approfondie du phénomène « physique » traité, utilisant essentiellement les équations de conservation de la mécanique des fluides (Navier-Stokes, Euler, Saint-Venant) auxquelles s'ajoutent des modèles de clôture de la turbulence avec un effort particulier sur les conditions aux limites et initiales afin de restituer des modèles « physiquement admissibles ».
- Développement de méthodes numériques nouvelles pour calculer des écoulements à surface libre en eaux peu profondes décrits par les équations de type Saint-Venant.
- Développement de méthodes numériques nouvelles pour modéliser le problème de l'aération des retenues d'eau soumises au phénomène de l'eutrophisation : équations de Navier-Stokes tridimensionnelles instationnaires avec injection de bulles d'air (modèles diphasiques, multi-échelles, etc...).
- Développement de modèles d'écoulements estuariens ( milieux densimétriques eau douce-eau de mer, marées, thermique, turbidité, tridimensionnel, instationnarité, transport de sédiments, transport de polluants, frontière libre, envasement, etc...).
- Développement de modèles de bassins versants pour décrire des écoulements de surface ( Saint-Venant, rupture de digues, inondations, interaction simulation numérique-vision par ordinateur, optimisation et contrôle, ...).
- Méthodes d'approximation de systèmes aux dérivées partielles avec des estimateurs d'erreur et des techniques d'optimisation dans un environnement éléments/volumes finis impliquant spécifiquement la maîtrise de systèmes de générations de maillage et de représentation graphique très élaborés pour le couplage de modèles multidimensionnels.
- Analyse algorithmique et développement d'outils de programmation parallèle sous MPI.

<sup>4</sup>Système de Gestion de Base de Données

<sup>5</sup>Système d'Informations Géographiques

- Développement de concept d'architecture logicielle et de système intégré en standalone et via le web : Intégration d'outils de traitement de données, des fonds documentaires hétérogènes existants et à venir traitant les aspects liés aux ressources en eau et à l'environnements. Ce système sera accessible, diffusable sur le web et surtout exploitable en tant qu'aide aux prises de décisions socio-politiques ou socio-économiques, ainsi qu'à la production d'informations et de savoir à des fins de modélisation et de simulation.

## 3. Fondements scientifiques

### 3.1. Introduction

L'action COSIVIE, considère les problèmes physiques liés à l'eau en vue de les analyser, modéliser sur le plan physico-mathématique, examiner les aspects mathématiques qui y sont liés, approximer numériquement les opérateurs en jeu et faire des estimations d'erreurs associées. Pour cela le but est de développer des schémas numériques de résolution basés sur les méthodes de discrétisation spatio-temporelles (éléments finis, volume finis, différence finis, méthodes spectrales, ...), ainsi que des solveurs numériques robustes, implémenter les schémas en question dans un cadre de calcul scientifique (scalaire ou parallèle), intégrer les technologies de l'information (SIG, SGBD, vision) dans un environnement logiciel convivial servant de « simulateur ».

Ce qui caractérise un tel « simulateur », c'est son architecture logicielle basée sur la possibilité d'intégration d'éléments logiciels (composants logiciels) provenant de sources différentes et par la prise en compte des systèmes informatiques existants. Il implique l'intégration et l'interactivité entre des outils très divers mais complémentaires. Au lieu d'un énorme outil multifonctions, il est basé sur la sélection ou le développement d'un ensemble de technologies permettant, par assemblage au sein d'un entrepôt de données (Figure 1), la création d'un système d'informations intégré adapté aux besoins spécifiques des utilisateurs et aux moyens de calculs disponibles.

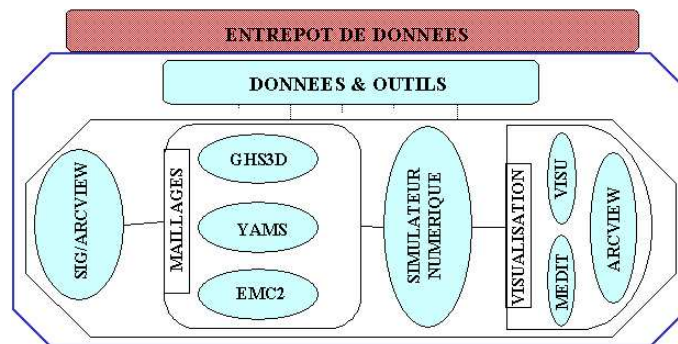


Figure 1. Entrepôt de données

Ceci implique des collaborations pluridisciplinaires qui paradoxalement, ne sont pas largement répandues alors que pourtant, les Mathématiques Appliquées ne sont pas spécialisées par domaine technique. Par exemple, l'écoulement des fluides multiphasiques en milieux poreux donne lieu à des systèmes d'équations de même nature que la modélisation d'un écoulement pétrolier ou d'une nappe phréatique. Les deux simulateurs

correspondant auront de nombreux éléments en commun. Les Mathématiques Appliquées permettent d'unifier et de généraliser les outils. Un travail d'ergonomie et d'adaptation est néanmoins nécessaire pour passer d'un domaine à l'autre. Une bonne analyse et une bonne organisation permettent de minimiser considérablement ce travail. La contrepartie nécessaire à l'approche pluridisciplinaire est la possibilité de construire ou d'acquérir les outils adaptés à un secteur donné à partir de composants généraux ou développés pour d'autres secteurs. Ceci permet une forte capitalisation de l'expérience acquise et de véritables transferts ainsi que l'ouverture de nouveaux champs de recherche dans les disciplines concernées. Le concept de système d'informations à travers ses outils de pré et post processing (SIG, SGBD, & Vision) permet d'une part d'extraire de manière automatique les informations nécessaires aux modèles de simulation et d'autre part de vérifier et de caler éventuellement en temps réel les résultats de ces simulations en les corroborant avec des paramètres extraits ou identifiés. L'intégration données-modèles va donc dans le sens d'une meilleure adéquation entre les codes développés et la réalité physique.

Dans cette optique générale, les sujets de recherche de l'action COSIVIE durant la période 2001-2002 se sont orientés autour des axes décrits ci-dessous.

### 3.2. Modélisation et simulation numériques

Les modèles de simulation numérique ont évolué vers une prise en charge plus complète des problèmes physiques qu'ils approchent en tenant compte de leur complexité (couplage de modèles physiques, aspect tridimensionnel instationnaire). Le développement de tels modèles de simulation numérique s'appuie certes sur les techniques de modélisation mathématique mais aussi sur la capacité sans cesse grandissante des outils proposés par les technologies de l'information. La modélisation mathématique met en oeuvre une approche pluridisciplinaire. Elle implique, d'un côté, une connaissance approfondie du phénomène « physique » traité, de ses variables d'état et des lois qui relient ses variables entre elles, et elle nécessite, d'un autre côté, la maîtrise des outils conceptuels exprimant ces lois par un système « consistant » de relations. Les modèles physiques abordés dans nos applications sont essentiellement régis par les équations de conservation de la mécanique des fluides (Navier-Stokes, Euler, Saint-Venant) auxquelles s'ajoutent des lois constitutives, des lois d'état et des modèles de turbulence suivant le cas considéré ; un effort particulier sur les conditions aux limites et initiales doit aussi être déployé afin de restituer des modèles « physiquement admissibles ». L'approximation d'un problème amène à privilégier certaines des variables et des lois et à prendre au sens faible les autres lois. Ces choix, transparents sur le problème continu réel, sont déterminants sur la qualité des résultats finaux. On peut ainsi obtenir une meilleure information qualitative sur certaines variables au détriment des autres. Le choix de privilégier telle ou telle de ces variables est lié souvent à des considérations physiques ou parfois de facilités numériques. Notre approche consiste à identifier les variables principales pouvant être calibrées par les outils, existants ou à adapter, de pré- ou post-traitement numérique. Cette approche nécessitera parfois le développement de nouvelles méthodes numériques mixtes ou hybrides. La simulation numérique proprement dite met en oeuvre des techniques qui se rapportent, pour l'essentiel, aux méthodes d'approximation des systèmes d'équations différentielles ou aux dérivées partielles et aux techniques d'optimisation. Sur le plan de l'informatique, ces méthodes nécessitent une maîtrise parfaite des outils de programmation algorithmique (projet ALADIN) ainsi qu'une grande puissance de calcul pour faire « tourner » le modèle numérique. Ces techniques impliquent aussi spécifiquement la maîtrise de systèmes de générations de maillages et de représentation graphique très élaborés pour l'analyse fine des résultats (projet GAMMA).

### 3.3. Techniques algorithmiques et calcul intensif

En calcul scientifique, la parallélisation des codes existants ou en cours de développement et leur implémentation sur des machines parallèles vont certes réduire les temps de calcul mais aussi vont permettre d'une part d'augmenter intrinsèquement la taille des problèmes traités et d'autre part de simuler plusieurs cas et par conséquent, améliorer le calibrage de ces codes afin de restituer des solutions proches de la réalité. En effet, pour une méthode donnée, l'amélioration de la précision de la solution calculée passe souvent par



l'augmentation du nombre d'inconnues. Par ailleurs, ces solutions précises peuvent ainsi servir de solution de référence pour la validation de résultats d'une approche différente et plus économique du problème traité. Une première phase consiste à reprendre les algorithmes déjà établis, les analyser et ensuite décider de la stratégie de parallélisme à mettre en oeuvre. Il est à noter que de plus en plus, nos algorithmes sont en amont, pensés pour une parallélisation éventuelle ; ceci facilite la phase d'algorithmique parallèle. L'implémentation de celle-ci sur des machines parallèles va nécessiter (si cela n'est déjà fait dans certains codes) d'intégrer dans des logiciels déjà opérationnels la plupart du temps en mode scalaire, les protocoles de communication type MPI/PVM ou HPF et des bibliothèques de solveurs algébriques parallélisés, disponibles en général dans le domaine public, ceci afin d'assurer la portabilité et garantir ainsi l'investissement réalisé. En effet, un aspect fondamental concerne le choix de standards de programmation qui permettent tout à la fois efficacité de l'exécution, fiabilité et réduction notable de la programmation, portabilité des codes depuis les réseaux de stations de travail jusqu'aux super-ordinateurs et leur réutilisation. Les choix se sont portés sur des standards maintenant bien établis et diffusés dans le monde : l'expression du parallélisme est principalement basée sur le standard MPI. Ce standard a été adopté et installé par la plupart des constructeurs pour son niveau de diffusion, d'universalité et de portabilité dans le domaine du HPCN ainsi que pour la disponibilité, dans le domaine public, d'outils et de bibliothèques associés, comme par exemple SCALAPACK, PETC, SOLVEBLOCK, PARASOL, etc. La parallélisation des procédures de calcul utilise au maximum ces bibliothèques de solveurs parallèles. L'acquisition de la HP V2250 (16 proc Risc PA 800 8Go RAM) va dans le sens de cette stratégie. En effet, cette machine est un vrai ordinateur parallèle de par son architecture interne en cross bar, le nombre de processeurs disponibles, sa mémoire partagée et surtout par ses bus pour les I/O entre les différents processeurs ; ce dernier point étant absent réellement dans une machine parallèle virtuelle constituée en général d'un cluster de stations ou de PCs sous réseau internet. Un effort a été fourni pour exploiter au mieux la machine en particulier par la mise en oeuvre de points techniques délicats (meilleure gestion des I/O, optimisation de la performance par une meilleure connaissance des Caches et du flux de données entre la mémoire et les caches, etc...). Ainsi, on devrait gagner un facteur d'échelle en temps réel sur les problèmes actuellement traités sur nos stations de travail (ou sur les petits serveurs de calcul HP de type C ou J) en mode scalaire ou parallèle virtuelle. Ceci fut vérifié par la comparaison entre les 2 architectures de calcul entre le serveur parallèle V2250 et un réseau de stations sous Unix (par ex les HP du bâtiment 16) ou de PCs sous Linux ou sous WinNT configurant une machine parallèle virtuelle ; les résultats obtenus montrent que les performances temps réel seront nettement améliorées sur le V2250 et ce indépendamment de son aspect mémoire partagée, qui est un plus pour une programmation aisée en calcul parallèle.

### 3.4. Architecture Logicielle et Système intégré

Historiquement, nous nous sommes basés sur les acquis du travail de la EEDB European Electromagnetic Data Base (EEDB - <http://squatina.inria.fr:8000/EEDB.html>) pour la conception de workshops virtuels dans les domaines des sciences de l'ingénieur. Ce travail consistait en la définition de la structure et de la mise en place d'une plateforme avec un accès interactif via le protocole WWW incluant des logiciels graphiques 2D/3D. Cette activité à caractère « informatique » est motivée par la transversalité et la multidisciplinarité des thématiques applicatives traitées dans COSIVIE. Notre investissement se concentre sur le côté conceptuel des infrastructures et de plateformes intégrées. Le travail entamé dans le projet européen ESIMEAU sur l'architecture intégrée offre un cadre idéal de continuité. Cette architecture s'articule autour de deux types de module, l'un générique avec les sources de données, les SIG et la technologie WEB et l'autre spécifique avec les modèles, solveurs numériques et outils (maillages, graphiques) liés à une application (Eutrophisation, Bassins Versants, etc). L'intégration se fait via des interfaces java assurant la meilleure portabilité avec un effort particulier sur les interfaces entre les SIG, source de données et les modèles numériques. Un prototype de ce système intégré client/serveur sous un WEB est en cours de développement, il utilise les technologies d'indexation de documents XML. Le prototype en « Stand Alone » est déjà fonctionnel sous WinNT, son extension sous Unix est en cours.

