

Rapport INRIA 1994 — Programme 6

Simulation Numérique dans les Sciences de l'Ingénieur

PROJET SINUS

3 mai 1995

PROJET SINUS

Simulation Numérique dans les Sciences de l'Ingénieur

Localisation : *Sophia-Antipolis*

Mots-clés :

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Alain Dervieux, DR INRIA

Responsable permanent

Jean-Antoine Désidéri, DR INRIA

Secrétaire

Françoise Martin-Trucas, TR INRIA

Conseiller scientifique

Roger Peyret, DR CNRS

Personnel Inria

Rémi Abgrall, CR, à UCLA du 01/01/94 au 30/06/94

Hervé Guillard, CR

Laurent Hascoët, CR

Stéphane Lanteri, CR

Chercheurs invités

Paul Arminjon, Université de Montréal
James Quirk, ICASE, NASA Langley

Ingénieurs experts

André Carrau, jusqu'au 31/08/94
Jean-Michel Malé
Boniface Nkonga
Christian Olivier

Chercheur post-doctorant

Tilo Lumpp, à partir du 01/11/94

Chercheurs doctorants

Laurent Angeli, bourse INRIA
Olivier Botella, allocataire MESR à partir du 01/10/94
Gilles Carré, bourse CIFRE-SNECMA
Christophe Debiez, bourse INRIA
Benoît Duval, bourse CIFRE-SIMULOG
Jérôme Francescato, allocataire MESR à partir du 01/10/94
Cyril Godart, bourse INRIA
Dominique Guezengar, bourse BDI-CNRS/INRIA
Wihem Kherrati, bourse INRIA jusqu'au 31/08/94, recrutée
par Mécalog-Sophia
Bruno Koobus, allocataire MESR
Tilo Lumpp, contrat HCM jusqu'au 30/09/94
Nathalie Marco, allocataire MESR
Régis Martin, bourse CIFRE-SIMULOG
Katherine Mer, allocataire MESR
Agnès Merlo, allocataire MESR jusqu'au 31/04/94, puis CDD-
SIMULOG

Collaborateur extérieur

Paul Arminjon, Université de Montréal
Marie-Claude Ciccoli, CRS4 Cagliari, Italie
Charbel Farhat, Université du Colorado, Boulder
Mark Loriot, Simulog
Bernadette Palmerio, Université de Nice/Sophia-Antipolis
Maria-Vittoria Salvetti, Université de Pise

2 Présentation du projet

Le projet SINUS effectue des travaux de recherche dans les domaines de la modélisation mathématique et de la simulation numérique en physique des milieux continus et notamment en mécanique des fluides.

La modélisation mathématique permet l'étude de phénomènes complexes (phénomènes physiques par exemple) en introduisant une représentation mathématique, reposant souvent sur un système d'équations aux dérivées partielles. Certaines propriétés qualitatives ou quantitatives du phénomène peuvent alors être mises en évidence par l'étude mathématique, en utilisant les techniques de l'analyse fonctionnelle, ou, plus souvent, par la simulation numérique.

En recherche, la simulation numérique joue, pour l'analyse des phénomènes, un rôle complémentaire à celui de l'expérimentation en laboratoires ; elle peut aussi constituer un terrain d'expérimentation lors de "simulations directes" d'instabilités par exemple. D'autre part, pour l'étude de nouveaux produits industriels, la simulation numérique complète efficacement les tests de mise au point : ses deux avantages sont une grande rapidité de mise en oeuvre et la possibilité de prendre en compte des conditions d'expériences difficiles ou trop coûteuses à obtenir en laboratoire.

La simulation numérique peut donc jouer un rôle à la fois pour l'amélioration de technologies classiques (par exemple, le moteur à piston), mais aussi pour la mise au point rapide de nouvelles techniques (par exemple pour l'industrie spatiale). C'est en particulier à cause de son utilité dans le développement des technologies de pointe que l'on assiste depuis peu à une forte croissance de la demande industrielle dans le domaine de la simulation numérique.

Spécialisé dans la mécanique des fluides numérique, le projet mène des études sur les écoulements compressibles en aérodynamique, dans le domaine des écoulements hypersoniques réactifs, et dans celui de la combustion en phase gazeuse ; les applications visées concernent les industries du transport et de l'énergie : aéronautique, automobile, espace électrique. Des filières de recherche à finalité industrielle sont développées, comme l'étude et la mise au point de méthodes d'éléments finis, aptes à des calculs en géométries complexes et répondant à des besoins industriels précis.

Le projet s'intéresse aussi aux problèmes posés par l'implémentation d'algorithmes numériques sur architecture parallèle. Cela passe par des activités de portage et d'évaluation de performance d'algorithmes existants (travaux sur Connection Machine CM-200/CM-5 en utilisant le modèle parallélisme de donnée, sur Kendall Square Research KSR-1 par une approche mémoire virtuelle partagée et plus récemment sur Intel Paragon et Cray T3D en utilisant un modèle de programmation par transfert de message), l'analyse de nouveaux algorithmes de résolution particulièrement bien adaptés à ce type d'architecture (méthodes de résolution additives) et l'étude et le développement d'outils d'aide à la parallélisation orientés calcul scientifique.

3 Action de recherche

3.1 Méthodes d'approximation

3.1.1 Formulation éléments finis/volumes finis

Participants : Katherine Mer, Alain Dervieux

Grâce à leur robustesse et à leur assez bonne précision, les schémas décentrés présentent actuellement un grand intérêt pour la résolution des équations hyperboliques. Cependant les justifications théoriques de leur construction dans le cas multidimensionnel sont insuffisantes pour permettre notamment d'améliorer ces schémas. Le présent travail est lié à l'étude des schémas *Finite Volume Galerkin* (FVG) associés à une approximation décentrée (ordre un ou extension à l'ordre deux suivant la technique MUSCL), largement développés au sein du projet. Le schéma FVG se présente comme une quadrature particulière des éléments finis (EF). Nous avons tout d'abord effectué une analyse variationnelle d'un schéma EF centré stabilisé à l'aide d'une dissipation artificielle par dérivation d'ordre quatre de type Jameson, dans le cas d'une équation de convection-diffusion stationnaire. Cette étude a conduit à l'obtention d'une relation suffisante entre coefficients du terme de dissipation artificielle et taille du maillage qui assure la conservation de la précision du schéma Lagrange-Galerkin dans le cas bidimensionnel. Un résultat de superconvergence a été obtenu dans le cas uniforme. Le cas d'une convection dominante a également été étudié [39]. Alors que des résultats de convergence et des estimations d'erreur en volumes finis non-structurés

existent déjà (cf. travaux de Vila, Coquel, Le Floch, Champier), l'intérêt de cette étude est l'obtention d'une bonne précision même pour des tailles très variables des éléments du maillage, grâce à l'approche EF considérée. L'aboutissement de ce travail est l'extension de cette approche aux cas de schémas non-linéaires tels que les schémas décentrés en étudiant la matrice de dissipation.

Si l'on confond l'erreur du schéma EF centré avec l'erreur d'interpolation, plusieurs études récentes apportent des éléments théoriques pour justifier qu'un maillage EF avec des tailles d'éléments différentes dans deux directions différentes particulières, est plus approprié pour l'approximation de structures anisotropes telles que les couches limites. La viscosité artificielle dite anisotrope construite par Jameson dans le cas non-structuré pour la capture des couches limites, semble numériquement ne pas dégrader, en maillage étiré, la précision du schéma centré. Ce bon comportement de la viscosité artificielle est loin d'être applicable à celle intervenant dans les schémas décentrés d'ordre un ou d'ordre deux MUSCL. En effet, pour ces schémas, une direction de décentrage non appropriée fait apparaître une viscosité transversale et celle-ci fait perdre une bonne partie de la précision. On cherche dans un premier temps à généraliser la viscosité dite anisotrope de type Jameson, puis à l'optimiser. On a montré qu'une diminution du taux de dissipation dans la direction transversale permettait de réduire l'influence de l'étirement du maillage sur la précision du schéma. Une étude complète dans le cas convection dominante comprendra la caractérisation d'une triangulation adaptée à la solution de l'équation, telle que l'erreur EF sur celle-ci soit d'ordre optimal, ainsi que l'adaptation de la dissipation artificielle à l'étirement de cette triangulation. On s'inspirera ensuite de cette étude pour améliorer les méthodes décentrées s'appuyant sur la formulation FVG, en maillage étiré, en modifiant le terme de dissipation. Cette étude permettrait de faire le lien et la comparaison avec d'autres approches parmi lesquelles l'approche de décomposition multidimensionnelle (cf. Roe-Deconinck) ou encore une approche visant à modifier la forme des cellules (cf. Stoufflet).

3.1.2 Approximation décentrée haute résolution

Participants : Paul Arminjon (Université de Montréal), Christophe Debiez, Alain Dervieux

L'étude d'écoulements de plus en plus complexes, notamment instationnaires motive la recherche d'une deuxième génération de schémas mixtes éléments finis/volumes finis qui serait plus précise et si possible plus robuste encore. Une voie explorée consiste en l'acclimatation de la méthodologie *Local Extremum Diminishing* (LED) à la vaste famille des méthodes d'éléments finis de type Lagrange (publication en préparation). L'extension à des molécules plus grandes portées par des maillages P1 (degrés de liberté aux sommets des simplexes) constitue une étape importante dont l'étude est en cours.

3.1.3 Analyse multirésolution en non-structuré

Participants : Rémi Abgrall

L'un des défauts essentiels des schémas ENO (essentiellement non-oscillant) dont on avait étudié la généralisation sur les maillages non structurés triangulaires [12, 7, 6] est leur coût. En effet, l'ingrédient fondamental de ces schémas est une approximation polynomiale d'ordre relativement élevé. Elle se caractérise par la recherche d'une molécule qui est très non-linéaire et coûteuse. De plus, cette procédure n'est réellement utile que dans les zones proches d'une singularité de la fonction à reconstruire. Ailleurs, une approche centrée plus classique serait tout aussi valable et même préférable. Une méthode plus économique serait d'identifier les structures où une recherche complexe de la molécule est nécessaire et, ailleurs, de se contenter d'une approximation basée sur une molécule fixe.

