

Projet M3N

Multi-Modèles et Méthodes Numériques

Rocquencourt

THÈME 4B



*R*apport
d'Activité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
3.1	Optimisation et Contrôle des Fluides Visqueux	5
3.2	Action Fluides-Structures	7
3.3	Modélisation des Semi-conducteurs	8
3.4	Analyse particulière des fluides complexes	9
3.5	Ecoulements en eaux peu profondes et surfaces libres	10
3.6	Modélisations numériques et Gestion des Ressources en Eau	10
4	Domaines d'applications	11
5	Logiciels	12
6	Résultats nouveaux	13
6.1	Modélisation, optimisation et contrôle pour les fluides turbulents ou diphasiques, interaction fluide-structure	13
6.1.1	Simulation d'écoulements turbulents décollés et instationnaires	13
6.1.2	Optimisation de formes	16
6.1.3	Estimateur d'erreur a posteriori	19
6.1.4	Ecoulements diphasiques	20
6.2	Domaine biomédical, biomécanique	21
6.2.1	Longueurs d'entrée des écoulements laminaires dans les veines collabables	22
6.2.2	Simulateur de chirurgie laparoscopique	22
6.3	Semi-conducteurs	23
6.4	Equations cinétiques et gaz raréfiés	27
6.4.1	Modèles BGK Gaussiens	27
6.4.2	Asymptotique haute fréquence de l'équation de Helmholtz	28
6.5	Schémas cinétiques pour les équations de Saint-Venant	29
6.6	Modélisations numériques et Gestion des Ressources en Eau	30
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	32
7.1	Action Optimisation de forme en mécanique des fluides	32
7.2	Action Modélisation simplifiée de gaz dilués	32
7.3	Action Semi-conducteurs	32
7.4	Action Décision	32
7.5	Action ESIMEAU	32
7.6	Action CruCID	33
7.7	Action ANFAS	33
7.8	Action WADI	33
7.9	Action Saint-Venant	33

8	Actions régionales, nationales et internationales	34
8.1	Actions Régionales	34
8.2	Actions nationales	34
8.3	Actions financées par la Communauté Européenne	34
8.3.1	Décision	34
8.3.2	ESIMEAU	35
8.3.3	CruCID	36
8.3.4	ANFAS	36
8.3.5	WADI	37
8.4	Relations bilatérales internationales	37
8.4.1	Europe	37
8.4.2	Russie et Asie centrale	38
8.4.3	Méditerranée	38
8.5	Accueil de chercheurs étrangers	38
9	Diffusion de résultats	39
9.1	Animation de la communauté scientifique	39
9.2	Actions d'enseignement	39
9.3	Autres Enseignements	40
9.4	Participation à des colloques	40
10	Bibliographie	41

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Benoit Perthame [Professeur, Université de Paris 6]

Responsable permanent

Americo Marrocco [DR]

Assistante de projet

Maryse Desnoux [TR, en commun avec MACS et Gamma]

Personnel INRIA

Jean-François Bourgat [DR, 4/5]

Marie-Odile Bristeau [DR, 4/5 depuis sept.99]

Fadi El Dabaghi [CR]

Jean-Frédéric Gerbeau [CR, depuis oct.99]

Marie-Hélène Lallemand-Tenkès [CR, 4/5]

Chercheurs extérieurs

Mohamed Amara [Professeur, Université de Pau]

Maxime Kaiss [Maître de Conférence, IUSTI-Université de Marseille]

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

Patrick Le Tallec [Professeur, Université de Paris Dauphine]

Bijan Mohammadi [Professeur, Université de Montpellier II]

Marc Thiriet [CR CNRS]

Chercheurs invités

Ramaz Botchorishvili [Tbilissi (Géorgie)]

Olof Runborg [Stockholm (Suède)]

Doctorants

Mohamed Abdelouahed [boursier ESIMEAU (INRIA-ENIT Tunisie)]

Pierre Andries [boursier X, depuis septembre 1998]

Rodolfo Araya [boursier Gouv. du Chili et INRIA]

Gabriel Barrenechea [boursier INRIA]

Said Belaaouane [boursier ESIMEAU (INRIA-EMI Maroc)]

Rachid Gouza [boursier ESIMEAU (INRIA-EMI Maroc)]

Maatoug Hassine [boursier ESIMEAU (INRIA-ENIT Tunisie)]

Gorazd Medić [boursier INRIA, jusqu'en juillet 1999]

Mohamed Oussaa [boursier ESIMEAU (INRIA-EMI Maroc)]

Kamel Rachedi [boursier INRIA, arrêt mars 1999]

Nabil Smakghi [boursier ESIMEAU (INRIA-ENP Algérie)]

Mugurel Stanciu [boursier INRIA]

Stagiaires

Emmanuel Audusse [Ecole des Ponts]
Tarek Bengarai [EMI - Maroc]
Farid Bouhachem [EMI - Maroc]
Lalla Hind El Alaoui [EMI - Maroc]
Antoine Habra [ESIB - Liban]
Muhetaer Kelimu [Université Paris XII]
Mohammad Moustapha [ESIB - Liban]
Fayçal Tanarhte [EMI - Maroc]
Souad Talamali [ENP - Algérie]
Salah Zahir [EMI - Maroc]

2 Présentation et objectifs généraux

Créé en 1996, le projet M3N (Multi-Modèles et Méthodes Numériques) se donne pour objectif de développer des approches numériques pluridisciplinaires en Mécanique, en Physique et en Sciences de l'Ingénieur. Il s'agit d'analyser, de coupler, d'optimiser différents modèles numériques pour simuler et concevoir des systèmes physiques complexes. Ces modèles s'écrivent le plus souvent sous la forme d'équations aux dérivées partielles **couplées** qui expriment sous forme mathématique les lois de conservation de la physique et les comportements des matériaux constitutifs. Ces équations sont ensuite discrétisées par des méthodes numériques variées, en maillages non structurés, ce qui réduit le problème initial à plusieurs systèmes couplés d'équations non linéaires à grand nombre d'inconnues (de plusieurs milliers à plusieurs millions) qu'il faut résoudre sur ordinateur par des méthodes adéquates. Les méthodes numériques peuvent être du type éléments finis, volumes finis, particulières. Le projet regroupe ces activités de modélisation mathématique, d'approximation sur maillages non structurés, et de développement de méthodes numériques autour des thèmes suivants :

- Modélisation, optimisation et contrôle de fluides visqueux turbulents : développement de lois de paroi, construction de maillages adaptés, optimisation de formes en présence de fluides incompressibles turbulents.
- Couplage fluide-structure en grands déplacements : modélisation et calcul de structures souples baignées par des fluides, modélisation d'écoulements biomécaniques dans des tuyaux souples, calculs aéroélastiques.
- Modélisation Multiéchelle des semi-conducteurs : mise en oeuvre de modèles de dérive diffusion, énergie-transport ou cinétique avec adaptation de maillages pour l'étude de transistors bipolaires de taille submicronique.
- Développement analyse et couplage de modèles cinétiques ou hybrides pour l'étude de fluides complexes : gaz raréfiés, fluides diphasiques, écoulements à bulles.
- Développement de méthodes numériques nouvelles pour calculer des écoulements à surface libre en eaux peu profondes décrits par les équations de Saint-Venant en régime rapide (hyperbolique). On utilise ici des méthodes de volumes finis en maillages non structurés.

- Développement de méthodes numériques nouvelles pour modéliser le problème d'eutrophisation des retenues d'eau: équations de Navier-Stokes tridimensionnelles instationnaires avec prise en compte des bulles d'air.
- Développement de modèles de bassins versants pour décrire des écoulements de surface (Navier-Stokes, Saint-Venant, rupture de digues, inondations, interaction simulation numérique-vision par ordinateur,...).
- Développement d'algorithmes parallèles et de techniques de type HPCN pour traiter des problèmes d'écoulements d'eaux de surface (crues, inondations,...). On utilise le protocole MPI sur un réseau de stations (processeur Risc) sous UNIX ou de Pc (processeur PENTIUM) sous WindowsNT.

Le projet M3N se concentre donc dans le secteur des méthodes numériques et sur des domaines proches de la dynamique des Fluides ou des Semi-Conducteurs. Pour ces sujets, il travaille en partenariat avec des industriels ou des laboratoires extérieurs sur des projets précis (étude d'applications ou développement d'outils).

3 Fondements scientifiques

De manière traditionnelle, l'analyse et la conception en milieu industriel utilisent les différents modèles disponibles de manière successive et découplée. Cette approche est mise en défaut aujourd'hui par la complexité des nouveaux projets technologiques. Le concept de modélisation multidisciplinaire consiste alors à développer et valider des hiérarchies de modèles physiques et numériques pour pouvoir les utiliser de manière complémentaire ou couplée dans un processus d'analyse, de conception ou d'optimisation. La réalisation d'un tel objectif nécessite de :

- savoir passer de manière continue d'un niveau de modélisation physique à un autre, afin de pouvoir les utiliser de manière couplée et consistante. Le couplage ou la transition se font par développement asymptotique ou par décomposition de domaines;
- savoir analyser les fondements mathématiques des modèles numériques retenus et en déduire les méthodes numériques les plus performantes et les mieux adaptées. Il est en particulier important de savoir démontrer des estimations d'erreur afin de garantir les résultats.
- savoir intégrer les modèles numériques dans une boucle d'optimisation et de contrôle. La conception optimale de formes demande à utiliser les modèles numériques de comportement développés au préalable pour optimiser la forme de l'objet étudié. Le contrôle actif des écoulements et des structures tel qu'on le prévoit dans un proche avenir cherche à optimiser en temps réel certaines données du modèle pour améliorer les résultats.

Dans cette optique générale, les sujets de recherche du projet M3N se sont orientés autour des cinq axes décrits ci-dessous.

3.1 Optimisation et Contrôle des Fluides Visqueux

L'action du projet se concentre sur la validation et l'adaptation numérique des modèles de base utilisables dans les calculs à grande échelle. L'idée est donc de simuler les écoulements

turbulents instationnaires en utilisant un modèle de type $k - \varepsilon$ couplé à des lois de parois adaptées près des obstacles [MP94]. Cette technique est intéressante par sa simplicité et son faible coût. Contrairement à ce qui est communément admis, il est possible de prédire ainsi de façon précise l'écoulement autour de configurations difficiles, si on utilise des stratégies d'intégration temporelle et spatiale précises et une implémentation fine des lois de paroi. Les expériences numériques montrent cependant que pour les écoulements les plus généraux, il faut enrichir le modèle $k - \varepsilon$ classique, pour prendre en compte les effets tridimensionnels, en ajoutant par exemple des termes d'ordre 2 aux tensions de Reynolds. D'un point de vue théorique, l'introduction de ces nouveaux termes implique une remise en cause de la stabilité du système et donc du solveur utilisé. Il faut donc étudier ces aspects et prendre des mesures nécessaires à une stabilisation numérique.

Un autre problème particulièrement important dans ce cadre est l'étude des écoulements sur des parois rugueuses. A titre d'exemple, les coques des bateaux, les pales de turbines ou encore le bouclier thermique d'une tuyère qui subit une abrasion sous l'effet de la chaleur ne sont pas parfaitement lisses et présentent des rugosités qui modifient les performances aérodynamiques du corps étudié. La difficulté est de traiter les différentes échelles de grandeurs contenues dans le domaine. En effet, la nécessité d'une description précise des rugosités associée au fait que la vitesse dans la couche limite passe de zéro à $O(1)$ sur une distance $\delta \approx O(\sqrt{\text{viscosité}})$, oblige à utiliser des maillages extrêmement fins. En raison de ce coût élevé pour résoudre les équations de Navier-Stokes sur de tels domaines, les ingénieurs traitent généralement seulement les grandes échelles en négligeant l'état rugueux du domaine. Ces approximations s'avèrent souvent insuffisantes pour retrouver les bons profils expérimentaux. Il est donc indispensable de mettre au point de nouvelles approches pour traiter les petites échelles à un faible coût. Les lois de parois apparaissent alors comme une alternative pour retirer du domaine de calcul la région de fort gradient contenant les rugosités. Les lois de parois sont des conditions aux limites équivalentes imposées à l'intérieur du domaine, ayant l'objectif de simuler l'influence de la paroi sur l'écoulement. Les premières lois de parois, établies de façon empirique pour des parois lisses sont souvent dites logarithmiques parce que elles sont établies dans une région de la couche limite où la vitesse suit un profil logarithmique. Elles restent valables sur les parois rugueuses, mais certaines constantes doivent être modifiées en fonction de la géométrie de l'obstacle. Cependant, jusqu'à présent, aucune stratégie générale n'a été mise au point pour simuler de façon automatique l'influence des différentes géométries de rugosités sur l'écoulement global. De plus, ces lois de parois manquent d'une base mathématique solide permettant d'établir une analyse d'erreur, et de construire de nouvelles lois plus générales qui s'adapteraient automatiquement à la forme de la rugosité. Le projet M3N cherche donc à développer de nouveaux cadres mathématiques et numériques pour construire et analyser des nouvelles lois de parois prenant mieux en compte les effets thermiques locaux ou les rugosités géométriques. Un premier cadre s'appuie sur une résolution quasi-analytique des équations dans la couche limite, avec utilisation locale d'un modèle logarithmique de viscosité turbulente. Cette résolution locale est couplée à l'extérieur par des conditions aux limites (de couplage) issues des méthodes de décomposition de domaine. Une autre approche utilise une méthode de développement asymptotique à deux

[MP94] B. MOHAMMADI, O. PIRONNEAU, *Analysis of the K-Epsilon TURBULENCE MODEL*, *Research in Applied mathematics*, John Wiley & Sons, 1994, Ciarlet, P. G. and Lions, J.-L. Eds.

échelles.

Le dernier aspect de la recherche est d'essayer d'optimiser ou de contrôler de manière quasi-automatique les formes aérodynamiques des objets étudiés. L'idée est de mettre au point une chaîne d'optimisation en étudiant chacun de ses aspects :

1. le choix de la stratégie de discrétisation des formes de l'objet permettant de se ramener à un problème d'optimisation classique dans R^n . Ceci exige de savoir paramétrer proprement dans R^n l'ensemble des configurations admissibles Ω situées dans un voisinage d'une forme de référence Ω_o , et de savoir déformer le maillage du domaine de calcul pour s'adapter aux variations de formes obtenues en cours d'algorithme;
2. l'utilisation d'un algorithme d'optimisation adapté. Les techniques de points intérieurs qui résolvent l'ensemble des équations d'optimalité par un algorithme de quasi-Newton tout en restant strictement à l'intérieur de l'ensemble des configurations admissibles se révèlent bien adaptées à ce type de problèmes;
3. la mise en oeuvre d'une stratégie de calcul de gradient ou de sensibilité qui traite les équations d'état implicites par des techniques d'état adjoint;
4. l'utilisation de la différentiation automatique de programme pour obtenir automatiquement à partir de solveurs directs les logiciels calculant les gradients des équations d'état explicites et les dérivées partielles du Lagrangien.

Cette approche est assez générale. Son efficacité locale dépend avant tout: de la pertinence de la paramétrisation de formes et de la fonction coût choisies, de l'efficacité de la discrétisation (du maillage) et des solveurs utilisés pour résoudre les équations d'état discrètes, de la forme de départ utilisée.

3.2 Action Fluides-Structures

La compréhension des mécanismes d'interactions entre un fluide et un solide élastique en grands déplacements est d'une importance capitale dans de nombreuses applications, aéroélasticité en grands déplacements, écoulements sanguins.

Les travaux récents des différentes équipes de recherche, et en particulier du projet M3N, ont permis de dégager et d'analyser une méthodologie générale pour la résolution numérique des problèmes d'interactions entre un fluide visqueux en écoulement et une structure souple en grands déplacements. Cette méthodologie propose de

1. traiter de façon cohérente l'interface entre fluide et structure même après discrétisation numérique (respect des propriétés énergétiques et du principe de l'action et de la réaction) : on impose la continuité cinématique des vitesses à travers l'interface, et on vérifie la continuité des efforts grâce à la formulation variationnelle choisie. Cette approche a été reprise dans les calculs d'aéroélasticité instationnaire effectués à l'Université de Boulder en liaison avec le projet INRIA-NSF sur les calculs à échelle multiple;
2. utiliser pour chaque sous-système les formulations classiques les plus adaptées au sous-problème considéré : pour le fluide formulation ALE (*Arbitrary Lagrangian Eulerian*) avec actualisation de la géométrie du domaine par un algorithme d'adaptation de maillage ou

formulation Eulerienne avec condition de transpiration, formulation en Lagrangien total pour la structure;

3. utiliser des schémas d'intégration en temps implicites sur les termes de couplage. Il a été montré au niveau théorique qu'un schéma d'Euler implicite n'introduisait pas d'instabilités artificielles, et au niveau pratique qu'un schéma de point milieu totalement couplé était à la fois stable, précis, et parfaitement conservatif;
4. calculer les grands déplacements de la structure sans approximations de la géométrie, y compris pour les coques, à l'aide de modèles dits géométriquement exacts (modèles étudiés les années passées), et contrôler strictement dans ce calcul l'erreur de discrétisation commise;

Le premier problème à surmonter dans cette approche est de savoir discrétiser proprement les différentes composantes du système étudié. Ce problème déborde en fait largement du cadre fluide-structure et fait l'objet d'une collaboration avec le projet MACS.