## 4. Domaines d'application

Le programme de travail de cette action est dirigé vers un domaine applicatif bien ciblé : les ressources en eau et leur gestion. Il s'appuie sur des programmes européens et bilatéraux et le partenariat avec des professionnels du secteur. Mais l'approche portant sur le développement d'un « simulateur » est générique, sa transposition vers d'autres domaines d'application est immédiate. On peut citer toujours dans des domaines voisins : l'aménagement du territoire (côtes, bassins versants, etc...), les transports de polluants, de sédiments, etc. Mais on peut citer aussi des domaines connexes comme la dynamique des populations, l'étude des espèces vivants dans les milieux considérés (espèces halieutiques), la gestion et la modélisation des ressources énergétiques, etc.

## 5. Logiciels

Nous donnons ci-dessous une liste de logiciels réalisés au cours de ces deux dernières années dans l'action COSIVIE.

NS2DCA-(u-p) : (Voir sections 6.2, 6.3) Logiciel de résolution des équations de Navier-Stokes en 2D en formulation vitesse-pression, utilisant la méthode des caractéristiques pour la discrétisation temporelle et la méthode des éléments finis continus P1/P1 bulle en vitesse pour l'approximation spatiale. A chaque pas de temps, on se ramène à la résolution d'un schéma des caractéristiques et d'un problème de type Quasi-Stokes. On fait appel pour ce dernier à la méthode d'Uzawa combinée à un gradient conjugué avec préconditionnement de Cahouet-Chabart. Les systèmes linéaires sont ensuite résolus avec la méthode du gradient conjugué préconditionnée avec Cholesky incomplet. L'adaptation de ce logiciel aux problèmes traités dans le cadre de l'action COSIVIE, comporte plusieurs variantes :

- Variante semi-compressible comportant la résolution d'une équation de transport sur la densité en utilisant la méthode des caractéristiques.
- Variante diphasique pour le traitement d'un écoulement diphasique eau-bulles d'air, en tenant compte de l'effet des bulles par le biais de termes de correction déterminés à partir des modèles diphasiques ; ces termes sont un terme source représentant la force d'Archimède et un terme, lié au taux de présence des bulles d'air, intervenant au niveau des facteurs de convection et de diffusion.

NS3DCA-(u-p) : (Voir sections 6.2, 6.3) C'est un logiciel INRIA (M3N). Ce logiciel consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes en 3D utilisant les mêmes techniques que le logiciel NS2DCA-(u-p).

NS2DCA-( $\omega, \psi$ ) : (Voir sections 6.2, 6.3) Logiciel de résolution des équations de Navier-Stokes en 2D en formulation vorticité-courant utilisant la méthode des caractéristiques pour la discrétisation temporelle et la méthode des éléments finis  $C^0$  stabilisée pour la discrétisation spatiale.

Dans la suite, on donne une liste des plus importants logiciels utilisés et/ou adaptés aux besoins de notre équipe :

FESWMS : (Voir section 6.4) Le code FESWMS (Finite Element Surface Water Modeling System) provient du domaine public. Il consiste à résoudre les équations de Saint-Venant en (U,V,H), linéarisées par la méthode de Newton et discrétisées par des éléments finis P1 pour H (hauteur d'eau) et P2 pour U et V (composantes de la vitesse). La discrétisation en temps s'effectue par le schéma de Cranck-Nicolson, le système linéaire ainsi obtenu est résolu par la méthode d'élimination de Gauss combinée à la méthode frontale ce qui permet de réduire l'espace mémoire nécessaire à la résolution. Le traitement de la condition initiale est très important pour

la convergence de la méthode de Newton. On peut soit initialiser les vitesses  $U$  et  $V$  ainsi que la hauteur  $H$  sur chaque noeud du domaine par des valeurs données, soit faire un « démarrage à froid » en donnant la même élévation d'eau non nul sur tous les noeuds et une vitesse nulle partout.

Deux types de frontière sont distingués dans ce code :

- Une frontière solide sur laquelle on donne une condition d'adhérence ( $U=0$ ,  $V=0$ ) ou une condition de glissement en donnant uniquement une vitesse tangentielle non nulle ; la hauteur d'eau n'est pas connue sur ce type de frontière.

- Une frontière ouverte composée généralement par la section d'entrée et la section de sortie où les types des conditions aux limites dépendent du nombre de Froude  $Fr$  (si  $Fr < 1$ , on se donne  $U$  et  $V$  à l'entrée et  $H$  à la sortie ou on fixe la hauteur  $H$  et une seule composante de la vitesse (tangentielle ou normale) à l'entrée ; si  $Fr > 1$ , la sortie doit rester libre,  $U$ ,  $V$  et  $H$  étant fixés à l'entrée). Ces conditions sont dictées essentiellement par la méthode des caractéristiques, chaque inconnue du système ayant son domaine de dépendance caractérisé en fonction des différents types d'écoulements (subcritique, critique, supercritique).

EMC2 : (Voir section 6.6) EMC2 est un logiciel INRIA (M3N) d'édition de maillages et contours en 2 dimensions. Il permet de générer interactivement des maillages bidimensionnels en définissant la géométrie, discrétisant les contours et affectant les sous domaines et numéros de référence. Ces maillages, formés de triangles ou de quadrangles, sont de type grille ou de type Delaunay-Voronoi. Il est également possible, d'éditer un maillage en ajoutant, supprimant ou déplaçant les sommets, et en lui appliquant des transformations affines : symétrie, rotation, etc. Ce logiciel utilise la bibliothèque F3D sous X11 et son portage sous MS-SDK a été effectué (COSIVIE).

VISU : (Voir section 6.6) VISU est un logiciel INRIA (GAMMA) de visualisation des maillages et des résultats numériques. Il présente différents menus interactifs qui permettent de définir les paramètres (décoration, tracé d'isovaleurs ou de vecteurs, etc.) de la visualisation 2D/3D et de lire différents types de base de données topologiques et de solutions et de les associer dans des fenêtres pour la visualisation, autrement dit, de créer des solutions associées (carte des locaux, carte des qualités des éléments, carte des références aux sommets ou aux éléments) et de définir des « fonctions » courbes ou surfaces en 2D/3D avec différents types de paramétrisation. Ce logiciel utilise la bibliothèque F3D sous X11 et son portage sous MS-SDK a été effectué (COSIVIE).

ARCVIEW : ArcView est un système d'informations géographique (SIG) commercial qui présente un certain nombre de fonctionnalités telles la visualisation, l'exploration, l'interrogation et l'analyse spatiale des données, la consultation d'une base de données stockée dans des tables propres au logiciel et notamment d'autres bases de données. ArcView dispose de Avenue, son propre langage, ou d'un pré-compileur Basic dépendant de la version ; il a été développé par la société (ESRI) et il est disponible sous Windows et Unix.

GHS3D : GHS3D est un logiciel INRIA (GAMMA) de maillage automatique en tétraèdres, il permet de générer en background des maillages 3D d'un domaine défini par une discrétisation de sa surface. La visualisation des maillages se fait par VISU. Il s'appuie sur un input important, le maillage de la surface du domaine ; celui-ci est donc fourni par l'assemblage de ses composantes qui peuvent être générées par EMC2 ou YAMS.

YAMS : YAMS est un logiciel INRIA (GAMMA) destiné à la génération des maillages de surfaces courbes. La donnée est une triangulation ou quadrangulation de surface, sur laquelle sont appliquées des modifications topologiques et géométriques. Le but est d'obtenir un maillage simplifié ou enrichi correspondant à la frontière d'un domaine donné. Son output peut être visualisé par VISU ou MEDIT.

MEDIT : (Voir section 6.6) MEDIT est un logiciel INRIA (GAMMA) qui permet de visualiser tout maillage (2D, 3D ou de surface) conforme (au sens des éléments finis) ou non, dans une fenêtre graphique qui lui est propre et éventuellement plusieurs maillages dans des fenêtres graphiques indépendantes. L'utilisateur pourra agir sur l'objet visualisé soit en changeant son apparence, soit

en effectuant des transformations (rotation, translation, coupe, zoom, ...). Ce logiciel utilise la technologie OpenGL et son portage sous MS-SDK a été effectué (COSIVIE).

MySQL : MySQL est un SGBDR (Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles) client-serveur. Le serveur est une application installée sur l'ordinateur où sont stockées les données, il attend des requêtes des clients, accède à la base pour exécuter la requête du client et lui fournir une réponse. Le client est un programme installé sur un ordinateur qui se connecte par l'intermédiaire d'un réseau au serveur pour effectuer une requête. Il comporte un serveur SQL (Structured Query Language), des programmes clients pour accéder au serveur, des outils d'administration et une interface de programmation pour écrire des applications. MySQL est un logiciel public disponible sous UNIX et MS-WINDOWS.

## 6. Résultats nouveaux

### 6.1. Introduction

Les résultats portent sur la période 2000-2002 et concernent des travaux sur :

- de nouvelles approches numériques pour les équations de Navier-Stokes adaptées aux problèmes ciblés,
- deux formulations pour le traitement de l'eutrophisation par aération mécanique (l'une monophasique, l'autre diphasique),
- des modèles multidimensionnels d'écoulements de rivières et leur couplage automatique par le biais d'estimateurs a posteriori,
- le développement d'algorithmes parallèles sous MPI,
- la construction d'un prototype d'intégration de logiciels liant un SGBD, un SIG, un mailleur et un code Navier-Stokes 2D et des outils de visualisation pour le post-processing.

Ils se sont concrétisés par 10 publications parues ou acceptées dans des revues internationales, 5 soumises ainsi que 24 communications avec actes pour cette période. Les thèses soutenues sont au nombre de 6 ([11],[57],[65],[68],[12],[13]) dont une en co-tutelle. En parallèle, les contrats européens domiciliés au sein de l'action Cosivie ont nécessité un effort particulier : fin du projet Esimeau et Crucid, lancement du projet Wadi (18 rapports techniques).

### 6.2. Méthodes numériques pour les équations de Navier-Stokes

**Participants :** M. Amara, F. El Dabaghi, M. Abdelwahed, M. Hassine, Ch. Kada Kloucha.

**Mots clés :** *Navier-Stokes, conditions aux limites non standard, méthodes mixtes, élément fini, stabilisation, méthode des caractéristiques.*

Le champ abordé dans ce volet concerne les équations de Navier-Stokes bi et tridimensionnelles, stationnaires ou instationnaires en domaines bornés avec des conditions aux limites non standard. Les applications des développements effectués dans le cadre de ces travaux, portent sur les écoulements de surface (fluviaux, torrentiels, estuariens) et les écoulements diphasiques (aération de lac). La non linéarité et l'instationnarité des équations de Navier-Stokes sont traitées numériquement en se ramenant à la résolution d'une suite de problèmes linéaires et stationnaires de type Stokes ou Quasi-Stokes (par semi-discrétisation en temps ou schémas aux caractéristiques). Le développement de solveurs efficaces pour ces derniers problèmes permet ainsi de prendre en charge efficacement la résolution des équations de Navier-Stokes.

L'approche bidimensionnelle nous a amené à nous intéresser à la modélisation en fonction courant-tourbillon appelée plus commodément formulation  $(\omega, \psi)$ . La formulation variationnelle mixte qui lui est associée, est construite sur les espaces naturels suivants :  $\psi \in H_0^1(\Omega)$  et  $\omega \in H^{-1}(\Delta, \Omega)$ . Une telle formulation est bien posée et on a existence et unicité de la solution sans condition de régularité particulière.

L'approximation numérique conforme est par contre pénalisée par la non uniforme coercivité de la forme principale, la conséquence en étant la perte d'un ordre d'erreur dans la convergence de la solution approchée vers la solution exacte. Ceci est particulièrement préjudiciable pour l'approximation basée sur des espaces d'éléments finis du premier degré, qui converge précisément alors à l'ordre 0 (sauf cas particuliers : régularité, convexité). Cette approximation reste néanmoins intéressante car elle est simple et facile à mettre en oeuvre (algorithme de Glowinski-Pironneau). L'introduction d'un terme de stabilisation dans la formulation mixte discrète a permis de lever cet obstacle et de récupérer une convergence optimale tout en conservant les propriétés de l'algorithme initial. La justification théorique et les essais numériques corroborant cette démarche sont présentés dans Amara-El Dabaghi [51], Amara et al. [52]. Une application de cette formulation (figure 2) a été utilisée pour la simulation de l'aération d'un lac avec un modèle monophasique dans Dabaghi [58].