Comment identifier ces zones ? Cela peut se faire au moyen d'une méthode multiéchelle qui est une extension directe du travail récent d'Harten : on construit par agglomération de cellules ou par déraffinement des échelles de représentation. Sur chacun de ces niveaux, on définit une représentation polynomiale locale, et en analysant l'erreur commise entre deux niveaux consécutifs, on peut détecter les zones singulières. Ceci fournit aussi une représentation nouvelle de fonctions – assez semblable par sa logique à celle qui est donnée par les ondelettes – mais ici la nouveauté radicale est que des géométries quelconques

peuvent être utilisées. La difficulté revient à générer localement une représentation polynômiale [24]. On a montré expérimentalement que cette représentation est stable et aussi performante que si un maillage régulier cartésien avait été utilisé. Il reste à montrer que cette approche peut être efficacement utilisée dans la simulation numérique d'écoulements compressibles ; ce travail est en cours.

3.1.4 Simulation directe de couche de mélange compressible

Participants : Rémi Abgrall, Hervé Guillard, Tilo Lumpp, Roger Peyret

Des simulations directes de l'évolution temporelle d'une couche de mélange compressible ont permis d'évaluer les performances de certains schémas ENO. Dans une précédente étude, on avait montré que les techniques MUSCL ne permettaient pas d'obtenir des taux d'amplification corrects des petites perturbations. Les schémas ENO du troisième ordre permettent de reproduire beaucoup plus fidèlement ces taux d'amplification. Ces simulations paraissent donc plus proches de la réalité physique. Cette conclusion doit être confrontée aux résultats en cours d'acquisition avec des schémas ENO du quatrième ordre que nous développons actuellement.

3.1.5 Discrétisation vraiment multidimensionnelle

Participant : Rémi Abgrall

On a continué et précisé le travail antérieur [4, 5, 25]. L'an dernier, nous avons réussi à calculer la solution exacte du problème de Riemann des équations de la mécanique des fluides linéarisées autour d'un état moyen. Afin de résoudre complètement le problème, il fallait déterminer quel est l'état moyen qu'il faut employer. Ceci a été fait cette année en s'appuyant sur une analyse du comportement de la solution du problème de Riemann des équations d'Euler non linéarisées cette fois-ci. La linéarisation est obtenue comme solution d'une relation de saut qui généralise celle définissant la moyenne de Roe unidimensionnelle. On a pu montrer l'existence de solutions à cette équation et indiquer un critère permettant de choisir la "bonne" solution. Enfin, une méthode numérique permettant de la calculer a aussi été proposée.

On peut maintenant écrire un schéma numérique [11], il reste à le tester.

3.1.6 Modélisation d'écoulements multispèces

Participants : Rémi Abgrall, James Quirk

Ce travail fait suite à celui engagé par le projet depuis quelques années où l'on avait étudié comment discrétiser, au moyen de schémas décentrés, les équations de la mécanique des fluides multispèces. Le gros problème qui restait en suspend était celui-ci : théoriquement, au travers d'une discontinuité de contact, on doit avoir égalité des vitesses (normales) et de la pression, la composition et la densité du gaz de part et d'autre de cette discontinuité pouvant être arbitraire. Ceci pouvait être violé numériquement, entraînant des erreurs numériques considérables, en particulier en présence de termes sources.

En modifiant l'écriture des équations et en abandonnant le caractère strictement conservatif de la discrétisation, suivant en ceci une idée de Karni, on a pu écrire et tester un schéma résolvant ce problème [26]. Bien que le schéma ne soit pas strictement conservatif, on a pu montrer sur des expériences à très haute résolution que les discontinuités se déplacent correctement, que la solution numérique converge (contrairement au schéma conservatif de base où les erreurs sont telles que la convergence semble au mieux extrêmement lente !). Enfin, contrairement à la méthode de Karni, des chocs forts sont traitables.

3.1.7 Equations de Hamilton-Jacobi

Participant : Rémi Abgrall

Suite à la visite de R. Abgrall à UCLA, nous nous sommes aperçu qu'on pouvait simplement étendre des inégalités (dues à Osher et Bardi) concernant la solution de viscosité d'une équation de Hamilton-Jacobi du premier ordre, quand la condition initiale est linéaire par quadrant, au cas où elle est linéaire par secteur angulaire, quelque soit leur nombre (Rapport 2342). Ceci permet certainement de comprendre comment discrétiser ce type d'équation sur un maillage non-structuré.

3.1.8 Calcul formel d'équations équivalentes non-linéaires

Participants : Jean-Antoine Désidéri, Roger Peyret

La technique de l'“Equation Equivalente” ou “Modifiée” sert à l'analyse (essentiellement qualitative) de la précision, et quelquefois de la stabilité,

de schémas de discrétisation de problèmes évolutifs modèles, le plus souvent hyperboliques. Des études préliminaires menées en collaboration avec le Projet SAFIR ont conduit au développement de logiciels dans le langage de calcul formel “Maple” permettant le traitement d’équations aux dérivées partielles scalaires combinant des termes d’advection et de diffusion en une ou deux dimensions d’espace, dans le cas linéaire par M. Spiridonova (*Bulgarian Ac. Sciences*)¹ et non-linéaire par E. Levinspiel². Ces techniques sont le support d’une activité pédagogique et de recherche liée aux schémas d’approximation.

3.1.9 Méthodes de Runge-Kutta non classiques

Participants : Laurent Baratchart (projet Miaou), Jean-Antoine Désidéri, Franck Wielonsky (projet Miaou)

On s’intéresse ici à la construction de méthodes d’intégration en temps, et on se place dans le cadre très simple d’un système test d’équations différentielles ordinaires linéaires autonomes, $\dot{u} = Au$ dans lequel A est une matrice donnée diagonalisable. Dans ce cas l’intégration exacte sur un intervalle de temps Δt équivaut à multiplier la condition initiale $u(t)$ par l’exponentielle de la matrice $A \Delta t$. Parallèlement, l’intégration approchée par une méthode classique équivaut généralement à la multiplication par une fraction rationnelle de cette matrice. On voit donc que le problème de l’intégration approchée est lié à celui de l’approximation de la fonction exponentielle par une fraction rationnelle du type approximant de Pradé. Or ce sujet a fait l’objet d’une étude spécifique au sein du Projet MIAOU.

A l’occasion du stage de maîtrise de MM. Rosier et Salort (Université de Nice/Sophia-Antipolis), on a initié une activité de recherche dont l’objectif est d’identifier des méthodes d’intégration spécifiquement adaptées à certains types de spectre de la matrice A représentatifs des discrétisations usuelles des équations aux dérivées partielles.

¹M. Spiridonova et J.-A. Désidéri, “Symbolic computations for the analysis of finite-difference schemes by the modified equation approach”, Proceedings of the International Workshop on Computer Algebra Applications, Springer Verlag, Kiev, Russie (1993).

²E. Levinspiel, “Calcul formel d’équations équivalentes non linéaires”, rapport de stage de DEA de Mathématiques, option calcul et déduction (1993).

3.1.10 Méthodes implicites d'ordre deux

Participants : Régis Martin, Hervé Guillard

En utilisant la méthode du défaut corrigé (DeC), ce travail propose un schéma implicite précis à l'ordre 2 en temps et en espace, mais n'utilisant que des jacobiens d'ordre 1. Une démonstration rigoureuse de la précision du schéma basée sur l'analyse de l'erreur de troncature a été réalisée et les propriétés de stabilité linéaire de la méthode analysées. Ce schéma a été appliqué à des calculs d'écoulements dans des moteurs à piston et en aérodynamique externe instationnaire qui confirment ses bonnes qualités de stabilité et de précision. Ce travail est soumis pour publication.

3.1.11 Méthodes de Galerkin non-linéaires

Participants : Valérie Le Bras, Hervé Guillard

Issues de la théorie des systèmes dynamiques, les méthodes de Galerkin non-linéaires sont de nouvelles techniques d'approximation où la solution est cherchée sur une variété non-linéaire au lieu de l'être sur un espace vectoriel de dimension finie comme dans les méthodes de Galerkin classiques. Dans ce travail, on a implémenté une méthode de Galerkin non-linéaire pour la résolution d'équations de réaction-diffusion. Cette méthode proposée par M. Marion est basée sur une approximation en éléments finis. Cette étude s'est surtout attachée à vérifier les ordres de grandeurs des divers termes des équations qui sont négligés dans l'expression définissant la variété inertielle approchée. Il apparaît que les hypothèses faites dans les méthodes de Galerkin non-linéaires ne sont pas toujours vérifiées. Par contre, les solutions obtenues sur les grandes échelles de la solution sont plus précises que celles obtenues par une méthode de Galerkin classique pour le même nombre de degré de liberté définissant ces grandes échelles (cf. stage de V. Le Bras).

3.2 Méthodes de résolution

3.2.1 Méthode multigrille et multiniveau par agglomération

Participants: Gilles Carré, Alain Dervieux, Bruno Koobus, Marie-Hélène Lallemand (projet Menusin), Nathalie Marco

La méthode multigrille par agglomération mise au point par SINUS a été appliquée à des écoulements turbulents, (cf. 3.5); elle est en cours d'extension à l'optimisation de formes tridimensionnelles (cf. 3.3). Plusieurs travaux théoriques ont par ailleurs été réalisés qui portent sur l'analyse de versions additives des méthodes multigrille et multiniveau dont l'intérêt principal est d'être particulièrement bien adaptées à une mise en oeuvre sur calculateur parallèle.

L'application d'une méthode multigrille additive avec filtrage sélectif des différents modes, niveau par niveau, remonte à des travaux de Chan et Tuminaro. Leur point de vue a été revu et replacé sous l'éclairage d'une quasi diagonalisation du système à résoudre dans une décomposition de l'espace de travail. Il en est ressorti une preuve abstraite de la convergence insensible à la finesse du maillage des algorithmes de ce type. Des algorithmes d'intérêt pratique ont été exhibés et analysés dans un contexte monodimensionnel. Ce travail est en cours de publication [37].

