

Projet SINUS

Simulation Numérique dans les Sciences de l'Ingénieur

Sophia Antipolis

THÈME 4B



*Rapport
d'Activité*

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	4
2	Présentation et objectifs généraux	5
3	Fondements scientifiques	6
3.1	Méthodes d'approximation	6
3.2	Algorithmes de résolution	8
3.3	Algorithmes pour l'optimisation	11
3.4	Plate-formes d'intégration	12
4	Domaines d'applications	12
4.1	Panorama	12
4.2	Aéronautique	13
4.3	Espace	13
4.4	Automobile	13
4.5	Énergie	13
4.6	Autres applications	13
5	Logiciels	14
5.1	N3S-NATUR	14
5.2	AERO	14
5.3	CAST	14
5.4	THOR	14
6	Résultats nouveaux	15
6.1	Approximation	15
6.1.1	Schémas ρ -positifs	15
6.1.2	Écoulements à faible nombre de Mach	15
6.1.3	Schémas en maillage étirés	16
6.1.4	Méthodes d'ordre élevé et aéroacoustique	16
6.1.5	Adaptation de maillages	17
6.2	Modélisation d'écoulements turbulents	18
6.2.1	Validation de la turbulence en hypersustentation	18
6.2.2	Calculs LES industriels	18
6.2.3	Modélisation OES	18
6.3	Méthodes multigrilles	18
6.3.1	Méthodes multiniveaux	19
6.3.2	Multigrille à maillages multiples	19
6.3.3	Méthodes multigrilles parallèles	21
6.3.4	Lisseurs par décomposition de domaine	21
6.3.5	Multigrille par agglomération dans N3S-NATUR	22
6.3.6	Méthode d'agglomération lissée	24
6.4	Méthodes de décomposition de domaine	25

6.4.1	Décomposition de domaine sans recouvrement pour des systèmes hyperboliques	25
6.4.2	Etude des conditions de raccord classiques pour les équations d'Euler	26
6.4.3	Préconditionnement de systèmes interfaces	27
6.5	Optimum design par gradient	28
6.6	Algorithmes génétiques	28
6.6.1	Algorithmes génétiques parallèles	29
6.6.2	Algorithmes d'optimisation hybrides	29
6.6.3	Optimisation multicritère	30
6.6.4	Stratégies de jeux non coopératifs (« Nash ») et algorithmes hiérarchiques	30
6.6.5	Optimisation de trajectoires par AG	31
6.6.6	Action coopérative EVOLAB	31
6.7	Proper Orthogonal Decomposition et Contrôle actif	32
6.8	Couplage fluide-structure	32
6.9	Plate-forme coopérative	33
6.10	Publications générales	34
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	34
7.1	N3S-PMG	34
7.2	Consortium Aérostructure	34
7.3	CNES: Aéroacoustique	34
7.4	Dassault-Aviation: MG	35
7.5	Dassault-Aviation: Optimum design	35
7.6	Dassault-Aviation: Proper Orthogonal Decomposition	35
7.7	Snecma: Adaptation de maillage	35
8	Actions régionales, nationales et internationales	35
8.1	Actions européennes	35
8.1.1	DECISION	35
8.1.2	UNSI	36
8.1.3	IDeMAS	36
8.1.4	SOFT-IT	37
8.1.5	AEROSHAPE	37
8.2	Réseaux et groupes de travail internationaux	37
8.2.1	FLOWNET	38
8.2.2	INGENET	38
8.3	Relations bilatérales internationales	39
8.4	Accueils de chercheurs étrangers	39
9	Diffusion de résultats	40
9.1	Enseignement universitaire	40
9.2	Thèses et Stages	41
9.3	Animation de la recherche	41
9.4	Participation à des colloques, séminaires, invitations	41

10 Bibliographie

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Jean-Antoine Désidéri [DR]

Assistante de projet

Patricia Maleyran

Personnel INRIA

Alain Dervieux [DR]

Hervé Guillard [DR]

Stéphane Lanteri [CR]

Gia-Toan Nguyen [DR, UR de Grenoble, à partir du 1er juin 1999]

Renaud Savalle [IE, jusqu'au 31 Juillet 1999]

Ingénieurs experts

Jérôme Blachon [UR de Grenoble, à partir du 1er juin 1999]

Romuald Carpentier

Gilles Carré [jusqu'au 31 octobre 1999]

Gilles Carte

Raphael Lardat [à partir du 1er juin 1999]

Nathalie Marco

Eric Schall [jusqu'au 31 juillet 1999]

Chercheurs doctorants

Paul-Henri Cournède [boursier Ecole Centrale de Paris, à temps partiel]

Victorita Dolean [allocataire CNES/INRIA]

Luc Fournier [allocataire CNRS/INRIA]

Christophe Held [allocataire MESR]

Ales Janka [allocataire CIES]

David Leservoisier [boursier CIFRE/Snecma, à temps partiel]

Guillaume Vigo [boursier CIFRE/Dassault Aviation, à temps partiel]

Chercheurs invités

Ilya Abalakin [Académie des Sciences de Russie, quatre mois]

Sergey Peigin [université de Tomsk, Russie, d'octobre à décembre 1999]

Conseillers scientifiques

Bruno Koobus [Maître de Conférence, université de Montpellier, à partir du 1er juin 1999]

Roger Peyret [DR CNRS]

Jacques Périaux [Dassault Aviation, Direction de la Prospective]

Stagiaires

Simone Camarri [avril-juillet 1999, septembre-décembre 1999]

Julien De Domenico [avril-juillet 1999]

Oliver Gloth [université de Duisbourg, avril-juin 1999]

Collaborateur extérieur

Charbel Farhat [université du Colorado à Boulder]

2 Présentation et objectifs généraux

Il y a plus d'un siècle que H.A. Schwarz a démontré l'existence de solution à l'équation de Laplace en domaine quelconque en prouvant un théorème désormais célèbre sur lequel reposent nombre de nos algorithmes actuels pour la coordination de sous-domaines et le calcul parallèle. En fait, le calcul scientifique moderne est vraiment né pendant la seconde guerre mondiale sous l'impulsion de R. Courant et la mise au point du premier grand ordinateur.

De son côté, la mécanique des fluides théorique et expérimentale est une discipline scientifique reconnue depuis bien longtemps, où se sont illustrés L. Euler et L. Prandtl et beaucoup d'autres.

Cependant, à la confluence de ces deux grands courants scientifiques, ce n'est que dans les années 1970 que la mécanique des fluides numérique a réellement pris son envol, principalement d'abord aux Etats Unis. C'est en effet à cette époque que, pour des raisons scientifiques, technologiques, économiques, voire stratégiques, la simulation numérique des équations d'Euler ou de Navier-Stokes est devenue suffisamment performante, pour donner naissance au concept de « soufflerie numérique » et rivaliser avec certaines expériences en laboratoire devenues trop coûteuses.

Pour ces raisons, les premiers ouvrages focalisés sur cette spécialité sont relativement récents (e.g. [ATP84]). Depuis, comme en atteste l'explosion du nombre des publications scientifiques et des conférences internationales sur le sujet, la discipline a bénéficié de progrès considérables,

[ATP84] D. ANDERSON, J. TANNEHILL, R. PLETCHER, *Computational Mechanics and Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1984.

et les ouvrages de cours d'aujourd'hui traitent souvent de sujets spécialisés tels que les schémas d'approximation pour l'hyperbolique [GR96] ou les techniques de résolution sur ordinateur parallèle.

Les projets R & D ambitieux d'aujourd'hui, motivés par les besoins des industries de pointe (aéronautique et automobile notamment), reposent assez systématiquement sur des programmes structurés d'études numériques approfondies dont le rôle est déterminant à de nombreux stades du développement : modélisation, certification, exploitation, optimisation, etc. De plus, ces projets, qui sont par nature multidisciplinaires, réussissent mieux aujourd'hui, notamment grâce aux progrès de l'analyse numérique, à « coupler » les disciplines entre elles.

Pour contribuer à ce progrès, le projet SINUS focalise ses recherches sur les méthodes numériques en Mécanique des Fluides en particulier, et plus généralement en ingénierie avancée (optimisation). On développe des méthodes d'*approximation* par éléments finis pour les équations de Navier-Stokes (principalement en compressible), des *algorithmes de résolution* des grands systèmes discrets qui en résultent (schémas implicites, méthodes d'accélération multi-grille, méthodes de résolution par décomposition de domaine) ; on étudie l'adaptation de ces algorithmes aux *architectures de Calcul Haute Performance* (calcul parallèle, aide à la programmation parallèle). Ces développements nous conduisent à participer, en collaboration avec des équipes de Mécanique des Fluides, à l'amélioration et la validation de *modèles* (en turbulence notamment). On aborde aussi les problèmes liés au *couplage* en aéroélasticité (simulation numérique du couplage fluide/structure en aérodynamique). De plus, l'efficacité des codes actuels permet de plus en plus de les insérer dans une boucle d'optimisation ; l'*optimisation* est donc devenue un thème de recherche plus affirmé du projet (algorithmes hiérarchiques, algorithmes génétiques).

La place du logiciel numérique dans un service industriel, l'optimisation et le couplage nous ont conduit à nous intéresser aux *plateformes d'intégration* et à nous associer dans SINUS à un groupe spécialisé dans l'étude de ces plateformes, et avec lequel nous avons déjà significativement coopéré. En revanche, notre composante Génie Logiciel a pris son envol hors du projet pour proposer l'avant-projet TROPICS. Enfin, le projet s'intéresse à l'*archivage* et la *dissémination* de l'information numérique, ainsi qu'à l'animation d'ateliers spécialisés (bases de données).

3 Fondements scientifiques

3.1 Méthodes d'approximation

Mots clés : éléments finis, volume fini, problème de Riemann, théorie TVD, schéma MUSCL, théorie LED, méthodes POD.

[GR96] E. GODLEWSKI, P.-A. RAVIART, *Numerical approximation of hyperbolic systems of conservation laws*, Springer, New York, 1996.

Résumé : Pour le projet SINUS, le but de la démarche d'approximation est de remplacer une équation aux dérivées partielles par un système algébrique dont la solution est :

- facilement calculable,
- proche de la solution de l'EDP,
- dotée de certaines propriétés de la solution de l'EDP.

En Mécanique des Fluides compressibles, deux caractéristiques dominantes des modèles sont :

- les singularités, et non-linéarités,
- la complexité des géométries industrielles.

Une revue récente des techniques modernes de la Mécanique des Fluides Numérique est présentée dans [Pey96], [ATP84], [Hir88].

Pour répondre aux défis ci-dessus, le projet SINUS s'est spécialisé dans le développement de méthodes combinant : (i) les résolutions approchées des *problèmes de Riemann* modélisant l'évolution d'un gaz à partir d'une interface plane entre deux états et (ii) les approximations en *maillages non-structurés*, c'est-à-dire par exemple celles s'appuyant sur la discrétisation du domaine de calcul en un ensemble de tétraèdres dans lesquels le nombre de sommets voisins d'un sommet donné est variable. Nous suggérons la lecture de [Tor97] au lecteur intéressé par les solveurs de Riemann.

Pour le point (i), la pierre philosophale serait un « solveur de Riemann » qui conserverait la positivité des masses et températures, serait peu coûteux, et peu dissipatif, adaptable enfin à des écoulement complexes (turbulents, réactifs) et à des nombres de Mach de zéro à des valeurs très grandes. Les investigations dans ce sujet sont donc liées à l'étude des problèmes de Riemann, à la modélisation de la physique complexe et à l'analyse asymptotique.

Pour le point (ii), la gageure est d'analyser et de maîtriser les erreurs locales et globales des nouvelles approximations sur des maillages de qualité de plus en plus arbitraire (étirement quelconque). La *consistance* et la *précision* sont mesurées grâce à des analyses variationnelles, des critères d'exactitude sur des polynômes, ou plus classiquement des calculs d'erreurs de troncature. La seconde préoccupation dans (ii) est de conserver la *positivité* de certaines solutions ; les approximations non-linéaires incluant des *limiteurs* sont analysées (approches TVD, Total Variation Diminishing, et LED, Local Extrema Diminishing) et utilisées intensivement. Enfin, de façon à contribuer à la *fiabilité du calcul numérique*, nous avons relancé une filière

-
- [Pey96] R. PEYRET, *Handbook of Computational Fluid Mechanics*, Academic Press, London, 1996.
[ATP84] D. ANDERSON, J. TANNEHILL, R. PLETCHER, *Computational Mechanics and Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1984.
[Hir88] C. HIRSCH, *Numerical Computation of Internal and External Flows*, Wiley and sons, Chichester, 1988.
[Tor97] E. TORO, *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Berlin, 1997.

sur l'adaptation de maillage avec pour objectif de mettre au point des stratégies permettant (et mesurant) la convergence vers la solution exacte.

Les simulations ont, durant la dernière décennie, fortement gagné en prédictivité. En même temps un nouveau besoin de prédictions moins précises mais très rapides a vu le jour. La décomposition en modes propres orthogonaux (POD, Proper Orthogonal Decomposition, introduite par Lumley)) est une voie séduisante pour apporter une réponse à ce besoin.

3.2 Algorithmes de résolution

Mots clés : schéma implicite, méthode multigrille, méthode de décomposition de domaine.

Résumé : *La discrétisation des équations aux dérivées partielles du modèle mathématique conduit à la nécessité de résoudre de grands systèmes algébriques généralement non-linéaires. Les méthodes utilisées à cette fin sont presque exclusivement itératives, et on en distingue deux types principaux : (i) les méthodes d'intégration pseudo-temporelles (schémas implicites), et (ii) les méthodes de résolution hiérarchiques (multigrille, décomposition de domaine). En général, dans les deux cas, on est amené à résoudre une suite de problèmes linéaires ; l'analyse de ces méthodes relève donc principalement de l'Algèbre Linéaire et de l'Analyse de Fourier, mais elles peuvent aussi être étudiées via les théories reposant sur l'analyse fonctionnelle (méthodes de l'énergie, propriétés d'approximation à la Hackbusch,...)*

Dans de nombreuses applications en Mécanique des Fluides, le modèle mathématique est dominé par les termes de convection. Le regroupement de ces termes forme les « Équations d'Euler » qui, en formulation stationnaire, constituent un jeu d'équations aux dérivées partielles non-linéaires qui est hyperbolique seulement dans les zones où l'écoulement est localement supersonique. Pour cette raison, les méthodes de résolution par avancement en espace, de type méthode des caractéristiques, sont limitées à des applications assez particulières. À l'inverse, on peut construire des méthodes très générales par approximation de la formulation instationnaire du modèle :

$$\frac{\partial}{\partial t} W(x,y,z,t) + \operatorname{div} F(W) = 0. \quad (1)$$

À partir d'une condition initiale :

$$W(x,y,z,0) = W^0(x,y,z) \quad (2)$$

on intègre en temps le système (1) soumis à des conditions aux limites jusqu'à convergence asymptotique ($t \rightarrow \infty$). Pour cela on construit une suite d'approximations :

$$W_h^n(x,y,z) \simeq W_h(x,y,z,n \Delta t) \quad (3)$$

où l'indice h se réfère à la discrétisation spatiale (généralement par éléments ou volumes finis), l'indice supérieur n à l'itération en temps, et Δt est un pas de temps d'intégration. On note :

$$\Phi_h(W_h(x,y,z,t)) \simeq \operatorname{div} F(W) \quad (4)$$

l'approximation du terme de divergence.