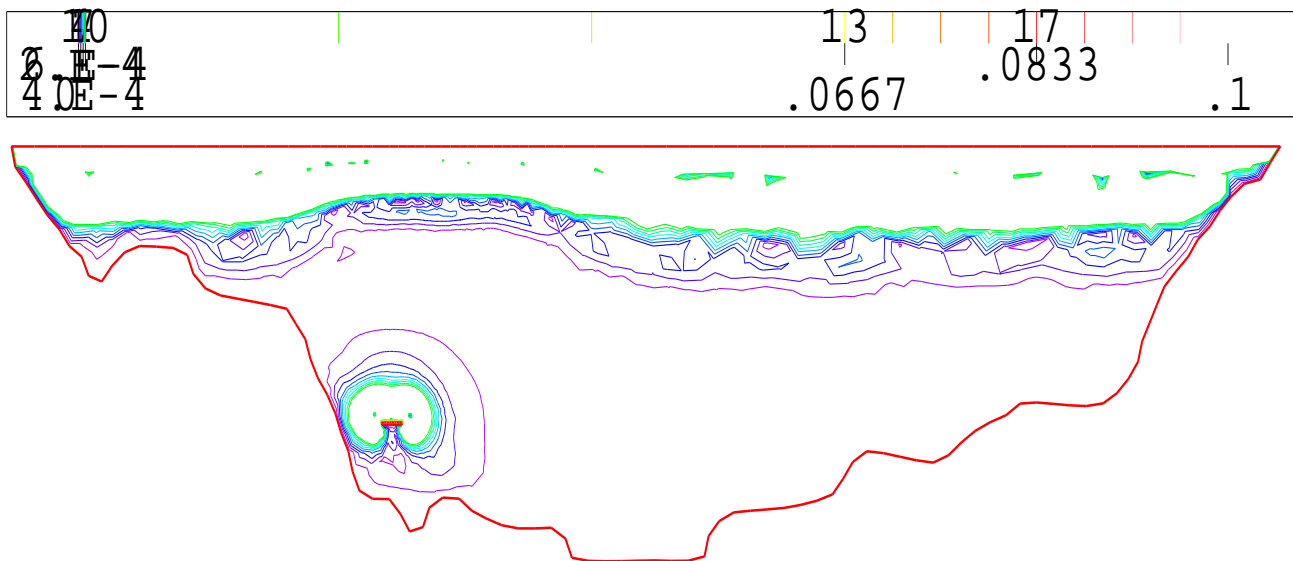


Figure 2. Equations de Navier-Stokes : iso-valeurs de la vitesse,  $Re=100$ ,  $V_{inj}=0.1m/s$

Naturellement la question de l'extension de cette approche au cas tridimensionnel s'est posée. Elle a fait l'objet de la thèse de M. Duloué [65]. Cette approche a fait apparaître les difficultés spécifiques à la dimension 3 et le rôle délicat joué par la fonction courant. Les fonctions courant et tourbillon sont vectorielles, les conditions aux limites dérivées sont du même type que celles existant pour les problèmes d'électromagnétisme. Les éléments finis à utiliser sont d'ailleurs ceux de Nédélec. La technique de stabilisation a pu être adaptée et justifiée théoriquement. Elle a nécessité le développement d'un opérateur de régularisation de type Clément spécifique à l'élément fini de Nédélec (M. Amara-M. Duloué [53]). Ce travail fait l'objet d'une proposition de publication au *Numerisch Mathematik*, en cours de révision [47].

L'autre volet abordé dans le cadre de ce programme de travail a porté sur le traitement de conditions aux limites non standards. Classiquement, les conditions aux limites sont du type Dirichlet homogène sur la vitesse, mais la réalité physique nous amène à des situations où la vitesse ou une de ses composantes est inconnue sur la frontière mais la pression ou la vorticité sont données (ou des panachages de type Robin). Ceci induit mathématiquement à poser des formulations plus adapt es. Nous nous sommes intéressés aux formulations mixtes en vitesse-rotation- pression  $(u, \omega, p)$ , leur cadre permettant de prendre en charge ces

types de conditions aux limites. La discrétisation conforme de ces formulations a nécessité une stabilisation qui assure une convergence de la méthode. Les tests numériques effectués ont montré l'efficacité de cette approche. Ces travaux présentés dans des séminaires [45][46] ou rapport interne [50] ont fait l'objet d'une publication acceptée ainsi que d'une communication au CEDYA2001 (voir Amara et al [19], [49]), d'une publication en cours de révision aux *Mathematics of Computation* ([56]), une communication acceptée à AMIF2002 ([28]) soumise à *Computing and Visualization in Science* ([20]). L'extension à la dimension 3 est en cours et ne fait pas apparaître les difficultés rencontrées avec la formulation 3D en  $(\omega, \psi)$ .

Enfin, les techniques développées dans ce cadre se sont révélées transposables à des domaines voisins portant sur des opérateurs aux dérivées d'ordre 4 avec des conditions aux limites particulières : les modèles visco-élastique du type Oldroyd ou les modèles de plaques de type Kirchhoff-Love et Reissner-Midlin. L'adaptation de ces techniques a permis de gérer le risque de verrouillage numérique spécifique à ces modèles. Des nouvelles formulations ont ainsi été proposées ; elles ont fait l'objet de deux publications dans le *SIAM Journal on Numerical Analysis* [16],[17] et une publication dans *Numerisch Mathematik* [15]. On notera enfin la soutenance de thèse de Mme A. Obeid, thèse portant sur des aspects mathématiques plus théoriques ([12], [21], [55], [54]).

### 6.3. Simulation numérique du traitement mécanique de l'eutrophisation

**Participants :** M. Amara, F. El Dabaghi, M. Abdelwahed, D. Ouazar, M. Hassine, S. Benziada.

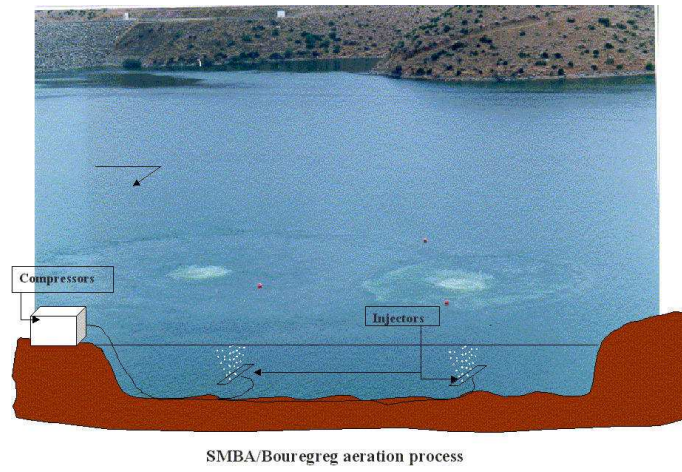
**Mots clés :** *Navier-Stokes, Écoulement diphasique eau-bulles d'air, multi-échelles, élément fini, méthode des caractéristiques.*

On s'intéresse dans ce travail à l'analyse mathématique et numérique d'écoulements de fluides diphasiques. Le problème physique considéré concerne l'eutrophisation des retenues naturelles ou artificielles d'eau (réservoirs, lacs, ...). Les variations climatiques et en particulier thermiques provoquent la détérioration progressive de la qualité de l'eau dans ces retenues. Quand la concentration en oxygène devient inférieure à  $3mg/l$ , la retenue est considérée en phase d'eutrophisation. L'injection d'air sous pression au fond de la retenue, pour réoxygéner les couches profondes, est considérée aujourd'hui comme l'une des techniques les plus prometteuses pour remédier à ce fléau (figure 3). La simulation numérique d'un tel procédé pose d'énormes difficultés dues principalement à la complexité de la modélisation de l'écoulement diphasique (eau-bulles d'air) et les coûts exorbitants des calculs 3D. Dans ce travail, on s'intéresse à l'étude d'un modèle monophasique basé sur les équations de Navier-Stokes semi-compressibles avec des termes de correction diphasique représentant l'effet des bulles libérées dans l'eau. L'idée principale est de prendre en compte la dynamique des bulles d'une part, par une condition aux limites liée à la vitesse d'injection de l'eau (ceci pour simuler le mouvement initial des bulles libérées dans l'eau) et d'autre part par l'introduction de l'effet de la force d'Archimède.

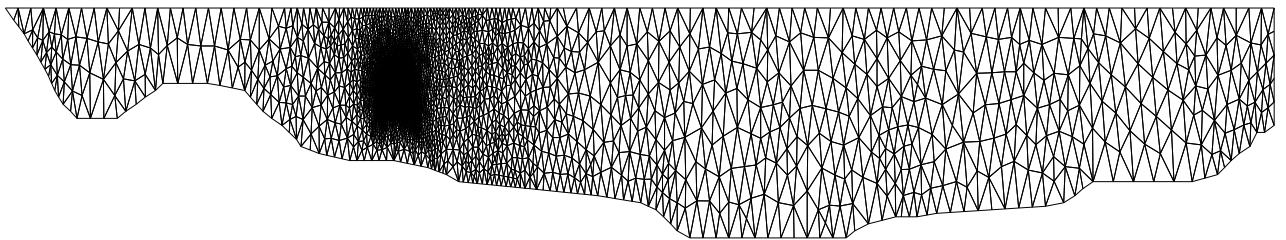
L'analyse des modèles physiques généraux décrivant ce type de problème d'écoulements à deux phases nous a permis de dériver un modèle simplifié à une phase avec terme de correction traduisant l'effet des bulles ; deux approches sont étudiées. Une première approche a pour objectif de montrer l'effet de l'injection des bulles en se limitant simplement à une condition aux limites aux injecteurs. Elle a été présentée et décrite dans Abdelwahed et al (in *Computational fluid dynamics*, [14]). La deuxième approche, plus élaborée, est décrite dans Abdelwahed et al [42], [40] ; elle tient compte de l'effet des bulles par le biais de termes de correction déterminés à partir des modèles diphasiques. Pour l'étude mathématique et numérique des deux modèles présentés, on s'est limité au cas 2D. On a obtenu des résultats d'existence et d'unicité de solutions pour les problèmes continu et discret ainsi que les estimations d'erreur a priori pour chacun de ces deux modèles [24]. La méthode numérique adaptée au code de simulation a été implémentée en Fortran. Des résultats de validation des modèles ont été effectués sur des cas réels ([22], [36]) (coupes 2D du lac de Bouregreg au Maroc, projet européen ESIMEAU) utilisant le logiciel NS2DCA-up (voir section 5.1) (figures 4-7).

Enfin, au vu de la complexité et de la taille du problème numérique à traiter même en 2D, on s'est intéressé à l'analyse algorithmique parallèle du code numérique implémenté avec l'utilisation de la librairie Message Passing Interface MPI (voir section 6.5). Une grande partie de ce travail concerne la thèse de M. Abdelwahed





SMBA/Bouregreg aeration process  
*Figure 3. Schéma du processus d'aération d'un lac*



*Figure 4. Maillage d'une section du lac eutrophe dans l'axe de l'injecteur d'air, cas 2D.*

(thésard INRIA) ; une partie plus réduite porte sur celle de M. Hassine qui comporte aussi l'extension à la dimension 3 du cas monophasique (figures 8-9) utilisant le logiciel ND3DCA-up (voir section 5.1). M. Abdelwahed a soutenu sa thèse le 26 Octobre 2002 [36]. Le problème inverse est en cours de traitement avec pour objectif, la maximisation du tourbillon dans les zones profondes sous la contrainte d'une faible variation des températures. Ceci a pour effet de brasser les couches profondes tout en préservant l'écosystème. Les techniques utilisées sont du type algorithmes topologiques. L'approche de type *Algorithmes génétiques* a aussi été abordée mais elle est trop coûteuse dès la dimension 2.

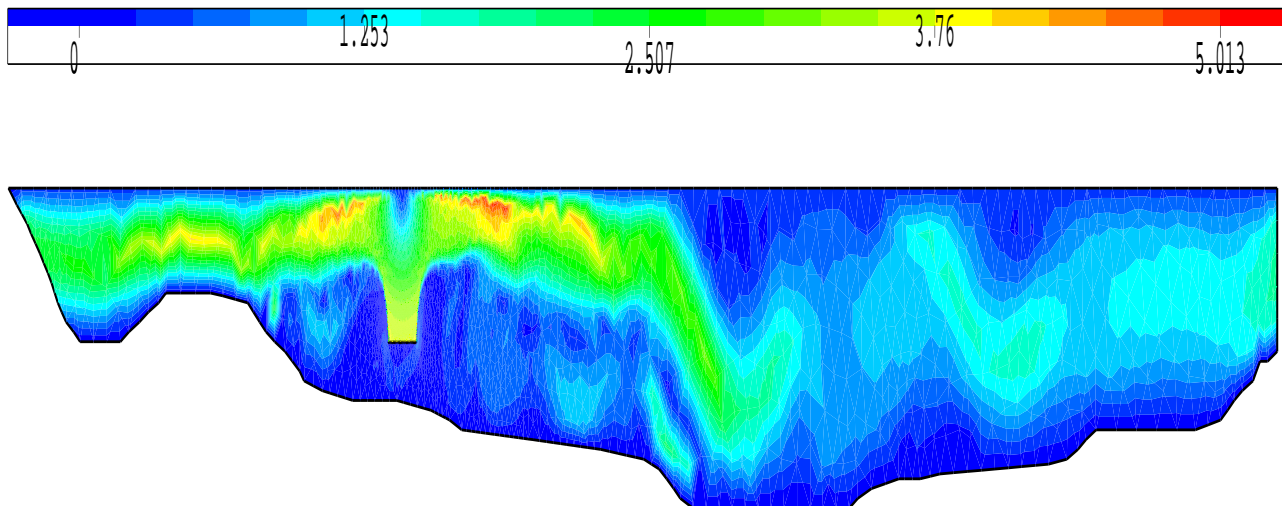


Figure 5. Isovaleurs de la vitesse d'un écoulement avec injection,  $Re=10^6$ ,  $V_{inj}=4m/s$ , Temps=10mn.