Le second problème est ensuite d'adapter et d'appliquer ces techniques à la solution de problèmes industriels ou médicaux complexes, comme les calculs d'écoulements autour des grands ponts, ou l'analyse des anévrismes. L'anévrisme cérébral chez l'homme est une dilatation sacciforme localisée de la paroi artérielle. Du fait de ces complications (thromboses, compression, rupture), cette lésion peut avoir des conséquences individuelles dramatiques. Ces anévrismes sacciformes sont implantés dans un embranchement artériel où se produit une forte interaction entre l'écoulement sanguin et les déformations des parois. Le problème est alors de prédire et d'analyser les contraintes hémodynamiques afin d'étudier la genèse et l'évolution pré et postopératoire des cavités anévrismales. Ceci peut se réaliser, grâce à une résolution par éléments finis du problème fluide interne et un calcul aussi par éléments finis des grandeurs mécaniques et des contraintes à la paroi, par l'utilisation des stratégies de couplage fluide-structure préalablement développées.

3.3 Modélisation des Semi-conducteurs

La simulation numérique de dispositifs à semiconducteur continue à faire l'objet d'études intensives dans le monde et en France. On espère, par ce biais, pouvoir prévoir le comportement a priori de dispositifs avant leur réalisation effective ou, en partant d'un état de l'art donné, optimiser leurs paramètres technologiques. Dans les études de modélisation de composants, cette approche est en outre très utilisée pour construire des modèles plus simples qui seront intégrés dans des logiciels de simulation de circuits. Le secteur cible est ici l'électronique rapide et les télécommunications. Le partenaire privilégié est le CNET.

Le modèle de base est un modèle de dérive diffusion. Ce modèle est associé à des équations aux dérivées partielles elliptiques hétérogènes, nonsymétriques et fortement nonlinéaires. Les hétérogénéités sont particulièrement violentes puisque les densités électroniques peuvent varier d'un facteur de plusieurs milliards. La résolution numérique de ces équations de dérive diffusion nécessite donc des méthodes d'approximation spécifiques, des maillages adaptés et des solveurs algébriques robustes. L'axe de travail du projet M3N dans ce cadre utilise des éléments finis mixtes ^[BF91] de bas degré, permettant de conserver exactement les courants au niveau dis-

[BF91] F. BREZZI, M. FORTIN, *Mixed and Hybrid Finite Element Methods*, Springer Series in Computational

cret, des maillages nonstructurés adaptatifs, et une stratégie de résolution nonlinéaire utilisant transitoire artificiel, relaxation des équations et méthode de Newton [GL89]. Cette stratégie nécessite de résoudre une succession de problèmes algébriques linéaires nonsymétriques, très mal conditionnés et de grande taille, pour lesquels il faut adapter les algorithmes de calcul matriciel existants.

De par la miniaturisation des dispositifs simulés, il devient aussi maintenant nécessaire d'étudier des modèles plus riches que le modèle de dérive-diffusion classique. En particulier, pour prendre en compte les phénomènes thermiques, il est nécessaire de faire entrer en jeu l'énergie des porteurs. Les deux principaux modèles fluides incorporant une équation de conservation de l'énergie sont le modèle hydrodynamique et le modèle de transport d'énergie. Ils dérivent tous deux de l'équation de transport de Boltzmann, mais ces liens doivent être éclaircis pour bien comprendre les principes et limites de validité de ces nouveaux modèles.

3.4 Analyse particulière des fluides complexes

Les modèles cinétiques permettent une description physique fine des milieux particuliers par une analyse de l'évolution des populations de particules à position et vitesse données. Leur utilisation est nécessaire entre autres pour la simulation de gaz raréfiés tels qu'on les trouve à haute altitude autour des corps de réentrée ou à l'intérieur des réacteurs à diffusion de vapeur. La modélisation des couches limites cinétiques en est un exemple typique, particulièrement importante en pratique car il s'agit de prédire le comportement aérodynamique des engins volant à haute altitude en atmosphère raréfiée ou semi-raréfiée. L'information recherchée dans ces couches limites est de savoir relier les sauts de vitesse et de température à la paroi aux valeurs des forces de frottement et de flux de chaleur. Le problème fondamental dans ces applications est d'identifier la distribution des particules en vitesse. Pour un gaz en équilibre, la distribution des vitesses des molécules est maxwellienne. Cependant, pour des écoulements raréfiés à très grande vitesse autour de surfaces solides, apparaissent des zones de fort déséquilibre. Tant que la distribution des vitesses reste proche d'une maxwellienne on peut utiliser des modèles continus. Si elle s'en écarte un peu plus, il faut résoudre l'équation de Boltzmann.

Dans tous les cas, la simulation numérique de ces modèles cinétiques, souvent à base de combinaison de méthodes particulières et de techniques de Monte Carlo est délicate et exige de gros moyens de calcul. Elle doit donc être couplée à des approches plus classiques de mécanique des fluides.

Trois tâches se dégagent dans ce contexte. La première tâche proposée est d'abord d'améliorer la pertinence physique des modèles utilisés. Le travail réalisé en collaboration avec le CESTA permet d'introduire des modèles de collision simplifiés et particulièrement efficaces. La seconde tâche est de comprendre les mécanismes de transition qui permettent de passer d'une modélisation cinétique fine à un modèle hydrodynamique. Les régimes visés par cette étude sont des écoulements hypersoniques à nombre de Mach élevé (20), à faible nombre de Reynolds ($Re/m < 100000$) et à basse température. L'idée de base poursuivie récemment consiste à utiliser l'approximation exponentielle proposée par D. Levermore pour approcher de

Mathematics, Springer-Verlag, 1991.

[GL89] R. GLOWINSKI, P. LE TALLEC, *Augmented Lagrangian and Operator Splitting Methods in Nonlinear Mechanics*, *Studies in Applied Mathematics*, SIAM, 1989.

manière positive et cohérente la densité cinétique des particules à vitesse et position données à l'intérieur de la couche limite.

La dernière tâche consiste à utiliser les deux niveaux de modèle de manière adaptative et couplée. La technique de base pour coupler les équations de Boltzmann ou l'une de ses approximations asymptotiques avec les équations de Navier-Stokes utilise un couplage interfacique par demi-flux, fondée sur une interprétation cinétique des flux ^[PQ94]. Les problèmes à résoudre concernent alors l'écriture des modèles asymptotiques, la détermination automatique des domaines, l'écriture des conditions d'interface, la mise au point d'un algorithme de couplage efficace et conservatif.

Les techniques particulières sont aussi très utiles à la compréhension des écoulements à bulles. Il s'agit de développer des modèles permettant de décrire le mouvement de bulles gazeuses ou de particules solides dans un fluide en mouvement. La difficulté est de décrire correctement les interactions entre bulles ou particules, et l'interaction entre chaque bulle et le fluide environnant.

3.5 Ecoulements en eaux peu profondes et surfaces libres

Le calcul d'écoulements rapides à surface libre est souvent trop complexe pour être réalisé par la résolution directe des équations de Navier-Stokes tridimensionnelles. C'est le cas des exemples de l'hydrologie: écoulements de rivières, zones d'inondations, marées.

Des modélisations plus simple que celles de Navier-Stokes ont montré leur efficacité depuis longtemps, en particulier les équations de Saint-Venant permettent de tels calculs. Elles posent toutefois de grandes difficultés numériques de part leur régime hyperbolique (convection dominante) et les équilibre hydrologiques à préserver.

Les recherches du projet M3N dans cet axe ont consisté à dériver des méthodes numériques robustes et précises permettant de réaliser des calculs de tels écoulements. Ce sont des méthodes de volumes finis en maillage non-structuré préservant les équilibres et permettant des bathymétries complexes et le calcul de façon stable et robuste de transport de polluants.

3.6 Modélisations numériques et Gestion des Ressources en Eau

L'objectif principal de cette action générique et transversale est de développer une infrastructure ouverte pour la réalisation d'un système intégré commun de simulation numérique, de traitement d'image et de gestion de données pour la prédiction et l'évaluation de phénomènes hydrauliques. La plateforme ESIMEAU, de par son architecture ouverte et dynamique, permettra de manière évolutive et pérenne un suivi et une gestion plus efficaces des ressources en eau (en particulier des zones méditerranéennes semi-arides); par exemple, l'action CruCID spécifique aux crues et aux bassins versants s'intégrera naturellement dans ESIMEAU.

Actuellement l'état des connaissances sur les phénomènes hydriques à étudier est assez limité ou manque de généralité. Les divers modèles physiques ou numériques développés ne répondent que partiellement à la problématique posée; des questions demeurent notamment sur les modèles rhéologiques à utiliser, sur la capacité à traiter des géométries réalistes ou à

[PQ94] B. PERTHAME, Y. QIU, « A variant of Van Leer scheme for hyperbolic systems », *J. Comput. Phys.* 112, 2, 1994, p. 370-381.

analyser d'importants volumes de données hétérogènes ainsi que sur la restitution correcte de la physique du phénomène (par traitement d'images ou par simulation numérique).

Pour répondre à ces questions de manière satisfaisante, on se propose de réaliser une infrastructure de système intégré; celui-ci nécessite certes le développement de logiciels de simulation numérique, de traitement d'images et de logiciels de gestion d'informations adéquats mais aussi et surtout une meilleure maîtrise de données particulièrement hétérogènes en amont et en aval de ces logiciels et une plus grande rigueur dans la modélisation mathématique et numérique des phénomènes physiques à simuler. Au delà des réelles innovations techniques qui devront être apportées dans chacun des modules du système intégré, c'est dans l'organisation et l'articulation de ces modules, issus de domaines traditionnellement disjoints, que réside à la fois la difficulté principale et l'apport majeur de ce projet (on peut consulter le site WEB <http://www-esimeau.inria.fr>).

Dans cette optique et dans un premier temps, les tâches suivantes sont identifiées:

- 1. Ecoulements à surface libre: mécanismes de propagation d'ondes de crues et de submersion, mécanique de transport de sédiments ou de polluants. Les modèles rhéologiques retenus feront l'objet de simulations numériques basées sur des techniques à adapter ou à développer spécifiquement pour ce type de problèmes à grande échelle et à géométries complexes.
- 2. Les retenues d'eau: modélisation de l'eutrophisation des lacs, mise en oeuvre de procédures optimisées de dépollution par l'aération. On propose de développer un modèle numérique basé sur la mécanique des fluides diphasiques: injection adéquate d'air favorisant, par une convection forcée, un brassage de l'eau et ainsi une diminution notable des besoins en traitement chimique pour améliorer sa qualité; l'optimisation de l'emplacement des injecteurs fera appel à des techniques d'identification et de contrôlabilité.

4 Domaines d'applications

Les modèles numériques sont maintenant un outil de base de l'ingénieur, et sont le noyau dur des activités de conception assistée par ordinateur. On peut dégager plusieurs tendances dans l'évolution de ce domaine qui motivent directement le travail de recherche du projet M3N.

D'une part, les équations utilisées font de plus en plus appel à des modélisations physiques ou chimiques fines et multiples. Ces nouveaux modèles sont utilisés dans les secteurs de haute technologie (semiconducteurs, spatial), de l'environnement, dans le milieu biomédical,... Leur maîtrise conditionne souvent le succès des grands projets technologiques du futur. Il leur faut donc savoir modéliser, mais aussi intégrer et identifier des modèles multiples, optimiser, valider et gérer les acquis. Les équipes de conception ont donc besoin à la fois de modèles numériques, de mailleurs adaptatifs, de solveurs puissants, d'estimateurs d'erreur, d'optimiseurs, tels que les étudie le projet M3N.

Ceci explique les nombreux contacts et contrats que le projet maintient avec le monde automobile, nucléaire, aérospatial, ou avec le secteur électronique. A titre d'exemple, on peut citer les partenariats avec le CEA, le CNET, Dassault-Aviation, EDF ou Valéo.

Les actions menées dans le domaine de la gestion des ressources en eau s'appuient sur des partenariats tant nationaux, qu'euro-péens ou internationaux. Les contacts et contrats actuels

concernent principalement le BRGM, Matra et l'IRD en France, IACM, FORTH en Grèce, Université de Calabre en Italie, IISAS en Slovaquie ainsi que des institutions de recherche appliquée de Chine (IAP,LIAMA) et de la zone sud-méditerranéenne (EMI-Maroc, ENP-Algérie, ENIT-Tunisie, ESIB-Liban). Le réseau sud-méditerranéen s'appuie fortement sur l'ONEP (Office National de l'eau potable du Maroc), qui fournit l'essentiel des données expérimentales utilisées pour la validation et le calibrage des modèles numériques.

5 Logiciels

Nous donnons ci-dessous une liste de logiciels dont certains ont été réalisés au cours des dernières années dans le projet Menusin et que M3N continue à diffuser dans des laboratoires extérieurs, soit dans le cadre de collaborations ciblées, soit par mise à disposition gracieuse.

OPTMTR: Générateur de métrique pour OPTMSH (avec le projet Gamma).

EMC2: Logiciel de maillage automatique interactif 2D (avec le projet Gamma).

BOL2D: Logiciel de calcul (Version 2) des écoulements bidimensionnels pour les gaz dilués polyatomiques régis par des équations de Boltzmann. La méthode numérique est de type particules aléatoires (Monte-Carlo). Ce logiciel est utilisé dans le cadre de contrats avec le CEA.

Participants : Pierre Andries, Jean-François Bourgat [correspondant], Patrick Le Tallec, Benoit Perthame.

NSC2KE-NSC3KE: Logiciel de résolution des équations d'Euler et de Navier-Stokes compressible en 2D ,axisymétrique ou 3D, en laminaire ou turbulent. Méthode de volumes finis d'ordre 2 avec possibilité de flux de Roe-Osher (collaboration SINUS), cinétique ou SUPG. Modèle de turbulence $k-\varepsilon$ avec loi de paroi ou bi-couche (uniquement en 2D-axi). Lois de parois généralisées pour la prise en compte des effets thermiques et de compressibilité. Extension aux domaines déformables et conditions aux limites de transpiration pour le contrôle.

Participant : Bijan Mohammadi [correspondant].

NSIKE: Logiciel de calcul des écoulements incompressibles tridimensionnels gouvernés par les équations de Navier-Stokes. La méthode numérique est basée sur la méthode de projection de Chorin, la discrétisation par les éléments finis couplée avec les techniques *residual distribution*. Pour les écoulements turbulents le modèle $k-\varepsilon$ avec lois de paroi ou méthode bi-couche est utilisé. Extension aux écoulements en repère tournant. Extension aux modèles de turbulence prenant en compte les effets 3D. Extension aux domaines déformables.

Participants : Gorazd Medić, Bijan Mohammadi [correspondant], Mugurel Stanciu.

OPTIMA-TASCOPT: Plateforme d'optimisation et contrôle d'instationnarités, utilisant la différentiation automatique pour les gradients, une gestion 'CAD-Free' de la déformation des surfaces, la déformation de maillage volumique, des interfaces avec des outils CAD suivant les applications, la gestion des repères tournants pour des applications turbomachines. Ce produit est interfacé avec NSC2KE, NSC3KE, NSIKE. Les algorithmes

d'optimisation sont basés sur une formulation *système dynamique* où l'on cherche les points fixes de l'ensemble *fluide-structure-optimiseur*. Un point fixe peut être par exemple une forme optimale ou une loi de contrôle fonction du temps. Cette formulation a permis une extension aux problèmes de contrôle d'instationnarités ainsi qu'une extension aux configurations multi-modèles. Une interface existe aussi avec les maillages du projet Gamma (**emc2**, **Bang**, **ghs3d**).

Participants : Gorazd Medić, Bijan Mohammadi [correspondant OPTIMA], Mugurel Stanciu [correspondant TASCOPT].

HET_2D: Logiciel de recherche destiné à la simulation numérique de dispositifs semi-conducteurs. Les modèles mathématiques implémentés sont les modèles de *Dérive-Diffusion* et *Energie-Transport*. Les variables utilisées pour la formulation sont le potentiel électrostatique et les quasi-niveaux de Fermi auxquelles s'ajoute la température électronique dans le cas du modèle *Energie-Transport*. L'approximation est faite en 2D avec des éléments finis mixtes de bas degré. Ce logiciel a servi à des calculs comparatifs dans des collaborations avec Thomson-LCR, IEF, SGS-Thomson. Un interfaçage avec le logiciel **Bang** du projet Gamma a été réalisé pour l'adaptation automatique de maillage (en dérive-diffusion pour le moment).

Participants : Americo Marrocco [correspondant], Philippe Montarnal¹, Abderrazzak El Boukili², Frédéric Hecht³.

6 Résultats nouveaux

6.1 Modélisation, optimisation et contrôle pour les fluides turbulents ou diphasiques, interaction fluide-structure

6.1.1 Simulation d'écoulements turbulents décollés et instationnaires

Participants : Gabriel Barrenechea, Patrick Le Tallec, Gorazd Medić, Bijan Mohammadi, Olivier Pironneau⁴, Frédéric Valentin⁵.

Mots clés : mécanique des fluides, turbulence.

Résumé : *Le développement des lois de paroi pour les écoulements complexes turbulents a continué dans le cadre des modèles $k-\varepsilon$. Les aspects étudiés concernent les modèles bicouches, les écoulements instationnaires et les domaines mobiles.*

Nous sommes intéressés par la simulation des écoulements complexes turbulents instationnaires et décollés par une approche de type $k-\varepsilon$ -lois de paroi. En particulier, nous avons développé une implémentation robuste et précise des lois de paroi valable pour tout nombre de

1. ancien thésard M3N

2. ancien thésard M3N

3. LAN, Université Paris 6.

4. LAN, Université Paris 6.

5. ancien thésard M3N

Mach, pour les parois adiabatiques et isothermes. Ces lois sont par ailleurs utiles lors du remplacement du modèle $k - \varepsilon$ par des modèles de type LES dans la mesure où les comportements bas-Reynolds dans ces derniers sont prescrits de manière quasi-identique à ceux de modèles de type viscosité turbulente (c'est à dire, avec des fonctions d'amortissement).