Un principe additif a aussi été appliqué à l'optimisation de formes. La méthode d'optimisation multiniveau nécessite dans sa version multiplicative le calcul d'une correction pour chaque niveau à partir d'un résidu recalculé sur le niveau fin. La variante additive ne nécessite qu'un calcul de résidu par cycle; une analyse prouve le bien fondé de cette démarche et plusieurs expériences font apparaître le gain supplémentaire obtenu [38].

3.2.2 Convergence des méthodes multigrilles par agglomération

Participants: Hervé Guillard, Nathalie Marco

Dans le cadre elliptique, une application directe de la méthode multigrille par agglomération nécessite de redéfinir correctement les opérateurs de transfert entre les différents niveaux. C'est ce qui est fait dans ce travail effectué en partie durant une visite au CWI (collaboration avec P.-W. Hemker et B. Koren). Cette nouvelle définition permet d'obtenir une

preuve de la convergence de la méthode multigrille par agglomération indépendante du maillage (publication en préparation).

3.2.3 Méthode de Gauss adaptative

Participants : Régis Martin, Hervé Guillard

Parmi les méthodes de résolution des systèmes linéaires (et non-linéaires), les plus classiques sont sans conteste, les algorithmes de Gauss-Seidel et de Gauss-Jacobi. En fait l'algorithme originel conçu par Gauss ³ est très différent par l'esprit de ces deux dernières méthodes. Il consiste à organiser l'ordre de balayage de la matrice en fonction de la magnitude du résidu associé à chaque équation. De multiples méthodes connues sous le nom de méthodes de Gauss-Southwell se sont inspirées de l'algorithme original de Gauss et ont été très utilisées dans les années 30 avant l'apparition de l'ordinateur. Actuellement, implémentées sur ordinateur, ces méthodes demeurent inutilisables, la partie recherche de l'ordre du balayage étant trop coûteuse. Suivant une variante proposée par Rude nous avons cependant été amené à revisiter l'algorithme originel de Gauss. Cette variante consiste à gérer une liste d'inconnues dont le résidu est a priori "mauvais". On parcourt cette liste, en relaxant tour à tour ses éléments si le résidu est effectivement "mauvais". Une fois un noeud relaxé, on l'extrait de la liste puis on y rajoute ses voisins. Le système linéaire est résolu quand la liste est vide. Cette manière d'implémenter l'algorithme de Gauss permet d'obtenir des gains en temps et en relaxation de l'ordre de 50%, quand on l'applique à la résolution de systèmes linéaires pour des problèmes d'aérodynamique stationnaire. Un rapport INRIA sur ces expériences est en cours de rédaction.

3.2.4 Méthode des résidus corrigés et annihilation de modes propres

Participants : Marie-Claude Ciccoli, Jean-Antoine Désidéri

Dans la méthode des "Résidus Corrigés" on considère deux approximations discrètes de la même équation aux dérivées partielles. La première, Φ_1 , est simple à inverser mais généralement peu précise. En particulier, lorsqu'on discrétise une équation d'advection pure par un schéma (décentré) du premier ordre, on aboutit à un système linéaire à diagonale

³Gauss dans une lettre à Gerling, 26 Décembre 1823.

dominante que l'on peut facilement résoudre par relaxation itérative. La seconde, Φ_2 , est de la précision souhaitée, mais son inversion beaucoup plus délicate. On construit alors un algorithme itératif dans lequel on résout une suite de problèmes dans lesquels on est amené à inverser Φ_1 tout en obtenant l'inverse de Φ_2 à la limite. L'analyse de la convergence de la méthode des résidus corrigés dans un cadre représentatif des équations d'Euler est un thème important de collaboration avec le CWI (P.-W. Hemker, B. Koren)⁴.

M.-C. Ciccoli qui bénéficie d'une bourse HCM est en stage post-doctoral au CRS4, Cagliari, Italie. Parmi ses études en cours, elle examine la possibilité et l'efficacité d'utiliser des opérateurs centrés dans le préconditionnement d'un schéma de discrétisation décentré du second-ordre d'une équation d'advection. L'analyse détaillée des spectres associés à ces schémas d'approximation permet d'envisager de les accélérer par la technique d'annihilation de modes propres⁵.

3.2.5 Méthodes de décomposition de domaines

Participants : Marie-Claude Ciccoli, Jean-Antoine Désidéri, Alfredo Quarteroni (CRS4 Cagliari, Italie)

Les perspectives du calcul parallèle apportent aux méthodes par décomposition de domaines, qui sont par nature parallélisables, un intérêt particulier. Au plan théorique, la difficulté pour établir une preuve de convergence constructive, permettant d'optimiser les paramètres de l'algorithme, réside dans l'identification de conditions aux limites aux interfaces des sous-domaines. Celles-ci doivent respecter la solution globale sur le domaine entier et permettre de résoudre sur chaque sous-domaine indépendamment, afin que le code puisse être parallélisé, et d'optimiser la vitesse de convergence du processus itératif global en terme de coût. Cependant, peu de preuves de convergence existent à ce jour dans le cas d'une équation non-elliptique. Cette action de recherche a pour but d'étudier, par la théorie et l'expérimentation, divers algorithmes de ce type pour une équation d'advection-diffusion. En particulier on

⁴J.-A. Désidéri et P.-W. Hemker, "Convergence analysis of defect correction iteration for hyperbolic problems", SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing, Vol. 16 (1995).

⁵J.-A. Désidéri, "La technique d'annihilation de modes propres et applications", rapport INRIA n°.1875 (1993).

s'intéresse, dans le cadre de schémas d'approximation mixtes volumes-finis/éléments finis, aux algorithmes adaptatifs, c'est-à-dire à ceux pour lesquels le choix de la condition d'interface se fait selon la valeur locale de la solution. Cet axe de recherche nous permet de collaborer avec le Pr. Quarteroni expert du domaine et son équipe.

3.3 Optimisation de formes

Participants : Nathalie Marco, Alain Dervieux, Jean-Michel Malé, Bruno Stoufflet (Dassault)

Le programme engagé pour développer des méthodes de conception optimale de formes en aérodynamique a vu son activité se concentrer sur les méthodes applicables au cas tridimensionnel. Notons que SINUS s'est doté (cf. 3.6.2., 3.8.2.) des moyens de régénérer un maillage en cours d'optimisation d'une forme 2D ou 3D. Une méthode de paramétrage de formes 3D a été mise au point à partir d'un principe d'agglomération multiniveau; ce travail a donné lieu à des communications et rapports dans le cadre du programme européen Ecarp [38] et au congrès Eccomas [14]. Son application à l'optimisation de la forme d'un avion de transport est en cours dans le cadre du programme Génie. Ce travail sera aussi une des bases d'une coopération Dassault-Boeing-NASA-INRIA en cours de discussion.

Un des axes importants de la conception optimale est la mesure de sensibilité; il s'agit d'obtenir le plus possible d'informations sur le comportement d'un écoulement en fonction des variations des paramètres sans relancer ce calcul d'écoulement (lequel est très coûteux). Une des approches prometteuses consiste à différentier automatiquement les diverses fonctions en présence. Cette voie est étudiée dans le cadre du programme Génie en coopération avec le projet SAFIR (N. Rostaing et C. Faure).

3.4 Gestion de maillages

3.4.1 Remaillages locaux 3D

Participants : Benoît Duval, Hervé Guillard

Les maillages dans les géométries déformables telles que celles des moteurs à piston demandent une gestion particulière de la déformation au

cours du temps des éléments qui les composent. Le remaillage dans le cadre de géométries 3D a été envisagé de façon locale afin de réduire les temps calculs (et les interpolations). Dans l'exemple d'une géométrie de moteur, des zones ont été générées automatiquement à partir des frontières mobiles et ceci indépendamment de considérations géométriques (cet algorithme est général dans le sens où il ne dépend pas de la géométrie considérée; plusieurs types de moteurs peuvent donc être testés sans qu'il soit nécessaire d'adapter l'algorithme). Chaque zone est considérée comme un maillage à part entière dont on va calculer la déformation des éléments. Lorsqu'une des zones dépasse notre critère de qualité, nous en retirons la peau et effectuons un remaillage de l'intérieur par l'intermédiaire du mailleur GHS3D directement implanté dans le code. Une remise à jour du maillage est alors nécessaire afin qu'à nouveau nos différentes zones ne reforment qu'une seule entité géométrique. Un rapport de recherche présentant des travaux préliminaires en 2D est en cours de parution.

3.4.2 Analyse multirésolution et adaptation de maillage

Participants : Alain Dervieux, Bernadette Palmerio

Les méthodes multirésolution reviennent au goût du jour; il s'agit d'analyser la représentation d'une fonction sur deux maillages emboîtés. Une des propriétés mises à jour est la convergence des modes ainsi construits avec une vitesse dépendant de l'adéquation du maillage aux détails (formellement singuliers ou non) de la fonction. Pour des maillages atteignant la convergence nominale théorique (ordre deux pour un schéma de cet ordre), la théorie développée cette année prédit un encadrement de l'erreur d'interpolation dans divers espaces fonctionnels standard (L2, H1 notamment) [20].

3.4.3 Génération hyperbolique de maillages réguliers

Participant : Jean-Antoine Désidéri

Pour certaines applications, notamment dans le cas de calculs de solutions de référence, il peut être utile de construire a priori (avant adaptation locale), un maillage très régulier. Une manière de procéder consiste à résoudre par différences finies un jeu d'équations aux dérivées partielles définissant une carte permettant de passer du plan cartésien

(x, y) (dans lequel sont imposées une ou plusieurs frontières du domaine de calcul souhaité) au plan transformé (ξ, η) . Par exemple, on peut résoudre le système “orthogonalité-volume” proposé par Steger,

$$\begin{cases} x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta = 0 \\ x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta = \mathcal{A}(\xi, \eta) \end{cases}$$

où $\mathcal{A}(\xi, \eta)$ est une fonction à choisir définissant la répartition des aires. Cette méthode de base peut être étendue afin d'optimiser divers critères, la fonction $\mathcal{A}(\xi, \eta)$ jouant le rôle de contrôle. Alors qu'avec V. Pierazzi⁶, on avait considéré, pour des calculs à l'extérieur d'une géométrie, le contrôle de la limite extérieure du maillage, on a depuis établi les équations pour contrôler la courbure d'un maillage interne. De plus, une analyse a été faite des conditions aux limites pour lesquelles le système et son adjoint sont bien posés et présentée au congrès Ecomas de Stuttgart. Il est à noter que ces méthodes sont techniquement très voisines de certaines procédures de contrôle d'interface utilisées dans le contexte de méthodes de résolution par décomposition de domaines auxquelles on s'intéresse indépendamment des questions de génération de maillage.