A moyen terme, une extension naturelle vers les nappes est prévue : Nappes aquifères, identification de nappes, infiltration de contaminants et polluants, intrusion des eaux salées. Ainsi, la modélisation et la simulation numérique de l'hydrodynamique des nappes et en particulier pour les écoulements multiphasiques en milieux poreux, seront étudiés. Dans cet esprit, un premier travail en 2D a été entamé sur la modélisation numérique d'un écoulement à 2 phases dans un milieu poreux hétérogène ; nous avons validé un schéma numérique basé sur une formulation hybride mixte éléments finis pour la pression-vitesse et volumes finis pour la saturation. Cette étude a été présentée à la conférence SWIKA 2001 [44] où elle fût sélectionnée pour une publication dans *Transport in Porous Media* [43].

#### 6.4. Simulation numérique d'écoulements fluviaux et torrentiels

**Participants :** M. Amara, F. El Dabaghi, D. Ouazar, B. Nakhle, N. Guelmi, S. Talamali, A. El Kacimi, Ch. Kada Kloucha, H. Henine, K. Ider.

**Mots clés :** Navier-Stokes, Saint-Venant, multi-échelles, élément fini, couplage, estimateurs.

Nous nous sommes intéressés à la simulation d'écoulements de rivières principalement sous l'angle hydrodynamique. La simulation numérique 3D n'étant pas envisageable sur tout le parcours d'une rivière, deux



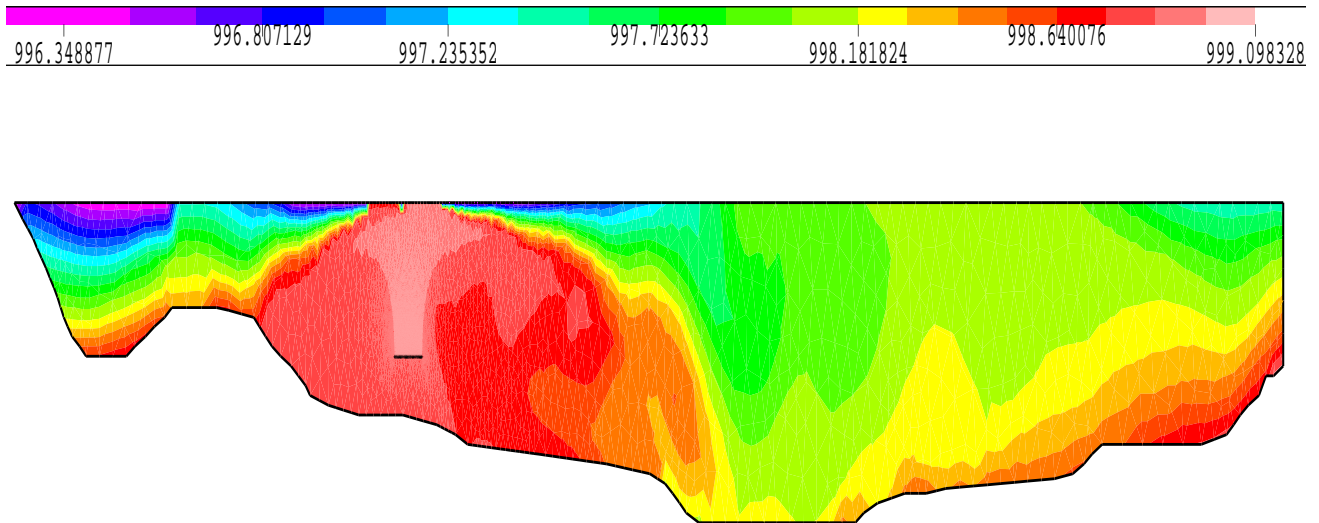


Figure 6. Isovaleurs de la densité,  $Re=10^6$ ,  $V_{inj}=4m/s$ , Temps=10mn.

approches se sont présentées, l'une, classique, porte sur des représentations de type Saint-Venant utilisant des modèles de type 2.5D ou 1.5D, l'autre, nouvelle, concerne le couplage automatique de modèles multidimensionnels nécessitant la maîtrise d'estimateurs a posteriori. Les équations de Saint Venant 2.5D sont issues des équations tridimensionnelles de Navier-Stokes par intégration, sur la hauteur, des variables. Elles supposent que la pression est hydrostatique et que les variations verticales de la vitesse sont faibles. Sous ces hypothèses, on se ramène à un modèle bidimensionnel dont les inconnues sont les champs de vitesses moyennées suivant la hauteur  $U, V$  et la hauteur d'eau  $H$ .

Les équations de Saint-Venant 1.5D, approximation quasi-bidimensionnelle, supposent de plus, que les variations latérales des vitesses sont négligeables. On se ramène ainsi à un modèle unidimensionnel dont les inconnues sont la vitesse moyennée  $U$  et la hauteur de l'eau  $H$ .

Ces modélisations sont classiques et nous les utilisons pour aider à la validation des codes développés par ailleurs. Ainsi, le choix s'est porté sur FESWMS, code numérique libre permettant la résolution des équations de Saint Venant 2.5D. Une adaptation de ce code, en termes de conditions aux limites, a permis d'élargir les champs d'application de ce dernier [13]. Plusieurs cas tests de simulation ont été effectués sur des cas réels (vallée de l'Ourika au Maroc dans le cadre du projet européen Crucid) [59][41][61] ou sur des canaux artificiels académiques (canal à section trapézoïdale ou rectangulaire) [13][67].

La simulation effectuée sur la vallée de l'Ourika est illustrée dans la figure 11 avant l'inondation et dans la figure 12 où on voit nettement l'effet de la crue en aval de l'écoulement ; ce résultat numérique corroborait avec les mesures in situ fournies par l'office Marocaine de la Météo.

Dans le même esprit, une alternative est en cours de développement dans le cadre de la thèse de Nakhle et du postdoc de El Kacimi. Celle-ci fait appel à la méthode des caractéristiques pour la discrétisation temporelle pour aboutir à des problèmes de type Quasi-Stokes non standards. La justification théorique est en progrès [30] et la validation numérique en cours d'implémentation.

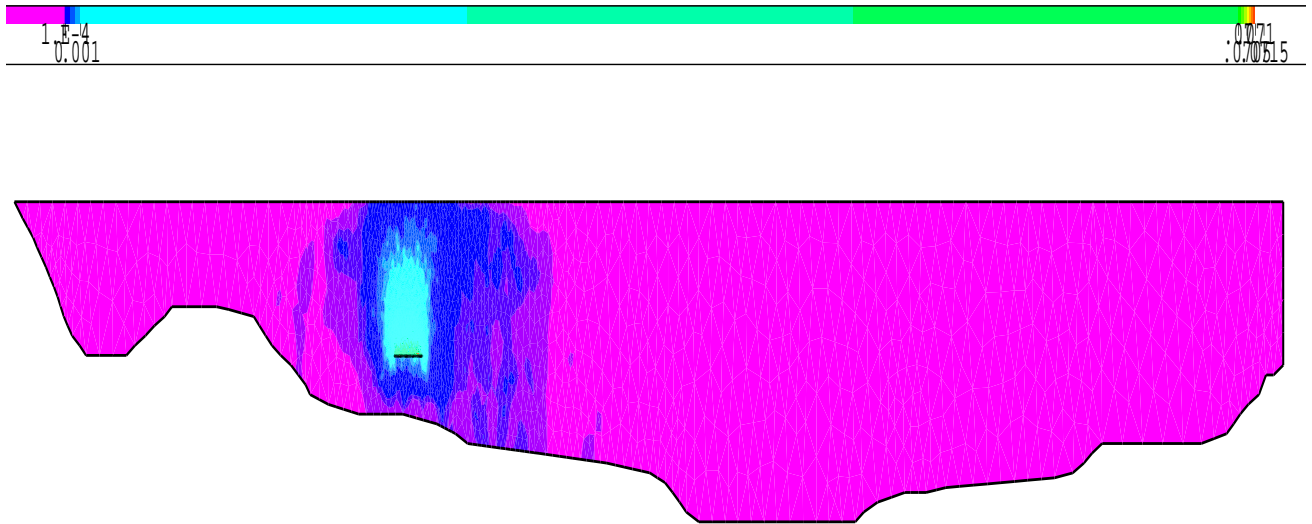


Figure 7. Isovaleurs du taux de présence de l'air après injection,  $Re=10^6$ ,  $V_{inj}=4m/s$ , Temps=10mn.

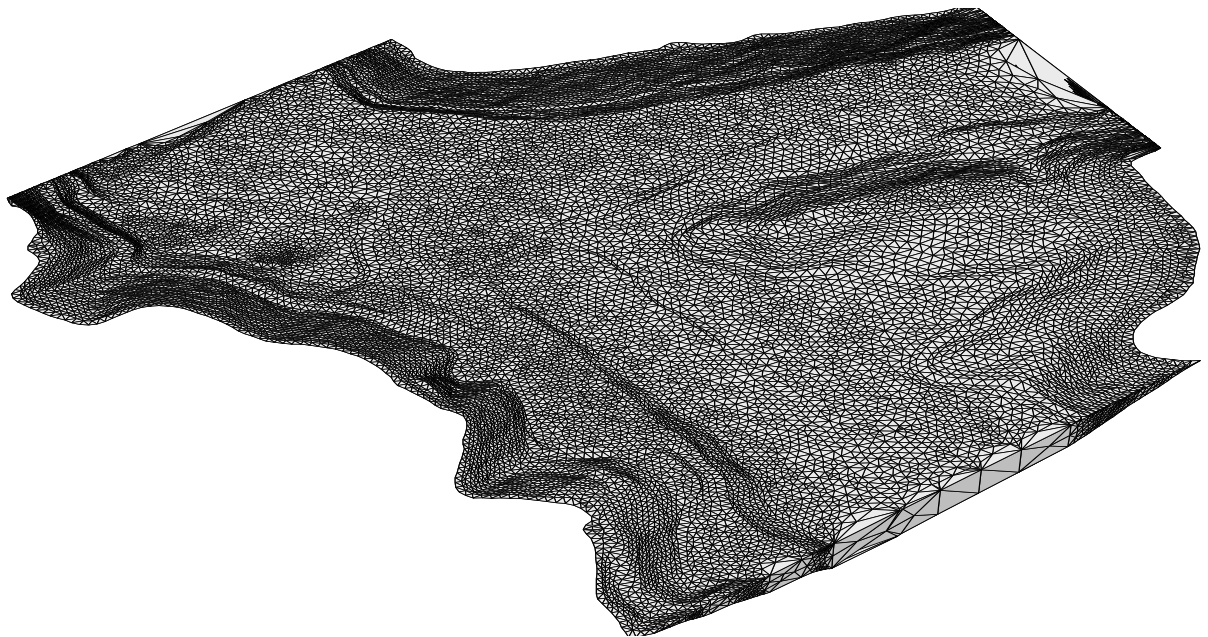


Figure 8. Maillage surfacique du fond du lac, cas 3D

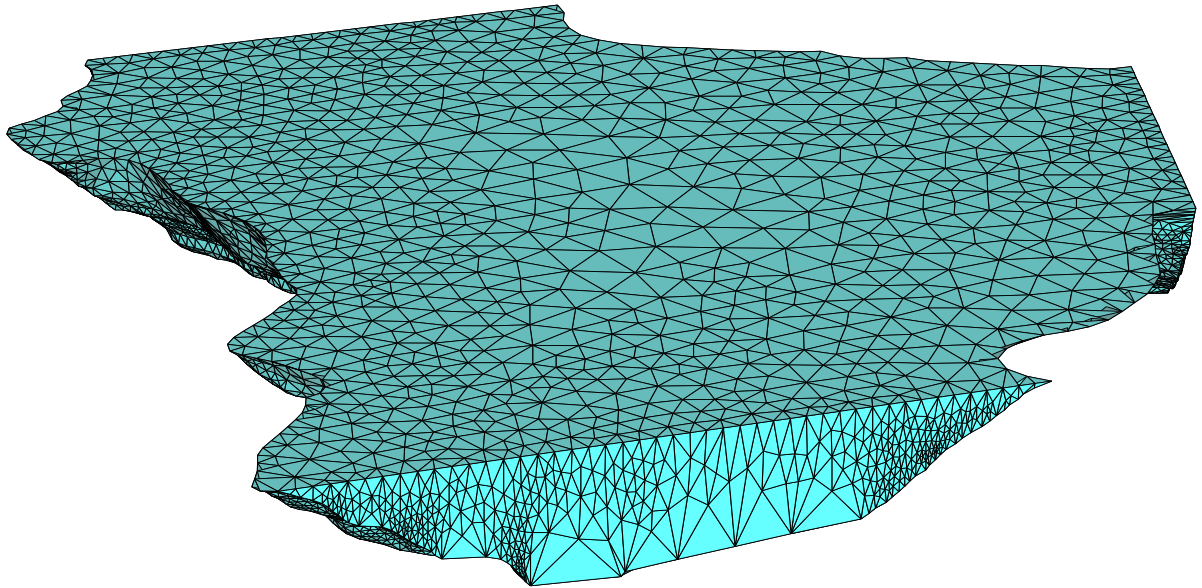


Figure 9. Maillage tétrahédrique du lac, cas 3D.