Schémas implicites : Une forme assez générale de schéma d'intégration implicite linéarisé peut alors s'exprimer par l'équation suivante :

$$(I + \Delta t \Phi'_h(W_h^n)) (W_h^{n+1} - W_h^n) = -\Delta t \Phi_h(W_h^n) \quad (5)$$

dans laquelle $\Phi'_h(W_h^n)$ est le jacobien de l'approximation $\Phi_h(W_h^n)$, ou une approximation. D'un point de vue algorithmique, à chaque itération en temps, on construit l'approximation (par éléments ou volumes finis) du membre de droite et des éléments constitutifs de la matrice apparaissant dans le membre de gauche. On résout ensuite le système linéaire par relaxation. Lorsqu'on applique ce type d'approche à une équation modèle hyperbolique, il est bien connu que l'algorithme itératif est alors inconditionnellement stable. Autrement dit, en pratique, on peut utiliser de très grands pas de temps, ce qui augmente l'efficacité de l'itération.

Dans le cas d'approximations par éléments finis sur maillages non-structurés, aucune factorisation spatiale de la matrice ne peut être effectuée et la largeur de bande est inconnue a priori. C'est pourquoi on résout par relaxation. Les principaux résultats du projet dans ce domaine ont eu trait à l'étude des préconditionneurs pour des schémas d'approximation décentrés [4], l'analyse théorique des propriétés de convergence [2] et la construction de variantes précises au second-ordre en temps [10].

L'analyse de Fourier (en espace), ou analyse modale, de systèmes linéaires représentatifs des équations à résoudre après discrétisation d'équations aux dérivées partielles, permet d'ordonner les composantes de l'erreur itérative suivant les valeurs d'un (ou plusieurs) paramètres fréquentiels, la valeur de la plus haute fréquence étant liée au pas de discrétisation en espace, ou, à l'inverse, au nombre de degrés de liberté. Un principe de base concernant les méthodes itératives classiques, telles que l'itération de Jacobi, est le suivant : l'itération agit avec la plus grande efficacité sur les composantes de l'erreur de hautes fréquences ; à l'inverse, ce sont les composantes de basses fréquences qui persistent et sont la manifestation de la raideur du système. Par contre, ces modes de basses fréquences, qui sont la représentation discrète de fonctions *lisses* des coordonnées d'espace, peuvent être interpolés sans grande perte de précision sur des grilles de moindre finesse.

Méthodes multigrilles : la méthode multigrille^{[Hac85]-[Wes91]} est issue de cette observation. On construit a priori une *hiérarchie* de niveaux de grille, associés à des intervalles de fréquences différents. Une méthode itérative de type classique, dite « lisseur » est utilisée pour atténuer efficacement les modes de hautes fréquences de l'erreur associés à la discrétisation la plus fine ; le problème résiduel est ensuite reformulé sur une grille plus grossière, sur laquelle on lisse à

[Hac85] W. HACKBUSCH, *Multigrid methods and applications, 4*, Springer Verlag, Berlin, 1985.

[Wes91] P. WESSELING, *An introduction to multigrid methods, Chichester*, John Wiley & Sons, Berlin, 1991.

nouveau avant de transférer le problème sur une grille encore plus grossière, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le problème devienne trivial. On construit ensuite à l'inverse des approximations sur les différentes grilles de dimensions croissantes par prolongement (et éventuellement lissage). En procédant de la sorte, les phases de lissage associées aux différentes grilles éliminent efficacement les composantes de l'erreur itérative suivant les différentes fréquences, jusqu'à la plus basse qui est éliminée par résolution directe d'un système trivial. Dans le cas d'un problème modèle linéaire elliptique, la théorie permet d'établir que la *complexité* de la méthode multigrille est proportionnelle au nombre de degrés de liberté. Cela signifie que le coût de résolution du système à la précision fixée par l'erreur d'approximation est directement proportionnel au nombre d'inconnues du problème.

L'analyse théorique, la pédagogie et l'application de méthodes multigrilles en Mécanique des Fluides constituent un axe important de l'activité du projet [8]-[7]-[1]- [5]-[3]. On s'intéresse plus particulièrement à la construction des différents niveaux de grille à partir de la grille la plus fine supposée non-structurée (agglomération, reconstruction), ainsi qu'à l'identification d'opérateurs de transfert de « grille à grille » efficaces, dans le cas d'équations à dominante hyperbolique (plutôt qu'elliptique). Ces méthodes, bien que complexes à mettre en œuvre informatiquement, sont néanmoins largement utilisées dans les applications à cause de leur efficacité et de leur robustesse.

Méthodes par décomposition de domaine : l'arrivée des ordinateurs parallèles a bousculé nombre d'a priori dans la recherche sur les algorithmes de résolution. Certaines méthodes « explicites » ou très itératives ont été traitées facilement par partitionnement spatial du domaine de calcul et programmation dans un modèle par transfert de message (bibliothèques PVM et MPI), de façon à reproduire sur l'architecture parallèle l'algorithme scalaire « parallélisable » [9].

À l'opposé, le remplacement des méthodes directes (factorisation, ...) est un problème difficile. On fait appel à des méthodes de décomposition de domaine (voir [SBG96]) dans lesquelles l'algorithme mathématique traite différemment les nœuds internes aux sous-domaines de ceux qui sont frontaliers (aux interfaces ou dans les recouvrements). Ces méthodes ont été développées essentiellement pour des problèmes elliptiques du second ordre et profitent de la forte régularité des solutions de ce type d'équation, ainsi que de la symétrie des opérateurs impliqués. On obtient ainsi des méthodes quasi-optimales, c'est-à-dire de convergence indépendante du maillage et « scalables », c'est-à-dire de convergence indépendante du nombre de sous-domaines^[FR92]. La situation est beaucoup moins claire pour les systèmes mixtes hyperboliques-paraboliques issus de la Mécanique des Fluides compressibles. Les opérateurs sont à dominante du premier ordre, non-symétriques, à solutions essentiellement singulières. Dans ce domaine, le

[SBG96] B. SMITH, P. BJØRSTAD, W. GROPP, *Domain Decomposition : Parallel Multilevel Methods for elliptic partial differential equations*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, 1996.

[FR92] C. FARHAT, F.-X. ROUX, « An unconventional domain decomposition method for an efficient parallel solution of large-scale finite element systems », *SIAM J. in Sci. Comp.* 13, 1992, p. 379–396.

projet s'intéresse à la construction de conditions d'interface appropriées à la nature hyperbolique (équations d'Euler) ou mixte hyperbolique-parabolique (équation de Navier-Stokes) pour des méthodes de décomposition de domaine applicables à la simulation numérique d'écoulements compressibles^{[GG93]_[Qua90]}. Dans les méthodes par décomposition de domaine, on utilise aussi une « hiérarchie » de discrétisations, mais ici les sous-systèmes sont associés à une partition du domaine de calcul en sous-domaines^[Xu92] (avec ou sans recouvrement).

3.3 Algorithmes pour l'optimisation

Les problèmes d'optimisation, notamment en aérodynamique industrielle, sont de plus en plus complexes. Dans certains cas, la difficulté essentielle tient au coût de chaque simulation et l'approche numérique choisie doit exploiter au maximum les spécificités (régularité, convexité locale) du problème.

Dans de nombreux autres cas, les critères à optimiser sont non différentiables et non convexes. De nombreux paramètres d'optimisation doivent être pris en compte, parfois de nature différente (booléen, entier, réel, fonctionnel) ainsi que des contraintes géométriques et aérodynamiques. Par ailleurs, les projets numériques d'aujourd'hui sont de plus en plus fréquemment multidisciplinaires, ce qui ajoute à la complexité des formulations. Il est donc indispensable de construire des optimiseurs robustes.

Pour aborder les problèmes convexes, le projet maintient une importante activité en optimisation de forme par *méthodes de gradient*, en relation avec des spécialistes des optimiseurs quasi-Newton, et des spécialistes en différentiation automatique.

Les *Algorithmes Génétiques* (AG) sont des méthodes basées sur les principes de la sélection naturelle. Ils reposent sur l'analogie avec l'un des principes darwiniens les plus connus : *la survie de l'individu le mieux adapté*. Les AG opèrent sur une population d'individus. Ces individus « évoluent » au cours des générations, grâce à des opérateurs génétiques, vers un individu optimal, solution du problème d'optimisation. Ces individus sont appelés *chromosomes* et on peut les coder en *chaînes binaires*. Ils évoluent en fonction de leur *valeur sélective*, valeur de la fonctionnelle à optimiser. Les AG diffèrent des méthodes déterministes (gradient conjugué, méthode de plus forte descente, one-shot,...) par trois principaux aspects : (1) ils ne nécessitent pas le calcul d'un gradient, (2) ils traitent une population dans son ensemble plutôt qu'un seul individu qui évoluerait vers l'optimum, (3) ils font intervenir des opérateurs aléatoires ou semi-aléatoires. De ce fait, ce sont des algorithmes très robustes ; ils sont capables d'optimiser des fonctions multimodales, non convexes, non différentiables. Les AG sont mieux armés pour

-
- [GG93] F. GASTALDI, L. GASTALDI, « On a domain decomposition for the transport equation : theory and finite element approximation », *IMA J. Numer. Anal.* 14, 1993, p. 111–135.
- [Qua90] A. QUARTERONI, « Domain decomposition methods for systems of conservation laws : spectral collocation approximation », *SIAM J. Sci. Stat. Comput.* 11, 1990, p. 1029–1052.
- [Xu92] J. XU, « Iterative methods by space decomposition and subspace correction », *SIAM Review* 34, 1992, p. 581–613.

éviter l'écueil des minima locaux. Pour en savoir plus sur les AG : [Gol89].

Dans ce domaine, le projet a pour objectif de développer une activité de recherche prospective visant à traiter des problèmes d'optimisation de plus en plus généraux, mais visant également à conduire une réflexion dans le domaine de l'optimisation pour définir les analogies de concepts qui se sont révélés performants dans le cadre plus strict de la résolution (méthodes hiérarchiques, calcul parallèle).

3.4 Plate-formes d'intégration

La résolution de problèmes complexes (en aérospatial par exemple) conduit à la mise en œuvre de modèles multiphysiques utilisant des codes sophistiqués (CFD, structure et électromagnétique, par exemple). La définition et la mise en œuvre d'applications dans ces domaines se heurte alors à plusieurs obstacles : les disciplines ont une culture scientifique, des méthodes et des outils de travail qui leur sont propres. Elles ont parfois peu l'habitude de travailler en commun, leurs problématiques font appel à des moyens très spécialisés (codes parallèles, calculateurs vectoriels, algorithmes génétiques, ...). La communauté informatique s'est de ce fait trouvée confrontée à des besoins pressants de la part des utilisateurs et concepteurs d'applications dans le domaine des sciences de l'ingénieur. Ces demandes ont amené à des efforts importants dans les domaines des environnements de résolution de problème (Problem solving environments), du couplage de codes et des plate-formes d'intégration logicielle. Celles-ci doivent permettre la résolution de problèmes multiphysique faisant appel à des codes spécialisés, souvent non ouverts, non prévus pour coopérer les uns avec les autres, écrits dans des langages de programmation différents, et tournant sur des systèmes différents et géographiquement dispersés, et qu'il est impossible de faire migrer (grappes de calculateurs, machines parallèles, ...).

Le projet SINUS s'intéresse à ces aspects à travers la définition et l'expérimentation de méthodes et d'outils pour l'intégration logicielle de codes de calcul.

4 Domaines d'applications

4.1 Panorama

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

[Gol89] D. GOLDBERG, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.

4.2 Aéronautique

Les besoins des industries de l'Aéronautique restent très forts en aérodynamique externe, aussi bien pour les types d'avions actuels, dont l'aérodynamique doit être améliorée pour satisfaire les nouvelles contraintes d'économie de carburant, de bruit, notamment à l'atterrissage, et d'émission de tourbillons au dessus des pistes, que pour les avions de l'avenir, gros porteurs ou supersoniques. Il s'agit non seulement de calculer des écoulements turbulents autour de géométries complexes, mais aussi de les coupler avec la déformation de la structure (ailes, dérives) et/ou de placer cette simulation dans une boucle d'optimisation de forme. Le deuxième volet d'application concerne les moteurs d'avions ; il s'agit soit d'étages tournants soit de diffuseurs et chambre de combustion, auquel cas le modèle doit prendre en compte les diverses espèces et leur schéma chimique réactionnel, ou encore de mécanismes d'inversion de poussée.

4.3 Espace

Les lanceurs spatiaux posent des problèmes d'aérodynamique externe difficiles, notamment parce que le trajet s'effectue à diverses vitesses et dans différents milieux. Un lanceur comme ARIANE 5 est équipé de plusieurs types de moteurs et, par exemple pour le premier étage, d'un moteur central à carburant liquide, et de deux propulseurs à poudre latéraux. Ici encore nous avons des gaz non homogènes, et des couplages possibles entre écoulement gazeux et structures.

4.4 Automobile

La prédiction de l'écoulement des gaz dans un moteur multisoupape reste un défi pour l'ingénieur, et c'est notamment dans ce contexte que se pose l'un des problèmes de maillage parmi les plus délicats, car il s'agit de construire un système de maillage rendant compte des mouvements de piston et soupapes. Ce type de calcul instationnaire et en géométrie mobile est aussi très gourmand en puissance d'ordinateur et très exigeant en précision d'approximation.

4.5 Énergie

Turbines, chaudières, tuyauteries sont le siège d'écoulements complexes souvent rapides et violents, ou souvent lents et longs à se stabiliser. La capacité des codes à traiter efficacement des écoulements à nombres de Mach grands et petits est importante. Ici encore, les écoulements sont susceptibles de se coupler avec des mouvements de structures.

4.6 Autres applications

Notre « fond de commerce » théorique, et notamment notre expertise en méthodes multinationnelles et multidomaines, nous permet d'envisager de contribuer de manière originale au développement des méthodes de l'imagerie et de la réalité virtuelle, notamment en informatique médicale, en collaboration avec nos collègues spécialistes du domaine.

5 Logiciels

5.1 N3S-NATUR

Participants : Gilles Carré, Alain Dervieux, Hervé Guillard, Stéphane Lanteri.

Le projet est co-fondateur et partenaire du consortium N3S-NATUR. Il est en particulier co-développeur et co-proprétaire du logiciel N3S-NATUR. Le consortium regroupe les partenaires suivants : École Centrale de Lyon, Électricité de France, INRIA, Metraflu, Simulog, Snecma, Renault. Le code lui-même est constitué d'un noyau de calcul d'écoulement gazeux généraliste (Navier-Stokes, Turbulence, combustion, maillages mobiles), et d'extensions à physique plus focalisée sur différents métiers de l'aéronautique et de l'énergie.

Dans le cadre du programme R&D N3S-PMG, le projet a eu ces trois dernières années pour mission de développer une version périphérique multigrille parallèle du logiciel de mécanique des fluides compressibles N3S-NATUR (co-développé par Simulog, EDF, la Snecma et Renault). Il s'agit-là d'une activité de pré-industrialisation du savoir-faire acquis par le projet SINUS depuis 1988 dans le domaine des algorithmes de résolution multigrille linéaires par agglomération. L'objectif est de réduire les temps de simulations numériques complexes 3D (écoulements réactifs turbulents) stationnaires ou instationnaires, sur des maillages de 100000 à 500000 nœuds, en améliorant l'efficacité des phases de résolution linéaires rencontrées dans N3S-NATUR. La version périphérique N3S-PMG est développée en Fortran et repose sur l'utilisation de MPI et PVM pour les aspects liés à la parallélisation.

5.2 AERO

Participants : Simone Camarri, Alain Dervieux, Charbel Farhat (université du Colorado), Bruno Koobus, Raphael Lardat, Eric Schall.

AERO est un logiciel co-développé (depuis près de neuf ans) avec le « Center for Aerospace Structures » de l'université du Colorado à Boulder. Il permet de calculer sur ordinateur parallèle des couplages fluide-structure. Le modèle fluide correspond aux équations de Navier-Stokes, avec modélisation statistique de la turbulence ($k - \epsilon$), et maillage mobile. Le logiciel est écrit en Fortran et MPI.

5.3 CAST

Participants : Jérôme Blachon, Gia-Toan Nguyen.