Par ailleurs, nous avons introduit un terme non linéaire dans la définition du tenseur de Reynolds pour les cas tridimensionnels et ainsi obtenu un cadre permettant de prendre en compte les effets tridimensionnels les plus importants sans pour autant perdre la simplicité de $k - \varepsilon$.

Pour une extension aux simulations multi-modèle, à l'optimisation de formes, ainsi qu'au contrôle d'instationnarités, nous nous sommes intéressés à l'extension de ces lois et notre implémentation aux configurations en domaines mobiles. Ceci par l'introduction de conditions aux limites d'injection équivalentes ainsi que par une approche ALE. Ceci est important pour les extensions en aéroélasticité, optimisation de formes et contrôle. Les progrès réalisés concernent:

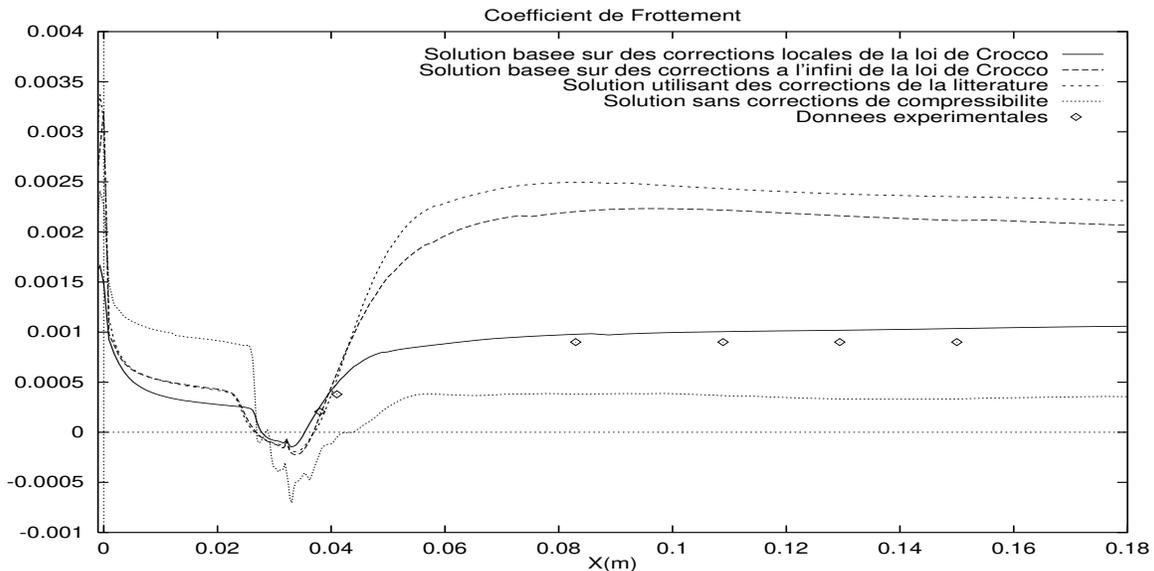


FIG. 1 – Rampe de détente adiabatique : coefficient de frottement, effets des corrections de compressibilité.

- **Les lois de paroi généralisées.** Le modèle de base pour le développement des lois de paroi est le modèle bi-couche qui a montré un bon comportement en bas-Reynolds dans nos simulations passées. Le but est de retrouver par nos lois les résultats de ce modèle sur des maillages 100 fois plus grossiers à la paroi dans la direction normale. Nos calculs montrent une réduction des coûts significative par rapport à l'approche bas-Reynolds, avec le même schéma en temps. Ces lois peuvent être appliquées aux écoulements instationnaires et décollés. Nos observations, utilisant le modèle $k - \varepsilon$ de la turbulence et des *lois de parois généralisées*, montrent que cet ensemble produit dans des situations de décollements et d'instationnarités sur des configurations classiques aussi bien en 2D

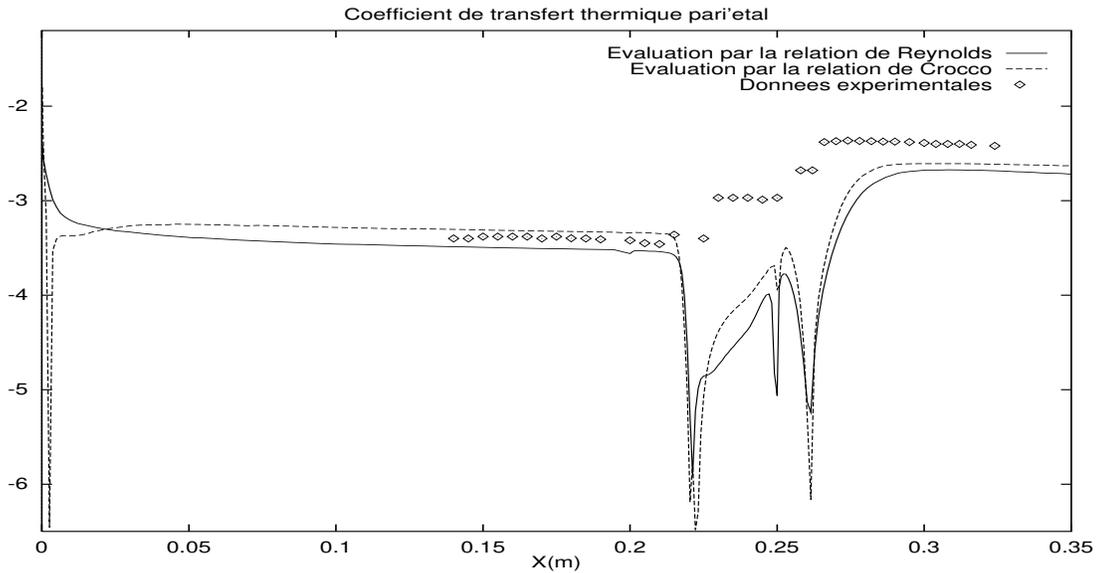


FIG. 2 – *Rampe de compression isotherme : distribution du coefficient de transfert thermique pariétal : relation de Reynolds contre loi de Crocco - effets d'une évaluation conservatrice des flux.*

(marche descendante, cylindre carré et cylindre circulaire, coude) qu'en 3D (canal courbe à section rectangulaire, aile), des résultats assez satisfaisants, comparables avec ceux obtenus avec les approches RSM et LES.

- **Les lois de paroi pour des écoulements instationnaires.** Les lois de paroi pour des problèmes stationnaires ont été étendues aux problèmes où l'écoulement dépend du temps. En particulier, nous avons fait la dérivation des lois de paroi du premier et du second ordre qui prennent en compte la taille de la rugosité, les gradients de pression proches de la paroi et les termes convectifs (dominants si le problème a un nombre de Reynolds important). Ces lois de paroi prennent aussi en compte de façon explicite le caractère instationnaire de l'écoulement, c'est à dire que dans la loi de paroi du second ordre il y a des termes de dérivée en temps.
- **La prise en compte des effets de compressibilité dans les lois de paroi.**
- **Les lois de paroi pour parois isothermes.**
- **La prise en compte des rugosités.**
- **L'extension aux domaines mobiles.** Dans le cadre de l'action incitative fluide/structure et pour la prédiction du comportement des ouvrages en génie civil, nous avons étendu les outils ci-dessus aux écoulements instationnaires en domaines déformables. Dans un premier temps, nous avons développé le solveur NSIKE pour les écoulements incompressibles. Ainsi, nous avons validé les approches ALE et injection équivalente qui nous sert par ailleurs comme justification a posteriori lors de simplifications dans les calculs de gradients en optimisation de formes.

- **La prise en compte des effets tridimensionnels dans les modèles de turbulence.**

6.1.2 Optimisation de formes

Participants : Gorazd Medić, Bijan Mohammadi, Nicolà Petruzzelli⁶, Olivier Pironneau⁷, Mugurel Stanciu.

Mots clés : algorithme numérique, mécanique des fluides, optimisation de formes.

Résumé : *Les approches d'optimisation de formes par différentiation automatique ont été améliorées avec l'utilisation de gradients approchés et le couplage avec des modules d'adaptation de maillages.*

La résolution des problèmes d'optimisation de formes et de contrôle d'états est un défi majeur pour la simulation. Ce travail concerne la mise en place d'une chaîne d'optimisation de formes aérodynamiques et de contrôle en 2D et 3D pour des configurations rigides ou élastiques. Le contrôle est présenté comme une optimisation de formes dépendante du temps.

Nous abordons quelques points cruciaux pour la mise en place de cette chaîne. Points qui sont par ailleurs utiles pour d'autres problèmes. Ces techniques ont fait pour la plupart l'objet d'un transfert technologique vers l'industrie.

Notre démarche est basée sur les algorithmes de type gradient, exprimés aux travers de systèmes dynamiques. La différentiation automatique par programme permet l'accès aux sensibilités. Enfin, l'adaptation de maillage automatique et une gestion des déformations sans faire appel à la CAO pendant la phase d'optimisation, mais uniquement en finale ont permis la mise au point d'une chaîne d'optimisation flexible.

Un point essentiel dans notre approche concerne l'évaluation incomplète des gradients qui permet de réduire de manière drastique le coût de calcul. Ainsi, on montre qu'il est possible d'utiliser des définitions différentes de la fonctionnelle pour son évaluation et sa différentiation.

Les progrès essentiels concernent :

- **La différentiation automatique de programmes.** Une originalité de notre approche réside dans l'utilisation intensive de la différentiation automatique par programme en modes direct et inverse en collaboration avec le projet SAFIR à travers Odysée.
- **Le gradient approché.** Nous avons par ailleurs découvert que différentes définitions (ou codes) pouvaient être utilisées pour l'évaluation du coût et son gradient. Plus exactement, nous procédons à des simplifications des fonctionnelles avant d'appliquer la différentiation automatique.

Cette étude prouve que la différentiation automatique est non seulement une aide à la résolution mais qu'elle peut aussi aider à l'analyse et la compréhension des problèmes.

La validation de cette approximation a été observée pour les configurations du CEA-CESTA (Corps de rentrée), de Dassault Aviation (SSBJ) et de Valeo (Ventilateur).

- **Gradient approché et calcul du Hessien.** Une vérification a posteriori de cette approximation provient de son utilisation pour une évaluation du Hessien de la fonctionnelle

6. université de Bari

7. LAN, université Paris 6.

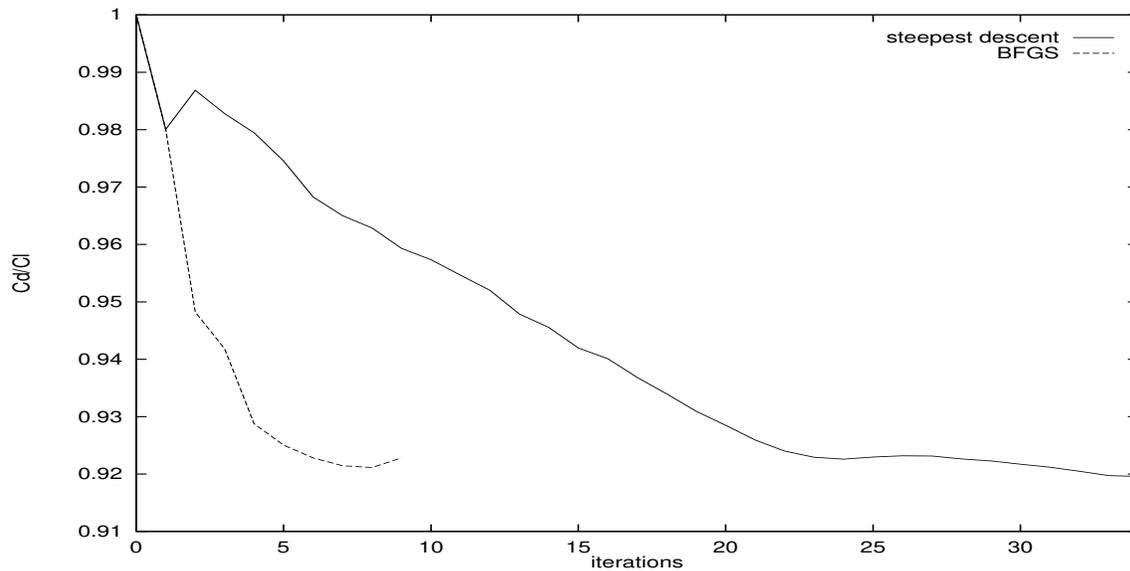


FIG. 3 – *Optimisation pour le profil multi-element RA16 - convergence de la fonction de coût: méthode de pas fixe et méthode BFGS*

à minimiser, nécessaire dans une méthode BFGS, en optimisation de formes. Ainsi, nous avons vérifié la pertinence de ces gradients incomplets pour diverses configurations allant de l'incompressible au supersonique, en 2 et 3 dimensions d'espace.

Une des applications effectuées concerne l'optimisation d'un profil multi-element proposé par Dassault Aviation dans le cadre du contrat européen DECISION.

- **L'approche 'CAD-Free'**. Une autre particularité de ce travail a été de montrer la possibilité d'utiliser tout point de discrétisation appartenant à la forme comme point de contrôle (en 2 et 3D) et ceci sans perte d'efficacité. L'intérêt de cette approche est de pouvoir gérer les déformations de surface sans faire appel aux outils de la CAO qui sont de manipulation et différentiation difficiles (voire impossible vue leur fermeture) pendant la phase d'optimisation. Ainsi, nous avons traité des configurations 3D avec plusieurs milliers de paramètres de contrôle. Ceci est similaire à l'optimisation topologique par l'enrichissement de l'espace de contrôle. Dans cette approche, l'interface avec la CAO se fait en dehors de la boucle d'optimisation. Un exemple de création de cet interface est présenté plus bas dans le cadre d'un contrat avec VALEO.
- **La H-adaptivité**. Un avantage de l'approche 'CAD-Free' est la possible prise en compte de l'adaptation de maillages car elle permet des changements de discrétisation (Figures 4 et 5). En effet, jusqu'ici, l'optimisation se faisait sur un espace de contrôle de taille donnée et sur des maillages à connectivité fixe (i.e. uniquement les coordonnées des points étaient variables pendant l'optimisation). Ainsi, pour introduire naturellement la notion de maillage-indépendance en optimisation, nous avons couplé l'adaptation de maillages non-structurés et l'optimisation de forme (dans le cadre d'une collaboration avec le projet

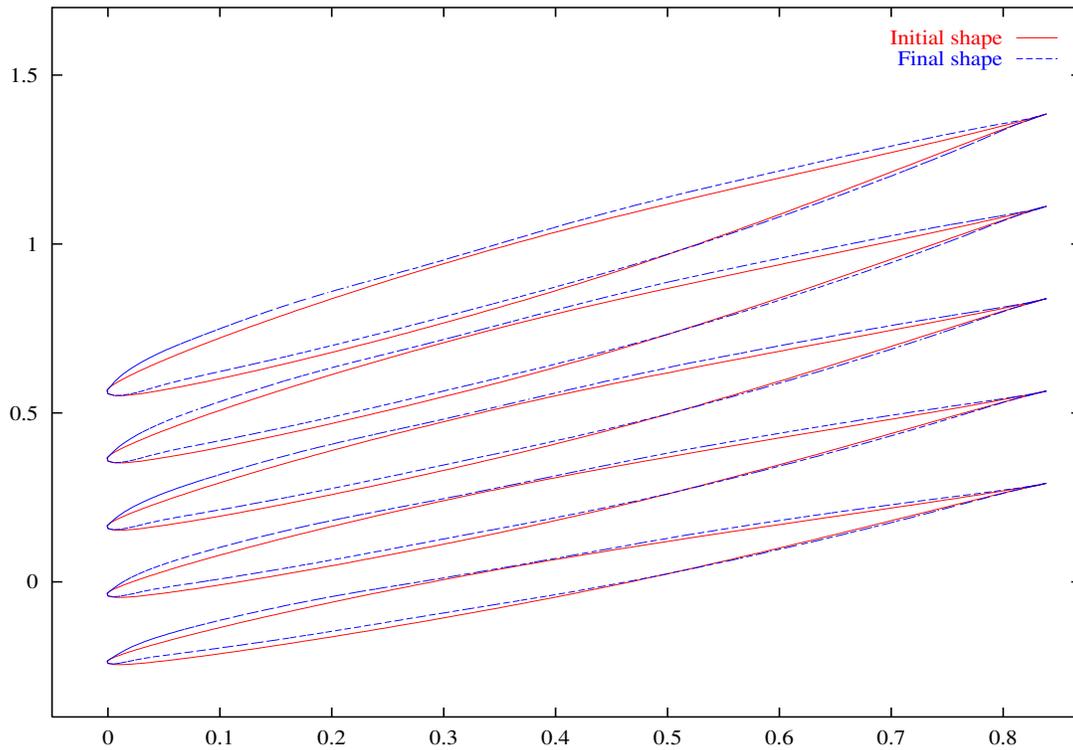


FIG. 4 – *Optimisation d'une pale de ventilateur. Les formes de la pale initiale et de la pale optimisée pour plusieurs sections. La forme de la pale est décrite par 2000 variables.*

GAMMA).