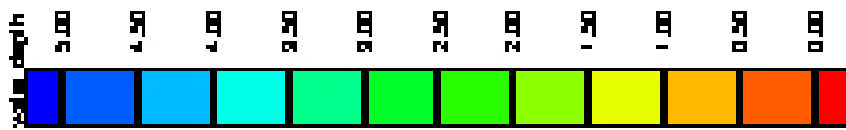


Figure 10.

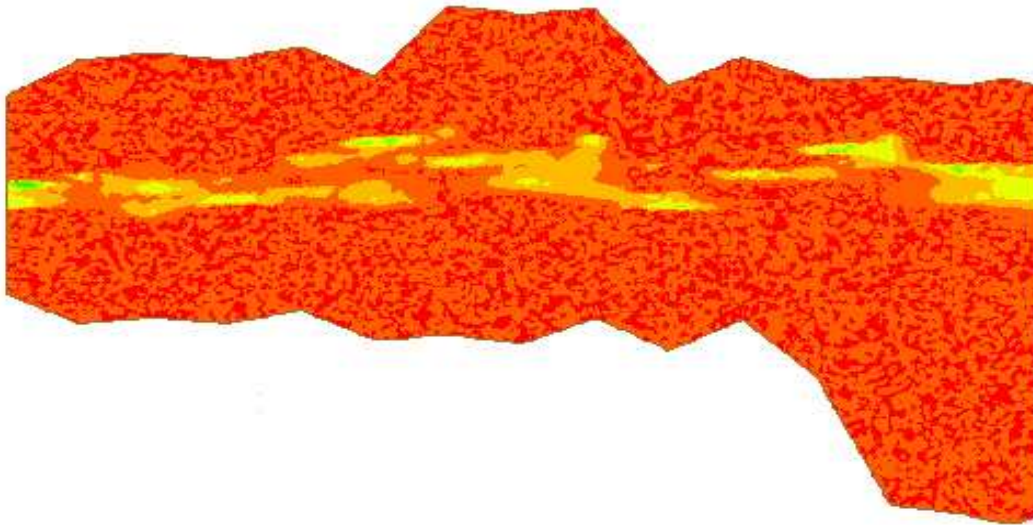


Figure 11. Isovaleurs de la hauteur avant la crue de la vallée de l'Ourika

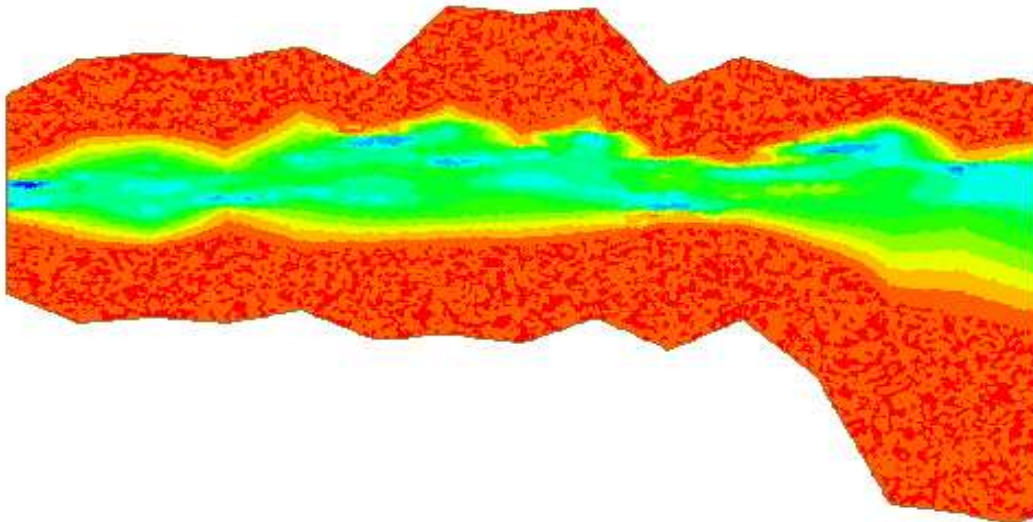


Figure 12. Isovaleurs de la hauteur pendant l'inondation de la vallée de l'Ourika



La seconde approche porte sur le couplage automatique de modèles multidimensionnels. Partant du modèle 3D de Navier-Stokes instationnaires, on construit par le biais d'approximations conformes des modèles dérivés. En se basant sur des fonctions indépendantes de la hauteur, on obtient un modèle 2D horizontal, ce modèle prenant en compte les courbures. En se basant sur des fonctions indépendantes de la variable latérale, on obtient un modèle 2D vertical proche du Saint-Venant 2.5D. En se basant sur des fonctions indépendantes des variables verticale et latérale, on obtient un modèle 1D proche du Saint Venant 1.5D. Les vitesses restent par contre vectorielles et font intervenir les fonctions de base et les autres variables (voir Amara et al [48], [18]). L'avantage immédiat de cette démarche est que l'on peut ainsi définir des estimateurs d'erreur a posteriori permettant de délimiter les zones où une approximation 1D ou 2D est admissible et celles où il est nécessaire d'utiliser une représentation plus fine. La justification mathématique des modèles semi-discrétisés en temps 1D, 2D et 3D est achevée ainsi que la définition des estimateurs d'erreurs entre ces modèles (communications à AMIF2002, CANUM 2002 et au colloque international sur les EDP [25], [26], [27], [29]). La discrétisation spatiale des modèles 1D et 2D a aussi été justifiée et a permis la définition d'estimateurs entre les modèles discret et continu. La phase mise en oeuvre numérique est en cours.

## 6.5. Algorithmes parallèles et calcul intensif

**Participants :** F. El Dabaghi, M. Abdelwahed, M. Hassine, B. Nakhle.

**Mots clés :** *calcul parallèle, MPI, performances, cluster.*

Ce volet porte sur l'algorithmique parallèle pour les différents solveurs déjà développés ou à implémenter, notamment en mécanique des fluides (ESIMEAU, CruCID et WADI). Le but est de renforcer une activité centrée sur l'application des technologies du calcul intensif distribué (HPCN) à la modélisation et la simulation numérique des Hydro-systèmes tels que les crues soudaines, leur annonce, la prévention des inondations, l'aménagement des bassins versants, les études d'impact d'ouvrages éventuels sur l'environnement, la qualité des eaux potables, le traitement de l'eutrophisation des lacs par aération mécanique, etc. Sans trop s'attarder sur la spécificité de ces problèmes, notamment leur grande taille et le besoin crucial d'atteindre des compromis temps réel/grande taille, il est clair que l'algorithmique parallèle des codes numériques apporte des solutions d'autant plus efficaces que l'implémentation peut se réaliser sur des machines adéquates. Ainsi, à titre d'exemple, le calcul intensif HPCN permettra la simulation « rapide » de nombreux scénarii à grande échelle, afin de délimiter les zones inondables et d'envisager les éventuelles mesures de prévention : l'exploitation des codes parallélisés assurera ainsi une meilleure restitution des phénomènes physiques simulés et donc une plus grande fiabilité dans la prévision des crues en vue d'un aménagement optimisé des bassins versants, d'une mise en place de systèmes efficaces d'annonces de crues ainsi que de la hiérarchisation des niveaux d'alerte et des mesures d'accompagnement correspondantes.

Pendant cette période, nous nous sommes intéressés à l'implémentation sous MPI (Message Passing Interface) du solveur ( $\psi - \omega$ ) avec analyse du load-balancing et des performances pour la résolution des équations de Navier-Stokes incompressible [23]. Dans ce code numérique, la résolution du système linéaire consomme environ 90% du temps CPU sur un ordinateur mono-processeur. Par conséquent, on s'est focalisé uniquement sur le traitement parallèle de cette partie du code utilisant le solveur itératif bigradient conjugué (BICG) avec préconditionneur diagonal. Cet algorithme nécessite un grand nombre de multiplications matrice-vecteur et de produits scalaires qui représentent la plus lourde tâche dans la résolution : ainsi nous avons parallélisé l'algorithme de ces opérations avec paramétrisation pour un découpage adaptatif en fonction du nombre de processeurs disponibles. La plateforme testée correspond d'une part à une machine parallèle virtuelle constituée d'un ensemble de stations HP (processeurs Risk) sous UNIX ou de Pc (processeur PENTIUM III) sous Windows NT sous réseau internet/intranet et d'autre part à une machine parallèle type MIMD (HP 9000 V-Class, 16 proc). On présente des résultats obtenus sur un cas d'application avec un maillage de 36864 noeuds et 73728 inconnues sur un réseau de stations (figures 13) et la machine parallèle (figures 14). On remarque le gain considérable obtenu au niveau du temps système entre les deux types de machines et donc sur le temps elapsed. La figure 15 représente les speed-up obtenu pour les deux cas et confirme les conclusions suivantes :

- l'architecture d'une machine parallèle virtuelle ne permet pas de quantifier qualitativement l'overhead virtuel des communications afin de « prévoir » la vraie performance d'un algorithme en terme de « temps réel » ; ceci est dû au fait que l'architecture ne prévoit rien pour les I/O inter-processeurs.
- Le gain important en temps système remarqué sur les résultats obtenus et donc sur le temps elapsed est dû principalement à l'architecture interne en « cross bar » de cette dernière, de sa mémoire partagée et surtout des ses bus pour les I/O entre les différents processeurs ; ce dernier point étant absent dans une machine parallèle virtuelle.

Néanmoins, le recours à une machine virtuelle permet d'attaquer de gros scénarii au prix de performances temps réel.

Par ailleurs, nous nous sommes penchés sur la parallélisation du code FESWMS résolvant les équations de saint-Venant 2.5 D. Le travail consistait principalement à remplacer le solveur de Gauss associé à la méthode frontale par le solveur itératif BICG associé à une structure de stockage type Morse : l'analyse des performances est en cours.

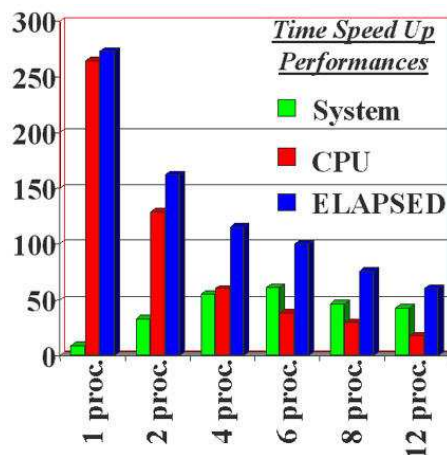


Figure 13. Performances sur un réseau de stations HP

## 6.6. Intégration d'outils et de données

**Participants :** F. El Dabaghi, A. Gharbi, D. Ouazar, N. Souissi, S. Talamali, H. Henine, Z. Karfal.

**Mots clés :** système d'information intégré, système d'information géographique, entrepôt de données, maillage, modèle numérique de terrain, visualisation.

Ce volet a vu la mise en place sur un environnement PC, d'un prototype d'un système d'information intégré liant un entrepôt de données, un SIG (Arcview), des maillages (Emc2,...), des solveurs numériques 2D/3D et des visualiseurs 2D/3D (Visu, ...).