3.5 Modélisation de la turbulence

La modélisation des écoulements turbulents requiert le développement de méthodes numériques de plus en plus puissantes d'abord pour calibrer et valider les modèles en cours de mise au point par les équipes de physiciens et d'autre part pour permettre l'utilisation de ces modèles dans les nouveaux codes industriels. Nos contributions portent avant tout sur les méthodes numériques. Afin de travailler sur les modèles les plus modernes, SINUS coopère avec des laboratoires de Mécanique des Fluides comme ceux notamment du Coria à Rouen (D. Vandromme, H. Loyau), de l'Ecole Centrale de Lyon (M. Buffat, C. Le Ribault, I. Yudiana), et de l'IMST à Marseille (J.P. Dussauge). Ces études se déroulent sous la bannière ETMA, un projet BRITE coordonné par SINUS. Ces études sont aussi soutenues par le CEA-CESTA de Bordeaux (Mr. Duffa).

⁶V. Pierazzi, “Construction de maillages structurés plans par des techniques de tir”, stage de l'ESSI, option calcul scientifique pour l'ingénieur (1993).

3.5.1 Méthodes multigrilles et turbulence

Participants : Gilles Carré, Alain Dervieux

Les calculs turbulents en géométrie interne comportent de nombreuses zones de recirculation et couches de mélange dans des géométries complexes telles que des têtes de chambres de combustion de turbo-réacteurs ou des chambres de combustion de réacteurs supersoniques. Si du point de vue modélisation et approximation, le calcul en $K-\epsilon$ et loi de paroi par des éléments finis décentrés (méthode MEV mise au point dans SINUS) permet une réponse satisfaisante, il reste à trouver un algorithme très performant. C'est dans cette perspective qu'une méthode implicite et multigrille a été développée pour ce modèle turbulent dans le cadre du projet ETMA [32, 29, 30] et d'une bourse CIFRE-SNECMA [31] et a été appliquée à certains des cas tests du workshop ETMA [30]

3.5.2 Modélisation anisotrope

Participants : André Carrau, Alain Dervieux

Une seconde étude nous a associé au Coria dans le cadre du projet ETMA et a porté sur le développement d'un modèle anisotropique à deux équations. Cette étude [28], encore à un stade préliminaire, repose sur une nouvelle écriture de l'hypothèse de transport des quantités scalaires faisant intervenir les tenseurs de Reynolds. Les profils de couches limites obtenus montrent que le modèle prend en compte leur anisotropie mais une calibration soigneuse des différentes constantes reste à réaliser.

3.5.3 Modèles bas Reynolds

Participants : Alain Dervieux, Jérôme Francescatto, Bruno Koobus

Les modèles dits à bas Reynolds prennent en compte le comportement des différentes variables dans la totalité des couches limites. Ils exigent l'utilisation d'un maillage fin et comportant des éléments très étirés (rapports de forme de 2000 à 5000), et comportent des termes non-linéaires particulièrement raides et instables. A ce titre, leur résolution efficace est un des défis de la décennie, notamment en maillage non-structuré triangulaire. Trois études ont porté sur ce thème : une recherche de maillages 1D adaptés a mis en oeuvre et étendu les méthodes adaptatives mises

au point dans le projet; on a montré que des couches limites en biéquation et bas Reynolds pouvaient être représentées assez précisément par un maillage adaptatif de 18 couches ; ce travail a donné lieu à une communication [13]. Une deuxième étude sur la résolution implicite en 1D a permis de dégager un ensemble d'options efficaces (cf. 6.1.4.). Une troisième étude a permis la mise au point d'un algorithme 2D implicite et son application à des couches limites supersoniques [37].

3.5.4 Turbulence compressible

Participants : Dominique Guezengar, Hervé Guillard, Jean-Paul Dussauge (IMST Marseille)

Une étude sur la modélisation de la turbulence en régime compressible a été effectuée dans le cadre du projet ETMA. Les modèles dits de compressibilité concernent les termes de “dilatation-dissipation” et les corrélations “pression-dilatation”. Ces termes regroupent les effets explicites de la compressibilité. Divers modèles ont été adaptés au modèle $k - \epsilon$ et testés dans le cas d'une couche de mélange supersonique. On fait apparaître un accord satisfaisant avec les données expérimentales, en particulier lorsque l'équation pour la dissipation solénoïdale utilise une échelle de temps différente de celle utilisée dans les autres équations [17].

3.6 Ecoulements moteurs

Depuis 4 ans, le projet a engagé une collaboration avec la direction de la recherche de Renault S.A et Simulog pour la mise au point de méthodes numériques destinées à calculer l'aérodynamique des moteurs à piston. Le calcul rapide (en moins de 15 jours pour un nouveau prototype de moteur) de ce type d'écoulement constitue un impératif majeur pour les services d'aérodynamique des constructeurs. Après une phase de développement purement numérique, les travaux menés actuellement sur ce thème se diversifient par l'étude de meilleures modélisations de la turbulence et l'adaptation des méthodes numériques au calcul parallèle.

3.6.1 Simulation directe de turbulence compressée

Participants : Olivier Botella, Hervé Guillard, Roger Peyret

Dans un moteur à piston, la turbulence est fortement en déséquilibre, en rotation et anisotrope, caractères très imparfaitement pris en compte

par les modélisations actuelles. On a commencé une série d'études sur la simulation directe de turbulence compressée afin de disposer d'une base de données numériques permettant d'aider la modélisation et de valider les modèles. Un travail préliminaire (cf. 6.1.4.) effectué au cours d'un stage de DEA a montré dans un cadre bidimensionnel certaines caractéristiques attendues d'une turbulence compressée telle la génération d'anisotropie. Ce travail se poursuit dans le cadre d'une thèse MESR par la mise au point d'un code utilisant une approximation spectrale par développement en polynômes de Chebyshev-Fourier dans un domaine cylindrique.

3.6.2 Ecoulement turbulent dans un moteur à quatre soupapes

Participants : Boniface Nkonga, Didier Chargy (Simulog), Hervé Guillard

L'objet de cette étude était de poursuivre le développement des simulations d'écoulements dans des moteurs à piston. L'objectif fixé était de réaliser une simulation, en écoulement non-réactif, du cycle d'un moteur à quatre temps (admission, compression, détente, échappement). Les schémas numériques que nous avons utilisés ont été développés dans le cadre d'une formulation mixte éléments finis/volumes finis non-structurés, s'inspirant de la méthode de Godunov (schémas décentrés), passe par une discrétisation dans l'espace spatio-temporel et se traduit par le calcul exact des termes géométriques induits par la déformation du domaine [10].

Nos efforts se sont portés sur la gestion du déplacement du maillage et sur les différentes techniques de fermeture et d'ouverture des soupapes. Nous posons les bases d'une gestion rigoureuse de la déformation du maillage en présence des mouvements simultanés du piston et des soupapes. Cette gestion s'appuie sur le comportement élastique d'un matériau composite associé au maillage du domaine. Les implications géométriques et hydrodynamiques de la fermeture et de l'ouverture des soupapes sont analysées numériquement. Nous avons réalisé des simulations sur un cycle complet par résolution des équations de Navier-Stokes et une description de la turbulence par le modèle $k - \epsilon$ [40]. Les résultats obtenus confirment la robustesse de l'approche utilisée. En effet la simulation des phases d'admission et d'échappement était jusqu'à présent difficilement réalisable.

3.6.3 Écoulement instationnaire dans la chambre de l'ARC

Participants : Régis Martin, Hervé Guillard

En 1985, une Action de Recherche Concertée (ARC) sur la modélisation de la combustion a été initialisée par le CNRS. Dans ce cadre, une chambre à combustion quasi bidimensionnelle transparente a été construite à l'Ensm de Poitiers. Les expérimentations conduites dans cette chambre offrent l'opportunité de confronter les résultats numériques avec l'expérience. Dans ce travail, on a réalisé une étude exhaustive du nouveau schéma implicite d'ordre 2 (cf. section 3.1.10) en le comparant à un schéma implicite d'ordre un déjà existant. On a ainsi pu montrer tout l'intérêt d'employer une méthode numérique plus précise. En effet, le schéma d'ordre 2, outre le fait qu'il capte mieux les phénomènes relatifs aux petites structures de l'écoulement, permet l'utilisation de pas de temps dix fois plus grand que le schéma d'ordre 1, pour la même qualité de solution.

3.7 Écoulements hypersoniques réactifs et gaz réels

Participants : Marie-Claude Ciccoli, Jean-Antoine Désidéri, Cyril Godart, Agnès Merlo, Maria-Vittoria Salvetti

Les perspectives de l'industrie aérospatiale européenne (et américaine) ont redonné intérêt à l'étude des écoulements à grand nombre de Mach et forte incidence qui se produisent lors de la rentrée dans l'atmosphère d'une navette spatiale. Les conditions physiques des écoulements réalisés dans ces cas de vol sont aux limites des possibilités de simulation expérimentale, en raison notamment des températures très élevées et de l'atmosphère raréfiée. La simulation numérique est donc amenée à jouer un rôle accru en prenant part à la certification des projets.

Cette filière a donné l'occasion à l'INRIA d'organiser avec le Gamm-Smai trois sessions d'un atelier sur les problèmes critiques de rentrée atmosphérique, *Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems* (Janvier 1990, Avril 1991, Janvier 1993). A l'occasion de la session de Janvier 93, une base de données européenne pour les écoulements à grande vitesse ("EHDVB" en anglais) a été créée par l'INRIA à Sophia-Antipolis, afin de rassembler sur ordinateur les contributions numérisées des experts ayant participé aux diverses sessions. Il s'agit d'une sorte de

journal d'archive informatisé évoluant continuellement grâce aux apports renouvelés des spécialistes du domaine. Cet outil qui permet aux scientifiques de la Communauté Internationale d'accéder par réseau à une information de haut niveau, de comparer à distance leurs propres réponses aux données de la base, en particulier grâce aux moyens modernes de l'infographie, facilite et stimule la communication scientifique interdisciplinaire et internationale.