La plate-forme CAST permet de faire coopérer des modules numériques simultanément sur différents postes de travail. Elle repose sur le concept d'objet ; elle est compatible CORBA. Ce logiciel est écrit en C++.

5.4 THOR

Participants : Gilles Carte, Stéphane Lanteri.

THOR est un logiciel de mécanique des fluides développé par le VKI à Bruxelles. Ce logiciel repose sur une formulation par éléments finis et des techniques d'approximation modernes (schémas MDHR, « Multi Dimensional High Resolution ») en 2D et 3D. Dans le cadre du projet communautaire BRITE IDeMAS, le projet SINUS a pour mission d'introduire des algorithmes de résolution multigrille non-linéaires parallèles dans THOR. On s'intéresse ici à des algorithmes multigrilles construits sur une hiérarchie de maillages éléments finis qui sont des discrétisations totalement indépendantes d'une même géométrie. THOR est programmé en C et utilise la bibliothèque (du domaine public) de solveurs itératifs AZTEC (Sandia National Laboratories). Les aspects liés à la parallélisation sont gérés avec MPI.

6 Résultats nouveaux

6.1 Approximation

6.1.1 Schémas ρ -positifs

Participants : Paul-Henri Cournède (Ecole Centrale de Paris), Alain Dervieux.

Une des difficultés du calcul d'écoulements compressibles rapides est la non-linéarité de sa modélisation, conjuguée à son domaine de définition, qui suppose que masse volumique et pression sont positives. En particulier, la mise au point de méthodes numériques conservant la positivité de la masse volumique est une des questions clés des études des schémas numériques. La poursuite des études sur les schémas TVD ou LED a permis la mise au point d'une nouvelle famille de schémas ρ -positifs quasi d'ordre deux pour les équations d'Euler, c'est-à-dire des schémas précis à l'ordre deux pour toute solution régulière, et conservant la positivité de la masse volumique sur les discontinuités. Un article réalisant la synthèse de ce travail a été soumis à publication [15].

6.1.2 Ecoulements à faible nombre de Mach

Participants : Alain Dervieux, Hervé Guillard, Eric Schall, Cécile Viozat (CEA Saclay).

Nous avons proposé plusieurs analyses montrant les défauts du solveur approché de Riemann proposé par Ph. Roe lorsque celui-ci est appliqué au calcul d'écoulement à petit nombre de Mach. En introduisant le préconditionnement de Turkel dans le terme de stabilisation du solveur de Roe, les problèmes d'approximation et aussi de résolution à l'aide d'un Jacobien précis à l'ordre un sont convenablement résolus, tant au niveau analyse qu'au niveau expériences numériques [19]. En ce qui concerne le schéma temporel, l'option raisonnable dans ce contexte est l'avancement en temps implicite aussi bien pour des calculs de solutions stationnaires qu'en évolutif.

Nous nous sommes en particulier intéressés à la question suivante : est-il raisonnable si on veut une certaine précision d'utiliser des schémas implicites avec des pas de temps très grands par rapport aux transitoires acoustiques? La réponse est affirmative, et étayée par la mise au point d'un schéma implicite précis à l'ordre trois. Il convient de rappeler que les équations de

Navier-Stokes comprennent des phénomènes diffusifs et advectifs. Or les méthodes à dérivation en temps rétrogrades (Backward Differencing Formulas) ne produisent pas de schémas à la fois inconditionnellement stables et précis à l'ordre trois pour l'advection. Nous avons choisi un schéma SDIRK2 (Norset) et démontré que des précisions en temps de l'ordre de un pour mille étaient obtenues avec des nombres de Courant acoustiques de plusieurs milliers ; dans ces conditions aussi, et à précision égale, le nouveau schéma est beaucoup moins coûteux qu'un schéma précis à l'ordre un en temps. De plus, pour répondre au besoin de robustesse dans la précision, une nouvelle méthode d'adaptation de pas de temps a été mise au point ; elle repose sur un critère avec mémoire de façon à ne pas introduire de fluctuations trop grande dans la taille du pas de temps en présence d'ondes acoustiques rapides. Ces résultats ont été obtenus sur un cas test de convection thermique dans une boîte rectangulaire avec réchauffement brusque d'une paroi et ont fait l'objet d'une communication en colloque [36].

6.1.3 Schémas en maillage étirés

Participants : Alain Dervieux, Christophe Held.

Ce travail concerne la technologie des schémas d'approximation des problèmes hyperboliques de la Mécanique des Fluides Numérique (MFN) en compressible. Ce domaine a été beaucoup étudié, avec de nombreux résultats durant les 15 dernières années. Néanmoins, il nous semble que, dans ce domaine, le comportement des schémas sur des maillages étirés est un thème bien peu exploré. Il s'agit pourtant d'un des problèmes d'approximation en MFN importants de la décennie, puisque l'on cherche à calculer en maillage non structuré des couches limites très minces, à l'aide de maillages spécifiés manuellement, ou bien (option plus futuriste) par adaptation automatique. Pour traiter le cas d'approximations décentrées, reposant sur des degrés de liberté attachés aux sommets de triangles, une première théorie a été développée autour d'une famille d'approximations, la dérivation Diamant [27]. Cette année les investigations portent sur le cas 3D, beaucoup plus complexe, avec pour perspective le calcul d'écoulement visqueux avec raffinement proche paroi.

6.1.4 Méthodes d'ordre élevé et aéroacoustique

Participants : Romuald Carpentier, Roger Peyret.

Les récents travaux effectués avec O. Botella sur les méthodes spectrales ont conduit à la rédaction cette année d'un article soumis [12]. Dans le cadre d'un cours IUTAM sur "Advanced Turbulent Flow Computations" qui a eu lieu à Udine (Italie) en septembre 1998, R. Peyret a rédigé un texte (80 pages) [25] qui doit paraître chez Springer. Une étude encore plus récente "Sur la consistance et la précision des méthodes de volumes finis" examine plus précisément le cas des maillages irréguliers.

Romuald Carpentier a terminé l'étude de schémas peu diffusifs, les schémas $\beta\gamma$, qu'il a étendu au cas axisymétrique. Ce développement a permis, dans la suite des travaux sur le cas test plan de propulseur C1 ([13], une étude intensive du cas test C3 comportant le couplage d'une onde de pression et de tourbillons détachés, et l'identification des comportements prin-

cipaux de ses solutions multiples sur une série importante de maillages, grâce à une version vectorielle optimisée passant sur le calculateur FUJITSU de l'IDRIS, voir [43].

Les études conduites ces dernières années sur les calculs d'écoulements stationnaires dans les propulseurs à poudre ont montré la nécessité d'utiliser des schémas de discrétisation plus précis que ceux disponibles dans les logiciels existants. Ceci nous a conduits à développer une méthode de volumes finis de haute précision (jusqu'au sixième ordre en espace et en temps). La précision en espace est obtenue par une technique de reconstruction fondée sur les valeurs moyennes des inconnues dans chaque cellule (quadrangulaire). La précision en temps est obtenue grâce à un schéma classique de Runge-Kutta explicite. La méthode a d'abord été validée sur le modèle simple de l'équation d'advection-diffusion bidimensionnelle dans le cas périodique et dans le cas d'un problème aux limites. Dans ce deuxième cas, le problème de la reconstruction a été étudié avec soin, de manière à sélectionner les stencils de bord (et de coin) susceptibles de conduire à un bon conditionnement de la matrice du système définissant les coefficients polynômiaux. Ensuite, des essais numériques ont été effectués dans le cas de l'équation de Burgers sans viscosité, dans le but, en particulier, d'évaluer la précision de l'approximation numérique du flux (non-linéaire) aux interfaces selon le nombre de points de Gauss utilisés. Enfin, la méthode du quatrième ordre a été appliquée aux équations d'Euler bidimensionnelles dans le cas d'une onde de pression dans un canal. Les résultats numériques ont montré que la précision théorique du quatrième ordre était bien obtenue dans ce cas simple. La perspective de cette étude est l'introduction de cette nouvelle technologie dans le code de Propulsion Solide (CPS).

6.1.5 Adaptation de maillages

Participants : Alain Dervieux, Paul-Louis George (projet GAMMA à Rocquencourt), David Leservoisier, Oliver Penanhoat (Snecma, Villaroche).

Depuis quelques années, nous avons cherché à mettre en évidence le fait que les méthodes de maillage adaptatives (et seulement ces méthodes) permettent un calcul avec une précision d'ordre supérieur à l'unité de solutions singulières d'équations aux dérivées partielles. B. Palmerio (université de Nice) a aussi montré récemment que les méthodes adaptatives par division isotrope ne peuvent pas être précises à l'ordre deux en trois dimensions. Ce dernier résultat constitue une forte motivation supplémentaire à s'intéresser aux méthodes de remaillage anisotropes initiées par les équipes GAMMA et M3N de Rocquencourt. Le point de vue spécifique du projet SINUS est la considération d'écoulements compressibles comportant des couches limites extrêmement fines, telles celles calculées avec des modèles de turbulence avec résolution jusqu'à la paroi. L'étude entreprise fait coopérer la Snecma, l'INRIA Rocquencourt (projet GAMMA), et le projet SINUS. D'une part, une nouvelle approche théorique a été construite : elle repose sur une modélisation fonctionnelle du maillage (notion de "métrique continue"). D'autre part, le concept initial de convergence adaptative a été pleinement confirmé et validé par une série de calculs pré-industriels d'écoulements turbulents avec loi de paroi, utilisant le logiciel BAMG du projet GAMMA et le code industriel N3S-NATUR (cf. la communication [35]).

6.2 Modélisation d'écoulements turbulents

6.2.1 Validation de la turbulence en hypersustentation

Participants : Ilya Abalakin, Alain Dervieux, Jérôme Francescato, Bruno Koobus, Michel Ravachol (Dassault).

En aéronautique, le problème de l'hypersustentation est celui de l'écoulement de l'air dans un système d'ailes totalement déployé comme celui d'un avion commercial à l'atterrissage. La prédiction du décrochement, phénomène qui entraîne une diminution brutale de la portance, est un problème délicat, à résoudre pourtant sur les géométries les plus complètes et réalistes possibles, d'où notre souci de valider des approches en maillage non-structuré. Dans le prolongement de nos études sur la modélisation à deux équations, nous continuons à réaliser des comparaisons calcul-soufflerie avec des lois de paroi ou des modèles « proche-paroi ».

6.2.2 Calculs LES industriels

Participants : Simone Camarri, Alain Dervieux, Bruno Koobus, Maria-Vittoria Salvetti (université de Pise).

Les progrès réalisés récemment en précision et efficacité pour le calcul d'écoulements tourbillonnaires, ainsi que la demande industrielle pour l'extension des méthodes en maillage non-structuré à la prédiction d'écoulements turbulents comportant de grandes structures instationnaires, nous ont conduits à lancer cette année une pré-étude sur le calculs LES (Large Eddy Simulation, Simulation de Grandes Structures). Cette étude est réalisée en collaboration avec l'université de Pise et prend comme support le code expérimental AERO (fruit de la coopération avec l'université du Colorado). L'approche choisie vise au calcul d'écoulements à grands nombres de Reynolds autour de voilures d'avion. Une loi de paroi de type Reichardt est appliquée au voisinage des parois. Des premiers (bons) résultats ont été obtenus sur une géométrie de validation (cylindre à section carrée), cf. [42].

6.2.3 Modélisation OES

Participants : Ilya Abalakin, Alain Dervieux.

La prédiction d'écoulements turbulents comportant de grandes structures instationnaires quasi-périodique peut aussi être mise en œuvre à l'aide de modèles de type $k - \epsilon$, grâce à la théorie de la moyenne de phase. Une collaboration entre des expérimentalistes (D. Favier, Marseille), des modélisateurs (M. Braza, Toulouse) et des numériciens (I. Abalakin à Moscou, et A. Dervieux) est cette année en cours de mise en place. Le contexte cible reste la voilure à grands nombres de Reynolds. Diverses méthodes sont appliquées pour adapter les modèles classiques de la modélisation statistique à la modélisation semi-déterministe (ou OES, Organised Eddy Simulation). Citons une approche par Moyenne en temps en cours de validation (cf. [40]).

6.3 Méthodes multigrilles

Résumé : *Les méthodes multigrilles constituent un thème de recherche ma-*

jeur du projet SINUS. Les études en cours portent sur l'adaptation du concept de multigrille par agglomération à la simulation numérique d'écoulements turbulents en maillages triangulaires et tétraédriques fortement étirés, la mise au point d'algorithmes multimaillages reposant sur l'utilisation d'une hiérarchie de grilles éléments finis construites par déraffinement et remaillage local et la prise en compte du parallélisme, à la fois pour les calculs intervenant à l'intérieur d'un niveau donné et entre les différents niveaux de grille (algorithmes additifs). Par ailleurs, le projet est maître d'œuvre depuis novembre 1996 dans une action R&D visant l'implantation et la démonstration du savoir-faire en multigrille par agglomération dans le logiciel industriel N3S-NATUR.

Trois techniques multigrilles sont actuellement considérées au sein du projet SINUS : les *multigrilles par agglomération* qui ont fait l'objet de plusieurs thèses depuis 1988, les *multigrilles multimaillages* qui ont été abordées plus récemment (notamment avec notre participation dans le projet européen IDEMAS) et les *approches multiniveaux*.

6.3.1 Méthodes multiniveaux

Participants : Alain Dervieux, Luc Fournier, Christophe Held, Nathalie Marco.

Une adaptation du principe multigrille à des problèmes d'optimisation a été proposée il y a quelques années par le projet SINUS. Cette nouvelle méthode, le paramétrage multiniveau hiérarchique, a été, d'une part, étendue à la représentation non-uniforme de profils par C. Held (voir le paragraphe Optimisation de forme) et, d'autre part, adaptée à un problème d'identification en collaboration avec le projet ROBOTVIS.

6.3.2 Multigrille à maillages multiples

Participants : Gilles Carte, Hervé Guillard, Stéphane Lanteri, Thierry Coupez (École des Mines de Paris).

Le projet SINUS est partie prenante dans le projet communautaire IDEMAS qui est un projet BRITE/EURAM de type « Basic Research » (cf. développement du logiciel THOR). Dans ce projet, nous nous intéressons à la mise au point d'algorithmes multigrilles adaptés à une famille d'approximations multidimensionnelles (schémas MDHR, « Multi Dimensional High Resolution ») en 2D et 3D. La méthode multigrille sélectionnée est du type non-linéaire (algorithme FAS « Full Approximation Storage ») et notre contribution porte sur la mise au point de stratégies MG et FMG (« Full MultiGrid »), en maillage tétraédriques indépendants (c'est-à-dire qu'il n'existe pas de relation du type nœuds-empoîtés entre les différentes grilles), la construction d'opérateurs de transfert inter-grilles d'ordre élevé par interpolation éléments finis, ainsi que sur des aspects algorithmiques liés à la parallélisation sur architecture à mémoire distribuée.

Pour les applications des méthodes MG aux maillages non-structurés, la génération d'une séquence de grilles de résolution décroissante est une tâche difficile. Pour ce faire, nous avons mis au point un algorithme automatique de génération d'une hiérarchie de grilles grossières

à partir d'un maillage fin composé de tétraèdres. L'algorithme, basé sur l'outil de manipulation de maillage MTC^[Cou99], utilise comme ingrédient de base la recherche d'une triangulation optimale de la cavité créée par la suppression d'un nœud de la triangulation. Cet algorithme génère une séquence de maillages emboîtés par les nœuds, ce qui simplifie le calcul des opérateurs de transfert. La figure 1 présente une séquence de maillages de la peau d'un avion Falcon qui montre que l'algorithme est capable de respecter des géométries très complexes. En s'appuyant sur le logiciel THOR une série d'études numériques expérimentales a été entreprise pour définir les performances des méthodes MG multimaillages vis à vis de la taille ou de la qualité des maillages grossiers. Ces travaux sur les techniques multimaillages ont fait l'objet d'une conférence invitée à la sixième conférence européenne sur les méthodes multigrilles [28].