- **L'optimisation de formes avec repères en rotation.** Pour traiter les applications spécifiques aux turbomachines, des termes de rotation ont été rajoutés aux équations Navier-Stokes et le solveur NSIKE a été modifié.

Par ailleurs, dans le cadre de contrat avec VALEO TM, nous avons créé une interface entre OPTIMA et l'environnement industriel de VALEO basé sur une CAO 3D et un solveur commercial TASCflow. L'ensemble a donné naissance à un outil d'optimisation en repère tournant pour les configurations en turbomachinerie. Ici le problème concerne l'optimisation d'une pale de ventilateur de refroidissement du moteur pour l'augmentation du rendement (minimisation du couple de résistance), tout en gardant une différence de pression amont-aval constante.

- **Le contrôle.** L'approximation du gradient, présentée plus haut, en permet une évaluation en temps réel. Ainsi, nous avons pu étendre le domaine d'applications de notre outil d'optimisation aux cas instationnaires pour des configurations aussi bien statiques que dynamiques. Un cas important pour ce dernier est le couplage fluide/structure.

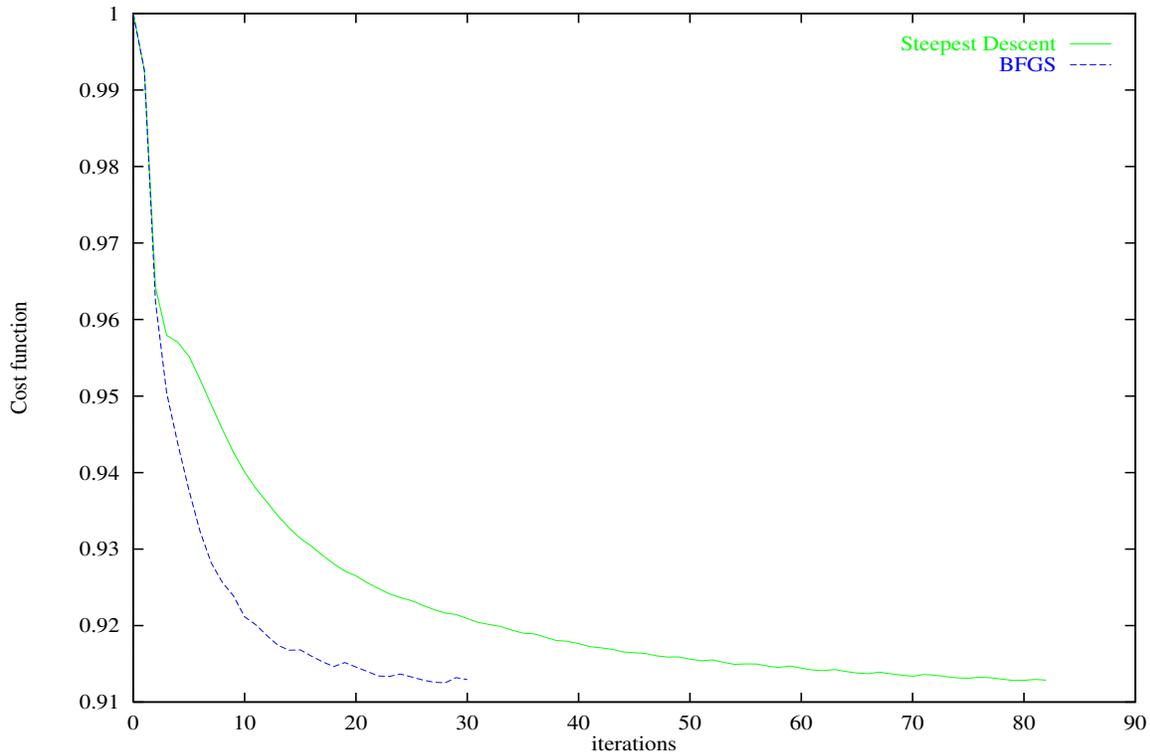


FIG. 5 – La convergence de la fonction de coût $1/\eta$. Deux méthodes d’optimisation ont été employées: pas de descente fixe et BFGS.

6.1.3 Estimateur d’erreur a posteriori

Participants : Rodolfo Araya, Patrick Le Tallec.

Mots clés : estimateur d’erreur, matériaux compressibles, matériaux incompressibles.

Résumé : *Dans le cadre des équations de l’élasticité compressible fortement hétérogène, un estimateur d’erreur a posteriori a été défini, analysé, implémenté et validé numériquement.*

Notre contribution a été de définir, analyser, implémenter et valider numériquement un estimateur d’erreur a posteriori du type hiérarchique pour des problèmes elliptiques non homogènes. En particulier, nous avons appliqué notre estimateur aux problèmes d’élasticité (compressible) fortement hétérogène. Pour ce type de problèmes, il n’existe pas de résultats concrets dans la littérature. Nous avons aussi montré, à l’aide de différents tests numériques, que notre estimateur hiérarchique est équivalent à l’estimateur du résidu pondéré développé dans une précédente étude. Ces résultats ont été publiés dans un rapport de recherche INRIA.

Ces travaux se poursuivent par la mise au point d’une généralisation de l’estimateur hiérarchique pour des problèmes homogènes et hétérogènes avec mélange de matériaux compressibles

et incompressibles. Ce nouvel estimateur a la propriété d'être paramétré par un espace de fonctions bulles choisies par l'utilisateur. D'un point de vue numérique cette généralisation est en cours d'implémentation.

6.1.4 Écoulements diphasiques

Participants : Rémi Abgrall², Thierry Gallouët^{3,4}, Marie-Hélène Lallemand-Tenkès, Boniface Mkonga², Richard Saurel^{1,4}.

Mots clés : écoulements diphasiques, mécanique des fluides compressibles.

Résumé : *On s'intéresse aux problèmes diphasiques où l'on suppose que chaque fluide est compressible. Le modèle utilisé est un modèle à 6 équations traduisant les différentes lois de conservation pour chaque phase, complétée d'une équation de transport pour la fraction volumique. Cette approche a l'avantage de préserver l'hyperbolicité du système et d'être applicable aussi aux problèmes à interface et aux écoulements dilués en particules.*

On travaille sur la mise au point d'un solveur robuste et précis de type VFRoe en variables caractéristiques ainsi que sur une méthode d'intégration en temps de type implicite dans le cadre d'un contrat Renault pour la modélisation des injecteurs Diesel.

Depuis le deuxième trimestre 1999, on s'intéresse aux problèmes d'écoulements multiphasiques (multifluides, problèmes à interface, écoulements dilués en particules). Ces problèmes sont d'une grande complexité physique (exposant adiabatique γ non constant, lois d'état complexes ou tabulées) et ont un vaste champ d'applications. Le problème principal réside dans la modélisation physique et mathématique et dans son champ d'applications.

Plusieurs approches sont possibles et on se restreint ici aux problèmes diphasiques (écoulements faisant intervenir deux fluides comme l'air et l'eau par exemple), où chacun des fluides est considéré compressible. On préiviligie l'approche de Gallouët et Saurel^[GS] qui conduit à un système à six équations, complété d'une équation supplémentaire pour l'évolution de la fraction volumique formant un système hyperbolique de par l'hypothèse de compressibilité. L'introduction de cette septième équation est nécessaire puisqu'on ne suppose pas a priori que les pressions des deux fluides sont égales. Le choix de ce modèle est motivé par le fait qu'il permet de traiter aussi bien des problèmes d'écoulements diphasiques que des problèmes multifluides avec interface. Pour la deuxième classe de problèmes, les seconds membres font intervenir les différences de pressions et vitesses de chaque fluide; ces termes sont traités par un procédé de

-
1. IUSTI Marseille
 2. Université de Bordeaux
 3. Université de Provence
 4. SMACS

[GS] T. GALLOUËT, R. SAUREL, « Modèles et méthodes numériques pour les écoulements fluides », Université de Provence, Centre de mathématique et d'informatique.

relaxation des vitesses et pressions de façon que les vitesses et pressions à l'interface soient respectivement égales à la vitesse et la pression d'interface.

Hormis l'équation d'évolution de la fraction volumique, les 6 équations (3 pour chaque phase) forment deux sous-systèmes d'Euler avec seconds membres qu'on peut résoudre par un solveur de Riemann approché. Ce solveur de Riemann doit être à la fois robuste, peu coûteux et suffisamment précis (en particulier, il ne doit pas être diffusif pour les chocs stationnaires), il doit de plus être facilement généralisable au modèle diphasique. C'est pourquoi la première étape consiste d'abord à étudier le comportement de différents solveurs de Riemann sur le système d'Euler 1-D. On privilégie pour l'instant le schéma VFRoe en variables non conservatives [BGH96] dont l'étude est en cours, en collaboration avec T. Gallouët et R. Abgrall.

On valide aussi notre modèle en le comparant à d'autres modèles existants en particulier avec celui de A. In et B. Perthame [Aru99] qui ont mis au point un modèle à six équations (pas d'équation d'évolution de la fraction volumique), où les sous systèmes sont résolus séparément puis complétés par une étape de relaxation sur la pression permettant de les coupler. Cette validation est en cours pour le cas 1-D.

Ce travail est aussi suscité par un contrat Renault (ARC moteur) pour l'étude des injecteurs diesel dans les moteurs et qui démarre dès octobre 1999 pour une durée de trois ans. Il s'inscrit aussi dans l'optique du nouveau projet INRIA **SMACS** qui devrait accueillir M.H. Lallemand-Temkès dans un futur proche, et qui devrait être créé à Marseille sur le site de Château-Gombert dès le 1er trimestre 2000, projet initié par Hervé Guillard, des membres de l'Université de Marseille, du CNRS, de l'IUSTI et M.H. Lallemand-Temkès.

6.2 Domaine biomédical, biomécanique

Participants : Marc Thiriet, Marina Vidrascu⁸.

Mots clés : algorithme numérique, biomécanique.

Résumé : *Les travaux biomécaniques entrent dans plusieurs cadres collaboratifs. Les études sur les pathologies de la circulation artérielle cérébrale et du liquide céphalo-rachidien sont poursuivies. De même, les investigations sur les tubes collabables ont été complétées de manière à fournir les paramètres hydrauliques nécessaires à la conception de bancs expérimentaux pour explorer la réponse cellulaire aux contraintes hémodynamiques. Le laboratoire pharmaceutique Innothera est associé à ce travail. Enfin, notre participation à l'action coopérative "Modélisation d'organes pour la simulation en chirurgie" consiste à fournir un maillage approprié aux différentes équipes impliquées et un modèle mécanique de référence du foie.*

8. Avant Projet MACS, Rocquencourt.

[BGH96] T. BUFFARD, T. GALLOUËT, J.-M. HÉRARD, « Schéma VFRoe en variables caractéristiques: principes de base et application aux gaz réels », *rapport de recherche*, EDF-DER, 1996.

[Aru99] I. ARUN, *Méthodes numériques pour les équations de la dynamique des gaz complexes et écoulements diphasiques*, thèse de doctorat, Université Paris 6, octobre 1999.

6.2.1 Longueurs d'entrée des écoulements laminaires dans les veines collabables

La cellule endothéliale, véritable interface dynamique entre le sang et la paroi vasculaire, est un récepteur mécanique et chimique qui sécrète des facteurs vasomoteurs, des agents de croissance et des molécules d'adhésion. Elle répond à de multiples signaux, en particulier les contraintes exercées par le sang. Cette étude porte sur l'analyse de ces contraintes dans diverses

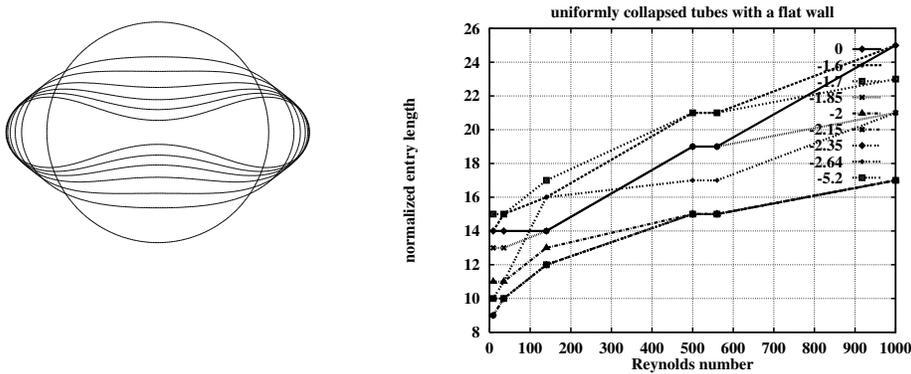


FIG. 6 – Relations entre la longueur d'entrée adimensionnelle (L_e/d_h) et le nombre de Reynolds pour les neuf configurations explorées (à gauche).

configurations de collabage d'un tube collabable, de section non-contrainte elliptique (ellipticité non-contrainte $k_0 = 1.005$), pris comme modèle de la veine isolée. Le tube collabé repose sur un plan rigide. Un tel tuyau modélise la veine superficielle susceptible de posséder une paroi face au muscle plus résistante à la déformation que la paroi externe. L'existence d'un tel plan permet, en outre, de placer l'optique de la microscopie inversée. Il s'agit de fournir la longueur d'entrée pour chaque configuration à partir d'un profil de vitesse en entrée uniforme, avec différents nombres de Reynolds Re compatibles avec les écoulements sur cultures cellulaires pour déterminer la longueur des maquettes (Fig 6).

6.2.2 Simulateur de chirurgie laparoscopique

La contribution du projet dans l'action coopérative "Modélisation d'organes pour la simulation en chirurgie" est essentiellement de fournir un maillage du foie à partir des données de l'imagerie médicale, muni de références (Fig 7).

Ces références correspondent aux conditions aux limites associées aux rapports anatomiques et aux faces à solliciter pour comparer le modèle biomécanique de référence du comportement mécanique du foie et les modèles de réponse aux sollicitations en temps réel utilisés dans le simulateur. Par exemple, la partie de la face postérieure du foie en regard de la veine cave inférieure et le hile, qui, en particulier, reçoit la veine porte, sont associés à une condition d'encastrement. En outre, des calculs de la déformation d'un gel cylindrique ont été effectués pour être comparés aux résultats expérimentaux.

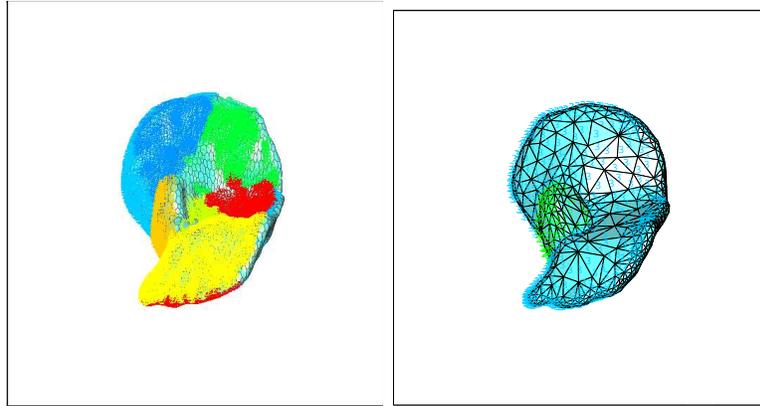


FIG. 7 – Maillage du foie (face inférieure) : à gauche, maillage polyédrique (4818 points, 2411 faces) issu de l'imagerie médicale, muni de 10 références, et à droite triangulation simplifiée (2411 points, 4818 faces), munie de 5 références.

6.3 Semi-conducteurs

Participants : Americo Marrocco, Frédéric Hecht⁹.

Mots clés : algorithme numérique, élément fini, logiciel numérique, modélisation, semiconducteur.

Résumé : *Les activités de recherche liées au contrat obtenu dans le cadre des consultations thématiques de France-Télécom se sont poursuivies cette année et ont abouti à la rédaction du rapport final de contrat et au transfert de la maquette logicielle au CNET. Ces recherches étaient guidées par deux grand axes, d'une part l'extension des techniques de résolution (développées pour le modèle de dérive-diffusion) aux modèles de type Energy-Transport et d'autre part l'implémentation de techniques d'adaptation de maillage dans le cas du modèle dérive-diffusion.*

Dans les différents modèles mathématiques servant de base à la simulation numérique du comportement des dispositifs semi-conducteurs, les équations sont formulées en utilisant les variables entropiques, c'est à dire le potentiel électrostatique (φ) et les quasi-Niveaux de Fermi des électrons et des trous (resp. φ_n, φ_p) dans le modèle de dérive-diffusion et par exemple $(\varphi, \varphi_p, \frac{\varphi_n}{T_n}, \frac{-1}{T_n})$ dans le cas du modèle de type *Energy-Transport*, T_n étant la température électronique.