- **ESIMEAU<sup>6</sup>/WADI<sup>7</sup> (Standalone-Client/Client) :** est un Système d'Information Intégré (SII) pour la prise en charge dans un environnement convivial et ergonomique des problèmes relatifs aux ressources hydriques à savoir, les aspects hydrodynamiques liés aux lacs et aux rivières, à l'aménagement des bassins versants et aux moyens de traitement et/ou de prévention des risques, notamment l'eutrophisation et l'inondation. Ce SII a été conçu pour fournir un cadre pérenne, générique, portable et modulaire qui permet aux utilisateurs de l'implémenter pour une

<sup>6</sup><http://www-esimeau.inria.fr>

<sup>7</sup><http://www-wadi.inria.fr>

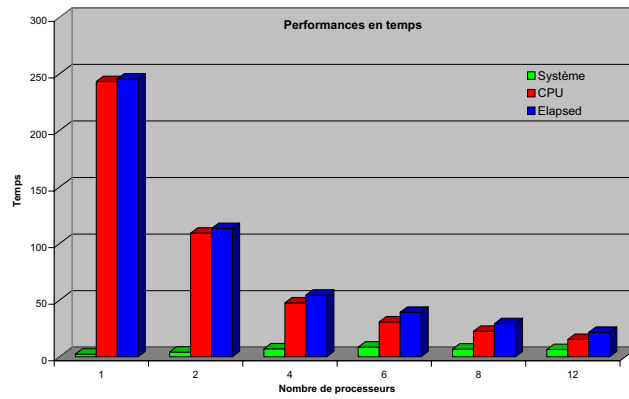


Figure 14. Performances sur la machine parallèle HP 9000 V-class

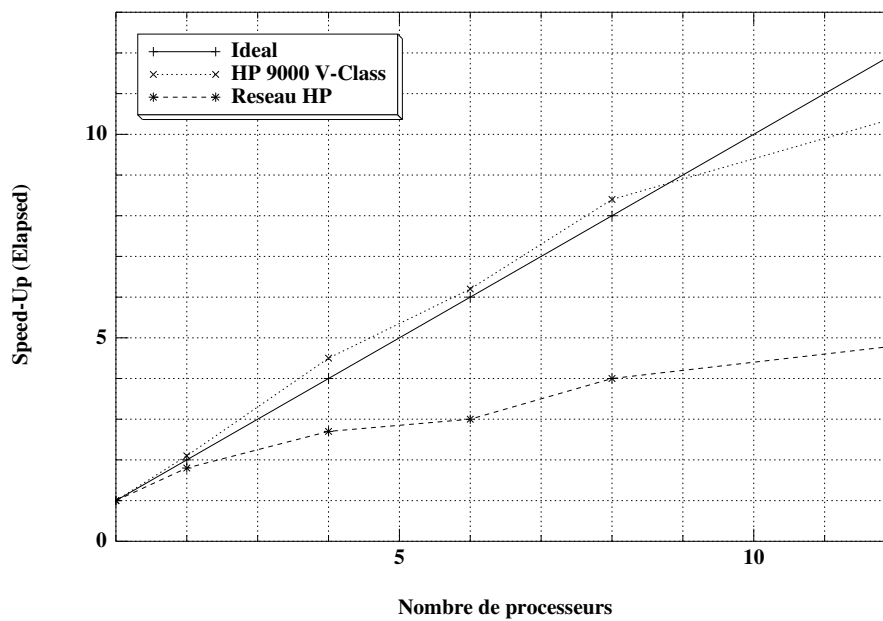


Figure 15. comparaison du speed-up (elapsed)

large variété de problèmes de modélisation ainsi que de développer en son sein de nouvelles applications. Il associe une variété d'outils des technologies de l'information au sein d'une application mère (standalone et distribuée) sous WEB couplant des modèles numériques avancés, des générateurs automatiques de maillage, des visualiseurs graphiques, des systèmes de gestion de données, et des systèmes d'informations géographiques. L'approche adoptée au sein des projets européens ESIMEAU/WADI va dans le sens de l'utilisation de l'approche intégrée de l'information au sein d'une plate-forme générique et évolutive qui offre une vision globale des divers composants traitant ou ayant à traiter l'écosystème étudié : source de données, SIG, vision, modèle numérique du terrain et maillages, modélisation physique et numérique, calcul scientifique et intensif, données expérimentales, évaluations d'impact, données socio-économiques et indicateurs, etc. Le prototype I de ESIMEAU/WADI fonctionne actuellement sur PC/MS-WinNT en mode « Standalone » client-client. Plusieurs rapports ont illustré ces travaux, parmi lesquels on cite un article dans SAMS [63], un papier dans IASTED-AI2003 [31], une communication poster au CANUM 2002 [32], plusieurs mémoires de DEA ou d'Ingénieurs ([64], [66], [37], [38], [39],[69]) et des rapports de contrats européens ESIMEAU et CruCID ([62], [60], [33], [34], [35]).

- **SIMULATEUR NUMERIQUE** : [31], [32], [64], [37], [38] Le modèle de simulation numérique abordé dans le prototype I de ESIMEAU est régi par les équations de conservation de la mécanique des fluides, et principalement celles de Navier-Stokes instationnaires à deux phases (air-eau) avec prise en compte des effets thermiques et de conditions aux limites dans des domaines bidimensionnels ou tridimensionnels. Ce modèle numérique, simulant le traitement de l'eutrophisation par un processus d'aération mécanique, a pour objectif d'optimiser le placement des injecteurs d'air et des débits d'air nécessaires au traitement de ce phénomène. Le modèle numérique adopté est basé sur une approche monophasique corrigée prenant en compte l'effet des bulles d'air dans la phase eau (voir sections 6.2, 6.3). Dans WADI, un autre modèle, FESWMS a été intégré ; il 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 valable pour l'étude de rivières peu profondes, les plaines inondées, les estuaires ou les côtes marines. 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). 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 (voir section 6.4).
- **PORTAGE DE EMC2 & VISU** : [39] Le module d'affichage et d'impression (Fortran3d) a pour but de déclencher l'ordre d'affichage ou celui d'impression. Après le dressage de l'arborescence des différents répertoires de Fortran3d, on s'est focalisé sur l'analyse des modules de pilotage : Unix/X11(P-X11) qui est réservée pour l'affichage, interfaçage imprimante (P-script) propre à l'impression. Les deux modules contiennent des fonctions qui font appel à une fonction commune entre eux. A son tour, cette dernière appelle soit la fonction d'impression en exécutant une commande d'impression accompagné d'un fichier d'interprétation, ou la fonction d'affichage en invitant les fonctions de la bibliothèque X11. Pour porter les deux logiciels, on est intervenu au niveau des deux fonctions d'affichage et d'impression, à cet effet on a réécrit tout le code de la fonction d'affichage en changeant des fonctions de X11 par leurs équivalentes en SDK. Pour l'impression, on a changé l'appel de l'exécution d'un fichier de commande par l'appel d'exécutable de gsview ; elle se fera dorénavant en créant un fichier postscript lu par gsview.
- **PORTAGE DE MEDIT** : [39] Medit est programmé avec le langage OpenGL (Open Graphic Language), il est orienté vers l'utilisation sous Unix. OpenGL est une interface logicielle qui se propose de standardiser dans le monde des applications graphiques, les différentes approches matérielles. Cette interface qui compte environ 120 commandes couvre la création, l'animation



et le rendu d'objets 3D avec une caractéristique principale d'être complètement indépendante du système de fenêtrage. Cette indépendance signifie que le noyau de cette interface ne contient aucune commande pour gérer des actions du genre `OpenDisplay`, `SelectInput`, `NexEvent`. L'ensemble des interfaces s'inscrit dans la philosophie client-serveur où une application dite cliente envoie des requêtes/commandes vers un serveur d'affichage local ou distant. L'indépendance de ces requêtes vis-à-vis du matériel permet d'intégrer clients et serveurs de marques différentes. Pour gérer simplement le fenêtrage des programmes utilisant OpenGL, il est coutume d'utiliser la bibliothèque GLUT ( `Graphic Librairie Utilitie Toolkit` ). Pour faire tourner Medit sur Windows, il a suffi de le recompiler sous Windows en ajoutant les bibliothèques OpenGL MS-WINDOWS disponibles en domaine public.

## 7. Contrats industriels

### 7.1. Action ESIMEAU

**Participants** : F. El Dabaghi, M. Amara, D. Ouazar, M. Kaiss, M. Abdelwahed, M. Hassine, A. Gharbi, P. L. George (Projet Gamma), E. Saltel(Projet Gamma) , S. Talamali, N. Souissi, Z. Karfal.

Elaboration d'un système intégré pour la modélisation et la gestion des ressources en eau en zones arides et semi-arides, voir [8.2.1](#).

### 7.2. Action CruCID

**Participants** : F. El Dabaghi, M. Amara, D. Ouazar, M. Abdelwahed, A. Gharbi, B. Philippe (INRIA-Rennes), H. Leroy (INRIA-Rennes), P. L. George, E. Saltel, N. Guelmi, B. Nakhle, S. Talamali.

Modélisation numérique de Crues via le Calcul Intensif Distribué, voir [8.2.2](#).

### 7.3. Action WADI

**Participants** : F. El Dabaghi, M. Amara, D. Ouazar, M. Abdelwahed, P. Frey (Projet Gamma), N. Guelmi, S. Talamali, B. Nakhle, N. Souissi, Ch. Kada Kloucha, A. El Kacimi, K. Ider, S. Benziada, O. Jawhari.

Water supply watershed planning and management : an Integrated approach. Voir [8.2.3](#).

## 8. Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1. Actions nationales

L'action Cosivie collabore particulièrement avec

- Laboratoire de Mathématiques Appliquées de l'Université de Pau,
- IUSTI-Université de Provence,
- Université de Paris XII,
- CMAP-Ecole Polytechnique.

### 8.2. Actions européennes

Les collaborations européennes sont de deux types : un accord de collaboration dans le cadre PAI-Platon avec l'IACM-FORTH Grèce (projet n° 00519XG, titre : Système d'information pour la modélisation numérique des crues-SIMO) et trois projets européens :

- cadre ESPRIT INCO/DC, projet ESIMEAU,
- cadre ESPRIT INCO/DC, projet CruCID,
- cadre IST-INCOII, projet WADI.

Des relations très développées existent avec le IACM/FORTH de Heraklion en Crète, ces relations portent sur plusieurs programmes de travail (ESIMEAU, CRUCID, ANFAS, WADI et la PAI PLATON). Le projet WADI est engagé aussi avec l'Université de Calabre en Italie.

### 8.2.1. ESIMEAU

L'objectif principal de cette action transversale (<http://www-esimeau.inria.fr>) est de développer une infrastructure ouverte pour la réalisation d'un système intégré commun de simulation numérique, de traitement d'images et de gestion de données pour l'évaluation et la prédiction de phénomènes hydrauliques. Les bénéficiaires directs sont les planificateurs et les décideurs qui trouveront dans un tel système des fonctionnalités opérationnelles efficaces dans la planification et/ou les mesures de secours directement liées à la gestion de l'eau - comme ressource et comme risque naturel. ESIMEAU a été mis à la disposition de tout le consortium. L'infrastructure du système intégré pourrait être vue comme une première étape importante d'un processus global pour la gestion et la simulation des systèmes de ressource d'eau. Dans cet esprit, l'eau étant un facteur majeur dans le développement socio-économique de n'importe quel pays, ESIMEAU est conçu comme plateforme générique pour aider :

- Les équipes de recherche scientifique impliquées dans les ressources en eau à accéder horizontalement à l'état de l'art de cette thématique (GIS, Système de gestion de bases de données, Images, modèles physiques et numériques).
- Les planificateurs et les décideurs pour prendre des mesures optimales et durables dans la gestion de la ressource en eau.

Ce projet, coordonné par Fadi El Dabaghi, est effectué dans le cadre d'un contrat ESPRIT en partenariat avec les projets Aladin, GAMMA de l'INRIA, l'ORSTOM/IRD en France, le RIKS aux Pays Bas, l'IACM/FORTH en Grèce, l'ENP (Ecole Nationale Polytechnique) en Algérie, l'ESIB (Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth) au Liban, l'EMI (Ecole Mohammadia d'Ingénieurs) et l'ONEP (Office National de l'Eau Potable) au Maroc, le CITET (Centre International des Technologies de l'Environnement de Tunis) en Tunisie. Les actions principales abordées par la plateforme ESIMEAU sont :

- développement et/ou intégration des outils pour la gestion, l'analyse et le traitement des données hétérogènes (saisies in situ ou par des images satellites) tenant compte des caractéristiques climatologiques (variabilité, hétérogénéité, taille, etc...);
- Modélisation physique et mathématique de phénomènes rapides tels que des inondations et le transport de sédiment ou lents tels ceux de l'eutrophisation, l'érosion et le changement de climat ; développement ensuite des algorithmes de simulations numériques appropriés pour une restitution meilleure et plus réaliste de la situation physique des phénomènes à l'étude ;
- intégration de ces actions traditionnellement disjointes dans une application simple via des interfaces intelligentes dans un environnement approprié et convivial.

En outre, des mesures spécifiques et parallèles de transfert de la connaissance sont mises en oeuvre pour la réalisation de ce projet dans son contexte international et industriel :

- développement et implémentation des méthodologies basées sur les systèmes d'information géographiques (SIG) pour manipuler des ensembles variés de données pour la gestion de ressources de l'eau, en fournissant une formation adéquate sur l'utilisation des SIG (Arcview/ArcInfo).
- Développement global de la culture TI dans le consortium (Internet, Web, Calcul distribué,...) et en particulier une formation structurée et continue dans le domaine du HPCN.