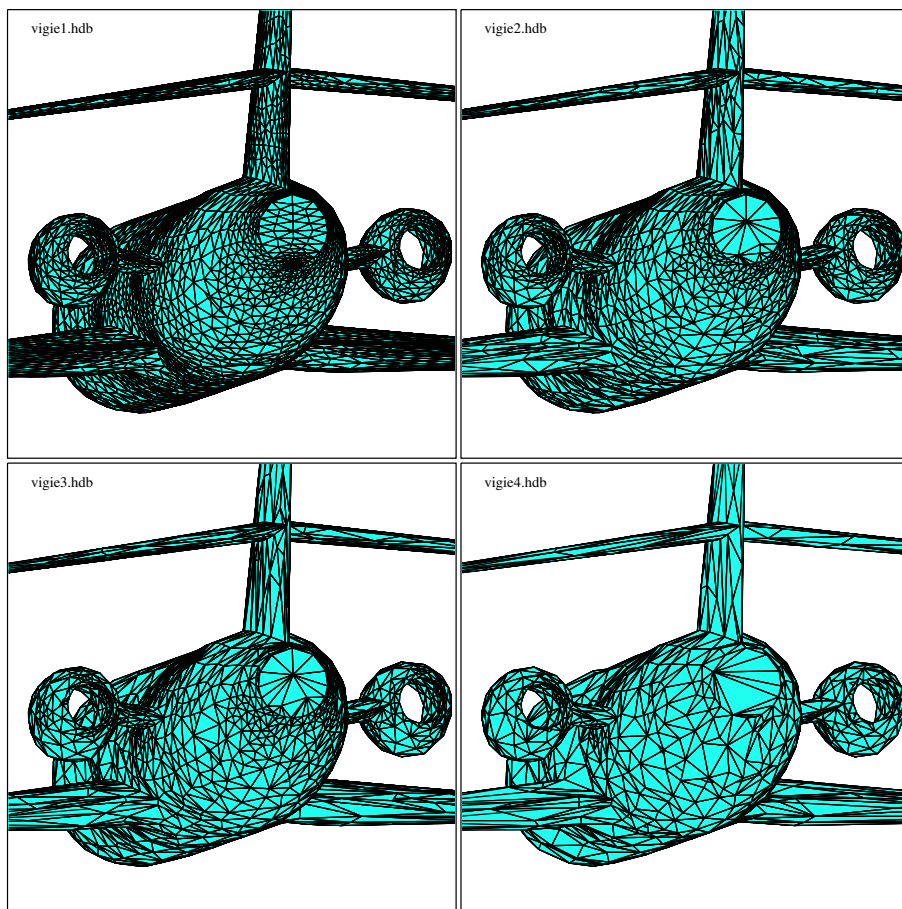


FIG. 1 – Zoom sur les maillage de surface d'un Falcon (géométrie Dassault)

[Cou99] T. COUPEZ, « Génération de maillage et adaptation de maillage par optimisation locale. », *Revue Européenne des éléments finis*, 1999, à paraître.

6.3.3 Méthodes multigrilles parallèles

Participants : Luc Fournier, Stéphane Lanteri.

On s'intéresse ici à la mise au point d'algorithmes multigrilles linéaires parallèles pour la résolution numérique d'écoulements de fluides compressibles laminaires et turbulents. Cette étude est menée sur la base d'une technique multigrille utilisant un principe d'agglomération de surfaces (2D)/volumes (3D) de contrôle pour construire une hiérarchie de grilles grossières à partir d'un maillage éléments finis triangulaire (2D)/tétraédrique (3D) définissant la grille la plus fine. La stratégie multigrille est alors utilisée pour accélérer la résolution itérative par relaxation de systèmes linéaires issus d'un schéma d'intégration en temps de type implicite linéarisé. Dans la formulation classique du multigrille les différents niveaux de grille sont traités en séquence suivant un schéma induit par le type de cycle sélectionné (V-cycle, F-cycle ou W-cycle). L'opérateur itératif associé à un tel cycle s'exprime alors comme le produit des opérateurs discrets (associés à l'EDP résolue) sur un même niveau de grille, avec des opérateurs liés aux lisseurs (opérations de *pré-lissage* et de *post-lissage*) et des opérateurs de transfert (opération de *restriction* depuis une grille fine vers une grille grossière et opération de *prolongation* depuis une grille grossière vers une grille fine). Pour cette raison, la formulation classique du multigrille est qualifiée de *multiplicative*. La parallélisation d'un algorithme multigrille *multiplicatif* ne peut donc porter que sur les opérations réalisées sur chaque niveau (parallélisation intraniveau). Dans un premier temps, une stratégie combinant des techniques de partitionnement de maillage non-structuré et un modèle de programmation en mémoire distribuée (standard d'échange de messages MPI) a été adoptée pour la parallélisation intraniveaux d'une méthode multigrille linéaire existante (résolution numérique des équations de Navier-Stokes 2D couplées à un modèle de turbulence $k - \varepsilon$).

Les expériences numériques réalisées avec cet algorithme multigrille basé sur une parallélisation intraniveaux ont montré les limites généralement observées avec ce type d'approche : la progression du traitement depuis le niveau fin vers le niveau le plus grossier se traduit par une dégradation des performances parallèles due à une évolution défavorable du rapport entre étapes de calcul et étapes de communication. Pour remédier à ce problème, nous avons élaboré une variante *additive* de l'algorithme multigrille fondée sur une décomposition du résidu en modes de basses et hautes fréquences (« filtrage numérique »). Cette stratégie permet de définir une série de problèmes *indépendants* associés aux différents niveaux de grille (parallélisme interniveaux). La notion de cycle disparaît, et l'opérateur itératif associé s'exprime maintenant comme une somme d'opérateurs élémentaires. Des expérimentations numériques ont été réalisées sur la plateforme expérimentale de Pentium Pro citée plus haut ; ces expériences ont démontré une amélioration de l'efficacité parallèle par rapport aux résultats obtenus avec la formulation *multiplicative* [18].

6.3.4 Lisseurs par décomposition de domaine

Participants : Luc Fournier, Stéphane Lanteri.

Parmi le grand nombre de méthodes numériques mises au point pour le calcul scientifique,

les méthodes multigrilles sont parmi les rares à avoir une complexité (théorique) optimale. Cependant ce type de méthodes n'est pas forcément très bien adapté aux contraintes liées aux architectures parallèles. Lors de précédents travaux [18], nous avons introduit le parallélisme dans une méthode multigrille en utilisant un lisseur simple (relaxation de Jacobi) dont l'efficacité n'est pas altérée par la parallélisation. Il serait néanmoins souhaitable d'utiliser un lisseur à la fois plus robuste et plus efficace. Les méthodes de décomposition de domaine sont naturellement parallélisables et permettent de construire des algorithmes de résolution efficaces et robustes. Nous nous intéressons ici à la construction d'un lisseur par décomposition de domaine reposant sur l'algorithme de Schwarz dans sa formulation *additive*. Il y a principalement deux points qui doivent être considérés en détails : les propriétés de lissage de l'algorithme de Schwarz (analyse spectrale) et les résolutions locales approchées (le lisseur doit être un ingrédient « économique » du multigrille). Des résultats préliminaires sur la mise au point de tels lisseurs ont été présentés à la conférence EMG99[33].

6.3.5 Multigrille par agglomération dans N3S-NATUR

Participants : Gilles Carré, Alain Dervieux, Stéphane Lanteri.

Le travail décrit ici est au cœur du programme R&D N3S-PMG et vise le transfert dans un logiciel à usage industriel du savoir-faire du projet SINUS en multigrille linéaire par agglomération. L'enjeu est important : les simulations numériques ciblées font appel à des modélisations réalistes (turbulence, combustion) ; les géométries sont complexes et, dans certains cas, à frontières variables (maillages non-structurés déformables). Nous avons, dans un premier temps, développé une version périphérique multigrille parallèle (logiciel N3S-PMG) applicable à la simulation numérique d'écoulements stationnaires turbulents et multispèces. Cette version a été évaluée sur les problèmes suivants : écoulement stationnaire turbulent mono-espèce dans une chambre à volute (cas test Renault, maillage tétraédrique à 332000 nœuds et 1900000 éléments) et écoulement stationnaire turbulent multispèce dans une chambre à combustion de moteur d'avion (cas test Snecma, maillage tétraédrique à 156000 nœuds et 800000 éléments, voir la figure 2). Ces résultats ont notamment été présentés lors de la conférence HPC99 [29].

Cette troisième et dernière année de l'étude a notamment été consacrée à l'adaptation de la méthodologie multigrille linéaire à la simulation d'écoulements instationnaires en maillages tétraédriques déformables. Dans ce cas, la principale difficulté réside dans le traitement de maillages fortement étirés (par exemple dans le cas de l'écoulement dans un moteur à piston, voir la figure 3). L'obtention d'un algorithme multigrille efficace et robuste pour la résolution de ce type d'écoulement a nécessité la mise au point d'une stratégie d'agglomération directionnelle. Plus précisément, il s'agit de construire des niveaux grossiers en agglomérant des cellules du niveau précédent en s'imposant le contrainte d'associer deux cellules au lieu de quatre seulement lorsque localement un fort étirement est détecté. Il s'agit là d'une extension des travaux de J. Francescatto et A. Dervieux [5] à la résolution d'écoulements stationnaires bidimensionnels en maillages triangulaires.



FIG. 2 – *Écoulement stationnaire turbulent multiespèce dans une chambre à combustion*
Champs de vitesse (haut) et lignes iso-Mach stationnaires (bas) dans un plan de coupe (géométrie Snecma)

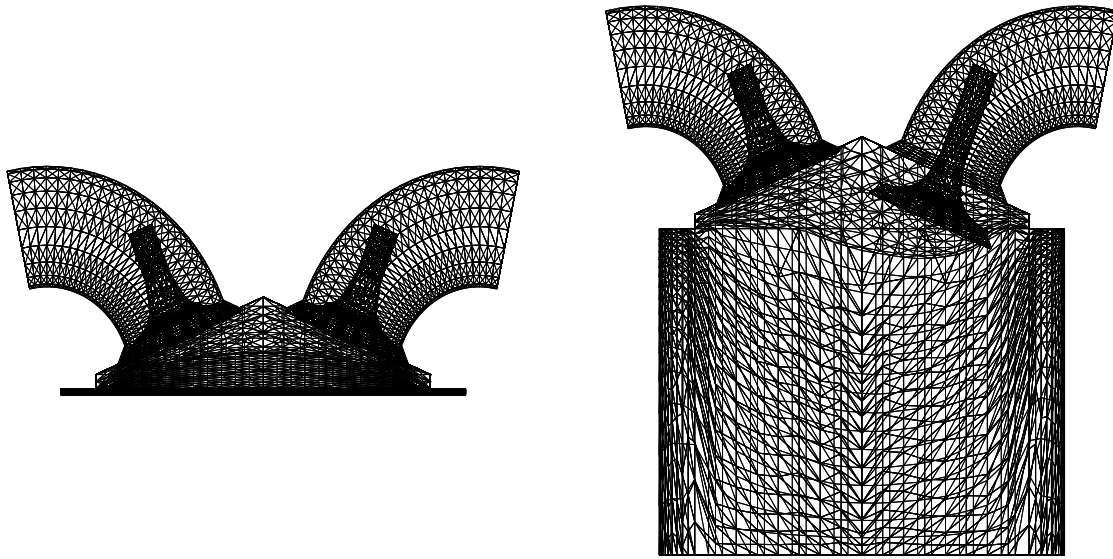


FIG. 3 – *Écoulement instationnaire turbulent dans un moteur à piston (géométrie Renault)*
Droite : position initiale - Gauche : position après 100 pas de temps

6.3.6 Méthode d'agglomération lissée

Participants : Alès Janka, Hervé Guillard.

On a poursuivi l'étude commencée lors de la visite de Petr Vaněk d'octobre à décembre 1998 sur les algorithmes MG algébriques utilisant le concept d'agrégation lissée. Ces algorithmes, très efficaces pour les équations elliptiques, utilisent un rapport de déraffinement de 3 qui n'est pas adapté aux problèmes hyperboliques où le rapport de déraffinement «canonique» de 2 donne de meilleurs résultats. Cela nous a conduit à proposer une variante Petrov-Galerkin de l'algorithme d'agglomération lissée. Dans le travail de cette année [47], on a justifié de façon théorique ce nouvel algorithme en étendant à la formulation Petrov-Galerkin une preuve de convergence de l'algorithme d'agrégation lissée due à Vaněk, Brezina et Mandel^[VBM99]. On a aussi clarifié le lien qui existe entre le degré du polynôme utilisé pour lisser l'opérateur de transfert d'agrégation et la stratégie de lissage, en montrant que, pour tout facteur de déraffinement, il existe un polynôme optimal permettant à la fois de préserver la complexité de l'algorithme et le taux de convergence. Dans la suite de cette étude, on s'attache maintenant à justifier l'introduction du facteur de sur-correction (facteur qui multiplie la correction grille grossière) qui est utilisé en pratique dans les méthodes d'agrégation lissée. L'analyse de Fourier montre que, sur des maillages réguliers, ce facteur correspond à l'introduction d'un facteur

[VBM99] P. VANĚK, M. BREZINA, J. MANDEL, « Convergence of Algebraic Multigrid Based on Smoothed Aggregation », *soumis à Num. Math.*, 1999.

d'échelle qui rend consistante avec le problème continu l'approximation grille grossière. On tente actuellement d'étendre cette interprétation aux maillages irréguliers.

6.4 Méthodes de décomposition de domaine

On s'intéresse ici à la mise au point, l'analyse et l'évaluation d'algorithmes de résolution par décomposition de domaine pour des systèmes discrets issus d'EDP hyperboliques ou mixtes hyperboliques-paraboliques. L'étroite similarité formelle existant entre les méthodes hiérarchiques de type multigrille et celles par décomposition de domaine nous conduit à étudier plus profondément leur lien et les possibilités de couplage des deux approches.

6.4.1 Décomposition de domaine sans recouvrement pour des systèmes hyperboliques

Participants : Jean-Antoine Désidéri, Victorita Dolean, Stéphane Lanteri.

Les méthodes de décomposition de domaines sans recouvrement par complément de Schur sont étroitement liées aux techniques d'élimination de Gauss par bloc (chaque bloc correspondant à un sous-domaine). Elles consistent à ramener la résolution d'un problème global posé sur l'ensemble des degrés de liberté (d.d.l.) issus d'une discrétisation éléments finis du domaine de calcul, à la résolution d'un problème de taille moindre posé sur les d.d.l. interfaces. Le problème d'interface ainsi posé est alors résolu par une méthode itérative adaptée (méthode de Krylov). L'avantage principal de ces méthodes par rapport à celles basées sur l'utilisation de domaines recouvrants est leur degré plus élevé de parallélisation. Les problèmes locaux peuvent être résolus presque indépendamment, des étapes de communication n'étant nécessaires que dans la phase d'assemblage des résultats locaux en vue de l'obtention de la solution globale. Les problèmes locaux dans chaque sous-domaine sont posés avec des conditions aux limites de type Dirichlet ou Neumann selon la nature de la frontière (si la frontière est « vraie » on a des conditions de Dirichlet et s'il s'agit d'une interface on a des conditions de flux imposé).