Une synthèse des différents résultats obtenus dans le cadre de la simulation des modèles *Energy-Transport* a été donnée dans le rapport final de contrat; parmi ces résultats on peut noter que :

- le choix des variables entropiques dans ce contexte était très intéressant mathématiquement car il donnait au modèle (statique) le même caractère elliptique sous-jacent dans

9. LAN, Université Paris 6.

le modèle dérive-diffusion et procurait par là-même des indications quant aux extensions à faire dans le cadre de l'algorithmique numérique

- le choix du maillage avait une certaine importance et une influence sur le comportement de l'algorithmique de résolution (avec peut être une sensibilité accrue du fait du choix des éléments finis mixtes de type Raviart-Thomas). Disons pour résumer, que la géométrie des dispositifs étudiés (HEMT) étant *très aplatie* -ceux-ci étant constitués de couches plus ou moins fines, certaines étant de l'ordre de quelques nanomètres pour une longueur de 4 à 5 microns-, nous avons utilisé pour les premières simulations un maillage fortement anisotrope, ceci afin de réduire le nombre de triangles (et donc la taille des problèmes à résoudre) tout en respectant la géométrie. Le choix de ce type de maillage a considérablement détérioré le comportement algorithmique du schéma de résolution et seul l'état d'équilibre ou des configurations très proches de l'état d'équilibre ont pu être simulées numériquement. En délimitant la zone de simulation ou en considérant des dispositifs *moins étirés*, que l'on ne sait pas encore construire technologiquement aujourd'hui, mais que l'on espère savoir réaliser dans quelques années, nous avons retrouvé avec des maillages "*plus isotropes*" un comportement algorithmique plus conforme à ce que l'on obtenait en dérive-diffusion.
- pour les dispositifs de petite taille, utiliser pour la simulation le modèle de dérive-diffusion ou le modèle de type *Energy-Transport* donnait des résultats très différents sur les courants traversant la structure, les courants calculés par le modèle *Energy-Transport* pouvant être jusqu'à 200 fois plus forts que les courants donnés par le modèle dérive-diffusion

Dans la partie relative à l'adaptation de maillage pour le modèle dérive-diffusion, les essais numériques relatifs aux dispositifs à hétérojonctions ont été complétés et étendus au cas où la simulation utilise le couplage éléments finis mixtes 1D et 2D (l'adaptation se faisant uniquement dans les régions approchées avec des éléments finis 2D).

Rappelons que pour les dispositifs à matériaux homogènes le processus d'adaptation automatique de maillage (via le logiciel Bamg) a pu être implémenté sans difficulté majeure et on a pu constater que l'on pouvait obtenir une convergence (relativement au pas du maillage) des solutions et aussi, bien entendu, de grandeurs physiques intéressantes comme les différents courants circulant dans la structure et de paramètres globaux caractérisant le dispositif, comme le facteur de gain par exemple.

Certaines difficultés sont apparues avec la simulation de dispositifs à hétérojonctions. Dans le dispositif modèle étudié, le quasi-niveau de Fermi des électrons (φ_n) présente une forte variation (couche interne) au niveau de l'hétérojonction, dans la direction orthogonale à celle-ci, et la technique d'adaptation qui est basée sur les hessiens des variables primales, raffine de plus en plus le maillage au voisinage de l'interface au fur et à mesure des itérations. La majorité des triangles du maillage se trouve donc concentrée dans une fine couche et le nombre de triangles augmente très vite, détériorant de plus le profil des matrices utilisées dans l'algorithmique de résolution. Le fait d'avoir introduit le couplage 1D/2D permet de réduire le nombre de triangles nécessaires pour une précision donnée car cette zone d'accumulation des triangles, dans une approche purement 2D, est cette fois approchée via les éléments 1D. Il reste cependant à bien appréhender l'épaisseur de cette couche 1D et à calculer plus précisément les hessiens (et donc les métriques) au niveau des raccords 1D-2D en tenant aussi compte de la solution dans la

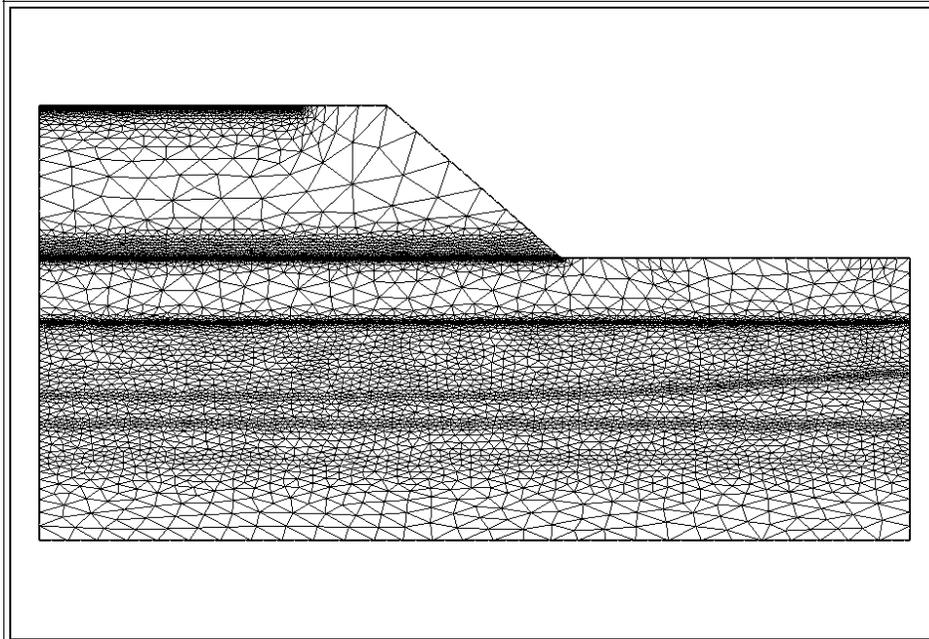


FIG. 8 – *Adaptation de maillages. Transistor à hétérojonctions, paramètre d'erreur $ERR=0.00625$, maillage (25423 éléments)*

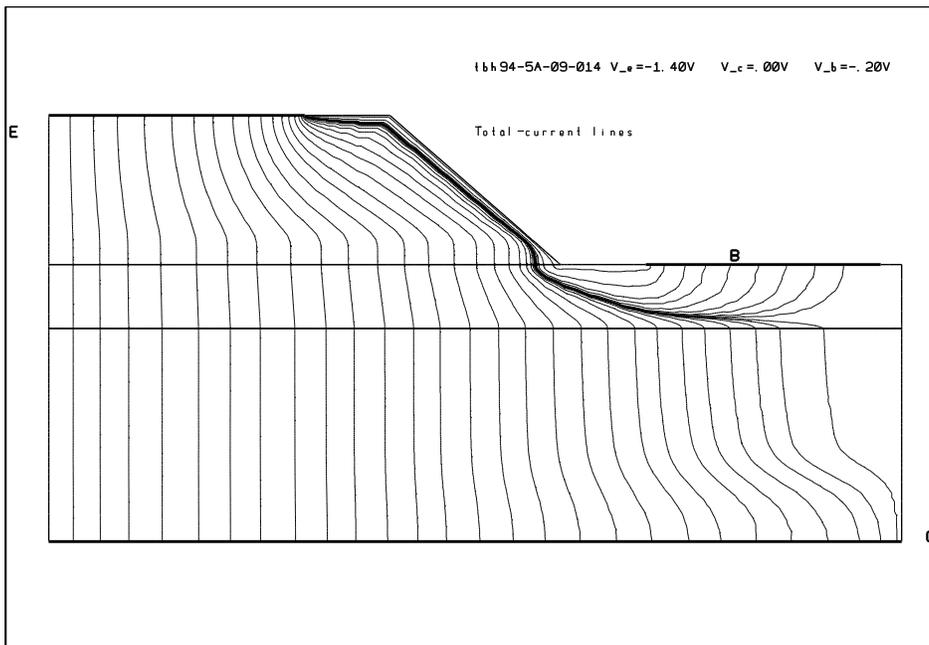


FIG. 9 – *Adaptation de maillages. Transistor à hétérojonctions, paramètre d'erreur $ERR=0.00625$, lignes de courant pour un point de fonctionnement dans la région NORMAL-DIRECT*

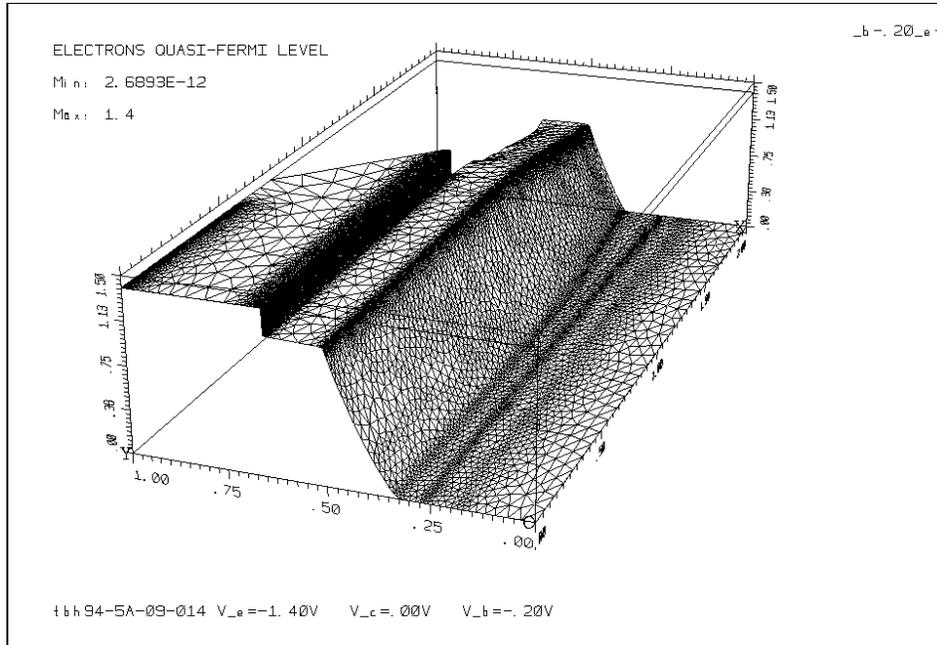


FIG. 10 – Adaptation de maillages. Transistor à hétérojonctions, paramètre d'erreur $ERR=0.00625$, quasi-niveau de Fermi des électrons (lissage P^1)

region 1D.

On présente quelques résultats sur les figures 8-10; on peut voir sur la figure 8 le maillage adapté obtenu pour le transistor à hétérojonctions modèle ($GaAlAs, GaAs$) pour une simulation numérique utilisant le couplage d'éléments finis mixtes en 1D et en 2D. La couche 1D le long de l'interface Emetteur-Base, située dans l'émetteur a une épaisseur de 50Angs et n'est pas représentée sur cette figure, ni sur les suivantes. Le paramètre d'erreur utilisé dans Bamg est $ERR = 0.00625$ donnant un maillage comprenant environ 25500 éléments. Ce maillage, de même que les lignes de courant représentées sur la figure 9 correspondent à un point de fonctionnement du transistor situé dans la zone de fonctionnement normal-direct, les valeurs des potentiels appliqués sont $V_C = 0.V$, $V_B = -0.2V$, $V_E = -1.4V$. Le facteur de gain obtenu est 31.8. On peut voir sur la figure 10 une représentation du quasi-niveau de Fermi des électrons φ_n , ou plutôt un lissage P^1 de cette solution sur le maillage 2D, gommant par là-même la discontinuité qui devrait être présente au niveau de l'hétérojonction.

La collaboration avec le CERFACS pour la mise en œuvre des techniques de décomposition de domaines afin de simuler le fonctionnement des semi-conducteurs sur des machines multi-processeurs ou sur un réseau de stations de travail s'est poursuivie. Deux approches ont été développées, l'une utilisant la résolution directe parallèle (qui reste limitée en nombre de processeurs utilisables) et l'autre plus "classique" en décomposition de domaines et qui est une méthode itérative de type gradient conjugué préconditionné visant à réduire la différence des solutions locales sur le squelette de la décomposition.

La première approche redonne exactement le même comportement algorithmique (nombre

de pas de temps, et nombre d'itération de Newton à chaque pas de temps) que la méthode initiale (sans décomposition de domaine) tournant en mémoire centrale sur un processeur. Pour la seconde approche, le comportement algorithmique semble se dégrader au fur et à mesure que le nombre de sous domaines augmente. Peut être dans ce cas faut-il revoir la stratégie des tests d'arrêt des itérations aux différents niveaux de l'algorithmique.

6.4 Equations cinétiques et gaz raréfiés

Mots clés : équation de Navier-Stokes, équation de Boltzmann.

6.4.1 Modèles BGK Gaussiens

Participants : Pierre Andries, Jean-François Bourgat, Patrick Le Tallec, Benoit Perthame.

Résumé : *Le modèle BGK-Gaussien simplifie le noyau de collision de l'équation de Boltzmann. Nous avons validé ce modèle dans le cas diatomique, montré qu'il peut prendre le relais de l'équation de Boltzmann pour le calcul d'écoulements transitionnels raréfiés/denses et qu'il fournit des nombres de Prandtl réalistes.*

Notre objectif est de remplacer l'équation de Boltzmann qui modélise les écoulements de gaz raréfiés par des modèles plus simples et moins coûteux en temps calcul lorsque l'on veut passer aux gaz semi-raréfiés.

Le noyau de collision étant l'élément le plus complexe de cette équation, le modèle BGK consiste à le linéariser, mais le nombre de Prandtl qui en découle est supérieur aux valeurs expérimentales. Le modèle BGK-gaussien (ou ES-BGK) qui fait l'objet de nos travaux en est une variante qui consiste à remplacer l'équilibre local supposé maxwellien par un équilibre gaussien. Il permet de faire varier et d'adapter le nombre de Prandtl et ainsi de fournir des coefficients de transport aux équations de Navier-Stokes.

Notre travail a consisté à montrer que le modèle ES-BGK bien que n'étant pas dérivé directement de l'équation de Boltzmann peut décrire correctement les écoulements semi-raréfiés et qu'il peut faire mieux que le modèle BGK.

Après la mise au point, en 1998, du modèle monoatomique, dans le cadre d'un contrat avec le CEA-CESTA, renouvelé en 1999, nous l'avons étendu aux gaz polyatomiques, d'un plus grand intérêt dans la pratique. Pour cela nous avons introduit un paramètre de relaxation supplémentaire qui règle l'échange d'énergie interne et d'énergie de translation. L'ajustement de ce paramètre permet d'approcher la solution Boltzmann et fournit un nombre de Prandtl pour le gaz étudié.

Nous avons réalisé de multiples tests numériques comparant le modèle ES-BGK aux simulations particulières de l'équation de Boltzmann et au modèle BGK traditionnel. Pour rendre les résultats fiables nous avons introduit des sous-cycles de collision aussi bien pour ES-BGK que pour Boltzmann dès que la probabilité de collision approche 1. Nous avons satisfait les lois de conservation dans les collisions et notamment la conservation de l'énergie totale (collisions

inélastiques). Enfin nous avons ajusté au mieux le paramètre de relaxation de l'énergie interne et de l'énergie de translation.

Les conclusions que nous pouvons tirer sont que le modèle ES-BGK améliore le modèle BGK en couche limite, converge bien vers la solution Boltzmann quand le gaz devient plus dense ($Kn < 10^{-3}$) et fournit des nombres de Prandtl proches des valeurs expérimentales.

Nous avons aussi mis au point un calcul et une visualisation des distributions de vitesses dans des régions caractéristiques de l'écoulement (paroi, choc). Pour des cas plus raréfiés, $Kn \sim 10^{-2}$, on a ainsi pu observer que le modèle BGK étalait trop les distributions et homogénéisait trop les différents flux de particules, notamment le long de la paroi où le pic du flux de particules venant de l'écoulement infini est gommé alors que le modèle ES-BGK le conserve bien.

Pour compléter ce travail il faudrait comprendre d'où provient, pour des gaz plus raréfiés ($Kn > 10^{-2}$) la trop grande diffusivité dans la partie externe du choc et, pour les gaz plus denses ($Kn < 10^{-3}$) profiter de la qualité du modèle ES-BGK pour lui trouver une résolution numérique plus rapide (schéma implicite,..)

6.4.2 Asymptotique haute fréquence de l'équation de Helmholtz

Participants : Jean-David Benamou¹⁰, Benoit Perthame, François Castella¹¹, Olof Runborg¹².

Le formalisme de Wigner a été étudié pour les équations de Helmholtz afin d'en justifier la limite haute fréquence. Partant de la fonction d'onde décrite par

$$\Delta u + \omega^2 n^2 u = S(x)$$

où $S(x)$ représente une source, ω la fréquence et avec des conditions de radiation à l'infini, on définit la fonction de Wigner

$$w(x, \xi) = T F_{y \rightarrow \xi} u(x + \frac{\varepsilon y}{2}) \bar{u}(x - \frac{\varepsilon y}{2})$$

avec $\varepsilon = \omega^{-1}$. A la limite haute fréquence, celle-ci vérifie l'équation de l'optique géométrique qui a la structure d'une équation cinétique

$$\xi \cdot \nabla_x w + \nabla_x \frac{n^2}{2} \cdot \nabla_\xi w = \Sigma(x, \xi)$$

Nous avons justifié entièrement cette limite haute fréquence dans ce cadre qui évite les problèmes de caustique.

Dans un premier temps le cas d'une source ponctuelle a été étudié (rapport de recherche [49]). Les travaux en cours permettent de traiter des sources plus complexes (source concentrée sur une courbe, une surface) et d'identifier la source Σ en haute fréquence selon la position x dans l'espace et la fréquence ξ .

10. Projet Ondes

11. CNRS-Rennes

12. Post-doc européen -M3N et ENS-

6.5 Schémas cinétiques pour les équations de Saint-Venant

Participants : Emmanuel Audusse, Ramaz Botchorishvili, Marie-Odile Bristeau, Benoît Perthame.

Mots clés : équation de Saint-Venant, volumes finis, schémas cinétiques, termes sources.