### 8.2.2. CruCID

Il s'agit d'un projet européen ESPRIT (<http://www-crucid.inria.fr>) coordonné par F.EL DABAGHI centré sur l'application des technologies du calcul intensif distribué (HPCN) à la modélisation et à la simulation numérique des crues soudaines notamment en zones arides et semi-arides. Les utilisateurs finaux de ce projet sont les services concernés par l'annonce des crues, la prévention des inondations, l'aménagement des bassins versants, les études d'impact des ouvrages éventuels sur l'environnement et intéressés par l'utilisation des outils et plate-formes HPCN dans l'exploitation de leurs modèles. Ce projet permettra également d'accroître les compétences des institutions de formation et de recherche impliquées dans le transfert et la dissémination des technologies de l'information, notamment dans l'implémentation et le développement de plate-formes HPCN, l'algorithmique parallèle et le calcul scientifique appliqués aux

sciences de l'ingénieur. Plus précisément, CruCID permet aux partenaires des PTM<sup>8</sup> d'acquérir un savoir faire dans le domaine HPCN et dans son application aux sciences de l'ingénieur, aux partenaires de l'UE, d'étendre le domaine d'application de leur recherche à des situations typiques présentes dans les PTM mais aussi présentes dans les pays de l'UE, de renforcer les techniques SIG et autres outils de visualisation pour le pré/post traitement, de disposer de logiciels de simulation numérique de crues intégrant les outils HPCN et des bibliothèques de solveurs algébriques parallélisés, d'étudier de manière conviviale, des cas concrets de crue sur des sites sélectionnés par les utilisateurs, aidant ainsi à l'obtention de cartes de vulnérabilité aux inondations qui serviront à l'aide à la décision en cas de catastrophe et à l'aménagement rationnel des bassins versants. La parallélisation des codes réduit les temps de calcul et permet surtout d'augmenter la taille des problèmes traités (nombres d'inconnues et de scénarios à simuler). Leur exploitation assurera ainsi une meilleure restitution des phénomènes physiques simulés et donc une plus grande fiabilité dans la prévision des crues en vue d'un aménagement optimisé des bassins versants, d'une mise en place de systèmes efficaces d'annonces de crues ainsi que de la hiérarchisation des niveaux d'alerte et des mesures d'accompagnement correspondantes. Ce projet s'appuie sur un réseau de partenaires constitué dans le cadre de ESIMEAU et qui est élargi à des opérateurs du monde applicatif concerné (Services de la Météorologie, de l'Hydraulique, etc). La réalisation de ce projet permet le renforcement des institutions PTM en matière de HPCN à travers des actions de mobilité humaine (la coopération Nord-Sud et Sud-Sud via Internet et les réseaux informatiques), de transfert, de formation et de dissémination axées autour de l'intégration et de l'implémentation des techniques existantes notamment en ce qui concerne les codes de calcul, les SIG, les réseaux de stations de travail (NOINS) et les solveurs de systèmes algébriques déjà parallélisés.

### 8.2.3. WADI

Le projet WADI (<http://www-wadi.inria.fr>) coordonné par F.EL Dabaghi, financé par la CE dans le cadre IST. Son objectif est de développer des systèmes interactifs d'aide à la décision pour la planification, l'exécution et la gestion rationnelles de bassins versants caractérisées par une pénurie d'eau et/ou par un manque d'eaux souterraines, dans le but d'améliorer l'approvisionnement en eau et d'aider par conséquent à satisfaire la demande de l'eau. Le projet évaluera les conditions techniques et scientifiques pour la planification et la gestion de bassins versants incluant des aspects sociaux et légaux, aussi bien que des contraintes environnementales pour un développement durable. Avec l'augmentation continue de la demande de l'eau due à la croissance socio-économique des régions méditerranéennes, entre autres, l'eau jouera un rôle de plus en plus important dans le prochain millénaire. En effet dans les décennies suivantes, les pays méditerranéens étiquetés en tant que zones arides et semi-arides, et particulièrement les méridionaux seront fortement concernés par la pénurie de l'eau. Ce fait a été mis en exergue dans plusieurs études et analyses récentes effectuées par des organismes indépendants (ESCWA, Banque Mondiale, UNESCO, etc..) aussi bien que par les agences et les bureaux nationaux en charge de la gestion de l'eau : la recommandation principale souligne le fait que le remède durable est dans le développement d'un outil dynamique rationnel de planification de l'eau qui se focalise en priorité sur la façon d'améliorer l'approvisionnement en eau en termes de quantité (barrage optimal, réutilisation de l'eau, couches aquifères, etc..) et de qualité (dépôts, pollution, etc..). Le projet de WADI se concentrera sur l'élaboration des outils et des méthodologies liés à l'identification de réservoir (emplacement géographique, volume de l'eau, coût de l'infrastructure) en fonction des caractéristiques du bassin versant (demande de l'eau, ressources de l'eau, MNT, etc..) et en considérant les aspects socio-économiques et environnementaux liés à l'inondation et aux risques de sécheresse.

Ce projet constitue une continuité de ESIMEAU et bénéficiera largement des acquis en ce qui concerne la plateforme intégrée.

## 8.3. Actions internationales

### 8.3.1. Méditerranée

Les relations concernent des institutions de tous les principaux pays francophones de cette zone à savoir :

---

<sup>8</sup>Pays tiers Méditerranéen

- Algérie, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger,
- Liban, Ecole supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth,
- Maroc, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs,
- Tunisie, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.

Ces relations très développées (plusieurs thèses en co-encadrement achevées ou en cours) ont pour cadre des programmes euro-méditerranéens (cités auparavant) ou des programmes bilatéraux engagés depuis 1996 ; dans la suite on citera les plus récents :

- Le projet CMEP 01 MDU 529 avec l'ENP d'Alger -Algérie, « Modélisation Numérique via le Calcul Intensif Distribué de l'Aération des Retenues d'Eau ». Jan 2001 - Déc 2004 (9 mois de stage junior, 2 mois séjour senior, 1 semaines séjours coordination).
- Le projet CMIFM A.I. n° MA/01/03 avec l'EMI de Rabat-Maroc, « Calcul intensif distribué et aération des lacs et lagunes marines » (9 mois de stage junior, 10 semaines séjour sénior).
- Le projet PAI/PLATON n° 00519XG avec IACM-FORTH de Crète-Grèce SIMO (Système d'Information pour le modélisation des crues), Jan 2000-Déc 2001

## 8.4. Accueil de chercheurs étrangers

Pour la période Oct2001-Sept 2002

- N. Kampanis, IACM/FORTH, Grèce (1 semaine)
- P. Prastacos, IACM/FORTH, Grèce (1 semaine)
- R. Aboulaich, EMI-Rabat, Maroc (2 semaines)
- A. Sakat, EMI-Rabat, Maroc (2 mois)
- A. Taoud, EMI-Rabat, Maroc (1 semaine)
- M. Berrah, ENP-Alger, Algérie (2 x 1 semaine)
- S. Benmamar, ENP-Alger, Algérie (1 mois)
- R. Bouchouirbat, EMI-Rabat, Maroc (1 mois)
- A. Bouyahyaoui, EMI-Rabat, Maroc (1 semaine)
- M. El Ossmani, EMI-Rabat, Maroc (2 mois)
- D. Hasnaoui, ONEP, Maroc(2 semaines)
- N. Khaled, EMI/ENIM-Rabat, Maroc (2 semaines)
- I. Sekkouri, EMI-Rabat, Maroc (1 mois)
- W. Nejm, Beyrouth, Liban (1 semaine)
- D. Ouazar, EMI-Rabat, Maroc (10 x 1 semaine)
- B. Amaziane, Univ de Pau, France (2 x 1 semaine)

## 9. Diffusion des résultats

### 9.1. Animation de la communauté scientifique

M. Amara est membre du comité éditorial de la revue Journal of Scientific Computing éditée par Kluwer, USA.

Dans le cadre des activités de dissémination des projets communautaires ESIMEAU et CruCID et WADI, F.El Dabaghi a organisé et animé plusieurs manifestations dont les plus récentes sont ci-dessous :

- CruCID Workshop et Tutorial de validation HPCN sur des cas Test ; INRIA-ESIB, Chairman, Beyrouth (Liban), 19-23 Fév. 2001.
- WADI Tutorial/Workshop on GIS and Water resources ; INRIA-ESIB, Chairman, Beyrouth (Liban), 14-26 Av. 2002.

On notera que M. Amara est membre du comité scientifique et du comité d'organisation du 34ème congrès national d'analyse numérique (mai 2002, Anglet). Mr Dabaghi est membre du comité scientifique du 1st International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifer Management-Monitoring, Modeling, and Management (Avril 2001).

## 9.2. Actions d'enseignement

- Méthodes numériques pour des EDP, cours de DEA, Université de Pau (M. Amara).
- Méthodes de simulation numérique, cours de DESS, Université de Pau (M. Amara).
- Modélisation Numérique en Mécanique des fluides, cours DESS, Université Paris XII (F. El Dabaghi)

## 9.3. Autres Enseignements

- Cadre INRIA-ENIT, cours bloqué de DEA, Méthodes numériques en Mécanique des Fluides, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis 2001 (M. Amara).
- Cadre CMEP, cours de DEA, méthode d'éléments finis mixte, Université des sciences et de la technologie Haouari-boumediene, Mars 2002.

## 9.4. Participation à des colloques

Des membres de l'équipe ont participé à des conférences et *workshops* ; on se reportera à la bibliographie pour avoir la liste complète des contributions. On peut cependant citer la participation active des membres de COSIVIE avec des communications acceptées avec referee aux conférences suivantes :

- Twelfth International Conference on finite Element Methods in Flows Problems 2003, FEF03, 1-4 April. Japan, 2003.
- 22<sup>nd</sup> IASTED International Conference, Modelling, Identification, and Control, MIC'2003, 10-13 February, Innsbruck, Austria, 2003.
- 22<sup>nd</sup> IASTED International Multi-Conference on Applied Informatics, AI 2003, 10-13 February, Innsbruck, Austria, 2003.
- Colloque International sur les Équations aux Dérivées Partielles, 27-29 Octobre. Alger, 2002.
- Applied Mathematics for industrial flow problems 2002, Lisbonne, Portugal, avril 2002.
- Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifer Management-Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001
- LACAFLUM 2001, 5th Latin-American & Caribbean Congress on Fluid Mechanics, 14-17 May, 2001, Venezuela.

# 10. Bibliographie

## Bibliographie de référence

- [1] M. ABDELWAHED, F. E. DABAGHI, D. OUAZAR. *A virtual numerical simulator for aeration effects in lake eutrophication*. in « International Journal of Computational Fluid Dynamics », numéro 2, volume 96, 2002, pages 119-128.
- [2] M. AMARA, C. BERNARDI. *Convergence of a finite element discretization of the Navier Stokes equations in vorticity and stream function formulation*. in « Mathematical Modelling and Numerical Analysis, M2AN », numéro 5, volume 33, 1999, pages 1033-1056.

- [3] M. AMARA, C. BERNARDI, M. BENYOUNES. *Error indicators for the Navier-Stokes equations in stream function and vorticity formulation*. in « Numerisch Mathematik », volume 80, 1998, pages 181-206.
- [4] M. AMARA, F. E. DABAGHI. *An optimal  $C^0$  finite element method for the 2D biharmonic problem*. in « Numerisch Mathematik », numéro 1, volume 90, 2001, pages 19-46.
- [5] F. E. DABAGHI. *Numerical Aspects of Aeration Process Modelling in Eutrophised Water Basins*. in « J. of Systems Analysis Modelling Simulation », numéro 1, volume 39, 2000, pages 1-23.
- [6] F. E. DABAGHI. *Steady incompressible and compressible solution of Navier-Stokes equations by rotational correction*. in « Numerical Methods for Fluid Dynamics », volume 3, 1988, pages 273-281.
- [7] F. E. DABAGHI, D. OUAZAR, P. PRASTACOS. *ESIMEAU Integrated Information System for Modeling and Management of Water Resources : Concept and Architecture*. in « J. of Systems Analysis Modelling Simulation », volume 41, 2001, pages 669-688.
- [8] F. E. DABAGHI, O. PIRONNEAU. *Stream vectors in three dimensional aerodynamics*. in « Numerisch Mathematik », volume 48, 1986, pages 561-589.
- [9] F. E. DABAGHI, J. PÉRIAUX, O. PIRONNEAU, G. POIRIER. *2-D/3-D Finite element solution of the steady Euler equations for transonic lifting flow by stream vector correction*. in « Int. J. for Num. Meth. in Fluids », volume 7, 1987, pages 1191-1209.
- [10] F. E. DABAGHI, J. H. SAIAC. *Characteristics and time dependant methods for solving the 3D incompressible Euler equations by a stream vector-vorticity formulation*. in « Int. J. for Hydraulics, Hydrology and Hydrodynamics in Eng », numéro 4, volume 2, 1989.

## Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [11] M. ABDELWAHED. *Modélisation et simulation numérique d'écoulements diphasiques*. Thèse de doctorat, Université de Pau et Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Octobre, 2002.
- [12] A. OBEID. *Analyse d'une équation elliptique non linéaire dégénérée*. Thèse de doctorat, Université de Pau, Décembre, 2002.
- [13] S. TALAMALI. *L'hydrodynamique des rivières et les systèmes d'information géographique*. Thèse de Magister en hydraulique, Ecole National Polytechnique d'Alger, Octobre, 2002.

## Articles et chapitres de livre

- [14] M. ABDELWAHED, F. E. DABAGHI, D. OUAZAR. *A virtual numerical simulator for aeration effects in lake eutrophication*. in « International Journal of Computational Fluid Dynamics », numéro 2, volume 16, 2002, pages 119-128.
- [15] M. AMARA, J. BARANGER. *An extra-stress vorticity formulation for Stokes problem for the Oldroyd viscoelastic model*. in « Numerisch Mathematik », 2002, accepted.