Un quatrième atelier, ayant la base EHVDB pour support, a été organisé dans le cadre du *Second European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles*, ESA/ESTEC, Noordwijk, Pays-Bas, 21-25 Novembre 1994. EHVDB servira également de prototype pour un atelier hypersonique qui se tiendra en Novembre 1995 à Houston (R. Glowinski, W. Fitzgibbon).

3.7.1 Approche homenthalpique

Participants : Marie-Claude Ciccoli, Jean-Antoine Désidéri

Lorsqu'un écoulement eulérien est stationnaire (qu'il soit réactif ou non), l'enthalpie totale par unité de masse est conservée par ligne de courant. Lorsqu'en plus, les conditions amont sont uniformes, cette grandeur est une constante dans tout le domaine. Il est alors inutile de résoudre l'équation d'énergie sous forme différentielle puisqu'on en connaît l'intégrale première. Ceci permet de réaliser deux améliorations de la méthode numérique: l'une en efficacité, parce qu'on résout une équation de moins; l'autre en précision, car la température, qui joue un rôle déterminant dans l'activité chimique des écoulements hypersoniques, est contrôlée par l'équation d'énergie dont la qualité de résolution est essentielle. L'analyse a permis de démontrer que la décomposition de flux de van Leer restreinte à ce cas particulier constitue une discrétisation stable. Enfin on a constaté un gain sensible en robustesse ce qui augmente encore l'efficacité⁷.

⁷M.-C. Ciccoli et J.-A. Désidéri, "Numerical computation of steady homenthalpic non-equilibrium flows", accepté pour publication dans *Computers & Fluids* (1995).

3.7.2 Écoulements hors-équilibre, modèles complexes

Participants : Jean-Antoine Désidéri, Cyril Godart, Maria-Vittoria Salvetti

L'énergie d'une molécule polyatomique admet plusieurs modes de stockage (énergie de translation, de rotation, de vibration électronique, ...). A la traversée d'un choc très fort tel que celui en avant d'un engin spatial hypersonique, en conséquence de l'importante élévation de température, ces modes énergétiques sont très fortement déséquilibrés. Le long de la trajectoire de la molécule après la traversée du choc, les collisions avec les autres molécules ont pour effet de *relaxer* ces modes énergétiques vers l'équilibre (chimique, thermique, etc). Le nombre de collisions nécessaires à atteindre l'équilibre dépend du mode considéré.

Dans ce domaine, notre action de recherche, en amont de l'usage courant des codes d'exploitation, a pour but d'évaluer la sensibilité des écoulements hypersoniques (eulériens ou visqueux) hors-équilibre au degré de raffinement de la modélisation chimique et thermodynamique (couplages des modes hors-équilibre entre eux, termes de transport, catalyse à la paroi, etc), et le coût des méthodologies numériques rendues nécessaires pour leur prise en compte. Dans une première approche, on a considéré notamment dans la thèse de M.-V. Salvetti des modèles non couplés pour lesquels chaque mode est modélisé par un jeu d'équations aux dérivées partielles dont le terme source ne dépend que de l'écart à la valeur d'équilibre, agissant ainsi comme un ressort.

Couplages Chimie-Vibration En réalité, à température égale, une molécule a une probabilité de se dissocier d'autant plus grande qu'elle vibre. La relaxation vibratoire a donc un effet sur la relaxation chimique. C'est le couplage "CVD". Symétriquement, la dissociation dépeuple plus les molécules dont le niveau vibratoire est élevé que les autres. C'est l'effet de la dissociation sur la vibration, ou couplage "CVDV". Ces couplages ont été modélisés pour les modèles que l'on utilise, par l'équipe de Systèmes Energétiques et Transferts Thermiques de l'Université de Marseille (R. Brun, M. Imbert, D. Zeitoun) avec qui nous collaborons. On a étudié les incidences de la prise en compte de ces modèles dans un code de résolution des équations d'Euler couplées aux équations de déséquilibre chimique et vibrationnel (thermique). L'étude initiée par le

stage de A. Lourdel⁸ a été prolongée par C. Godart. En particulier, grâce à un changement de variable suggéré par le Pr. M. Pandolfi de l'*Instituto Politecnico* de Turin, on a amélioré la robustesse et la précision de la méthode pour les nombres de Mach élevés et effectué des comparaisons qualitatives des différents modèles⁹.

Catalyse à la paroi Dans les écoulements hypersoniques réels, les phénomènes chimiques et thermiques dont le mélange gazeux est le siège sont modifiés au voisinage de la paroi par la présence de cet agent métallique. Dans une première approche, on peut considérer cet agent seulement comme un catalyseur. Ce fut l'approche utilisée par M.-V. Salvetti dans sa thèse où certaines difficultés numériques que ces phénomènes introduisent furent mises en évidence. Désormais, on envisage dans le cadre de notre collaboration avec M.-V. Salvetti, désormais à l'Université de Pise, de continuer l'étude numérique de la paroi catalytique en couplant la résolution de l'écoulement à la résolution d'un schéma réactionnel hétérogène (gaz-paroi) à la surface. Plusieurs modèles sont possibles¹⁰.

3.8 Couplage fluide/structure

3.8.1 Hadamard et aéroélasticité

Participants : Christophe Debiez, Alain Dervieux

Une étude systématique a été réalisée sur les possibilités d'utiliser des opérateurs linéarisés en écoulements autour de profils en oscillation forcée et en flottement aéroélastique. La linéarisation porte principalement sur deux points, d'une part la linéarisation de l'opérateur, qui prive le système de la condition d'entropie interdisant les chocs non-physiques, et la linéarisation du mouvement de la paroi, motivée par le souci de se ramener à un écoulement en domaine constant. Des gains en temps

⁸A. Lourdel, "Effets du couplage chimie-vibration sur la simulation numérique d'écoulements hypersoniques", stage de l'ESSI, option calcul scientifique pour l'ingénieur (1993).

⁹C. Godart, M.-V. Salvetti et J.-A. Désidéri, "Etude numérique de modèles thermo-chimiques couplés pour les écoulements hypersoniques eulériens", rapport INRIA en préparation.

¹⁰M.-V. Salvetti, "Modèles pratiques de catalyse à la paroi pour les calculs d'écoulements hypersoniques", rapport INRIA n°.2005 (1993).

appréciables ont pu être mis en évidence, mais l'amplitude maximale permise est limitée notamment en transsonique à cause des chocs parasites qui détériorent la précision [33, 36, 34, 35].

3.8.2 Méthode implicite pour l'aéroélasticité

Participants : Stéphane Lanteri, Katherine Mer, Boniface Nkonga

En marge des méthodes reposant sur une formulation ALE, utilisées notamment en aéroélasticité pour la prise en compte de la déformation du domaine du fluide sous l'action de la structure, nous intégrons dans cette étude la déformation du domaine par une formulation dans l'espace spatio-temporel. Cette approche, développée initialement par B. Nkonga et H. Guillard [10] pour les simulations dans les moteurs à piston, s'adapte assez aisément à la simulation de problèmes d'interaction fluide/structure. Le travail réalisé ici porte sur des problèmes d'aéroélasticité en dimension deux et repose plus particulièrement sur l'étude d'une méthode implicite avec une linéarisation du flux qui nous ramène à la résolution d'un système linéaire. Cette méthode est développée dans le cadre d'une formulation mixte éléments finis/volumes finis. Nous avons montré l'efficacité, la précision et les limites de la méthode implicite dans le cadre de l'étude du flottement d'un profil d'aile d'avion. Une technique de déformation de maillage, la méthode de pseudo-élasticité, a été analysée dans le cas de très grandes déformations (rigides) du profil, pour l'extension de la présente étude au cas tridimensionnel ¹¹.

3.8.3 Aéroélasticité tridimensionnelle

Participants : Charbel Farhat, Stéphane Lanteri, Nathan Maman (Université du Colorado, Boulder puis Simulog), Serge Piperno (Cermics)

La collaboration entre le projet SINUS, le Cermics et le *Center for Aerospace Structures* de l'Université du Colorado à Boulder autour du thème modélisation et simulation numérique de l'aéroélasticité existe depuis maintenant près de trois ans. Cette année a vu la réalisation des premiers calculs aéroélastiques portant sur des structures flexibles à plusieurs degrés de liberté [9, 15]. Ces calculs utilisent les résultats des différentes études menées en parallèle par les différents intervenants dans

¹¹ K. Mer et B. Nkonga, "Implicit calculations of an aeroelasticity problem", rapport INRIA en préparation.

cette collaboration : algorithmes de couplage hétérogènes (C. Farhat et S. Piperno), mise en correspondance de maillages fluide et structure et coordination des différents champs physiques (C. Farhat et N. Maman) et solveurs fluides en maillages déformables sur ordinateur parallèle (C. Farhat et S. Lanteri). Pour ce qui concerne le projet SINUS, la suite de cette collaboration verra notamment le départ en séjour postdoctoral de B. Koobus au *Center for Aerospace Structures* afin d'étudier la prise en compte de modèles de turbulence dans les solveurs fluides et l'étude de méthodes de résolution efficaces et précises pour les écoulements instationnaires.

3.9 Calcul parallèle

3.9.1 Applications en mécanique des fluides numérique

Participants : Charbel Farhat, Loula Fezoui (Cermics), Stéphane Lanteri, Mark Loriot, Nathan Maman (Université du Colorado, Boulder puis Simulog)

Les activités en calcul numérique parallèle au projet SINUS concernent le développement et l'évaluation de méthodes de résolution parallèles pour les équations de la mécanique des fluides compressibles (en collaboration avec L. Fezoui du Cermics, M. Loriot et N. Maman de Simulog et C. Farhat de l'Université du Colorado à Boulder).