Résumé : *Une méthode de résolution des équations de Saint-Venant par des schémas cinétiques a été développée, ces schémas ont la propriété essentielle d'assurer la positivité de la hauteur d'eau. On a étudié la prise en compte du terme source dû à la bathymétrie afin de conserver certains équilibres tels que celui du lac "au repos" et validé cette approche sur des cas tests bidimensionnels.*

Les équations de Saint-Venant permettent de simuler des écoulements à surfaces libres dans les rivières, les lacs, les régions côtières, etc... Sous différentes hypothèses (hauteur d'eau petite comparée aux dimensions du domaine de calcul, pression hydrostatique, homogénéité verticale des composantes horizontales de la vitesse), le système bidimensionnel des équations de Saint-Venant est déduit des équations d'Euler tridimensionnelles pour les fluides incompressibles avec frontière libre.

On s'intéresse à la résolution de la formulation conservative des équations de Saint-Venant sur des maillages non structurés. Une approche classique pour résoudre ce problème de type hyperbolique est d'utiliser un schéma volumes finis qui s'appuie sur le maillage "dual" d'un maillage triangulaire. Différents schémas basés sur des solveurs de Riemann approchés sont bien connus, parmi ceux-ci le schéma de Roe est très répandu mais il ne garantit pas la positivité de la hauteur d'eau (certaines études récentes tendent à l'améliorer dans ce sens). Il est très important de traiter correctement les zones à hauteur d'eau très petite ou nulle car les zones avec interfaces sol mouillé-sol sec sont fréquentes dans les applications: ruptures de barrage, crues, bancs découvrants... Aussi nous avons développé une méthode de résolution par des schémas cinétiques ([21]) qui ont la propriété essentielle d'assurer la positivité de la hauteur d'eau. Ces schémas sont basés sur l'interprétation cinétique du système qui conduit à une équation de transport linéaire pour laquelle on écrit facilement un schéma décentré; par intégration sur le domaine des vitesses, on en déduit un schéma au niveau macroscopique.

Si on couple au système de Saint-Venant une équation d'advection d'une variable passive (température, polluant), le schéma cinétique permet d'assurer la conservation et la monotonie de cette variable.

Une autre difficulté dans la résolution des équations de Saint-Venant est la prise en compte du terme source modélisant la bathymétrie, sachant que le schéma doit préserver différents équilibres. Certaines données conduisent à des états stationnaires dans lesquels le gradient de flux est non nul mais doit être exactement équilibré par le terme source. Ce problème est actuellement l'objet de nombreuses recherches. L'exemple le plus simple est le lac "au repos" dont le fond est irrégulier, la hauteur d'eau et la cote du fond sont variables mais l'on doit retrouver la cote de la surface libre constante. Nous avons développé et mis en oeuvre des variantes du schéma cinétique initial qui préservent ces équilibres.

Les codes 1D et 2D (Cf. Fig. 13) ont été testés et validés sur différents problèmes ([48]) en régime fluvial ou torrentiel. En particulier, on a repris les tests définis pour le Workshop

organisé à Lisbonne en 1996 dans le cadre du groupe de travail AIRH (rupture de barrage sur sol mouillé ou sol sec, écoulement à débit constant dans un canal à fond variable).

6.6 Modélisations numériques et Gestion des Ressources en Eau

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

Participants : Mohamed Amara, Fadi El Dabaghi, Paul Louis George¹³, Maxime Kaiss, Antoine Gharbi, Mohamed Abdelouahed, Said Belaaouane, Rachid Gouza, Maatoug Hassine, Mohamed Oussaa, Nabil Smakghi.

Mots clés : Navier-Stokes, Euler, équation de Saint-Venant, éléments finis, calcul parallèle, MPI, maillage, calibrage, SIG (Système d'information géographique), SGBD (Système de Gestion de Base de Données), données.

Résumé : *Dans cette thématique portant sur la 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, l'effort s'est focalisé cette année sur la validation numérique d'un modèle Navier-Stokes 2D en formulation $(\psi - \omega)$ pour le traitement de l'eutrophisation par aération mécanique, sur le développement d'algorithmes parallèles sous MPI et sur la construction d'un prototype d'intégration de logiciels liant un SGBD, un SIG, un mailleur et un code Navier-Stokes 2D.*

Cet axe est intimement lié à l'action ESIMEAU. L'idée motrice sur la modélisation des équations d'Euler et de Navier-Stokes s'appuie sur la décomposition de Helmholtz d'un champ de vecteur dans $L^2(\Omega)$ ($u = \nabla\phi + v$, $v = \nabla \times \psi$). La résolution numérique de ces équations dans un environnement éléments finis non structurés repose sur un algorithme de correction rotationnelle aux écoulements potentiels, combinée à la méthode des caractéristiques pour la convection.

Sous le nouvel éclairage apporté par les conditions aux limites absorbantes dans les problèmes de propagation d'onde. La poursuite de cet axe de recherche se maintient dans un esprit orienté vers l'intégration des logiciels et en particulier dans les directions suivantes:

- a) Dans un cadre variationnel naturel $\psi \in H^1(\Omega)$ et $\omega \in H^{-1}(\Delta, \Omega)$, sans condition de régularité supplémentaire, on propose une nouvelle formulation mixte $(\psi - \omega)$ en 2D/3D pour le Bilaplacien Δ^2 avec une méthode d'approximation optimale de classe C^0 par éléments finis IP^k et une estimation d'erreur en $O(h^k)$ pour $k \geq 1$. L'originalité de ce résultat tient dans l'optimalité de l'approximation tandis que les nombreuses études sur ce sujet ne donnaient qu'une estimation en $O(h^{k-1})$ pour des éléments finis IP^k avec $k \geq 2$; cette nouvelle formulation sera une alternative sérieuse à celle en $u - p$ car elle est de coût égal en 2D et inférieur en 3D.

13. Projet Gamma

- b) Etude de modélisation liée aux problèmes d'eutrophisation et de frontières libres et notamment des conditions aux limites absorbantes pour un écoulement rotationnel torrentiel ou fluvial; deux approches, s'appuyant sur une formulation $(\psi - \omega)$ et déjà validées en 2D incluant une technique de remaillage non conservative, sont à l'étude pour le 3D:
- 1) une reposant sur un solveur biharmonique adoptant une discrétisation mixte IP^1/IP^1 de classe C^0 optimale (un opérateur elliptique $\nabla \times \nabla \times$ pour ψ et sur la méthode des caractéristiques pour le transport de ω combinée à un opérateur elliptique $(\alpha Id - \nu \Delta)$ pour ω dans le cas des équations de Navier-Stokes);
+ Applications: Bassins versants et écoulement torrentiel, problème d'eutrophisation mono- et di-phasique avec le volet identification et optimisation des injecteurs (voir figures 14, 15, 16, 17).
 - 2) une basée sur un suivi du front d'onde par des résolutions successives du $\nabla \times \nabla \times$ pour ψ sur des domaines réduits emboîtés évoluant avec le front d'onde (efficace pour le fluvial);
+ (Applications: Bassins versants et écoulement fluvial).
- c) Modélisation des équations de Navier-Stokes incompressibles 2D/3D par une formulation $(\phi - v)$ (décomposition de Helmholtz) et résolution numérique avec les outils suivants:
- Solveur elliptique pour le calcul de ϕ .
 - Solveur parabolique/hyperbolique pour le calcul de v s'appuyant sur un algorithme d'Uzawa préconditionné pour la partie Stokes et une méthode des caractéristiques pour la partie convective.
- + Applications: problème d'eutrophisation mono- et di-phasique avec le volet identification et optimisation des injecteurs.
- d) Modélisation des équations de Navier-Stokes compressibles 2D/3D en régime subsonique rotationnel ou transsonique par une formulation $(\phi - v)$ et Résolution numérique combinant les outils développés dans c). L'originalité de cette approche réside dans l'avantage de se ramener à un système de Navier-Stokes modifié incompressible en v et à une équation potentielle transsonique modifié pour ϕ , les deux sous-problèmes étant bien maîtrisés numériquement.
- + Applications: problème d'eutrophisation mono- et di-phasique avec le volet identification et optimisation des injecteurs.
- e) Recherche d'éléments finis mixtes offrant une compatibilité d'approximation pour le calcul de $\nabla \phi / v$ dans le cas de Navier-Stokes en $(\phi - v)$ et assurant la condition *Inf-Sup* pour le calcul de $\phi / \nabla \phi$.
- f) Algorithmique parallèle pour les différents solveurs déjà développés ou à implémenter, notamment en fluide dans ESIMEAU et CruCID. L'implémentation sous MPI du solveur $(\psi - \omega)$ avec analyse du load-balancing et des performances pour la résolution des équations de Navier-Stokes incompressible. La plateforme testée correspond à un réseau de stations (processeurs Risk) sous UNIX ou de Pc (processeur PENTIUM) sous WindowsNT.
- g) Mise en place sur un environnement PC d'une application prototype d'un système intégré liant un SGBD (ACCESS), un SIG (Arcview), un mailleur (Emc2) et un solveur Navier-Stokes 2D.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Action Optimisation de forme en mécanique des fluides

Participants : Bijan Mohammadi, Gorazd Medić, Mugurel Stanciu.

Cette action correspond à un contrat avec VALEO TM pour une durée de trois ans (1998-2000). Des pales de ventilateurs de refroidissement moteur ont été calculées de façon à optimiser l'écoulement de l'air. Le rendement du ventilateur est ainsi augmenté. Notons que cette étude est réalisée en trois dimensions.

7.2 Action Modélisation simplifiée de gaz dilués

Participants : Pierre Andries, Jean-François Bourgat, Patrick Le Tallec, Benoit Perthame.

Nous avons poursuivi la collaboration avec le CEA-CESTA qui a pour objet la conception et la validation de nouveaux modèles numériques pour le calcul d'écoulements transitionnels raréfiés/denses, plus simple que l'équation de Boltzmann. Le contrat pour 1999 porte sur l'étude de nouveaux modèles gaussiens.

7.3 Action Semi-conducteurs

Participants : Americo Marrocco, Benoit Perthame, Frédéric Hecht¹⁴.

Suite aux Consultations thématiques lancées par France-Télécom-CNET en décembre 1994, ayant entre autres pour thème *Nouvelles approches de simulation et de modélisation de composants photoniques et optoélectroniques*, un marché d'étude pour une durée de trois ans (avec le CNET), portant sur la *Modélisation et algorithmes de simulation des phénomènes intervenant aux temps très courts ou pour les petites dimensions*, notifié en mars 1996 s'est terminé cette année et a motivé toute l'action du projet sur les semi-conducteurs.

7.4 Action Décision

Participant : Bijan Mohammadi.

Etude en optimisation de formes pour le transport aéronautique civil, (voir aussi 8.3.1).

7.5 Action ESIMEAU

Elaboration d'un système intégré pour la modélisation et la gestion des ressources en eau en zones arides et semi-arides

Participants : Fadi El Dabaghi, Mohamed Amara, Maxime Kaiss, Mohamed Abdelouahed, Maatoug Hassine, Said Belaaouane, Mohamed Oussaa, Nabil Smakghi, Rachid Gouza, Antoine Gharbi, Paul Louis George¹⁵

14. LAN, Université Paris 6

15. Projet Gamma

voir 8.3.2.

7.6 Action CruCID

modélisation numérique de Crues via le Calcul Intensif Distribué

Participants : Fadi El Dabaghi, Mohamed Amara, Maxime Kaiss, Mohamed Abdelouahed, Antoine Gharbi, Bernard Philippe¹⁶, Hugues Leroy¹⁷, Paul Louis George¹⁸.

voir 8.3.3.

7.7 Action ANFAS

data fusion for Flood Analysis and decision Support

Participants : Fadi El Dabaghi, Mohamed Amara, Maxime Kaiss, Olivier Monga¹⁹, Francois-Xavier LeDimet²⁰, Mohamed Abdelouahed, Paul Louis George²¹.

voir 8.3.4.

7.8 Action WADI

Water supply watershed planning and management: an Integrated approach.

Participants : Fadi El Dabaghi, Mohamed Amara, Maxime Kaiss, Mohamed Abdelouahed, Paul Louis George²².

voir 8.3.5.

7.9 Action Saint-Venant

Participants : Emmanuel Audusse, Ramaz Botchorishvili, Marie-Odile Bristeau, Benoit Perthame.

Cette action correspond à un contrat avec EDF(LNH) pour l'année 1999. Des schémas préservant les équilibres ont été mis au point (schémas cinétiques), testés en dimension deux et comparés à ceux d'un "benchmark" européen.

16. INRIA-Rennes.

17. INRIA-Rennes

18. Projet Gamma

19. Action VIRAGE-Rocquencourt.

20. INRIA-Grenoble.

21. Projet Gamma

22. Projet Gamma

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions Régionales

Le projet est associé étroitement et en priorité aux Universités de Paris 6, Paris Dauphine, à l'Ecole Polytechnique et à l'Ecole Normale Supérieure : participation aux formations doctorales, accueil de thésards ou de stagiaires, collaboration de Professeurs de ces Institutions au projet ou réciproquement. Le projet s'est aussi rapproché de l'Université de Versailles Saint-Quentin en participant activement au DEA de Modélisation, Simulation et Applications de la Physique.

Par ailleurs, le projet est membre du Firtech Calcul Scientifique de la région parisienne, qui regroupe industriels et laboratoires intéressés par les problèmes de modélisation numérique en milieu industriel. Le travail de thèse de Rodolfo Araya est partiellement financé par une bourse de ce Firtech.

Enfin, le projet est à l'origine d'un club anévrisme qui a vu le jour en 1997, et qui réunit en dehors des personnels des projets Epidaure, Gamma et MACS intéressés, A. Gaston, chef du service de neuroradiologie au CHU Henri Mondor à Créteil, J. Bittoun, responsable du CIERM à l'hôpital de Kremlin Bicêtre.

8.2 Actions nationales

Au niveau du CNRS, le projet M3N participe à trois groupements de recherche (GdR) : couplage d'équations, optimisation, et physique des particules chargées (Sparch). Ces GdR ont un fort pôle d'intérêt à Toulouse et Montpellier. Le projet a des relations privilégiées avec l'Université de Montpellier, des collaborations avec le centre de Rennes.

Au niveau INRIA, les recherches sur le couplage fluide-structure sont développées dans le cadre d'une action incitative. Celle-ci est pilotée par S. Piperno (du projet Caiman, INRIA-Sophia-Antipolis). Y participent également les projets Gamma et MACS ainsi que le LCPC.

8.3 Actions financées par la Communauté Européenne

8.3.1 Décision

M3N participe, grâce à B. Mohammadi et E. Laporte, au projet européen DECISION réunissant l'INRIA, Dassault Aviation, Nag, VTT, l'université de Jyvaskyla et des industriels finlandais. Le but du projet est de développer :

- une plateforme d'intégration d'outils de conception permettant le partage effectif d'informations en vue de la réalisation de projets de conception complexe via des stratégies reconnues d'optimisation, actuelles et à venir. Les composantes principales de cette technologie d'optimisation regroupent : des disciplines couplées, des optimiseurs déterministes traditionnels, des optimiseurs stochastiques (algorithmes génétiques et recuit simulé), optimisation multi-critères combinant algorithmes génétiques parallélisés et concepts d'optima de Pareto ou Nash, contraintes.
- une base de données contenant les descriptions des spécifications utilisées pour des cas-test d'optimisation, à la fois de la part des fournisseurs du projet (INRIA, VTT, université

de Jyvaskyla) et des utilisateurs finaux (Dassault Aviation et les industriels finlandais), un logiciel de visualisation spécialisé, des indications sur les processus d'optimisation.

8.3.2 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 la prédiction et l'évaluation 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 sera un shareware à mettre 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 meilleure et réaliste restitution 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.

8.3.3 CruCID

Il s'agit d'un projet européen ESPRIT 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 permettra 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 réduira les temps de calcul et permettra 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 permettra 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.

8.3.4 ANFAS

L'objectif global du projet ANFAS, effectué dans le cadre d'un projet européen IST(5^{ème} PCRD) est de développer des systèmes interactifs d'aide à la décision pour la gestion et la protection d'inondation, intégrant les techniques les plus avancées de la vision et de la modélisation numérique. Quand une inondation va se produire, les décideurs doivent décider quelles sont les actions les plus appropriées: évacuation de la population, renfort des digues, rupture intentionnelle de digues, etc. Anfasc consiste à développer un outil de simulation et de prévision au sein d'un système intégré d'aide à la décision par opposition à un système de détection précoce. Pour cela, Le projet ANFAS comportera:

- l'acquisition de données par des techniques avancées - optique, radar, radar d'interférométrie, etc - et qui seront incorporées dans un système d'information géographique

- le développement d'outils informatiques avancés pour la modélisation des scènes s'appuyant sur la modélisation numérique des crues et sur la simulation des zones inondées.

La vision par ordinateur et le calcul scientifique seront employés ensemble afin de tenir compte de l'information extraite à partir de vraies images pour le calcul des paramètres hydriques et physiologiques. Ceci permettra la simulation de scénario d'inondation et évaluer ainsi les mesures à prendre pour diminuer les dommages. ANFAS fournira des cartes de risque d'inondation sur trois sites situés respectivement en Chine, en Slovaquie et en France. Ce projet est coordonné par Olivier Monga, F.EL Dabaghi est responsable de la tâche de modélisation et simulation numérique des crues.

8.3.5 WADI

Le projet WADI coordonné par F.EL Dabaghi, est soumis à 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.

8.4 Relations bilatérales internationales

8.4.1 Europe

Il faut mentionner la participation du projet à une action de recherche commune avec l'Université de Kaiserslautern, sur le thème des gaz raréfiés, dans le cadre de l'accord bilatéral DFG/CNRS et des relations avec l'Université de Catania sur la modélisation de semi-conducteurs.