- [16] M. AMARA, D. CAPATINA, A. CHATTI. *Bending Moment Mixed Method for the Kirchhoff-Love Plate Model*. in « SIAM J. Numerical Analysis », numéro 5, volume 40, 2002, pages 1632-1649.
- [17] M. AMARA, D. CAPATINA, A. CHATTI. *New Locking-Free Method for the Reissner-Mindlin Plate Model*. in « SIAM J. Numerical Analysis », numéro 4, volume 40, 2002, pages 1561-1582.
- [18] M. AMARA, D. CAPATINA, D. TRUJILLO. *Hydrodynamical modeling and multidimensional approximation of estuarian river flows*. in « Computing and Visualization in Science », juillet, 2002, Soumis.
- [19] M. AMARA, E. CHACON-VERA, D. TRUJILLO. *A three field stabilized finite element method for the Stokes equations*. in « Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série I », volume 334, 2002, pages 603-608.
- [20] M. AMARA, E. CHACON-VERA, D. TRUJILLO. *Velocity-vorticity-pressure formulation for Navier-Stokes equations*. in « Computing and Visualization in Science », juillet, 2002, Soumis.
- [21] M. AMARA., A. OBEID, G. VALLET. *Existence results for a degenerated non-linear elliptic problem*. in « Journal of Mathematical Analysis and Application », juillet, 2002, Soumis.

### **Communications à des congrès, colloques, etc.**

- [22] M. ABDELWAHED, M. AMARA, F. E. DABAGHI. *Modélisation et simulation numérique d'écoulements diphasiques*. in « CANUM 2002 », Anglet, France, Mai, 2002.
- [23] M. ABDELWAHED, F. E. DABAGHI, H. MAATOUG. *A parallel algorithm implementation of Navier-Stokes type model simulating a two phase flow*. in « 22<sup>nd</sup> IASTED International Conference, Modelling, Identification, and Control, MIC'2003 », Austria, February, 2003.
- [24] M. ABDELWAHED, F. E. DABAGHI, D. OUAZAR. *An alternative two phase flow correction based virtual simulator for aeration process in lakes*. in « Twelfth International Conference on finite Element Methods in Flows Problems 2003, FEF03 », Japan, April, 2003.
- [25] M. AMARA, M. CAPATINA, D. TRUJILLO. *Couplage de modèles multidimensionnels d'écoulements estuariens*. in « CANUM 2002 », Anglet, France, Mai, 2002.
- [26] M. AMARA, M. CAPATINA, D. TRUJILLO. *Hydrodynamical modeling and multidimensional approximation of estuarian river flows*. in « Applied Mathematics for Industrial Flow Problems AMIF 2002 », Lisbonne, Portugal, avril, 2002.
- [27] M. AMARA, M. CAPATINA, D. TRUJILLO. *Modèles multidimensionnels d'écoulements estuariens*. in « Colloque International sur les Équations aux Dérivées Partielles », Alger, Octobre, 2002.
- [28] M. AMARA, M. CAPATINA, D. TRUJILLO. *Velocity-vorticity-pressure formulation for Navier-Stokes equations*. in « Applied Mathematics for Industrial Flow Problems AMIF 2002 », Lisbonne, Portugal, avril, 2002.
- [29] M. AMARA, F. E. DABAGHI, N. GUELMI. *Analyse Numérique d'Indicateurs d'Erreur pour le problème de Saint-Venant 2D5*. in « Colloque International sur les Équations aux Dérivées Partielles », Alger, Octobre,

2002.

- [30] F. E. DABAGHI, A. E. KACIMI, B. NAKHLE. *A Priori Error Analysis of the Characteristics Mixed Finite Element Method for Shallow Water Equations*. in « 22<sup>nd</sup> IASTED International Conference, Modelling, Identification, and Control, MIC'2003 », Innsbruck, Austria, February, 2003, à paraître.
- [31] F. E. DABAGHI, D. OUAZAR, N. SOUISSI. *Water resources modelling and simulation software : an integrated approach*. in « 22<sup>nd</sup> IASTED International Multi-Conference on Applied Informatics (AI 2003) », Innsbruck, Austria, February, 2003, à paraître.
- [32] F. E. DABAGHI, N. SOUISSI. *ESIMEAU : Un Système d'Information Intégré pour la modélisation des ressources en eau*. in « CANUM 2002 », France, Mai, 2002.

## Rapports de recherche et publications internes

- [33] W. NAJEM, D. OUAZAR, M. D. HASNAOUI, N. AQID. *Planning and management tools for sustainable development, Environmental considerations*. Rapport de contrat WADI, numéro D5.1, DGXIIIX - Commission Européenne, Mars, 2002.
- [34] W. NAJEM, D. OUAZAR, M. D. HASNAOUI, N. AQID. *Water resources assessment, Hydroclimatological Data Base Management System*. Rapport de contrat WADI, numéro D2.1, DGXIIIX - Commission Européenne, MARS, 2002.
- [35] W. NAJEM, D. OUAZAR, M. D. HASNAOUI. *Planning and management tools for sustainable development, Infrastructures*. Rapport de contrat WADI, numéro D5.2, DGXIIIX - Commission Européenne, Mars, 2002.

## Divers

- [36] M. ABDELWAHED. *Modélisation et simulation numérique d'écoulements diphasiques*. 28 Novembre, 2002, Séminaire du Laboratoire de Mathématiques Appliquées, Université de Pau.
- [37] H. HENINE. *Interfaces conviviales via l'intégrateur ESIMEAU entre un SIG et des modèles numériques de simulation*. juin, 2002, Mémoire de PFE ENP-Algérie, INRIA-France.
- [38] O. JAOUHARI. *Système intégré WADI lançant et gérant des tâches à travers le WEB dans le domaine de l'ingénierie de l'eau*. Juin, 2002, Mémoire PFE ENSIAS-Maroc, INRIA-France.
- [39] Z. KARFAL. *Conception et développement d'une application d'intégration en Java*. Mars, 2002, Mémoire DESA EMI-Maroc, INRIA-France.

## Bibliographie générale

- [40] M. ABDELWAHED, M. AMARA, F. E. DABAGHI. *A P1 bubble/P1 finite element velocity-pressure solution of a pseudo homogeneous flow model simulating a two phase flow : Application to a lake eutrophication remedial by air injection*. in « VIIèmes journées Zaragoza-Pau de mathématiques appliquées et statistiques », pages 6 pages, Jaca, Espagne, Sep, 2001.



- [41] M. ABDELWAHED, F. E. DABAGHI, S. KARRAKCHOU, B. NAKHLÉ, S. TALAMALI. *Méthodologie d'approche pour la parallélisation d'un modèle numérique ; exemple du projet CruCID*. 19-21 Fév, 2001, Séminaire de clôture du projet Européen CruCID : Modélisation Numérique des Crues via le Calcul Intensif Distribué ; INRIA-ESIB, Beyrouth (Liban).
- [42] M. ABDELWAHED, F. E. DABAGHI, D. OUAZAR. *A Virtual hybrid distributed-lumped two phase flow for the simulation of lake aeration coupling the MOC and the FEM*. in « 5th Latin-American & Caribbean Congress on Fluid Mechanics », pages 15 pages, Venezuela, May, 2001.
- [43] M. AFIF, B. AMEZIANE, F. E. DABAGHI. *Mixed Hybrid Finite Elements and Finite Volumes for Saltwater Intrusion*. in « Transport in Porous Media », 2001, En cours de révision.
- [44] M. AFIF, B. AMEZIANE, F. E. DABAGHI. *Mixed Hybrid Finite Elements and Finite Volumes for Saltwater Intrusion*. in « 1st International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifer Management-Monitoring, Modeling, and Management, SWICA 2001 », Essaouira, Marocco, April, 2001.
- [45] M. AMARA. *Equations de Stokes pour des conditions aux limites non standards*. 23 Mai, 2001, Séminaire de l'IRMAR, Université de Rennes.
- [46] M. AMARA. *Méthode de résolution des équations de Stokes pour des conditions aux limites non standards*. 19 Février, 2001, Laboratoire d'Analyse Numérique, Groupe Fluides, Université Pierre et Marie Curie Paris 6.
- [47] M. AMARA, H. BARUCQ, M. DULOUE. *A convergent mixed finite element method for the three-dimensional Stokes problem*. in « Numerisch Mathematik », 2001, en cours de révision.
- [48] M. AMARA, D. CAPATINA, P. PUISEUX, D. TRUJILLO. *Hydrodynamical modelling and multidimensional numerical approximation of estuarine river flows*. in « VIIèmes journées Zaragoza-Pau de mathématiques appliquées et statistiques », Jaca, Espagne, Septembre, 2001, à paraître.
- [49] M. AMARA, E. CHACON-VERA, D. TRUJILLO. *On Stokes equations with non standard boundary conditions*. in « Conference on Differential Equations & Applications, CEDYA 2001 », Salamanca, Espagne, septembre, 2001.
- [50] M. AMARA, E. CHACON-VERA, D. TRUJILLO. *Stokes equations with non standard boundary conditions*. Rapport Interne, numéro 13/2001, Université de Pau, 2001, <http://www.univ-pau.fr/RECHERCHE/LMA/ipublic.htm>.
- [51] M. AMARA, F. DABAGHI. *An optimal  $C^0$  finite element method for the 2D biharmonic problem*. in « Numerisch Mathematik », numéro 1, volume 90, 2001, pages 19-46.
- [52] M. AMARA, F. E. DABAGHI, M. HASSINE. *Une formulation mixte utilisant un élément fini  $C^0$  optimal pour la résolution des équations de Quasi-Stokes incompressible : Analyse théorique et validation numérique*. Rapport de recherche, numéro RR-4142, Inria, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4142.html>.
- [53] M. AMARA, M. DULOUE. *Un opérateur de régularisation pour les éléments finis tétraédriques de Nédélec*. in « Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série I », volume 333, 2001, pages 249-254.

- [54] M. AMARA, A. OBEID, G. VALLET. *A relaxed formulation for a degenerated elliptic non-linear equation*. Rapport Interne, numéro 31/2001, Université de Pau, 2001, <http://www.univ-pau.fr/RECHERCHE/LMA/ipublic.htm>.
- [55] M. AMARA, A. OBEID, G. VALLET. *Existence results for a degenerated non-linear elliptic problem*. Rapport Interne, numéro 30/2001, Université de Pau, 2001, <http://www.univ-pau.fr/RECHERCHE/LMA/ipublic.htm>.
- [56] M. AMARA., E. CHACON-VERA, D. TRUJILLO. *Vorticity-Velocity-Pressure Formulation for Stokes Problem*. in « Mathematics of Computation », Décembre, 2001, en cours de révision.
- [57] A. CHATTI. *Analyse de Méthodes d'Éléments Finis en Hydrodynamique*. Thèse de Doctorat, Université de Pau et Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Juin, 1999.
- [58] F. DABAGHI. *Numerical Aspects of Aeration Process Modelling in Eutrophised Water Basins*. in « J. of Systems Analysis Modelling Simulation, SAMS », volume 39, 2000, pages 1-23.
- [59] F. E. DABAGHI. *Final & Evaluation Report*. Rapport de contrat CruCID, numéro 1, DGXIII - Commission Européenne, Jan, 2001.
- [60] F. E. DABAGHI. *Final Report & Evaluation Report*. Rapport de contrat ESIMEAU, numéro 2, DGXIII - Commission Européenne, July, 2001.
- [61] F. E. DABAGHI, W. NAJEM, D. OUAZAR. *Présentation et résultats du projet CruCID*. 19-21 Fév, 2001, Séminaire de clôture du projet Européen CruCID : Modélisation Numérique des Crues via le Calcul Intensif Distribué ; INRIA-ESIB.
- [62] F. E. DABAGHI, D. OUAZAR. *Final research report*. Rapport de contrat ESIMEAU, numéro D30, DGXIII - Commission Européenne, Jan, 2001.
- [63] F. DABAGHI, D. OUAZAR, P. PRASTACOS. *ESIMEAU Integrated Information System for Modeling and Management of Water Resources : Concept and Architecture*. in « J. of Systems Analysis Modelling Simulation, SAMS », numéro 669-688, volume 41, 2001.
- [64] M. DJEDDOUR. *Couplage d'un système d'information géographique avec un modèle numérique quasi-tridimensionnel des écoulements à surface libre*. juin, 2001, Mémoire de PFE ENP-Algérie, INRIA-France.
- [65] M. DULOUE. *Approximation tridimensionnelle des équations de Stokes et de Navier-Stokes*. Thèse de doctorat, Université de Pau, Janvier, 2000.
- [66] R. HAJOUJI-IDRISSI. *Etude conceptuelle et analyse de la faisabilité d'une interface entre un SGBD MySQL et un environnement de calcul parallèle au sein d'un système intégré dans le domaine de l'ingénierie de l'eau*. juin, 2001, Mémoire de PFE EMI-Maroc, INRIA-France.
- [67] K. HANDIZI. *Réalisation d'une interface pour un modèle numérique pour la propagation d'onde de crues*. juin, 2001, Mémoire de PFE EMI-Maroc, INRIA-France.

- 
- [68] F. MANSANNE. *Analyse d'Algorithmes d'Evolution Artificielle appliqués au domaine pétrolier : Inversion sismique et approximation de fonctions*. Thèse de doctorat, Université de Pau, Décembre, 2000.
- [69] N. SOUSSI. *Mise en place d'un système intégré lançant et gérant des tâches à travers le WEB dans le domaine de l'ingénierie de l'eau*. juin, 2001, mémoire de PFE EMI-Maroc, INRIA-France.