Durant cette année 1994, les travaux effectués ont tout d'abord porté sur la parallélisation d'un solveur explicite des équations d'Euler bidimensionnelles en maillages non-structurés déformables. L'approche utilisée combine une technique de partitionnement de maillage et un modèle de programmation de type transfert de message. Une phase de communication est nécessaire pour les sommets situés sur les frontières artificielles entre deux sous-domaines de calcul. Deux situations ont été envisagées et comparées en détail : la première repose sur l'utilisation de partitions recouvrantes des maillages de calcul (l'effort de programmation est alors minimal mais on introduit un certain nombre d'opérations arithmétiques redondantes au niveau des zones de recouvrement qui influent sur les propriétés d'extensibilité de l'algorithme parallèle); la seconde alternative utilise des partitions non-recouvrantes (dans ce cas il n'y a pas d'opération arithmétique redondante mais le nombre d'étapes de communication est supérieur). Il est ainsi possible d'écrire un code relativement portable en isolant clairement la partie communication de la partie calcul pur,

le passage d'une architecture à une autre ne nécessitant que la modification de la partie communication. Cette approche a été testée sur les architectures M.I.M.D. Meiko CS-1, Intel iPSC-860, et Kendall Square Research KSR-1 [19, 8, 18].

Cette étude a par la suite été étendue au cas d'un solveur implicite des équations de Navier-Stokes tridimensionnelles (noyau du code de calcul **NSTC3D**) avec deux objectifs à court terme : réaliser des simulations sur des géométries représentatives de cas industriels (chambre à combustion de moteur à piston, chambre à combustion de moteur d'avion, avion complet) et progresser dans la simulation du couplage fluide/structure sur plateforme de calcul hétérogène [9, 15] (travail en collaboration avec l'équipe de C. Farhat de l'Université du Colorado à Boulder). En ce qui concerne le premier point, des premiers résultats de simulations réalisées sur Intel Paragon et Cray T3D, ont été présentés lors de l'atelier international sur les techniques de solution pour les problèmes de CFD de grande taille au CERCA (Centre de Recherche en Calcul Appliqué) à Montréal [16].

3.9.2 Parallélisation semi-automatique

Participants : Laurent Angeli, Laurent Hascoët

Les recherches effectuées au sein du projet portent sur la réalisation d'un environnement de parallélisation de programmes Fortran. Elles s'articulent autour de deux axes principaux : l'amélioration des algorithmes existants et la conception d'algorithmes plus généraux d'une part, et l'implémentation de ces algorithmes dans un système offrant une bonne interaction avec l'utilisateur permettant l'optimisation des résultats de la parallélisation.

En ce qui concerne les algorithmes, le travail de l'année 1994 a porté sur la génération de code parallèle, exploitant les informations de parallélisme calculées auparavant. Les algorithmes de calcul de ces informations ont été développés durant les années précédentes. Cette année, le résultat principal est la conception de l'algorithme de "distribution du graphe de contrôle". Cet algorithme est une extension majeure de la "distribution de boucles" classique. Alors que la distribution de boucles permet la génération de code parallélisé pour une boucle pure, la distribution du graphe de contrôle permet la génération de code pour tout graphe de flot de contrôle, c'est à dire pour n'importe quel sous-programme Fortran.

La génération de code apparaît donc composée de cinq phases principales:

l'analyse calcule le statut (séquentiel, parallèle ...) de chaque opération élémentaire;

le regroupement des opérations d'un même statut en "composantes" correspondant aux boucles à générer;

le tri dans lequel on choisit l'ordre optimal dans lequel ces composantes devront figurer dans le code parallèle;

la distribution où l'on crée un nouveau graphe de contrôle, à partir de l'ancien et du résultat du tri. Pour chaque composante, on crée un graphe de contrôle correspondant à une boucle (séquentielle ou parallèle), dont le corps est obtenu par projection du corps de la boucle initiale;

l'écriture où l'on crée la représentation textuelle Fortran du nouveau graphe de contrôle.

Cet algorithme a été raffiné pour inclure la vectorisation, l'expansion des scalaires, et d'autres optimisations qui souvent apparaissent dans la littérature comme des transformations séparées.

En ce qui concerne l'interaction avec l'utilisateur, le résultat principal est la mise en place de deux transformations interactives. Ces transformations sont contrôlées par le système, qui ne propose que celles qui conservent le comportement du programme :

- l'expansion en ligne permet de remplacer l'usage d'une variable par sa définition. Cette transformation, dirigée par l'utilisateur, améliore la concision du programme, et permet des simplifications;
- l'échange de boucles permet de modifier le sens de parcours des tableaux multidimensionnels. Cette transformation, dirigée par l'utilisateur, permet d'arbitrer entre parallélisation et vectorisation.

L'ajout de nouvelles transformations a été prévu, et l'infrastructure nécessaire a été mise en place. Elle inclut les boutons d'activation, la visualisation des options proposées, et une option de retour en arrière.

L'interface nécessaire aux transformations interactives et à la génération de code a été développée en collaboration avec le projet CROAP. En effet, ce projet maintient le système Centaur, qui sert de plateforme d'implémentation aux outils de parallélisation Fortran.

3.10 Génération de code à partir d'équations aux dérivées partielles

Participants : Alain Dervieux, Laurent Hascoët, Stéphane Lanteri

L'objectif de ce travail est de générer automatiquement une partie centrale des codes éléments finis, à partir de la spécification mathématique du problème, c'est à dire des équations aux dérivées partielles. La première phase de ce projet consiste en la définition des équations à traiter, du type de code que l'on en déduira, et de l'architecture du système futur. Une maquette d'un système d'entrée et de manipulation d'équations aux dérivées partielles a été réalisée.

3.11 Outils interactifs de visualisation scientifique

Participants : Robert Fournier, Hervé Guillard, Wihem Kherrati

Une première année de thèse réalisée par Wihem Kherrati, encadrée par Hervé Guillard et Robert Fournier, au cours de l'année 1994 a permis d'étudier quelques algorithmes sur les thèmes suivants:

- calcul d'isosurfaces par un algorithme issu des "marching cubes",
- localisation de points dans un maillage volumique 3D et interpolation,
- construction de surfaces de courant par une technique de "pavage minimal" utilisant des ajouts et des retraits de particules.
- étude d'une méthode de rendu volumique par une technique de calcul incrémental cellule par cellule.

Ce travail a conduit à diverses présentations¹², rapport¹³ et documents internes ("VIGIE User Manual version 1.4", "xmtools" : Motif procedures for VIGIE"; "la Glib, une librairie graphique pour se faciliter la vie").

¹²W. Kherrati, "Rendu volumique pour des maillages non-structurés complexes", Journées AFIG-GROSPLAN, Bordeaux, 1-3 décembre 1993.

¹³R. Fournier et W. Kherrati, "Etude d'algorithmes graphiques dans le cadre de la simulation numérique", rapport INRIA en préparartion.

4 Actions industrielles

Les recherches décrites plus haut sont soutenues ou valorisées via les partenariats industriels suivants :

- Convention CEA-CESTA sur la modélisation de la turbulence.
- Programme CNES Thesee-V7, qui nous associe au CNES, à la SEP, à Bertin et à Simulog.
- Programme N3S de Simulog et EDF, soutenu notamment par un contrat Ministère de l'Industrie-Grand projet innovant, nous associant avec le projet MODULEF, Simulog, EDF, et Renault.
- Convention DRET associant Dassault, l'ENSAM, la société Sinfotec et l'INRIA sur les schémas centrés.
- Convention CNES-Aérospatiale, associant Science & Tech/INRIA, en coordination avec l'ONERA et E.N. Saint-Cyr sur la linéarisation des écoulements battants.
- Convention avec l'ESA-ESTEC nous associant avec Dassault.
- Programme moteurs en coopération avec Renault et Simulog accompagnant les deux bourses CIFRE de B. Duval et de R. Martin.
- Convention INRIA-Snecma accompagnant la bourse CIFRE de G. Carré, sur le thème de la résolution par multigrille d'écoulements compressibles turbulents.
- Programme Génie soutenu par le Ministère de l'Industrie, et associant l'INRIA, plusieurs de ses filiales et Dassault. SINUS participe à la mise au point applicative, à la validation et à la démonstration avec Dassault de trois concepts : application de la différentiation automatique à la conception optimale, environnement de programmation et de parallélisation en éléments finis, traitement parallèle de l'aéroélasticité 3D.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Participation à des projets internationaux

On citera les projets suivants :

ETMA (*Efficient Turbulence Models for Aeronautics*) projet coordonné par SINUS, accepté par la CEE (programme BRITE-EURAM/Aeronautics) pour la période du 01/12/92 au 30/11/94.

ECARP (*European Computational Aerodynamics Research Project*) projet coordonné par British Aerospace, accepté par la CEE (programme BRITE-EURAM/Aeronautics), pour la période du 01/04/93 au 30/03/95.

5.2 Actions internationales

5.2.1 Organisation de conférences

Le projet a organisé l'Atelier EHVDB, durant le "Second European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles", ESTEC, Noordwijk, Pays-Bas, 24 au 25 Novembre 1994. De plus, J.-A. Désidéri a participé à l'organisation du congrès Eccomas à Stuttgart ("Second European Computational Fluid Dynamics Conference", 5 au 8 Septembre 1994).

5.2.2 Invitations

Le projet a invité J. Quirk de l'ICASE, NASA Langley, du 11 au 16 Septembre 1994. Nous avons aussi eu la visite du Pr. P. Arminjon de l'Université de Montréal du 11 au 15 Juillet 1994.

Dans le cadre d'un contrat "DRET-Russes" J.-A. Désidéri a été en mission à Moscou (Centre Lyapunov) en Mars 1994.

A l'invitation du *National Aerospace Laboratory*, Tokyo, Japon, J.-A. Désidéri a participé à l'Atelier hypersonique HOPE/OREX (*Orbital Rentry Experiment*) ce qui a notamment permis l'inclusion de cas tests japonais dans la base EHVDB.

A l'invitation du *Kyoto Institute of Technology* (Pr. N. Satofuka), J.-A. Désidéri a donné une conférence intitulée "Control of Hyperbolic Systems for the Generation of Structured Grids".

Rémi Abgrall a été invité par le Département de Mathématiques de l'Université de Houston pour y faire un exposé sur les méthodes multiéchelles en maillage non-structuré et décrire le contenu, l'architecture et les logiciels utilisés pour la base de donnée EHVDB (6-8 Juin 1994).