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). Une nouvelle action (WADI) est engagée avec l'Université de Calabre en Italie et une autre (ANFAS) a été entamée avec IISAS de Slovaquie et le IAP/LIAMA en Chine..

8.4.2 Russie et Asie centrale

Le second axe de l'activité internationale du projet est l'approfondissement de la collaboration franco-russe en Calcul Scientifique et Mécanique des Fluides autour de l'Institut Liapunov. Outre la DRET, les partenaires de cette action sont le projet SINUS, le CNRS, Dassault-Aviation, l'Université de Moscou, le centre de Modélisation Mathématique de Moscou, l'Université de Tomsk, le Centre de Calcul et l'Institut de Mécanique des Fluides de Novosibirsk. Deux applications y sont particulièrement privilégiées : le calcul d'écoulements en régime transitionnel ou raréfiés avec le professeur Ivanov et les techniques de décomposition de domaines et de domaines fictifs en Mécanique des Fluides et en Electromagnétisme.

Ces actions ont été évaluées en fin 1996 et de nouveaux projets sur les mêmes thèmes ont démarré en juin 1997.

8.4.3 Méditerranée

Les relations concernent des institutions de tous les principaux pays francophones de cette zone à savoir: Algérie (Ecole Nationale Polytechnique d'Alger), Liban (Ecole 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 en cours) ont pour cadre des programmes euro-méditerranéens ou des programmes bilatéraux engagés depuis 96.

8.5 Accueil de chercheurs étrangers

- O. Runborg, Suède, (9 mois).
- R. Botchorishvili, Tbilissi, Géorgie, (7 mois).
- C.Schmeiser, TU Vienne, Autriche, (5 jours).
- M.D. Tidriri, Iowa State University, Etats-Unis, (1 mois).
- N.Kampanis, FORTH, Grèce (1 semaine)
- V.Dugalis, IACM/FORTH, Grèce (1 semaine)
- P. Prastacos, IACM/FORTH, Grèce (2 x 1 semaine)
- M. Berrah, ENP-Alger, Algérie (1 semaine)
- M. Kettab, ENP-Alger, Algérie (2 semaines)
- S.Benmamar, ENP-Alger, Algérie (2 semaines)
- W. Nejm, Beyrouth, Liban (2 x 1 semaine)
- D.Ouazar, EMI-Rabat, Maroc (8 x 1 semaine)
- D.Hasnaoui, ONEP, Maroc(2 x 2 semaines)
- M.Jaoua, ENIT-Tunis, Tunisie (1 semaine)

- M.A.Taoud, EMI-Rabat, Maroc (5 jours)
- M.Ezbach, EMI-Rabat, Maroc (5 jours)
- A.Cheng, Univ of Delwane USA (5 jours)
- M.Foultane, ONEP-Rabat, Maroc (5 jours)
- B.Amaziane, Univ de Pau, France (2 x 1 semaine)

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

P. Le Tallec participe au Comité Directeur des Ecoles d'été CEA-EDF-INRIA, et est membre du Comité Scientifique et Technique de l'ONERA ainsi que du Conseil Scientifique de l'Institut Liapunov. B. Perthame et P. Le Tallec assurent l'organisation scientifique des écoles CEA-EDF-INRIA sur les problèmes non linéaires appliqués. Les sessions organisées en 1999 ont été :

- Suivi d'interfaces (mai 1999).
- Mathématiques financières (juin 1999).
- Modélisation mathématique et numérique des problèmes de contact et de frottement (novembre 1999).

Benoit Perthame est éditeur en chef de la revue M2AN, éditeur des revues CALCOLO, CPDE et SIAM J. Math. Analysis, Marie-Odile Bristeau fait partie du Comité Editorial de la revue Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.

Dans le cadre des activités de dissémination des projets communautaires ESIMEAU et CruCID, F.EL Dabaghi a organisé et animé les manifestations suivantes

- ESIMEAU Workshop on GIS and Advanced Computer Tools; INRIA-FORTH-CITET, Co-Chairman, Tunis (Tunisie), 29-31 octobre 1998.
- CruCID Workshop et Tutorial sur le HPCN et l'Algorithmique Parallèle; INRIA-ESIB, Chairman, Beyrouth (Liban), 14-18 Déc, 1998.
- CruCID Workshop et Tutorial sur la Modélisation/SIG/Interfaces; INRIA-ESIB, Chairman, Beyrouth (Liban), 17-19 Déc, 1998.
- CruCID Workshop et Tutorial sur la Modélisation Numérique des Crues via le HPCN; INRIA-EMI, Co-Chairman, Rabat (MAROC), 5-8 Juillet, 1999.

9.2 Actions d'enseignement

- Mathématiques appliquées, cours de DEA, université Paris 6 et Ecole Polytechnique (B. Perthame).
- Travaux dirigés de Contrôlabilité, Pôle universitaire Léonard de Vinci (M.O. Bristeau), Session des postgradués, 6h.
- 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).
- Méthodes Numériques des sciences de l'Ingénieur, TD et TP de 4^{ème} Année à l'IUSTI, Université de Marseille (M. Kaiss)

9.3 Autres Enseignements

- Cours CEMRACS: Kinetic schemes for Fluid Dynamics. Theory and Applications 5-9 juillet 1999 à Orsay : Kinetic schemes for the shallow water equations, par M-O. Bristeau
- Cours Numerical Methods in Fluid Dynamics, 12-16 juillet 1999 à Coimbra (Portugal) par B. Perthame
- Méthodes numériques en Mécanique de fluides, Stage F03, ENSTA, du 6-10 décembre 1999, par A. Marrocco.
- Méthodes d'éléments finis mixtes, cours de DEA, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs de Rabat Mars 1999 (M. Amara).

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 en avoir la liste complète des contributions. On peut cependant citer la participation active avec présentation de communications des membres de M3N aux conférences suivantes

- Journée du CTI-12, Bagnaux, janvier 1999.
- AIAA, "Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 37th", Reno, janvier 1999.
- French-Russian Workshop, Novosibirsk, juin 1999.
- AIAA, "Fluid Dynamic Conference, 30th", Norfolk, juin 1999.
- ERCOFTAC- Workshop on adjoint methods, Toulouse, juin 1999.
- Journée de Mathématiques Appliquées Carthage, Juin 1999
- VIIèmes journées franco-espagnoles de Mathématiques Appliquées, Jaca, Septembre 1999.
- ESIMEAU Workshop on GIS and Advanced Computer Tools;INRIA-FORTH-CITET, Tunis (Tunisie), 29-31 octobre 1998.
- 4th ERCIM Environmental Modelling Working Group - Workshop on Environmental Models and Computational Methods FORTH/IACM - Heraklion, Crete (Greece), Nov 1998.
- CruCID Workshop et Tutorial sur le HPCN et l'Algorithmique Parallèle; INRIA-ESIB, Beyrouth (Liban), Déc, 1998.
- CruCID Workshop et Tutorial sur la Modélisation/SIG/Interfaces; INRIA-ESIB, Beyrouth (Liban), Déc, 1998.
- 8th Concertation Meeting for Telematics Applications for Environment; 11-12 May 1999 , EC - Brussels.
- Aldana Workshop-Petra99, IT Applied to Natural Resources Management; Petra, Jordan, 29 May - 1 June, 1999
- 5th ERCIM Environmental Modelling Group - Workshop on Information Systems for Environmental Modelling 3-4 June 1999, Palais des Congrès, Versailles, France.
- CruCID Workshop et Tutorial sur la Modélisation Numérique des Crues via le HPCN; INRIA-EMI, Rabat (MAROC), Juillet, 1999.

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] N. BELLOMO, P. LE TALLEC, B. PERTHAME, « The solution of the nonlinear Boltzmann equation: a survey of analytic and computational methods », *Computer Math. Applic.* 30, 7, 1995, p. 21–30.
- [2] M.-O. BRISTEAU, R. GLOWINSKI, J. PÉRIAUX, « Wave Scattering at high wave numbers using Exact Controllability and Finite Element Methods », *IEEE Transactions on Magnetics* 31, 3, May 1995, p. 1530,1533.
- [3] F. HECHT, A. MARROCCO, « Mixed finite element simulation of heterojunction structures including a boundary layer model for the quasi-Fermi levels », *in : NASECODE X Conference*, Boole Press, p. 50–51, Dublin, june 1994.
- [4] P. LE TALLEC, *Domain decomposition methods in computational mechanics*, North-Holland, 1994, Advances in computational mechanics, Volume 1.
- [5] A. MARROCCO, P. MONTARNAL, « Simulation des modèles energy-transport à l'aide des éléments finis mixtes », *C.R. Acad. Sci. Paris 323*, Série I, 1996, p. 535–541.
- [6] B. MOHAMMADI, O. PIRONNEAU, *Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model*, Masson et J.Wiley Int. Ed., 1994.
- [7] B. MOHAMMADI, O. PIRONNEAU, « New Tools for Optimum Shape Design », *CFD Review*, 1995, Special Issue.
- [8] B. MOHAMMADI, O. PIRONNEAU, *Wall-Laws for Fluids, 2*, Wiley, 1998.
- [9] B. MOHAMMADI, *Mesh Adaption and AD for OSD, 11*, Gakuto Int., 1998, Math. Sc. and App.
- [10] M. THIRIET, G. MARTIN-BORRET, F. HECHT, « Ecoulement rhéofluidifiant dans un coude et une bifurcation plane symétrique. Application à l'écoulement sanguin dans la grande circulation. », *J. Phys. III 6*, 1996, p. 529–542.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [11] A. CHATTI, *Analyse de méthodes d'éléments finis en hydrodynamique*, thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis ENIT-INRIA, juin 1999.
- [12] G. MEDIC, *Étude mathématique des modèles aux tensions de Reynolds et simulation numérique d'écoulements turbulents sur parois fixes et mobiles*, thèse de doctorat, Univ. Paris VI, 1999.

Articles et chapitres de livre

- [13] M. AMARA, H. BARUCQ, M. DULOUE, « Une formulation mixte convergente pour le système de Stokes tridimensionnel », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, CRAS*, 1999.
- [14] M. AMARA, C. BERNARDI, « Convergence of a finite element discretization of the Navier-Stokes equations in vorticity and stream function formulation, Mathematical Modelling and Numerical Analysis », *M2AN*, 1999.
- [15] M. AMARA, A. CHATTI, F. EL DABAGHI, « A Stabilized C^0 Finite Element for Plane Crack Problem », *SIAM J. of Num. Analysis*, à paraître, (Soumis en 1999).
- [16] M. AMARA, F. EL DABAGHI, « An Optimal C^0 F.E. Algorithm for the 2D Biharmonic Problem: Theoretical and Numerical Analysis », *Numerische Mathematik*, à paraître, (Soumis en 1999).
- [17] P. ANDRIÈS, P. LE TALLEC, J. PERLAT, B. PERTHAME, « The Gaussian-BGK model of Boltzmann equation with small Prandtl numbers », *Eur. J. Mech (B fluids)*, à paraître.

- [18] M. O. BRISTEAU, R. GLOWINSKI, B. MANTEL, J. PÉRIAUX, M. SEFRIQUI, *Genetic Algorithms for Electromagnetic Backscattering: Multiobjective Optimization*, édition Y. Rahmat-Samii and E. Michielssen, J. Wiley & Sons, 1999, ch. 13, p. 399–434.
- [19] M. O. BRISTEAU, R. GLOWINSKI, J. PÉRIAUX, T. ROSSI, « Solution Methods for the 3D Harmonic Maxwell Equations on Vector and Parallel Computers using Controllability and Finite Element Methods », *Journal of Computational Physics*, soumis.
- [20] M. O. BRISTEAU, R. GLOWINSKI, J. PÉRIAUX, « Controllability Methods for the Computation of Time-Periodic Solutions; Application to Scattering », *Journal of Computational Physics* 147, 2, December 1998, p. 265–292.
- [21] M. O. BRISTEAU, B. PERTHAME, « Kinetic schemes for solving Saint-Venant equations on unstructured grids », *Book dedicated to Ph. Roe, M. Hafez ed.*, à paraître.
- [22] F. EL DABAGHI, « Numerical Aspects of Aeration Process Modelling in Eutrophised Water Basins », *J. of Systems Analysis Modelling Simulation*, à paraître, (Soumis en 1999).
- [23] G. MEDIC, B. MOHAMMADI, N. PETRUZZELLI, M. STANCIU, « 3d Optimal Shape Design for Complex Flows: Application to Turbomachinery », *AIAA 99-0833*, 1999.
- [24] B. MOHAMMADI, « Contrôle d'instantanéités en couplage fluide-structure », p. 115–123, Note cras.
- [25] B. MOHAMMADI, O. PIRONNEAU, « Mesh Adaption and Automatic Differentiation in a CAD-Free Framework for Optimal Shape Design », *Int. J. Num. Meth. in Fluids* 30, 1999, p. 127–146.
- [26] B. MOHAMMADI, « Dynamical Approaches and Incomplete Gradients for Shape Optimization and Flow Control », *AIAA 99-3374*, 1999.
- [27] B. MOHAMMADI, « Optimal Control of 3D Turbulent Flow over Circular Cylinder », *AIAA 99-3654*, 1999.
- [28] B. MOHAMMADI, « Shape Optimization and Flow Control for Aeroelastic Configurations », *AIAA 99-0182*, 1999.
- [29] N. PETRUZZELLI, B. MOHAMMADI, A. DADONE, « 3D Aerodynamic Shape Design using Hessians based on Incomplete Sensitivities », *IJCFD*, 2000.
- [30] M. THIRIET, ET COLL., *Biomechanics Systems Techniques and Applications IV*, Gordon & Breach, à paraître, ch. Flow in thin-walled collapsible tubes.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [31] M. AMARA, « Méthodes numériques mixtes pour les équations de Navier-Stokes bi et tridimensionnelles », in : *Journée Internationale de Mathématiques Appliquées, Carthage, 24 juin 1999*.
- [32] M. AMARA, « A mixed convergent formulation for the three-dimensional Stokes equations », in : *VII^{èmes} Journées franco-espagnoles de Mathématiques Appliquées, Jaca, Espagne, 16-17 septembre 1999*.
- [33] M. AMARA, « A numerical method for multipolar viscous fluids », in : *VII^{èmes} Journées franco-espagnoles de Mathématiques Appliquées, Jaca, Espagne, 16-17 septembre 1999*.
- [34] F. EL DABAGHI, « Eutrophication Aspects and Numerical Modelling: Methodology, Validation, Parallel Algorithm and Performances; », in : *8th Concertation Meeting for Telematics Applications for Environment; 11-12 May 1999, EC - Brussels*.
- [35] F. EL DABAGHI, « Modèle numérique pour l'aération d'un lac eutrophe par éléments finis basé sur une formulation $(\psi - \omega)$ des équations de Navier-Stokes: Méthodologie, validation, algorithme parallèle et performances », in : *CruCID Workshop et Tutorial sur le HPCN et l'Algorithmique Parallèle, ESIB, Beyrouth, Liban; 14-18 Déc. 1998*.

- [36] F. EL DABAGHI, « Numerical Aspects of Aeration Process Modelling in Eutrophised Water Basins », in : *4th ERCIM Environmental Modelling Working Group- Workshop on Environmental Models and Computational Methods; FORTH/IACM - Heraklion, Crete (Greece)- Nov 16-17, 1998*.
- [37] F. EL DABAGHI, M. KAISS, D. OUAZAR, « Présentation et Sélection de modèles numériques de Crues », in : *CruCID Workshop et Tutorial sur la Modélisation Numérique des Crues via le HPCN; INRIA-EMI, Rabat (MAROC), Juillet, 1999*.
- [38] F. EL DABAGHI, D. OUAZAR, P. PRASTACOS, « ESIMEAU Integrated Information System for Modeling and Management of Water Resources: Concept and Architecture », in : *5th ERCIM Environmental Modelling Group - Workshop on Information Systems for Environmental Modelling; 3-4 June 1999, Palais des Congrès, Versailles, France*.
- [39] F. EL DABAGHI, « Outlook On The Role Of IT In Natural Resources Management In The Arab World -Keynote Speech », in : *Aldana Workshop-Petra99, IT Applied to Natural Resources Management*, Petra, Jordan, 29 may -1 june 1999.
- [40] M. KAISS, H. LEROY, « Benchmark : Parallélisation d'un code Saint-Venant pour l'étude de la propagation de Crues FESWM-FLOMOD (Analyse du code, Run scalaire, Utilisation de PETSc, Algorithmes parallèles, performances) », in : *CruCID Workshop et Tutorial sur la Modélisation Numérique des Crues via le HPCN; INRIA-EMI, Rabat (MAROC), Juillet, 1999*.
- [41] M. KAISS, H. LEROY, « Tutorial MPI: 1)Introduction et Initiation à l'Environnement MPI/MPI2, 2)Comparaison entre MPI et OPEN MPI, 3)Solveurs et bibliothèques PETSc; », in : *CruCID Workshop et Tutorial sur la Modélisation Numérique des Crues via le HPCN; INRIA-EMI, Rabat (MAROC), Juillet, 1999*.
- [42] M. THIRIET, ET COLL., « Computed entry lengths of laminar flow in uniformly collapsed veins with a flat wall. Application to flow-subjected cell cultures. », in : *Arch. Physiol. Biochem., vol. 107 (spt.)*, 24ème congrès de la Société de Biomécanique, Beaune, 1999.
- [43] M. THIRIET, « Modélisation numérique en biomécanique des fluides. Etude des singularités pathologiques. », in : *JEF99: Biomécanique*, 1999.