On étudie la possibilité de construire un algorithme de résolution par sous-domaine pour un système hyperbolique linéarisé éventuellement symétrisé. Une composante importante de notre étude concerne l'utilisation de méthodes multigrilles en combinaison avec un algorithme de résolution par sous-domaine. Deux voies sont explorées : une stratégie multigrille est employée comme accélérateur d'une méthode de relaxation pour résoudre les problèmes locaux (il s'agit alors d'une alternative à une méthode de résolution directe moins coûteuse en place mémoire) ou bien comme préconditionneur du solveur itératif utilisé pour le problème interface. Nous avons établi une formulation de type Schur pour un système hyperbolique linéarisé. Plus précisément, on construit une formulation de type Schwarz additive sur une décomposition sans recouvrement, basée sur des conditions de raccord aux interfaces exprimées en termes de flux entrants dans chaque sous-domaine. Après application d'une technique de sous-structuration, nous obtenons un système interface de la forme $S\Phi = g$ où l'inconnue Φ est un vecteur de flux numériques aux interfaces entre sous-domaines (solveur de Riemann approché de Roe dans le cas présent). Cette formulation a été implantée dans un code de résolution des équations d'Euler bidimensionnelles qui a les caractéristiques suivantes : formulation mixte éléments

finis/volumes finis en maillages triangulaires, schéma d'intégration en temps du type Euler implicite linéarisé, méthode d'accélération multigrille par agglomération de volumes, stratégie de parallélisation MIMD combinant des techniques de partitionnement de maillage et une programmation dans un modèle par transfert de message (utilisation de MPI). Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport de recherche[45].

6.4.2 Etude des conditions de raccord classiques pour les équations d'Euler

Participants : Victorita Dolean, Stéphane Lanteri, Frédéric Nataf (CMAP, École Polytechnique).

On étudie ici la convergence de l'algorithme de Schwarz additif sur une décomposition sans-recouvrement appliqué à la résolution des équations d'Euler. Si $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ et si $\mathcal{B}_{1,2}$ désignent les conditions de raccord, l'algorithme est le suivant :

$$\begin{array}{c} \Omega_1 \\ \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L}(w_1^{p+1}) = f_1 \\ \mathcal{B}_1(w_1^{p+1}) = \mathcal{B}_1(w_1^p) \end{array} \right. \end{array} \quad \begin{array}{c} \Omega_2 \\ \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L}(w_2^{p+1}) = f_2 \\ \mathcal{B}_2(w_2^{p+1}) = \mathcal{B}_2(w_2^p) \end{array} \right. \end{array}$$

où $\mathcal{L}(w)$ est l'opérateur aux dérivées partielles dont on cherche la solution. Ce type de formulation a notamment été étudié pour la résolution d'une équation d'advection-diffusion par F. Nataf [Nat93]. Plus précisément, la formulation proposée repose sur l'utilisation de conditions de raccord absorbantes aux interfaces entre sous-domaines. Les conditions aux limites absorbantes (ou conditions aux limites artificielles) ont été introduites pour la première fois par Engquist et Majda^[EM77] dans un article désormais célèbre. Ce type de conditions aux limites a été utilisé pour la première fois dans la résolution des équations aux dérivées partielles définies sur un domaine non-borné. Celles-ci sont imposées sur une frontière artificielle de sorte que la solution dans le domaine restreint soit la plus proche possible de la solution dans le domaine infini. Leur application à l'équation d'advection-diffusion ou aux équations de Navier-Stokes a été faite par L. Halpern et M. Schatzmann dans [Hal86]. F. Nataf [Nat93] s'est aperçu que l'on rencontre une situation similaire dans la décomposition de domaine : idéalement, on cherche à résoudre localement sur chaque sous-domaine indépendamment des sous-domaines voisins. F. Nataf *et al.* [NRdS94] ont par ailleurs démontré que, dans ce contexte, l'utilisation de conditions de raccord absorbantes conduit à une vitesse de convergence optimale des algorithmes de type Schwarz. Cependant, ce type de conditions aux limites fait intervenir des opérateurs non-locaux qui doivent ensuite être approchés par des opérateurs aux dérivées partielles. Ceci

-
- [Nat93] F. NATAF, « On the use of open boundary conditions in block Gauss-Seidel methods for the convection-diffusion equation », *rapport de recherche n° RI284*, Centre de Mathématiques Appliquées, Ecole Polytechnique, 1993.
- [EM77] B. ENGQUIST, A. MAJDA, « Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves », *Math. Comp.* 31, 1977, p. 629–651.
- [Hal86] L. HALPERN, « Artificial boundary conditions for the advection-diffusion equation », *Math. Comp.* 174, 1986, p. 425–438.
- [NRdS94] F. NATAF, F. ROGIER, E. DE STURLER, « Optimal interface conditions for domain decomposition methods », *rapport de recherche n° RI301*, Centre de Mathématiques Appliquées, Ecole Polytechnique, 1994.

a été réalisé dans le cas de l'équation d'advection-diffusion par C. Japhet dans [Jap98] avec, comme critère d'approximation, la minimisation du taux de convergence de l'algorithme de type Schwarz dans lequel les conditions de transmission sont ces conditions optimisées. On cherche des conditions de transmission à l'interface de la forme :

$$\mathcal{B} = \frac{\partial}{\partial n_i} - c_1 \frac{\partial}{\partial \tau_i} - c_2 \frac{\partial^2}{\partial \tau_i^2}$$

où les n_i et les τ_i sont respectivement les vecteurs unitaires normaux à l'interface et les vecteurs unitaires tangents. Les constantes c_i sont déterminées de façon à ce que le taux de convergence de l'algorithme de Schwarz sans recouvrement appliqué au problème décomposé avec de telles conditions de raccord soit optimal.

L'extension de ce type de formulation, basée sur des conditions de raccord optimisées, à la résolution des équations d'Euler fait l'objet de la thèse de T. Gonzales [Gon99]. Dans notre cas, nous considérons une formulation basée sur des conditions de raccord classiques de la forme :

$$\mathcal{B} = A_n^-$$

où A^- est la partie négative du Jacobien des flux hyperboliques et n est la normale à l'interface considérée. L'étude de convergence de l'algorithme de Schwarz additif ainsi formulé fait appel à l'analyse de Fourier ; elle a été réalisée en 2D pour des décompositions en 2 et N sous-domaines et en 3D pour une décomposition en 2 sous-domaines. Dans chaque cas, on démontre que l'algorithme est convergent et que, par ailleurs, il existe une valeur du nombre de Mach normal à l'interface pour laquelle le taux de convergence est minimal. Pour une large plage de valeurs du nombre de Mach de l'écoulement, le taux de convergence asymptotique (c'est-à-dire lorsque le pas d'espace tend vers 0) est sensiblement inférieur à 1. Ces résultats semblent indiquer qu'il n'est peut-être pas indispensable d'avoir recours à des conditions de raccord optimisées pour mettre au point un algorithme de Schwarz additif efficace pour la résolution des équations d'Euler.

6.4.3 Préconditionnement de systèmes interfaces

Participants : Victorita Dolean, Caroline Japhet (université de Paris XIII), Stéphane Lanteri.

Le système interface résultant de l'application d'une technique de sous-structuration à la formulation de type Schwarz *additive* adoptée pour la résolution numérique du système des équations d'Euler, est, dans un premier temps, résolu par une simple méthode de Richardson. L'étape suivante consiste à étudier l'application d'une méthode de minimisation de résidus généralisés, telle que GMRES, à la résolution de ce système. Il est bien connu que ce type

[Jap98] C. JAPHET, *Méthode optimisée d'ordre 2. Application à l'équation d'advection-diffusion*, thèse de doctorat, université Paris XIII, 1998.

[Gon99] T. GONZALEZ, *Parallélisation des schémas implicites de résolution des équations Euler compressibles par application des méthodes de décomposition de domaine*, thèse de doctorat, université Paris VI, 1999.

de méthode itérative n'est réellement efficace (en termes d'itérations et de coût global) que si elle est correctement préconditionnée. On se propose donc d'étudier les propriétés de l'opérateur interface afin d'en déduire un bon préconditionneur. Cette étude est réalisée à l'aide de l'analyse de Fourier dans le cas de deux sous-domaines. On a notamment exhibé un inverse exact du symbole de l'opérateur à l'interface, qu'on a identifié ensuite comme étant le symbole d'un opérateur de préconditionnement non-local. Il faut ensuite approcher ce symbole pour obtenir un opérateur local ayant comme critère d'approximation la minimisation du taux de convergence du problème préconditionné.

6.5 Optimum design par gradient

Participants : Alain Dervieux, Christophe Held, et projet Tropics.

L'optimisation est la suite naturelle de la simulation. L'optimisation en aérodynamique reste un problème difficile et coûteux en temps calcul [[22]]-[[11]]. L'obtention de gradient analytique est une tâche très complexe ; un certain nombre d'interactions entre SINUS et la nouvelle équipe Tropics a permis de mieux cerner la problématique de la méthode inverse et d'entrevoir une solution via une approche utilisant le "check pointing". Il reste néanmoins intéressant aujourd'hui de développer des méthodes efficaces d'optimisation sans gradient analytique. Le point de vue adopté par C. Held consiste à utiliser le caractère itératif des algorithmes de résolution des écoulements complexes pour mettre en place une méthode de résolution simultanée écoulement/design. Cette étude utilise les idées de S. Taasan sur les approches one-shot adaptées dans SINUS par F. Beux et N. Marco dans leurs thèses. La nouveauté de l'approche de C. Held réside dans la construction d'une méthode one-shot sans calcul analytique du gradient. Elle a été appliquée à des optimisations de profils d'aile, notamment en turbulent avec un modèle proche-paroi ([46]).

6.6 Algorithmes génétiques

Participants : Jean-Antoine Désidéri, Stéphane Lanteri, Bertrand Mantel (Dassault Aviation), Nathalie Marco, Sergey Peigin, Jacques Périaux (Dassault Aviation).

Dans le cas d'une optimisation de profil d'aile, les chromosomes représentent différents profils d'ailes. L'utilisation d'un AG comme algorithme d'optimisation en calcul optimal de formes aérodynamiques est caractérisée par des temps de simulation très importants, même pour des géométries bidimensionnelles. Il y a deux facteurs principaux qui conduisent à ce constat : il est nécessaire de réaliser un grand nombre d'itérations d'optimisation pour atteindre la solution optimale et chaque itération requiert N évaluations de la fonction d'adaptation (où N est la taille de la population, généralement de l'ordre de 20) chacune de ces évaluations conduisant au calcul d'un écoulement. Nous avons notamment observé que, pour un problème d'optimisation directe de réduction de la traînée de choc sur un profil d'aile RAE2822, le temps passé à calculer les différents écoulements (résolution des équations d'Euler) représente environ 90% du temps total de l'optimisation. Différentes stratégies peuvent être envisagées pour améliorer cette situation.

6.6.1 Algorithmes génétiques parallèles

L'adaptation des AG aux plateformes de calcul parallèles est une direction de recherche que nous avons considérée très tôt dans notre étude des AG. Pour les applications qui nous intéressent, l'écoulement est modélisé par le système des équations d'Euler. La méthode adoptée pour la résolution numérique de ces équations repose sur une formulation mixte éléments finis/volumes finis en maillage triangulaire couplée à un schéma d'intégration en temps du type implicite linéarisé. Ce schéma est bien adapté à la recherche de solutions stationnaires du système des équations d'Euler, ce qui est le cadre de notre étude. Dans un premier temps, nous avons donc proposé et mis en œuvre une stratégie de parallélisation à deux niveaux. Le premier niveau de parallélisation porte sur le calcul de l'écoulement et s'appuie sur des travaux effectués par le passé au projet [9] : on applique une stratégie de parallélisation qui combine des techniques de partitionnement de maillage et un modèle de programmation par échange de messages (utilisation du standard MPI). Le deuxième niveau de parallélisation concerne la boucle principale de l'algorithme génétique. Nous utilisons la notion de groupes de processus qui est l'une des principales caractéristiques de l'environnement MPI. À chaque génération, l'étape de sélection des individus fait appel à une procédure de tournoi à deux points, c'est-à-dire que les individus sont sélectionnés deux par deux. Les nouvelles valeurs d'adaptation associées aux deux individus candidats peuvent alors être évaluées en parallèle ; l'idée de base consiste à former deux groupes de processus et à allouer un calcul d'écoulement à chaque groupe. Le nombre de processus par groupe est fixé par le partitionnement du maillage sous-jacent. Ce travail a notamment fait l'objet d'une publication[24].

Cette étude se poursuit dans le cadre du projet ESPRIT/HPCN DECISION avec l'étude d'algorithmes génétiques parallèles basés sur l'utilisation de modèles de sous-populations. Par ailleurs, une extension au cas de l'optimisation directe d'une voilure (cas tridimensionnel) a été réalisée et est en cours de validation.

6.6.2 Algorithmes d'optimisation hybrides

Il s'agit là d'une autre stratégie de réduction du coût global d'une optimisation par AG. Les techniques d'hybridation ont pour principe de mélanger de manière harmonieuse des algorithmes stochastiques et des algorithmes déterministes, tout en essayant de ne retenir que les caractéristiques les plus intéressantes de chacune des deux familles. Nous avons considéré dans un premier temps une solution simple, bien adaptée au cas où l'optimum recherché est inconnu, qui consiste à démarrer le processus d'optimisation par un certain nombre d'itérations d'un AG afin d'explorer tout l'espace de recherche potentiel. Les AG sont mieux armés pour éviter l'écueil des minimums locaux, cependant, lorsqu'un AG s'approche de la solution optimale, sa vitesse de convergence devient de plus en plus lente. C'est là que va intervenir l'algorithme déterministe (Newton, gradient, « stochastic hill-climbing »). Près de l'optimum, une telle méthode est très efficace et converge en quelques itérations. Ainsi, l'algorithme déterministe prend comme solution de départ le meilleur individu de l'AG, au bout d'un certain nombre de générations et s'attache à l'affiner aussi rapidement que possible. Nous avons appliqué des méthodes hybrides à l'optimisation de plusieurs fonctions analytiques, dans le cadre du projet ESPRIT/HPCN DECISION.

6.6.3 Optimisation multicritère

Dans la vie de tous les jours, nous faisons face à des problèmes d'optimisation comme acheter un nouveau téléviseur performant, pas trop cher, ayant un joli design, c'est-à-dire des problèmes d'optimisation présentant plusieurs critères qui doivent être pris en compte simultanément. Dans une optimisation multicritère, la solution optimale n'est pas la même vis à vis des différents critères. On identifie alors un ensemble de solutions, dit *front optimal de Pareto*, qui dominent toutes les autres solutions potentielles de l'espace de recherche, mais sont entre elles non comparables. Pour déterminer ce front de manière pratique, on procède généralement par l'une ou l'autre des deux approches suivantes :

- on crée une combinaison linéaire des différents critères en les pondérant et on minimise la fonction résultante. L'inconvénient majeur de cette approche est que certaines pondérations peuvent être mauvaises et donc la fonction résultante peut n'avoir aucun sens. De plus, il y a un grand nombre de problèmes d'optimisation à résoudre suivant les valeurs de poids que l'on choisit ;
- on utilise un AG. Étant donné que les AG travaillent avec toute une population de solutions potentielles, on crée un nuage de solutions (ou encore, une base de données de solutions) et l'enveloppe convexe de ce nuage constitue le *front optimal de Pareto*.

Nous nous proposons de résoudre un problème d'optimisation multicritère dans le domaine de l'optimisation de formes en aérodynamique. Le but est de trouver les différentes configurations de profils d'ailes existant entre deux régimes d'écoulement et deux incidences différentes. Pour chaque individu on résout deux écoulements (un à Mach = 0.2 et incidence = 10.8°, l'autre à Mach = 0.77 et incidence = 1°). Lorsque l'on fait face à un problème d'optimisation multicritère, les individus n'ont plus une valeur d'adaptation mais plusieurs critères. Pour les comparer entre eux, il faut donc leur assigner une valeur d'adaptation qu'on appellera « fausse valeur d'adaptation ». Pour ce faire, on introduit la notion de *critère de non-dominance* qui permet de classer par fronts les individus. Par exemple, dans le cas d'une minimisation, les meilleurs individus seront sur le front 1 et les plus mauvais sur le front N. La valeur d'adaptation des individus dépend alors du numéro de rang ($v/nrang$, où v est un réel positif). Il est à noter qu'en assignant une telle valeur d'adaptation à un individu, le problème devient un problème de maximisation. Le processus sélection-croisement-mutation de l'AG peut alors commencer. Pour réduire le coût d'une telle optimisation, nous employons la stratégie de parallélisation à deux niveaux décrite en 6.6.1. Ce travail a fait l'objet d'un rapport de recherche[48].