A l'invitation du groupe de Mécanique de Fluides Numérique de NASA Ames Research Center, Rémi Abgrall a fait une série d'exposé afin de montrer comment utiliser les méthodes multiéchelles en maillage non-structuré (17–21 Juillet 1994). Enfin, il a été invité à faire un exposé sur le même sujet au colloque organisé à l'I.H.P., le 22 Novembre 1994, lors de la remise, au Pr. D. Gottlieb, du diplôme de Docteur Honoris Causa de l'Université de Paris VI.

5.2.3 Bases de données

Le projet développe le concept de “networkshop” : il s'agit de stimuler la coopération scientifique par la constitution d'un réseau de laboratoires, d'une base de donnée partagée par ce réseau, à fort contenu scientifique et technologique (données d'expériences, de calcul, logiciels) et d'une ou plusieurs manifestations scientifiques permettant la comparaison des travaux des participants sur des problèmes communs. Ce mode de travail a été appliqué dans le cadre du Programme Hermès (“European High-Velocity Data Base”, EHVDB), du projet BECAUSE et du projet BRITE/ETMA.

La mise en place d'EHVDB a été réalisée par le Service SEMIR, grâce en particulier à L. Ottavj, D. Terrer et R. Immordino. D'une part, EHVDB est un journal d'archive électronique dont le contenu initial est une compilation des contributions numériques ou expérimentales aux Sessions I (1990) et II (1991) de l'“Atelier Hypersonique” et dont l'évolution est gérée par un Comité d'Experts. D'autre part, EHVDB est un outil accessible par le réseau qui permet à la communauté scientifique et industrielle notamment grâce aux outils graphiques en développement, d'évaluer les performances des nouvelles méthodes de simulation par comparaison aux solutions de référence. Les travaux de R. Fournier du SEMIR ont permis de développer un logiciel de visualisation, VIGIE, particulièrement efficace dans le cadre d'un atelier de calcul scientifique. En effet, ce logiciel très convivial s'adapte à des solutions de différents types (maillage structuré ou non) provenant de divers contributeurs, à divers types de poste de travail, et permet la visualisation simultanée de plusieurs contributions, ce qui facilite grandement la synthèse d'un cas test. Le SEMIR et le Projet SINUS contribuent au lancement par le Projet MENUSIN (F. El Dabaghi) de la base de données pour l'électromagnétisme “EEDB” dont la structure initiale est inspirée de EHVDB.

6 Diffusion des résultats

6.1 Formation

6.1.1 Enseignement universitaire

Méthodes Multigrilles , point de vue variationnel et analyse de Fourier, cours de DEA de Mathématiques (option Mathématiques Appliquées, UNSA (A. Dervieux, 9 heures).

Introduction à l'Analyse Numérique , cours de première année de l'ESSI (J.-A. Désidéri, 13 heures).

Méthodes de Résolution Itératives , cours de troisième année de l'ESSI, option calcul scientifique pour l'ingénieur (J.-A. Désidéri, 30 heures).

Approximation des équations d'Euler , cours de troisième année de l'ESSI, option calcul scientifique pour l'ingénieur (H. Guillard, 18 heures).

Fluides Compressibles , cours en Maîtrise d'Ingénierie Mathématique, UNSA (J.-A. Désidéri, 25 heures).

6.1.2 Autres enseignements

Calcul parallèle et méthode d'éléments finis , Ecole d'été du parallélisme du CNRS, LIP (Stéphane Lanteri [21]).

Journée thématique "parallélisme" , séminaire organisée par le CREMIS (Jean-Michel Malé [22]).

Méthodes numériques sur ordinateur parallèle , formation permanente au CEA Cadarache (Jean-Michel Malé [23]).

6.1.3 Thèses

- Thèses soutenues dans le projet :
 1. Bruno Koobus, "Algorithmes multigrille et algorithmes implicites pour les écoulements compressibles turbulents", UNSA, spécialité Mathématiques, 14 Décembre 1994.
 2. Agnès Merlo, "Méthodes numériques pour le calcul d'écoulements hypersoniques stationnaires en déséquilibre thermique

ou instationnaire à l'équilibre", UNSA, spécialité Mathématiques, 11 Mars 1994.

3. Tilo Lumppp, "Simulation numérique de couches de mélange compressibles au moyen de schémas d'ordre élevé du type ENO", UNSA, spécialité Sciences de l'Ingénieur, 11 Octobre 1994.

6.1.4 Stages

Le projet a accueilli les stagiaires suivants :

- Olivier Botella, "Etude d'une turbulence soumise à compression", DEA de turbulence et systèmes dynamiques, UNSA, du 01/03/94 au 30/06/94.
- Jérôme Francescato, "Modèles numériques pour les écoulements turbulents transsoniques", DEA de turbulence et systèmes dynamiques, UNSA, du 01/03/94 au 30/06/94.
- Valérie Le bras, "Etude d'une méthode de Galerkin non-linéaire appliquée à une approximation éléments finis bigrille", DEA de turbulence et systèmes dynamiques, UNSA, du 01/03/94 au 30/06/94.

Par ailleurs, J.-A. Désidéri co-encadre avec M. Ammou (CNRS-LPSES Sophia Antipolis) une série de stages d'étudiants pour la réalisation d'un logiciel effectuant la simulation de la génération de paires électrons-trous dans un semi-conducteur homogène par une méthode de Monte-Carlo et de la diffusion et recombinaison de ces porteurs par une méthode d'éléments finis multigrilles.

6.2 Activités extérieures

R. Abgrall s'occupe de la rubrique "Colloques" dans Matapli, le bulletin de la Smai, J.-A. Désidéri est le rédacteur de la "Newsletter" d'Eccomas et co-éditeur d'une série chez John Wiley sous l'égide d'Eccomas. J.-A. Désidéri est membre du bureau du Gamni (Groupement pour l'Avancement des Méthodes Numériques de l'Ingénieur) (Trésorier). H. Guillard représente Sophia-Antipolis au comité de pilotage du Crémis.

A. Dervieux est membre du comité scientifique et S. Lanteri du comité directeur du réseau Rapid (Réseau de ressources des Applications Parallèles pour l'Industrie et le Développement scientifique).

R. Abgrall est membre du Conseil Scientifique de l'IMT (Marseille).

A. Dervieux est président du Conseil Scientifique du Centre Informatique et Médicale de Lyon.

7 Publications

Thèses

- [1] B. KOOBUS, *Algorithmes multigrille et algorithmes implicites pour les écoulements compressibles turbulents*, thèse de doctorat, Université de Nice/Sophia-Antipolis, spécialité Mathématiques, 1994.
- [2] T. LUMPP, *Simulation numérique de couches de mélange compressibles au moyen de schémas d'ordre élevé du type ENO*, thèse de doctorat, Université de Nice/Sophia-Antipolis, spécialité Sciences de l'Ingénieur, 1994.
- [3] A. MERLO, *Méthodes numériques pour le calcul d'écoulements hypersoniques stationnaires en déséquilibre thermique ou instationnaire à l'équilibre*, thèse de doctorat, Université de Nice/Sophia-Antipolis, spécialité Mathématiques, 1994.

Articles et chapitres de livre

- [4] R. ABGRALL, « Approximation du problème de Riemann vraiment multidimensionnel des équations d'Euler par une méthode de type Roe (I) : la linéarisation », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 319, I, 1994, p. 499–504.
- [5] R. ABGRALL, « Approximation du problème de Riemann vraiment multidimensionnel des équations d'Euler par une méthode de type Roe (II) : solution du problème de Riemann approché », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 319, I, 1994, p. 625–629.
- [6] R. ABGRALL, « An essentially non-oscillatory reconstruction procedure on finite element type meshes, application to compressible flows », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 116, 1994, p. 95–101.
- [7] R. ABGRALL, « On essentially non-oscillatory schemes on unstructured meshes : analysis and implementation », *Journal of Computational Physics* 114, 1, 1994, p. 45–54.
- [8] C. FARHAT, S. LANTERI, « Simulation of compressible viscous flows on a variety of MPPs : computational algorithms for unstructured dynamic

meshes and performance results», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1994, accepté pour publication (paru aussi comme rapport de recherche INRIA n°.2154).

- [9] C. FARHAT, M. LESOINNE, P. STERN, S. LANTERI, «High performance solution of three-dimensional nonlinear aeroelastic problems via parallel partitioned algorithms : methodology and preliminary results», *Journal of Computing Systems in Engineering*, 1994, accepté pour publication (paru aussi comme rapport de recherche College of Engineering, University of Colorado, Boulder, No. CU-CAS-94-20).
- [10] B. NKONGA, H. GUILLARD, «Godunov type method on non-structured meshes for three-dimensional moving boundary problems», *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 113, 1994, p. 183-204, (paru aussi comme rapport de recherche INRIA n°.1883).