Rapports de recherche et publications internes

- [44] M. AMARA, S. BELAAOUANE, F. EL DABAGHI, M. HASSINE, « Une formulation mixte ($\psi - \omega$) utilisant un élément fini C^0 optimal et la méthode des caractéristiques pour la résolution des équations de Navier-Stokes incompressible: Analyse théorique et validation numérique », *rapport de recherche*, INRIA, à paraître.
- [45] P. ANDRIÈS, J. BOURGAT, P. LE TALLEC, B. PERTHAME, « Numerical comparison between the Boltzmann and ES-BGK models for rarefied gases », *Rapport de recherche*, INRIA, à paraître.
- [46] P. ANDRIÈS, P. LE TALLEC, J. PERLAT, B. PERTHAME, « The Gaussian-BGK model of Boltzmann equation with small Prandtl numbers », *Rapport de recherche n° 3716*, INRIA, juin 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3716.html>.
- [47] R. ARAYA, P. LE TALLEC, « An a posteriori error estimate of hierarchical type », *Rapport de recherche n° 3722*, INRIA, 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3722.html>.
- [48] E. AUDUSSE, M. O. BRISTEAU, B. PERTHAME, « Kinetic schemes for solving Saint-Venant equations with source terms », *Rapport de recherche*, INRIA, à paraître.
- [49] J.-D. BENAMOU, F. CASTELLA, T. KATSAOUNIS, B. PERTHAME, « High Frequency Limit of the Helmholtz Equations », *rapport de recherche n° 3785*, Inria, octobre 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3785.html>.

-
- [50] M. O. BRISTEAU, R. GLOWINSKI, J. PÉRIAUX, T. ROSSI, « 3D Harmonic Maxwell Solutions on Vector and Parallel Computers using Controllability and Finite Element Methods », *Rapport de Recherche n° 3607*, INRIA, Janvier 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3607.html>.
 - [51] F. EL DABAGHI, D. OUAZAR, P. PRASTACOS, « Architecture du système intégré ESIMEAU: Identification des tâches et des flux d'information inhérents entre les SGBD, le SIG et les Modèles numériques. », *rapport de recherche*, INRIA, à paraître.
 - [52] F. EL DABAGHI, « CruCID Project Programme; Contrat ESPRIT-INCO/DC avec la DGIII - Commission Européenne », *rapport de contrat*, INRIA, octobre 1998.
 - [53] F. EL DABAGHI, « ESIMEAU : Quarterely Report n° 3 », *rapport de contrat*, INRIA, novembre 1998.
 - [54] F. EL DABAGHI, « Workshop on Numerical Modelling, Application to Eutrophication; Rapport D4, Contrat ESIMEAU, DGIII - Commission Européenne », *rapport de contrat*, INRIA, décembre 1998.
 - [55] F. EL DABAGHI, « ESIMEAU : 1st evaluation report; Contrat ESPRIT-INCO/DC avec la DGIII - Commission Européenne », *rapport de contrat*, INRIA, mai 1999.
 - [56] F. EL DABAGHI, « ESIMEAU : Quarterely Report n° 4 Contrat ESPRIT-INCO/DC avec la DGIII - Commission Européenne », *rapport de contrat*, janvier 1999.
 - [57] F. EL DABAGHI, « ESIMEAU : Quarterely Report n° 5; Contrat ESPRIT-INCO/DC avec la DGIII - Commission Européenne », *rapport de contrat*, INRIA, mars 1999.
 - [58] F. EL DABAGHI, « Numerical Simulation of some Eutrophication Aspects: Single phase formulation (2D and 3D,) Rapport D8, Contrat ESIMEAU, DGIII - Commission Européenne », *rapport de contrat*, INRIA, janvier 1999.
 - [59] M. EL DABAGHI, F. MOREL, O. OUAZAR, P. PRASTACOS, A. RIZK, « Architecture of the ESIMEAU system and Components, Rapport D5, Contrat ESIMEAU, DGIII - Commission Européenne », *rapport de contrat*, INRIA, janvier 1999.
 - [60] A. MARROCCO, « Modélisation et algorithmes de simulation de phénomènes intervenant aux temps très courts ou aux petites dimensions dans les dispositifs micro-opto-électroniques. », *Rapport final de contrat*, Inria, décembre 1998.
 - [61] M. THIRIET, « Computational flow models in cerebral congenital aneurisms. », *rapport de recherche*, INRIA, 1999.
 - [62] M. THIRIET, *Modélisation numérique en biomécanique*, Journées de la culture mathématique, IUFM de l'académie de Versailles, Cergy, 1999.

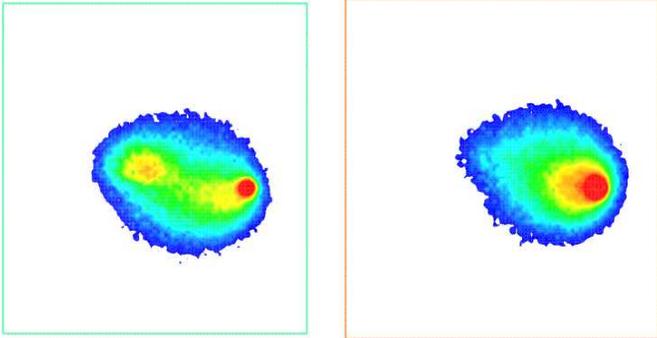


FIG. 11 – *Distribution de vitesses (v_x, v_y) près de la paroi*

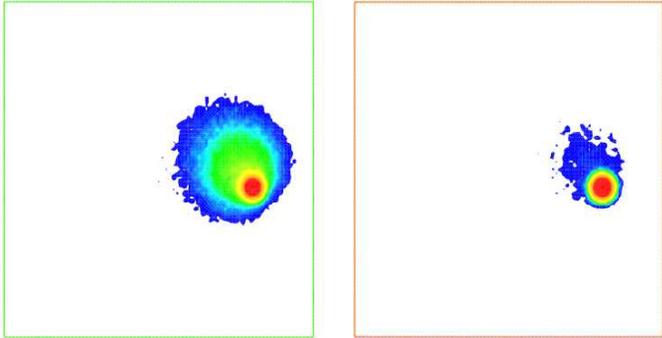


FIG. 12 – *Distribution de vitesses (v_x, v_y) près du choc*

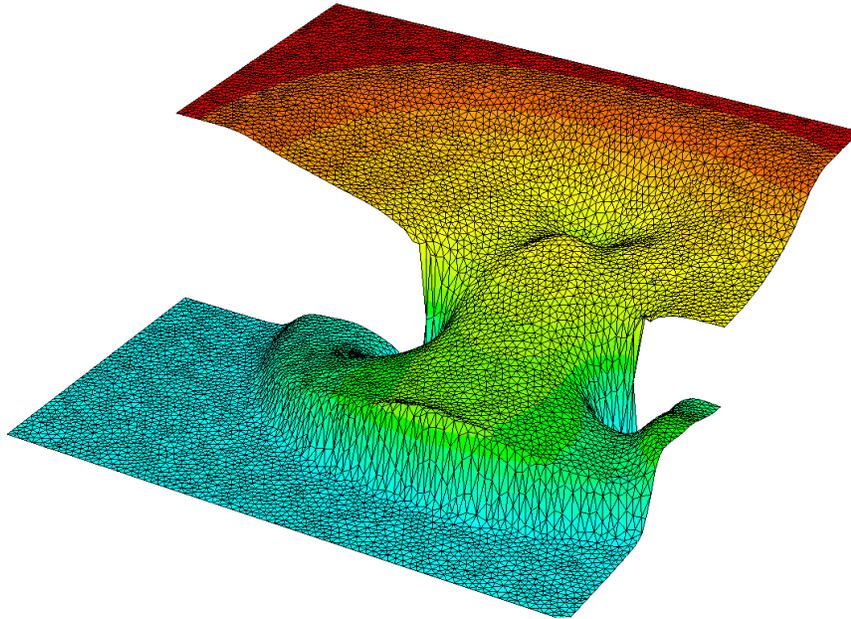


FIG. 13 – Cote de la surface libre après une rupture partielle de barrage.

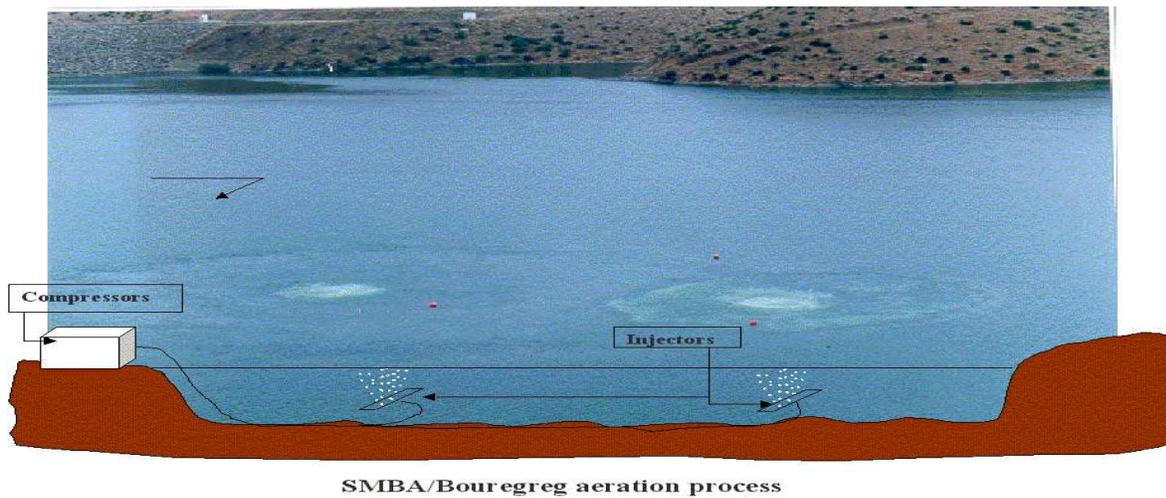


FIG. 14 – Schéma du processus d'aération d'un lac

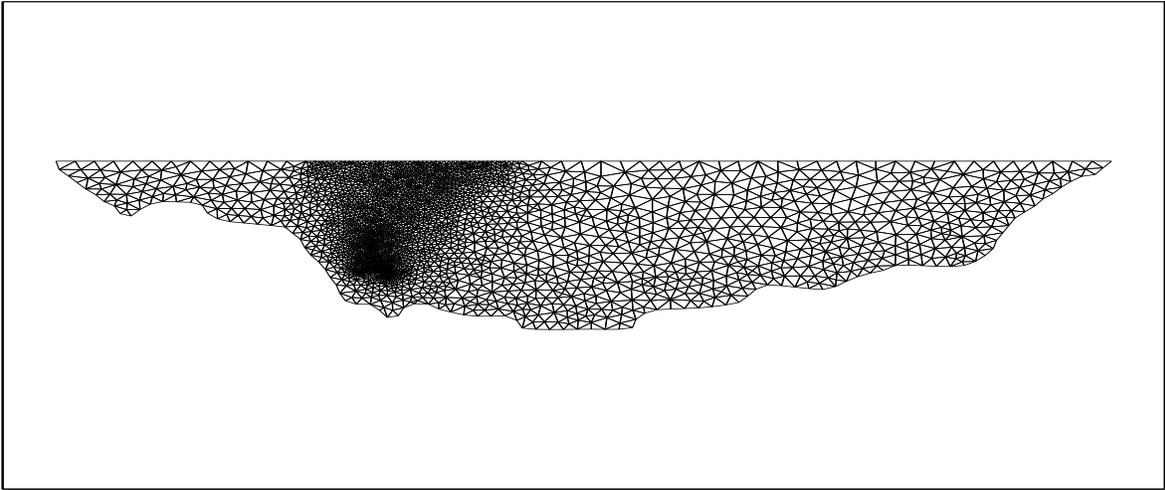


FIG. 15 – Maillage d'une section du lac eutrophe dans l'axe de l'injecteur d'air

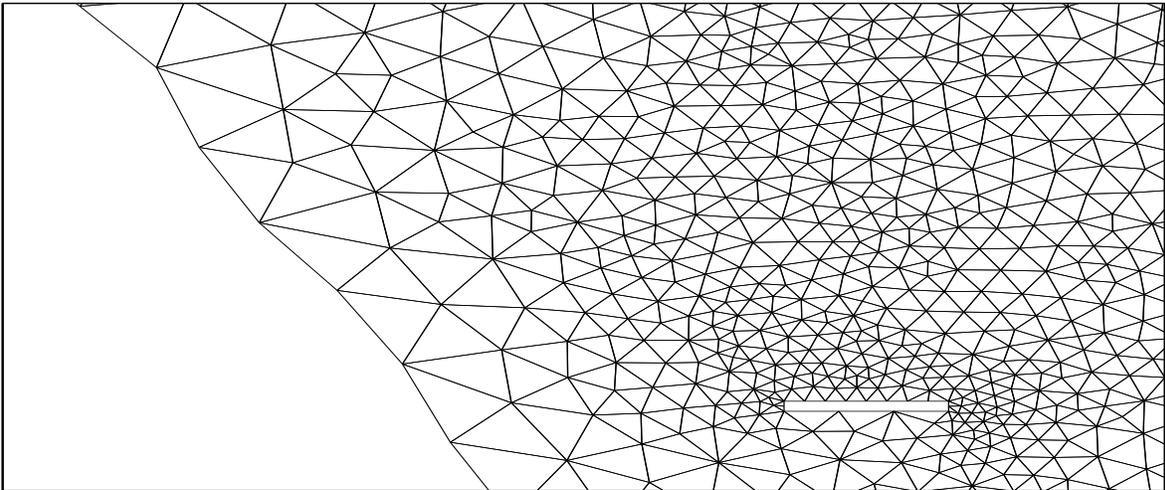


FIG. 16 – Zoom du maillage au voisinage de l'injecteur

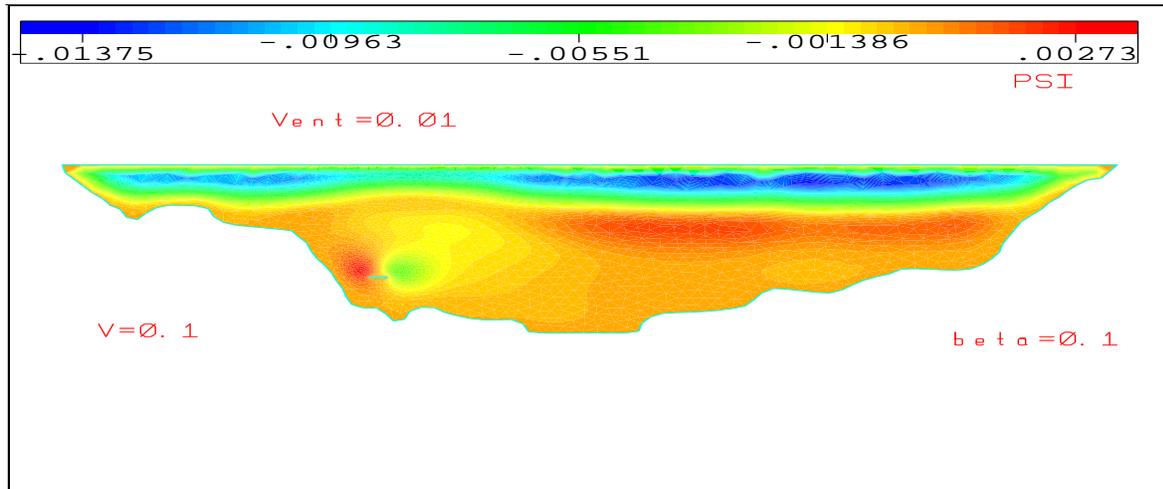


FIG. 17 – *Ligne de courant Ψ d'un écoulement avec aération*

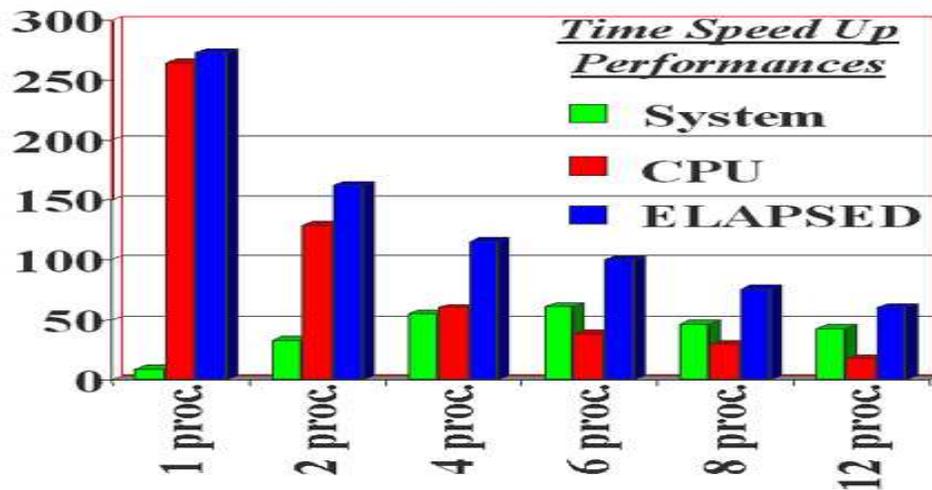


FIG. 18 – *Performances préliminaires de MPI sur un réseau de stations HP connectés sur un réseau 100 Mbits-full duplex*