6.6.4 Stratégies de jeux non coopératifs (« Nash ») et algorithmes hiérarchiques

Participants : Jean-Antoine Désidéri, Nathalie Marco, Jacques Périaux, Dassault Aviation, Jiang Feng Wang, Dassault Aviation, NUAA.

On cherche à augmenter l'efficacité et la robustesse des AG dans les applications industrielles futures. Pour cela, on explore les deux voies suivantes[31]-[30]-[38] :

- l'utilisation de la théorie des jeux pour rendre l'approche locale, en « décentralisant » ; l'algorithme décisionnel au niveau de plusieurs « joueurs » (ou agents); ainsi, les sous-populations sont plus petites et la longueur des chromosomes réduit ;

- les AG hiérarchiques parallèles s'appuyant sur une hybridation à deux niveaux :
 - le niveau des modèles: utiliser un modèle plus simple et moins cher dans la phase d'exploration et le modèle cher uniquement dans la phase d'exploitation (raffinement). Par exemple on envisage le couplage du code TVSL de S. Peigin (voir paragraphe suivant) à un modèle économique de couche limite ;
 - le niveau des optimiseurs (AG pour la phase d'exploration et méthode de descente ou méthode du simplex (non différentiable) dans la phase de raffinement.

Dans le cadre de notre projet avec le LIAMA (voir 8.3), J.F. Wang a effectué un séjour de un mois à Pékin où il a expérimenté des techniques de décomposition de domaine et des stratégies parallèles de Nash portant sur des algorithmes génétiques.

6.6.5 Optimisation de trajectoires par AG

À l'occasion du séjour du Professeur S. Peigin, on a appliqué des algorithmes génétiques à codage réel à l'optimisation de la trajectoire de rentrée atmosphérique d'un engin spatial. Dans ce problème, on minimise l'intégrale (en temps) du flux de chaleur pariétal au point d'arrêt d'un corps arrondi. On résout pour cela les équations de la mécanique des fluides dans l'hypothèse de couche visqueuse mince (TVSL, *thin viscous shock layer*), dont la précision est suffisante au point d'arrêt (où le flux thermique est maximal) couplées aux équations de bilan des espèces chimiques (modèle hors équilibre). Le problème est potentiellement soumis à de nombreuses contraintes non linéaires (prise en compte de la catalyse à la paroi, contraintes physiques sur la trajectoire, etc).

Par la mise en œuvre de ce cas-test, on a démontré la très grande robustesse de l'AG dans une situation où la modélisation du gaz réactif est très complexe et la solution du problème non intuitive (suivant les variantes de la formulation, certaines contraintes non linéaires sont actives ou passives). Par ailleurs, l'utilisation du modèle simplifié TVSL, beaucoup moins coûteux que la résolution des équations de Navier-Stokes complètes, permet une exploitation du logiciel dans une étude paramétrique. Les trajectoires obtenues sont remarquablement proches de celles des navettes spatiales Buran et Orbiter [44].

6.6.6 Action coopérative EVOLAB

L'action coopérative EVOLAB est une initiative du projet Fractales (E. Lutton) et nous associe au laboratoire CMPAX de l'Ecole Polytechnique (M. Schoenauer) et à l'ENSTA (J. Louchet). Une bibliothèque d'outils logiciels en C++ est en construction. Son objectif est de faciliter l'écriture de programmes d'optimisation par algorithmes évolutionnaires. En particulier, une interface graphique permettra notamment à l'utilisateur de choisir dans un menu les opérateurs de sélection, croisement et mutation ou d'établir un lien avec ses propres procédures, celles-ci pouvant être écrites dans un autre langage de programmation <http://www-rocq.inria.fr/fractales/ACTION-INCITATIVE/EVO-Lab-eng1.html>. Dans cette action, le projet SINUS met en place une démonstration de l'outil s'appuyant sur le problème de la coordination de sous-domaines par moindres carrés.

6.7 Proper Orthogonal Decomposition et Contrôle actif

Participants : Alain Dervieux, Jean-Antoine Désidéri, Angelo Iollo, Stéphane Lanteri, Michel Mallet (Dassault Aviation), Guillaume Vigo (Dassault Aviation).

L'ambition naturelle du concepteur aérodynamicien est de pouvoir influencer sur la structure de l'écoulement (par exemple par injection locale de fluide) afin d'améliorer, voire d'optimiser une performance aérodynamique. Pour cette raison, en aéronautique, le contrôle actif ou passif se place à la pointe de la recherche. Une difficulté cependant tient au fait que la dynamique « exacte » du système étudié repose sur des calculs très coûteux notamment dans les applications aux écoulements turbulents (résolution des équations de Navier-Stokes), d'où l'intérêt d'étudier les techniques mathématiques pour représenter cette dynamique de manière simplifiée, néanmoins systématique. Dans ce cadre, on étudie l'approche POD (« Proper Orthogonal Decomposition ») qui permet de construire une base de fonctions pertinentes à partir d'instantanés précalculés de l'écoulement, et de réduire le modèle dynamique à un jeu d'équations différentielles ordinaires [21]. Plus spécifiquement, on a étudié certaines questions liées à la stabilité numérique de l'approche POD. En particulier, on a comparé différentes définitions possibles du produit scalaire et démontré l'effet stabilisateur de la prise en compte simultanée de la fonction et de son gradient (« approximation dans H^1 ») pour un problème de profil d'aile oscillant [21] [20].

G. Vigo a réalisé des travaux visant à adapter la méthode POD au calcul d'écoulements visqueux instationnaires. L'approche utilisée minimise le coût calcul qui est, dans certains cas, mille fois plus petit que le coût en éléments finis. Trois modèles ont été mis au point de Euler jusqu'à Navier-Stokes couplé à un modèle de turbulence [50].

Une réflexion sur l'exploitation de cette méthode en combustion est actuellement en cours avec M. Sorine (projet SOSSO, Rocquencourt).

6.8 Couplage fluide-structure

Participants : Alain Dervieux, Charbel Farhat (université du Colorado), Hervé Guillard, Bruno Koobus, Eric Schall, Raphael Lardat.

Ce sujet est un sujet-clé de plusieurs équipes de calcul scientifique à l'INRIA qui se coordonnent dans le cadre d'une Action de Recherche Coopérative de la Direction Scientifique de l'INRIA sur le couplage Fluide-Structure. Poursuivie depuis huit ans dans le cadre de divers contrats NSF et post-doctorats, la coopération avec l'université du Colorado (coopération qui nous associe aussi avec Mostra, M3N et Caïman, notamment dans le cadre d'un accord NSF-INRIA), a permis de faire des deux partenaires des centres d'excellence en couplage fluide-structure pour les écoulements compressibles. En ce qui concerne SINUS, des travaux théoriques portant sur les Conditions de Conservation Géométrique pour les maillages mobiles et les systèmes de déformation de maillages, ont connu plusieurs développements, en particulier pour les écoulements visqueux (cf. [22]).

Cette année le consortium Aérostructure a pris son régime de croisière malgré le départ de E.

Schall. Une première application notable nous associe avec la SEP et le Coria (D. Vandromme, E. Lefrançois) et concerne des tuyères de lanceurs. La contribution INRIA a fait l'objet d'une première publication dans [39]. Cette année, A. Dervieux édite un numéro spécial « Couplage Fluide-Structure » dans la Revue Européenne d'Éléments Finis.

6.9 Plate-forme coopérative

Participants : Jérôme Blachon, Alain Dervieux, Nathalie Marco, Gia-Toan Nguyen.

Une première approche est explorée à l'aide d'outils de spécification, de configuration et de déploiement d'applications sur une plate-forme de calcul distribué. Les techniques mises en œuvre doivent permettre la spécification d'applications multiphysiques faisant collaborer des codes hétérogènes sur des calculateurs répartis. La spécification est faite en rendant la localisation des codes et des données transparente à l'utilisateur. La configuration permet à un administrateur de spécifier la localisation des codes qui sont utilisés et de reconfigurer dynamiquement les applications. Le déploiement permet de lancer ces applications sur des calculateurs hétérogènes, réparties sur des réseaux de stations de travail (NOW), des grappes de calculateurs (clusters), des réseaux locaux (LAN) ou distants (WAN). Un prototype de plateforme d'intégration appelé CAST est développé et expérimenté dans le cadre du projet HPCN DECISION en optimisation dans le domaine aéronautique (optimisation multidisciplinaire fluide-structure).

CAST est une plateforme d'intégration de logiciels. Elle permet la spécification, l'implantation et l'exécution d'applications coopératives réparties et le couplage de codes. On peut spécifier des applications définies comme des ensembles de composants répartis coopérants, synchronisés à l'aide d'opérateurs de choix, d'itération, de délai, de séquence, etc. Elle s'appuie sur un formalisme de spécification formelle (l'algèbre SCCS) et une interface graphique évoluée.

La plateforme CAST a permis d'intégrer des logiciels d'optimisation de forme, basés sur des algorithmes génétiques développés par le projet SINUS, avec des logiciels de simulation aérodynamique. Elle a également permis une collaboration avec l'université de Jyväskylä (Finlande) concernant l'enrobage de codes d'optimisation, et avec NAG Ltd. à Oxford (Angleterre) pour l'interface avec une bibliothèque de calcul commerciale (Iris Explorer). CAST permet également le couplage et la coopération de logiciels, indifféremment conformes ou non au standard CORBA. Ceci permet d'intégrer des logiciels existant sans adaptation coûteuse à l'environnement CORBA fourni par CAST.

CAST est réalisé en C++ sur stations Unix. Une version Windows NT est en cours de finition. CAST est interfacé avec ORBACUS, l'environnement CORBA de Object Oriented Concepts, Inc. Une collaboration avec les projets APACHE et PARIS est en cours d'élaboration sur le couplage de codes parallèles utilisant MPI et les extensions de CORBA aux objets parallèles dans CAST. Les sociétés Simulog et Dassault-Aviation ont officiellement fait connaître leur intérêt pour cette démarche.

6.10 Publications générales

Participants : Rémi Abgrall (université de Bordeaux I), Hervé Guillard.

Nous avons terminé la rédaction d'un ouvrage général sur la modélisation des écoulements de fluides compressibles et l'approximation numérique de ces modèles. Ce livre dont le titre est «Modélisation numérique des fluides compressible» sera publié chez Elsevier/Gauthier-Villars dans la série « Series in Applied Mathematics » eds P. G. Ciarlet et P.L. Lions.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 N3S-PMG

Participants : Gilles Carré, Alain Dervieux, Luc Fournier, Stéphane Lanteri.

Ce programme de recherche et développement soutenu par un consortium a démarré le 01/11/96, a duré trois ans et fut réalisé dans le cadre du projet SINUS avec une sous-traitance Simulog. Il occupe un ingénieur à plein temps et un doctorant à mi-temps. L'objet principal de cette étude porte sur la prise en compte d'une méthode multigrille parallèle pour accélérer les diverses étapes de résolution linéaire rencontrées dans le logiciel N3S-NATUR. La méthode multigrille retenue repose sur un principe d'agglomération de volumes en accord avec la méthode d'approximation mixte éléments/volumes finis à la base de N3S-NATUR. Les industriels suivants financent ce programme : EDF, Renault et la Snecma (conventions communes N° 197E718/partie recherche et N° 197E720/partie développement) et le CNES (convention N° 197E660).

7.2 Consortium Aérostructure

Participants : Alain Dervieux, Charbel Farhat (université du Colorado), Bruno Koobus, Eric Schall, Raphael Lardat.

Le consortium Aérostructure créé à l'initiative de l'INRIA rassemble pour trois ans environ, outre l'INRIA, sept industriels de l'aéronautique et de l'énergie. Dans le cadre de ce consortium, l'INRIA (SINUS) réalise six calculs innovants de couplage entre fluide et structure à l'aide du code AERO, et fournit aux adhérents un état de l'art sur les nouvelles méthodes liées au couplage.

7.3 CNES: Aéroacoustique

Participants : Romuald Carpentier, Roger Peyret.

Cette étude s'est terminée par la remise d'un document faisant le bilan des calculs 2D et axisymétrique liés aux couplages aéro-acoustiques intervenant dans les boosters à poudre semblables à ceux équipant le lanceur ARIANE. Cette étude s'est réalisée en coopération avec les participants du programme ASSM et notamment la SNPE, concepteur des propulseurs à poudre d'ARIANE 5, Bertin et l'ONERA. Un deuxième document examine l'option d'un schéma d'ordre élevé pour répondre aux besoins de précision relevés au cours de cette étude.

7.4 Dassault-Aviation: MG

Participants : Gilles Carte, Hervé Guillard, Stéphane Lanteri.

Ce programme a démarré en Juillet 99 pour une durée de 18 mois et fait suite aux recherches réalisées antérieurement sur les méthodes multigrilles multimaillages en deux dimensions d'espace. Il s'agit maintenant de définir des méthodes automatiques de génération de maillages grossiers pour des applications multigrilles 3-D. Bien que ce projet se concentre sur le calcul d'écoulements non-visqueux sur des maillages isotropes, on s'intéresse dans cette étude à des techniques générales qui permettront de prendre en compte des maillages anisotropes pour des calculs d'écoulements modélisés par les équations de Navier-Stokes.

7.5 Dassault-Aviation: Optimum design

Participants : Alain Dervieux, Christophe Held.

La mise en place de boucles d'optimisation en aérodynamique pose de nombreux problèmes. Les travaux sur l'optimisation one-shot par différences finies ont donné lieu à la livraison finale d'une convention SPAE-Dassault.

7.6 Dassault-Aviation: Proper Orthogonal Decomposition

Participants : Alain Dervieux, Jean-Antoine Désidéri, Guillaume Vigo.

Cette convention CIFRE a pour but la mise au point de méthodes POD pour Navier-Stokes compressible avec pour perspective le contrôle actif via notamment des jets pulsés.

7.7 Snecma: Adaptation de maillage

Participants : Alain Dervieux, David Leservoisier.

Cette convention CIFRE, combinée avec une convention associant la Snecma et le projet Gamma, va apporter une forte impulsion dans l'emploi efficace de stratégies de maillage adaptatif pour le calculs d'écoulements internes (prédictions de perte de charge notamment) et externes (jet d'arrière-corps d'avions supersoniques) liés au design des moteurs d'avion.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions européennes

Le projet SINUS a actuellement un rôle actif dans les projets européens suivants :

8.1.1 DECISION

Participants : Jérôme Blachon, Alain Dervieux, Stéphane Lanteri, Nathalie Marco, Gia-Toan Nguyen, Renaud Savalle.

Le projet DECISION (ESPRIT/HPCN RTD No. EP 25058, *HPCN Integrated Optimization Strategies for Increased Engineering Design Complexity*) dont les partenaires sont : Dassault Aviation (France), Messet (Finlande), Noka Tume (Finlande), university of Jyvaskyla (Finlande), VTT (Finlande), NAG (Royaume Uni) et l'INRIA (projets SINUS, SAFIR, M3N et SHOOD), a démarré le 01/11/97 et durera 30 mois. Son objectif principal est la construction d'une plateforme d'intégration visant des applications en optimisation multidisciplinaire de produits complexes et leur distribution sur des calculateurs parallèles et distribués. Dans DECISION, le projet SINUS contribue sur les sujets suivants :

- des algorithmes d'optimisation : algorithmes génétiques parallèles, hybridation d'un algorithme génétique avec un algorithme d'optimisation classique, algorithmes d'optimisation multicritères ;
- CAST: une plate-forme d'intégration compatible CORBA ;
- une base de données d'optimisation : exploration via le WEB d'une base de données stockant l'historique d'une application d'optimisation (développements d'outils visant à interfacier SQL et HTML) ;
- un démonstrateur reposant sur des algorithmes génétiques et des problèmes d'aérodynamique externe.