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [11] R. ABGRALL, «On genuinely multidimensional upwinding in the finite volume context», *in: Proceedings of the 5th International Conference on Hyperbolic Problems, Theory, Numerics and Applications*, Stony Brook, NY, USA, 1994.
- [12] R. ABGRALL, «A third order ENO scheme on unstructured meshes, application to shock waves calculations», *in: Proceedings of the 17th International Symposium on Shock Waves*, Springer Verlag, 1994.
- [13] A. CARRAU, A. DERVIEUX, «Application of a mesh adaptive capture strategy for solving 1D turbulent boundary layers», *in: Proceedings of the 4th international conference on numerical grid generation in computational fluid dynamics and related topics*, N.-P. Weatherill, P.-R. Eiseman, J. Hauser, J.-F. Thompson (éd.), Pineridge Press Ltd., p. 513-526, Swansea, Wales, 1994.
- [14] A. DERVIEUX, J.-M. MALÉ, N. MARCO, J. PÉRIAUX, B. STOUFFLET, H.-Q. CHEN, «Some recent advances in optimal shape design for aeronautical flows», *in: 2nd European Computational Fluid Dynamics '94 conference*, S. Wagner, J. Périaux, E.-H. Hirschel (éd.), *Invited Lectures and Technological Sessions*, John Wiley & Sons, p. 251-258, Stuttgart, Allemagne, 1994.
- [15] C. FARHAT, S. LANTERI, N. MAMAN, «Distributed solution of transient coupled aeroelastic problems», *in: Proceedings of the 3rd World Congress on Computational Mechanics (WCCM III), (II)*, p. 1463-1565, Chiba, Japon, 1994.
- [16] L. FEZOU, S. LANTERI, M. LORIOT, «Strategies for Navier-Stokes solvers on MPP machines», *in: Proceedings of the international workshop*

- on solution techniques for large-scale CFD problems*, W.G. Habashi Eds., p. 61–83, CERCA, Montréal, Québec, Canada, 1994.
- [17] D. GUEZENGAR, H. GUILLARD, «Compressibility models applied to supersonic mixing layers», *in: Proceedings of the ETMA workshop on turbulence modeling for compressible flow arising in aeronautics*, UMIST, Manchester, Angleterre, 1994.
- [18] S. LANTERI, «Unsteady flow simulations on MIMD systems», *in: Proceedings of the 6th joint EPS-APS international conference on Physics Computing*, R. Gruber and M. Tomassini Eds., p. 445–452, Lugano, Suisse, 1994.
- [19] S. LANTERI, «Unstructured CFD computations on MIMD systems», *in: Proceedings of the joint DFG-CNRS symposium on CFD on parallel systems*, S. Wagner Eds., à paraître dans Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vieweg Verlag, Université de Stuttgart, Allemagne, 1994.
- [20] B. PALMERIO, A. DERVIEUX, «Mesh adaptive interpolation : towards a mini theory ?», *in: Proceedings of the 4th international conference on numerical grid generation in computational fluid dynamics and related topics*, N.-P. Weatherill, P.-R. Eiseman, J. Hauser, J.-F. Thompson (éd.), Pineridge Press Ltd., p. 479–488, Swansea, Wales, 1994.

Cours polycopiés

- [21] S. LANTERI, *Application du calcul parallèle à la résolution d'écoulements compressibles par une méthode d'éléments finis*, Ecole d'été du parallélisme du CNRS, Laboratoire d'Informatique du Parallélisme, Ecole Normale Supérieure de Lyon, 1994, (à paraître dans La lettre des Calculateurs Parallèles et Distribués).
- [22] J.-M. MALÉ, S. LANTERI, *Parallélisme et modélisation par éléments finis ou méthodes spectrales en mécanique des fluides*, Journée thématique "parallélisme", Crémis, Institut Méditerranéen de Technologie, Marseille, 1994.
- [23] J.-M. MALÉ, *Implantation de diverses méthodes numériques sur calculateur parallèle à mémoire distribuée*, CEA Cadarache, 1994.

Rapports de recherche et publications internes

- [24] R. ABGRALL, A. HARTEN, «Multiresolution representation in unstructured meshes : I. preliminary report», *rapport de recherche n° 94-20*, UCLA CAM, 1994.
- [25] R. ABGRALL, «Approximation of the multidimensional Riemann problem in compressible fluid mechanics by a Roe type method», *rapport de*

- recherche n°2343*, INRIA, 1994, soumis à SIAM Journal on Numerical Analysis.
- [26] R. ABGRALL, «How to prevent pressure oscillations in multicomponent flows : a quasi conservative approach», *rapport de recherche n°2372*, INRIA, 1994.
- [27] R. ABGRALL, «Some remarks about the Riemann problem of first order Hamilton–Jacobi equations on general geometries», *rapport de recherche n°2342*, INRIA, 1994.
- [28] A. CARRAU, H. LOYAU, D. VANDROMME, «Advanced study on anisotropic turbulence models; preliminary results», *rapport de recherche*, ETMA, 1994.
- [29] G. CARRÉ, «Computation of a curved mixing layer with FUTUR-MG», *rapport de recherche*, ETMA, 1994, BRITE-EURAM Proposal *Efficient Turbulence Models for Aeronautics*.
- [30] G. CARRÉ, «Multigrid methods applied to turbulent flows», *rapport de recherche*, ETMA, 1994, BRITE-EURAM Proposal *Efficient Turbulence Models for Aeronautics*.
- [31] G. CARRÉ, «Résolution d'écoulement visqueux et turbulents par une méthode multigrille linéaire», *rapport de recherche*, SNECMA, 1994, Rapport annuel.
- [32] G. CARRÉ, «Unstructured MG for $k - \epsilon$ kernel», *rapport de recherche*, ETMA, 1994, BRITE-EURAM Proposal *Efficient Turbulence Models for Aeronautics*.
- [33] C. DEBIEZ, A. DERVIEUX, «Bilan d'avancement: discrétisation de Hadamard - Calculs de cas tests de référence», *rapport de recherche n°I*, Convention Science & Tec/INRIA, Janvier 1994.
- [34] C. DEBIEZ, A. DERVIEUX, «Différences finies et déformation frontière: expériences en stationnaire», *rapport de recherche n°III*, Convention Science & Tec/INRIA, Avril 1994.
- [35] C. DEBIEZ, A. DERVIEUX, «Différences finies et déformation frontière: expériences en stationnaire et instationnaire», *rapport de recherche n°IV*, Convention Science & Tec/INRIA, Octobre 1994.
- [36] C. DEBIEZ, A. DERVIEUX, «Formule de Hadamard en vitesse: le cas continu», *rapport de recherche n°II*, Convention Science & Tec/INRIA, Avril 1994.
- [37] B. KOOBUS, M.-H. LALLEMAND, «An additive standpoint in parallel two-level multigrid algorithms», *rapport de recherche n°2311*, INRIA, 1994.
- [38] N. MARCO, B. KOOBUS, A. DERVIEUX, «An additive multilevel preconditioning method», *rapport de recherche n°2310*, INRIA, 1994.

- [39] K. MER, «Variational analysis of a mixed finite element finite volume scheme on general triangulations», *rapport de recherche n°2213*, INRIA, 1994, soumis à M₂AN.
- [40] B. NKONGA, «Phases d'admission et d'échappement dans un moteur quatre soupapes», *rapport de recherche*, contrat Renault, Avril 1994.

8 Abstract

The activities of the SINUS team are aimed to contribute to the progress of methods of numerical modelling, from the analysis of mathematical and physical models, to the computer implementation of the solution algorithms. Our efforts are to find new methods (approximation, solution algorithms), to analyse models and schemes, and to experiment them. Today's application domain is the simulation of compressible reactive flows (aerodynamics, hypersonics, combustion), with an extension to first-order hyperbolic systems in general. The main methods that are produced are : upwind TVD finite-element methods applicable to non-structured meshes, self-adaptive meshes, implicit and multigrid schemes, spectral methods, parallel algorithms ; these methods are to prepare a new generation of CFD codes that will be more friendly (due to more general meshes, to extra robustness provided by TVD and strongly implicit formulations), and more adapted to intensive/parallel calculations. Besides our colleagues of numerical methods, our usual collaborators are : physicists (for the analysis of fundamental phenomena, and help in modelling), computer scientists (software chain for parallelism with emphasis on numerics and environments), industries of software (numerical methods, design of codes), application-oriented industries (contribution to physical modelling, numerical methods, design of codes).

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation du projet	3
3	Action de recherche	4
3.1	Méthodes d'approximation	4
3.1.1	Formulation éléments finis/volumes finis	4
3.1.2	Approximation décentrée haute résolution	6
3.1.3	Analyse multirésolution en non-structuré	6
3.1.4	Simulation directe de couche de mélange compressible	7
3.1.5	Discrétisation vraiment multidimensionnelle	7
3.1.6	Modélisation d'écoulements multispèces	8
3.1.7	Equations de Hamilton-Jacobi	8
3.1.8	Calcul formel d'équations équivalentes non-linéaires	8
3.1.9	Méthodes de Runge-Kutta non classiques	9
3.1.10	Méthodes implicites d'ordre deux	10
3.1.11	Méthodes de Galerkin non-linéaires	10
3.2	Méthodes de résolution	11
3.2.1	Méthode multigrille et multiniveau par agglomération	11
3.2.2	Convergence des méthodes multigrilles par agglomération	11
3.2.3	Méthode de Gauss adaptative	12
3.2.4	Méthode des résidus corrigés et annihilation de modes propres	12
3.2.5	Méthodes de décomposition de domaines	13
3.3	Optimisation de formes	14
3.4	Gestion de maillages	14
3.4.1	Remaillages locaux 3D	14

3.4.2	Analyse multirésolution et adaptation de maillage	15
3.4.3	Génération hyperbolique de maillages réguliers . . .	15
3.5	Modélisation de la turbulence	16
3.5.1	Méthodes multigrilles et turbulence	17
3.5.2	Modélisation anisotrope	17
3.5.3	Modèles bas Reynolds	17
3.5.4	Turbulence compressible	18
3.6	Écoulements moteurs	18
3.6.1	Simulation directe de turbulence compressée	18
3.6.2	Écoulement turbulent dans un moteur à quatre soupapes	19
3.6.3	Écoulement instationnaire dans la chambre de l'ARC	20
3.7	Écoulements hypersoniques réactifs et gaz réels	20
3.7.1	Approche homenthalpique	21
3.7.2	Écoulements hors-équilibre, modèles complexes . .	22
3.8	Couplage fluide/structure	23
3.8.1	Hadamard et aéroélasticité	23
3.8.2	Méthode implicite pour l'aéroélasticité	24
3.8.3	Aéroélasticité tridimensionnelle	24
3.9	Calcul parallèle	25
3.9.1	Applications en mécanique des fluides numérique .	25
3.9.2	Parallélisation semi-automatique	26
3.10	Génération de code à partir d'équations aux dérivées partielles	28
3.11	Outils interactifs de visualisation scientifique	28

4 Actions industrielles

29

5	Actions nationales et internationales	29
5.1	Participation à des projets internationaux	29
5.2	Actions internationales	30
5.2.1	Organisation de conférences	30
5.2.2	Invitations	30
5.2.3	Bases de données	31
6	Diffusion des résultats	32
6.1	Formation	32
6.1.1	Enseignement universitaire	32
6.1.2	Autres enseignements	32
6.1.3	Thèses	32
6.1.4	Stages	33
6.2	Activités extérieures	33
7	Publications	34
8	Abstract	38