8.1.2 UNSI

Participants : Alain Dervieux, Bruno Koobus, Eric Schall.

Le projet UNSI (projet BRITE/BR No. BE97-4044, *Unsteady Viscous Flow in the context of Fluid-Structure Interaction*) est coordonné par Daimler-Benz Aerospace; y participent une quinzaine d'industriels et laboratoires (l'INRIA est sous-traitant de Dassault Aviation) européens. Les phénomènes d'aéroélasticité ont été parmi les premiers à être analysés. Leur impact sur la sécurité, la durée de vie des avions, leur consommation est déterminant. En régime subsonique et supersonique, l'analyse linéaire donne depuis longtemps des outils satisfaisants. Ce n'est pas le cas en régime transsonique, qui se trouve être le régime de croisière de la plupart des avions commerciaux (régime de manœuvre pour les avions militaires) et pour lequel le bureau d'étude est obligé d'appliquer des facteurs d'incertitudes très pénalisants. Le but de UNSI est d'introduire de nouveaux algorithmes et de nouvelles technologies numériques pour la prédiction de phénomènes d'aéroélasticité. Le mot-clé est "visqueux". Il s'agit d'introduire dans le couplage le modèle le plus difficile et le plus coûteux, les équations de Navier-Stokes avec moyenne de Reynolds. L'expérience de SINUS dans ce domaine (issue de la collaboration avec CHARBEL FARHAT (université du Colorado à Boulder)) lui permet d'intervenir notamment au niveau du bilan méthodologique dressé par le consortium UNSI, et dans la réalisation d'un cas test de flottement 3D en visqueux.

8.1.3 IDeMAS

Participants : Gilles Carte, Alain Dervieux, Stéphane Lanteri.

Le projet IDeMAS (projet BRITE/BR No. BE97-4162, *Industrial Demonstration of Accurate and Efficient Multidimensional Upwind and Multigrid Algorithms for Aerodynamic Simu-*

lations) dont les partenaires sont le VKI (Belgique), le CRS4 (Italie), ALENIA (Italie), l'EPFL (Suisse), Dassault Aviation (France), Daimler Benz Aerospace (Allemagne) et l'INRIA (projet SINUS) a démarré le 01/12/97 et a une durée de 36 mois. L'objectif principal de ce projet est de réaliser une avancée conséquente dans la précision et l'efficacité des simulations numériques d'écoulements aérodynamiques à grands nombres de Reynolds, avec la mise au point du prototype d'un logiciel de CFD d'une nouvelle génération incluant des méthodes d'approximation décentrées multidimensionnelles, des méthodes de résolution de Krylov préconditionnées et des méthodes d'accélération multigrille et des techniques d'adaptation de maillage 3D. Le logiciel résultant sera conçu pour une exploitation sur ordinateur parallèle MIMD à mémoire distribuée.

8.1.4 SOFT-IT

Participants : Stéphane Lanteri, Mark Loriot (Simulog), Nathan Maman (Simulog), Thierry Priol (projet CAPS).

Le projet SOFT-IT (projet ESPRIT/HPCN - Technical and Scientific Support to the HPCN Domain, *SOFTware IntTeroperability and platform independence: the next generation of simulation environments*) s'intéresse à l'étude de techniques logicielles modernes pour l'intégration et la coopération de composants logiciels dans des applications multidisciplinaires/multiphysiques. Les partenaires de ce projet sont Simulog, Thomson-CSF et l'INRIA. Le projet comprend deux grandes parties: d'une part, la réalisation d'une analyse en profondeur de projets HPCN récemment terminés ou en cours du point de vue des aspects intégration et interopérabilité de composants logiciels et, d'autre part, la réalisation d'un démonstrateur à base de CORBA pour la mise en place d'une application multidisciplinaire spécifiée par Thomson-CSF. La contribution mentionnée ici porte sur la première partie de ce projet.

8.1.5 AEROSHAPE

Participants : Alain Dervieux, Jean-Charles Gilbert (Projet Ident, Rocquencourt), et le projet Tropics.

Il s'agit d'un projet BRITE coordonné par Alenia, focalisé sur l'optimisation de formes pour les avions. Il est en cours de mise en place. La contribution de l'INRIA consistera en de nouveaux algorithmes de minimisation avec de multiples contraintes sur l'état, des algorithmes one-shot, des méthodes de construction d'états adjoints par différentiation automatique, des algorithmes de résolution d'états adjoints, un démonstrateur de ces innovations.

8.2 Réseaux et groupes de travail internationaux

Participants : Jérôme Blachon, Jean-Antoine Désidéri, Nathalie Marco, Gia-Toan Nguyen, Jacques Périaux, Renaud Savalle.

Le projet SINUS a actuellement un rôle actif dans les réseaux thématiques suivants :

8.2.1 FLOWNET

Le réseau thématique FLOWNET (« Flow Library Over the Web Network ») s'inscrit dans le programme Industrial and Material Technologies Programme, BRITE/EURAM III. FLOWNET est focalisé sur la validation pré-industrielle de codes numériques en mécanique des fluides en général. Plus précisément, les objectifs de ce réseau sont les suivants :

1. contribuer à la validation scientifique de problèmes d'écoulements ;
2. installer une base de données (à l'INRIA Sophia Antipolis) rassemblant des résultats de calculs et des données expérimentales ;
3. établir un réseau de partenaires (« nœuds ») provenant des universités, laboratoires et industries ;
4. organiser des réunions, ateliers, cours spécialisés ;
5. organiser annuellement un atelier en Europe pour enrichir une base de données ;
6. mettre à disposition une page Web pour la dissémination des informations principales concernant le réseau.

La coordination de ce réseau est désormais assurée par Dassault Aviation en étroite collaboration avec le projet qui en avait coordonné la phase exploratoire « HSFFNET » moins généraliste (« High-Speed Flow Field Network »). Les autres partenaires sont, pour le noyau, le DLR et DASA (Allemagne), le CIRA et l'université de Rome (Italie) ainsi qu'une vingtaine de laboratoires européens. La société savante européenne ERCOFTAC a également souhaité y contribuer. Pour la composante française, le projet assure la responsabilité principale de l'installation de la base de données, et collabore plus étroitement avec l'université de Marseille (D. Zeitoun, « Milieux Hors Equilibre ») pour l'organisation d'un atelier sur la modélisation, et avec l'université de Lyon (M. Garbey) pour l'organisation de tutoriaux.

Cette activité permet au projet de maintenir un contact étroit avec les laboratoires européens de mécanique des fluides (numérique ou expérimentale).

Le prochain atelier aura lieu à Rome les 17 et 18 mars 2000. Les informations techniques notamment en ce qui concerne les cas-tests d'écoulements étudiés sont disponibles sur le site suivant : <http://www.inria.fr/sinus/flownet/index.php3>.

8.2.2 INGENET

Le réseau thématique INGENET (« Networked Industrial Design and Control Applications Using Genetic Algorithms and Evolution Strategies ») s'inscrit dans le programme Industrial and Material Technologies Programme, Brite EuRam III. Le projet SINUS participe au noyau du réseau thématique INGENET dont les autres partenaires sont le CEANI (Las Palmas, Espagne) et Dassault Aviation (France). Les objectifs de ce réseau sont les suivants :

1. mettre à disposition un site Web pour disséminer de l'information concernant le développement d'algorithmes génétiques ;

2. installer une base de données (à l'INRIA Sophia Antipolis) rassemblant les données de calculs d'optimisation ;
3. établir un réseau de partenaires (« nœuds ») provenant des universités, laboratoires et industries ;
4. coordonner les travaux de R & D en milieu industriel liés aux algorithmes génétiques ;
5. organiser des réunions de spécialistes ;
6. organiser annuellement un atelier en Europe pour enrichir une base de données ;
7. organiser tous les 2 ans le shortcourse EUROGEN.

Ce réseau permet de vitaliser les contacts du projet avec les équipes européennes impliquées dans les algorithmes d'évolution, et vient en support de l'axe de recherche sur les algorithmes génétiques développé notamment pour les problèmes d'optimisation de forme en aérodynamique. Dans ce cadre, le deuxième atelier du réseau se tiendra au CIRA, Capoue (Italie) les 27 et 28 janvier 2000 et s'appuyera sur la base de données installée par le projet, dont on peut consulter les cas tests sur le site suivant : <http://www.inria.fr/sinus/ingenet/index.php3>.

8.3 Relations bilatérales internationales

Le projet est actuellement impliqué dans les actions suivantes :

LIAMA : coordination (X.-J. Xu, Institute of Computational Mathematics, CAS, et J.-A. Désidéri) du projet intitulé « Coordination and Optimisation of Hierarchical Methods for the Distributed Numerical Simulation of Nonlinear P.D.E. Problems » du Laboratoire Franco-Chinois LIAMA.

LIAPUNOV : Coordination (Prof. B. Chetveruskin et A. Dervieux) d'un projet qui s'est terminé en septembre 1999 (visite de T. Kozubskaya, deux séjours de I. Abalakin). Un nouveau projet sur la turbulence et l'acoustique a été accepté et est en cours de démarrage (I. Abalakin, B. Chetveruskin, A. Dervieux, M. Mallet(Dassault), T. Kozubskaya)

DFG/CNRS : le projet participe à un programme de coopération DFG/CNRS dans le cadre du GDR « Mécanique des Fluides Numérique » dirigé par P. Bontoux. Ce programme nous associe avec l'université de Duisbourg (Prof. D. Haenel et Prof. R. Vilsmeier) pour une étude des méthodes numériques en maillages multiéléments. Dans ce contexte, le projet a accueilli pendant 3 mois O. Gloth de l'université de Duisbourg (voir [32]).

NSF-INRIA : le projet participe à la convention NSF-INRIA sur le couplage fluide structure coordonnée par S. Piperno (Projet CAIMAN du Cermics).

8.4 Accueils de chercheurs étrangers

Cette année, le projet a reçu les personnes suivantes :

Charbel Farhat (professeur à l'université du Colorado à Boulder, USA).

Tanya Kozubskaya (IMM, université Lomonossov de Moscou)

Ilya Abalakin (IMM, université Lomonossov de Moscou)

Sergey Peigin (professeur à l'université de Tomsk, UEI)

Maria-Vittoria Salvetti (université de Pise)

Simone Camarri (université de Pise)

Juha-Pekka Koskinen, chercheur à l'université de Jyväskylä en Finlande a été reçu une semaine en janvier 1999 à Grenoble dans le cadre d'une collaboration instaurée par le projet DECISION (enrobage de codes d'optimisation numérique).

Thierry Cornu, Direction Technique, Simulog, a été invité pour une conférence sur les environnements de calcul en juin 1999 à Grenoble.

9 Diffusion de résultats

9.1 Enseignement universitaire

Les membres du projet ont participé aux activités d'enseignement suivantes :

Méthodes multigrilles et multidomaines : cours au DEA de mathématiques (option analyse et applications) de l'UNSA et à l'ESSI (Option Calcul Scientifique), 30 h, (J.-A. Désidéri).

Modèles industriels en turbulence : cours au DEA de turbulence et systèmes dynamiques, UNSA, 12 h, (H. Guillard).

Modélisation numérique des fluides compressibles : cours en troisième année de l'ENSTA, 21 h, (H. Guillard).

Mécanique des fluides compressibles : cours de Maîtrise d'Ingénierie Mathématique, université de Nice-Sophia Antipolis, 20 h (H. Guillard).

Calcul numérique parallèle : cours de troisième année de l'ESSI, option calcul scientifique, 20 h, (S. Lanteri).

Volumes Finis : cours au Pôle universitaire Léonard de Vinci, Formation Post-Gradués en Calcul Scientifique, 3 h, (A. Dervieux).

Mastère de Mécanique Numérique : participation à son lancement par le CEMEF (École des Mines de Paris) et six contributions aux enseignements :

- Modèles mathématiques pour la Mécanique, 6h (J.-A. Désidéri);
- Modèles numériques de turbulence, 6h (H. Guillard);
- Méthodes de Volumes Finis, 6h (J.-A. Désidéri);
- Aérodynamique, combustion, 6h (H. Guillard);
- Méthodes multigrilles et multidomaines, 6h (J.-A. Désidéri);
- Calcul parallèle en Mécanique des Fluides, 6h (S. Lanteri).

Par ailleurs, J.-A. Désidéri a été missionné pour suivre les questions concernant les relations de l'Unité de Recherche avec l'université.

Enfin, le projet (J.-A. Désidéri) est associé à une initiative du Professeur M. Garbey (CDCSP, université de Lyon 1) pour mettre en place des cours par vidéo-conférence avec le département de mathématiques de l'université de Houston (Professor Fitzgibbon) sur les thèmes des mathématiques appliquées et du calcul à haute performance.

9.2 Thèses et Stages

Cette année, le projet assure ou a assuré l'encadrement des doctorants suivants :

PAUL-HENRI COURNÈDE, École Centrale de Paris « Schémas LED positifs » (co-encadrement avec C. Saguez)

VICTORITA DOLEAN, université de Nice-Sophia Antipolis, « Étude d'algorithmes par décomposition de domaine et accélération multigrille ».

LUC FOURNIER, université de Nice-Sophia Antipolis, « Algorithmes multigrilles parallèles pour les systèmes raides et application à des écoulements tridimensionnels ».

CHRISTOPHE HELD, université de Nice-Sophia Antipolis, « Calcul et contrôle d'écoulements turbulents stationnaires par des algorithmes multiniveaux ».

DAVID LESERVOISIER, université de Paris VI, « Méthodes de maillage adaptatif, application à la combustion interne en turboréacteur ».

GUILLAUME VIGO, université de Paris-Dauphine, « Application de la méthode POD à l'aérodynamique ».

ALÈS JANKA, université de Nice-Sophia Antipolis, « Développement de Méthodes multigrilles géométriques et algébriques pour l'accélération de la convergence des méthodes de résolution des équations de Navier-Stokes sur maillages non-structurés ».

9.3 Animation de la recherche

Le projet a contribué à l'organisation des manifestations suivantes notamment dans le cadre des réseaux européens mentionnés précédemment :

- Second International Symposium on Finite Volumes for Complex Applications, Problems and Perspectives, juillet 1999, université de Duisbourg, Allemagne,
- State of the art in CFD, Marseille, 13-14 septembre 1999.

G.T. Nguyen a organisé la 3ème réunion du projet HPCN DECISION à Grenoble en octobre 1999.

R. Peyret est un des deux éditeurs associés de *Computer and Fluids*.

A. Dervieux édite un numéro spécial de la Revue Européenne des Eléments Finis sur le couplage Fluide-Structure.

J. Blachon, J.-A. Désidéri, L. Mirtain (Service Semir) et G.T. Nguyen coordonnent l'installation des bases de données Ingenet et Flownet en vue des ateliers annuels (Ingenet : Capoue, 27-28 Janvier 2000; Flownet : Rome, 15-16 Mars, 2000).

Par ailleurs, J.-A Désidéri et J. Périaux participent à la proposition de Réseau d'Excellence MACSInet à la DG XIII dans le cadre du 5è PCRD sur le rôle des mathématiques appliquées dans l'Industrie.

9.4 Participation à des colloques, séminaires, invitations

Cette année, les membres du projet ont participé aux manifestations scientifiques suivantes :

- *A non-overlapping domain decomposition method for the solution of the Euler equations*, 8th International Symposium on Computational Fluid Dynamics (ISCFD99), septembre

- 1999, Bremen, Allemagne (V. Dolean).
- *A FAS multigrid method by agglomeration as an efficient solver of a flexible finite volume library*, Second International Symposium on Finite Volumes for Complex Applications, Problems and Perspectives, juillet 1999, université de Duisbourg, Allemagne (L. Fournier).
 - *On higher order accurate implicit time advancing for stiff flow problems*, Second International Symposium on Finite Volumes for Complex Applications, Problems and Perspectives, juillet 1999, université de Duisbourg, Allemagne (D. Leservoisier).
 - *Application of mesh-adaptive techniques to mesh convergence in complex CFD*, Second International Symposium on Finite Volumes for Complex Applications, Problems and Perspectives, juillet 1999, université de Duisbourg, Allemagne (D. Leservoisier).
 - *Additive aspects of hybrid multigrid/domain decomposition solution of fluid flow problems on parallel computers*, European Multigrid Meeting (EMG99), septembre 1999, université de Gent, Belgique (L. Fournier).
 - *Parallel multigrid acceleration of 3D compressible flows on unstructured meshes*, High Performance Computing Conference (HPC99), avril 1999, San Diego, California, USA, (S. Lanteri).
 - *Une approche par sous-domaines pour la résolution des équations d'Euler par une méthode mixte éléments/volumes finis en maillages triangulaires*, journée Décomposition de Domaine et Parallélisme, octobre 1999, CEA Saclay (S. Lanteri).
 - *A parallel Genetic Algorithm for multi-objective optimization in CFD*, Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science Short Course (EUROGEN99), mai-juin 1999, Jyväskylä, Finlande (N. Marco).
 - *Présentation de CAST*, Séminaire « Plate-formes CORBA de calcul numérique » organisé par l'ONERA, l'INRIA et le projet européen SOFT-IT sur les plate-formes CORBA (juin 1999, conférence invitée de Nguyen G.T.)
 - *The CAST platform* Foundation sur les « Problem Solving Environments » à San Feliu de Guixols (Espagne) en juin 1999 (présentation par Nguyen G.T. d'un poster invité sur CAST).
 - *La plateforme CAST*, « 8e Forum sur le Metacomputing » à l'INSTN (CEA de Saclay) en octobre 1999 (Nguyen G.T.).
 - *Multigrid strategies for CFD problems on unstructured meshes*, EMG99, Sixth European MG Conference, Gent, Belgium, septembre 1999, conférence invitée (H. Guillard).
 - *Petrov-Galerkin smoothed aggregation method*, Ninth Copper Mountain Conference on Multigrid method, avril 1999, Copper Mountain, USA (H. Guillard).
 - *Development of Navier-stokes Solvers on hybrid grids*, 7th DFG-CNRS Workshop in Numerical Flow Simulation, 5-6 novembre 1999, Berlin, Allemagne (A. Dervieux).
 - *Genetic Algorithms*, State of the art in CFD, Marseille, 13-14 septembre 1999 (J. Périaux).
 - *Optimal Design*, Séminaire au CESTA-Bordeaux, mars 1999 (A. Dervieux).
 - *OES turbulence model by time averaging*, Séminaire à l'Institut Liapunov, Moscou, mars 1999, (A. Dervieux).

- *Optimisation de formes aérodynamiques par résolution simultanée*, Journées de Metz sur l'Optimisation de Formes, aspects théoriques et numériques, 30-31 mars 1999 (C. Held).
- *Parallel Multigrid Solution and Optimization in Compressible Flow Simulation and Design*, Parallel Fluid Dynamics Conference '99, Williamsburg, Virginia (USA) (J.A. Désidéri, conférence invitée).
- *Nash Strategies and Game Theory in Domain Decomposition Methods for CFD Applications*, Domain Decomposition Methods Conference 12, Chiba university (Japon), 25-29 Octobre 1999 (J. Périaux).
- *Decentralized Nash/GA Optimization Strategies for the Solution of Multicriterion Inverse Fluid Dynamics Problems*, CEDYAP'99, Las Palmas de Gran Canarias (Espagne) (J. Périaux, conférence invitée).
- *FLOWnet: A Flow Library on the Web*, Annual Meeting of the ERCOFTAC, Special Interest Group: Quality and Trust in the Industrial Application of CFD, university of Florence, 27 Octobre 1999 (J.-A. Désidéri, conférence invitée).

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] G. CARRÉ, « An implicit multigrid method by agglomeration applied to turbulent flows », *Comput. Fluids* 26, 1997, p. 299–320.
- [2] J.-A. DÉSIDÉRI, P. HEMKER, « Convergence analysis of the defect-correction iteration for hyperbolic problems », *SIAM J. in Sci. Comp.* 16, 1995, p. 88–138.
- [3] J.-A. DÉSIDÉRI, *Modèles discrets et schémas itératifs. Application aux algorithmes multigrilles et multidomaines*, Hermès, Paris, 1998.
- [4] L. FEZOU, B. STOUFFLET, « A class of implicit upwind schemes for Euler simulations with unstructured meshes », *J. of Comput. Phys.* 84, 1989, p. 174–206.
- [5] J. FRANCESCETTO, A. DERVIEUX, « A semi-coarsening strategy for unstructured multigrid based on agglomeration », *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 26, 1998, p. 927–957.
- [6] H. GUILLARD, C. VIOZAT, « On the behaviour of upwind schemes in the low Mach number limit », *Comput. Fluids* 28, 1999, p. 63–86.
- [7] B. KOOBUS, M.-H. LALLEMAND, A. DERVIEUX, « Agglomeration multigrid for two-dimensional viscous flows », *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 18, 1994, p. 27–42.
- [8] M.-H. LALLEMAND, H. STEVE, A. DERVIEUX, « Unstructured multigridding by volume agglomeration : current status », *Comput. Fluids* 21, 1992, p. 397–433.
- [9] S. LANTERI, « Parallel solutions of compressible flows using overlapping and non-overlapping mesh partitioning strategies », *Parallel Computing* 22, 7, 1996, p. 943–968.
- [10] R. MARTIN, H. GUILLARD, « A second order defect correction scheme for unsteady problems », *Comput. Fluids* 25, 1, 1996, p. 9–27.
- [11] B. N'KONGA, H. GUILLARD, « Godunov type method on non-structured meshes for three dimensional moving boundary problems », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng* 113, 1, 1994, p. 183–204.

Articles et chapitres de livre

- [12] O. BOTELLA, R. PEYRET, « Computing singular solutions of the Navier-Stokes equations with the Chebyshev-collocation method », *Int. J. Numer. Methods in Fluids*, 1999, soumis.
- [13] R. CARPENTIER, « An example of numerical multiple solutions in internal aerodynamics », *Aerospace Science and Technology*, soumis.
- [14] G. CARRÉ, A. DERVIEUX, « On the application of FMG to variational approximation of flow problems », *Comp. Fluid. Dyn. J.* 12, 1999, p. 99–117.
- [15] P.-H. COURNÈDE, C. DEBIEZ, A. DERVIEUX, « Analysis of a density-positive MUSCL scheme for triangulations », *Journal of Computational Physics*, 1999, soumis.
- [16] C. DEBIEZ, A. DERVIEUX, « Mixed Element Volume MUSCL methods with weak viscosity for steady and unsteady flow calculation », *Comput. and Fluids* 29, 1999, p. 89–118.
- [17] A. DERVIEUX, S. LANTERI, J.-M. MALE, N. MARCO, N. ROSTAING-SCHMIDT, B. STOUFFLET, « New technologies for advanced three-dimensional optimum shape design in Aeronautics », *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 30, 1999, p. 179–191.
- [18] L. FOURNIER, S. LANTERI, « Algorithmes multigrilles parallèles en mécanique des fluides numérique », *Technique et Science Informatiques*, 1999, à paraître.
- [19] H. GUILLARD, C. VIOZAT, « On the behaviour of upwind schemes in the low Mach number limit », *Comput. Fluids* 28, 1999, p. 63–86.
- [20] A. IOLLO, A. DERVIEUX, J.-A. DÉSIDÉRI, S. LANTERI, « Stability Properties of POD-Galerkin Approximations for the Compressible Navier-Stokes Equations », *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 1999, à paraître.
- [21] A. IOLLO, A. DERVIEUX, J.-A. DÉSIDÉRI, S. LANTERI, « Two stable POD-based approximations to the Navier-Stokes equations », *Computing and Visualization in Science*, 1999, à paraître.
- [22] B. KOOBUS, C. FARHAT, « Time-accurate integration of two- and three-dimensional ALE viscous fluxes on unstructured dynamic meshes », *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 29, 1999, p. 975–996.
- [23] R. LARDAT, B. KOOBUS, E. SCHALL, A. D. C. FARHAT, J.-F. GUERY, P. D. PIÉTA, « Interaction between a pulsating flow and a perforated membrane », *Revue Européenne des Eléments Finis*, 2000, à paraître.
- [24] N. MARCO, S. LANTERI, « A two-level parallelization strategy for Genetic Algorithms applied to optimum shape design », *Parallel Computing*, 1999, à paraître.
- [25] R. PEYRET, « Introduction to high-order methods in Computational Fluid Dynamics », *R. Peyret et al., reds.*, 1999, à paraître chez Springer Verlag.
- [26] E. SCHALL, R. LARDAT, A. DERVIEUX, B. KOOBUS, C. FARHAT, « Aeroelastic coupling between a thin divergent and high pressure jets », *Revue Européenne des Eléments Finis*, 2000, à paraître.
- [27] C. VIOZAT, C. HELD, K. MER, A. DERVIEUX, « On vertex-centered unstructured finite-volume methods for stretched anisotropic triangulations », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1999, à paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [28] G. CARRÉ, G. CARTE, H. GUILLARD, S. LANTERI, « Multigrid strategies for CFD on unstructured meshes », in: *Proceedings of the European Multigrid Meeting (EMG99), Lecture Notes in Computer Science and Engineering*, Springer, University of Gent (BELGIQUE), 1999. à paraître.
- [29] G. CARRÉ, L. FOURNIER, S. LANTERI, « Parallel multigrid acceleration of 3D compressible flows on unstructured meshes », in: *Proceedings of the High Performance Computing Conference (HPC99)*, San Diego, California (USA), 1999.

- [30] H. CHEN, J. DÉSIDÉRI, J. PÉRIAUX, « Nash Strategies and Game Theory in Domain Decomposition Methods for CFD Applications », *in: Proceedings of the Domain Decomposition Methods Conference 12*, Chiba University (JAPON), 1999. à paraître.
- [31] J.-A. DÉSIDÉRI, L. FOURNIER, S. LANTERI, N. MARCO, B. MANTEL, J. PÉRIAUX, J. WANG, « Parallel Multigrid Solution and Optimization in Compressible Flow Simulation and Design », *in: Proceedings of the Parallel Computational Fluid Dynamics Conference (PARCFD'99)*, Ecer, Emerson (éditeurs), Elsevier/North Holland, Williamsburg, Virginie (USA), 1999. à paraître.
- [32] L. FOURNIER, O. GLOTH, « An attempt to develop a multi purpose FAS multigrid algorithm », *in: Finite Volume for Complex Applications II, Problems and Perspectives, Actes du "Symposium on Finite Volumes for Complex Applications, Problems and Perspectives"*, D. H. R. Vilsmeier, F. Benkhaldoun (éditeur), Hermes Sciences, p. 623–630, University of université de Duisbourg, Allemagne, 1999.
- [33] L. FOURNIER, S. LANTERI, « Additive aspects of hybrid multigrid/domain decomposition solution of fluid flow problems on parallel computers », *in: Proceedings of the European Multigrid Meeting (EMG99), Lecture Notes in Computer Science and Engineering*, Springer, University of Gent (BELGIQUE), 1999. à paraître.
- [34] H. GUILLARD, C. FARHAT, « On the significance of the GCL for flow computations on moving meshes », *in: 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. AIAA 99-0793, Reno, NV, 1999.
- [35] D. LESERVOISIER, P.-L. GEORGE, O. PENANHOAT, A. DERVIEUX, « Application of mesh-adaptive techniques to mesh convergence in complex CFD », *in: Finite Volume for Complex Applications II, Problems and Perspectives, Actes du "Symposium on Finite Volumes for Complex Applications, Problems and Perspectives"*, D. H. R. Vilsmeier, F. Benkhaldoun (éditeur), Hermes Sciences, p. 817–824, University of université de Duisbourg, Allemagne, 1999.
- [36] D. LESERVOISIER, C. VIOZAT, E. SCHALL, A. DERVIEUX, « On higher order accurate implicit time advancing for stiff flow problems », *in: Finite Volume for Complex Applications II, Problems and Perspectives, Actes du "Symposium on Finite Volumes for Complex Applications, Problems and Perspectives"*, D. H. R. Vilsmeier, F. Benkhaldoun (éditeur), Hermes Sciences, p. 631–638, University of université de Duisbourg, Allemagne, 1999.
- [37] N. MARCO, S. LANTERI, J.-A. DÉSIDÉRI, J. PÉRIAUX, « A parallel Genetic Algorithm for multi-objective optimization in CFD », *in: Proceedings of the Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science Short Course (EUROGEN99)*, Wiley, p. 445–455, Jyväskylä (FINLANDE), 1999.
- [38] J. PÉRIAUX, J. LIONS, H. CHEN, « Decentralized Nash/GA Optimization Strategies for the Solution of Multicriterion Inverse Fluid Dynamics Problems », *in: Proceedings of the CEDYAP'99 Conference*, University of Las Palmas (ESPAGNE), 1999. à paraître.
- [39] E. SCHALL, B. KOOBUS, C. FARHAT, « Investigation of the Aeroelastic Coupling between a Nozzle and a Supersonic Jet », *in: USACM/USNCCM99, 5th U.S. National Congress on Computational Mechanics*, University of Colorado, Boulder, USA, 1999.

Rapports de recherche et publications internes

- [40] I. ABALAKIN, A. DERVIEUX, « Time-averaging in Organised Eddy Simulation », *rapport de recherche*, Inria, décembre 1999, à paraître.
- [41] I. ABALAKIN, « Reichardt wall law, two layer model and Menter correction for the computation of flow around an high-lift configuration », *rapport de recherche*, Inria, décembre 1999, à paraître.
- [42] S. CAMARRI, M.-V. SALVETTI, « Towards the Large-Eddy Simulation of complex engineering flows with unstructured grids », *rapport de recherche n° 3844*, Inria, décembre 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3844.html>.

-
- [43] R. CARPENTIER, « Le schéma $\beta\gamma$ en axisymétrique », *rapport de recherche n° 3376*, Inria, avril 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3376.html>.
- [44] J.-A. DÉSIDÉRI, S. PEIGIN, S. TIMCHENKO, « Application of Genetic Algorithms to the solution of the space vehicle reentry trajectory optimization problem », *rapport de recherche n° 3843*, Inria, décembre 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3843.html>.
- [45] V. DOLEAN, S. LANTERI, « A domain decomposition approach to finite volume solutions of the Euler equations on triangular meshes », *rapport de recherche n° 3751*, Inria, octobre 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3751.html>.
- [46] C. HELD, « Optimisation de formes aérodynamiques par résolution simultanée sans gradient », *rapport de recherche*, Inria, décembre 1999, à paraître.
- [47] A. JANKA, H. GUILLARD, P. VANĚK, « Convergence of Algebraic Multigrid Based on Smoothed Aggregation II: Extension to a Petrov-Galerkin method », *rapport de recherche n° 3683*, Inria, mai 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3683.html>.
- [48] N. MARCO, J.-A. DÉSIDÉRI, S. LANTERI, « Multi-objective optimization in CFD by Genetic Algorithms », *rapport de recherche n° 3686*, Inria, avril 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3686.html>.
- [49] N. MARCO-BLASZKA, J.-A. DESIDERI, « Numerical solution of optimisation test-cases by Genetic Algorithms », *rapport de recherche n° 3622*, Inria, février 1999, <http://www.inria.fr/RRRT/RR-3622.html>.
- [50] G. VIGO, « Numerical simulation of pulsed jet with a Proper Orthogonal Decomposition approach », *rapport de recherche*, Inria, décembre 1999, à paraître.