INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

Projet OPALE

Optimisation et contrôle, algorithmes numériques et intégration de systèmes complexes multidisciplinaires régis par des E.D.P.

Sophia Antipolis — Rhône-Alpes

THÈME 4B

Rapport d'Activité

2002

Table des matières

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique
Jean-Antoine Désidéri [DR, INRIA Sophia Antipolis]
Responsable permanent
Toan Nguyen [DR, INRIA Rhône-Alpes]
Assistante de projet
Montserrat Argente [INRIA Sophia Antipolis]
Chercheurs Permanents
Abderrahmane Habbal [MdC, en délégation de l'UNSA]
Jean-Paul Zolésio [DR CNRS]
Conseiller scientifique
Jacques Périaux [Dassault Aviation, Direction de la Prospective]
Ingénieur Associé
Simon Baudot-Roux [INRIA Sophia Antipolis]
Chercheur post-doctorant
Martial Mancip [post-doc INRIA, ARC COUPLAGE, jusqu'au 30 juin 2002]
Zhi Li Tang [post-doc EGIDE, jusqu'au 30 septembre 2002]
Chercheurs doctorants
Alberto Clarich [Université de Trieste, stage 3 mois]
Pierre Dubois [Ecole des Mines et France Télécom]
Jamel Ferchichi [Université de Tunis]
Marios Karakasis [Université d'Athènes, stage 3 mois]
Stagiaire
Jacques Morice [MathMeca, Bordeaux]
Pierre Pronchery [IUT Informatique, Grenoble]
Raphael Sellam [Paris Dauphine]
Collaborateurs extérieurs
John Cagnol [MdC, Pôle Léonard de Vinci]
Raja Dziri [Université de Tunis]
Carlo Poloni [Université de Trieste]
Michel Delfour [Centre de Recherches Mathématiques, Montréal]

2 Présentation et objectifs généraux

2.1 Objectifs généraux

Les objectifs de l'équipe Opale sont multiples : analyser mathématiquement des systèmes couplés mono ou multidisciplinaires régis par des équations aux dérivées partielles en vue de leur optimisation ou leur contrôle (optimisation géométrique) ; construire et expérimenter des algorithmes numériques efficaces de résolution (algorithmes de couplage, réduction de modèles) et d'optimisation (algorithmes de gradient, algorithmes évolutionnaires, théorie des jeux) pour approcher ces systèmes et les optimiser ; développer des plates-formes logicielles pour le calcul parallèle réparti des systèmes discrets associés. Les applications considérées comprennent notamment l'optimisation multidisciplinaire de forme aérodynamique (voilure d'avion) en partenariat avec Dassault Aviation, et l'optimisation de systèmes d'antennes, en partenariat avec France Télécom.

3 Fondements scientifiques

3.1 Algorithmique d'optimisation numérique

Mots clés : conception optimale de forme, optimisation multipoint, multicritère, multidisciplinaire, paramétrisation, volume fini, élément fini, algorithme évolutionnaire, algorithme de gradient, hybridation, algorithme hiérarchique, réduction de modèle, technique POD, optimisation géométrique.

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.

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 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).

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

3.2 Optimisation géométrique

Dans l'optique de la robustesse des algorithmes d'optimisation de type gradient de forme, la maîtrise de l'évolution continue des géométries est essentielle. L'ambiguité tient au fait que les gradients de formes "vivent" dans des espaces de distributions "duaux" des espaces des paramètres géométriques. Bien entendu, lorsque le problème est "discrétisé", c'est-à-dire remplacé par un autre problème de dimension finie et "voisin", ces espaces se confondent. Cependant la non prise en compte *a priori* de ces questions de dualité conduit à des instabilités qui nécessitent par exemple l'usage de lisseurs et de réinitialisations (pour ce qui est des algorithmes de type "narrow band" et "level sets")..

La compréhension mathématique de ces paradoxes passe par l'analyse de ce phénomène de dualité sur les modèles continus : comment incrémenter la géométrie dans la direction (opposée) d'un gradient irrégulier qui va soit "déchirer" les frontières, soit dans un moindre mal, les faire osciller. La notion d'équation différentielle de domaine est une réponse à cette question. La complexité de sa mise en œuvre tient dans les moyens mis en jeux : un opérateur de dualité qui nécessite le déploiement au préalable d'un cadre fonctionnel. Cette approche se simplifie lorsqu'on dispose d'une structure hilbertienne. Ce dernier point est toutjours rendu possible en augmentant autant que nécessaire le degré de l'opérateur différentiel de dualité choisi. Typiquement cet opérateur peut alors prendre la forme d'une puissance "convenable" (souhaitée la plus petite possible) d'un système de type elliptique. Dans cet objectif le point clé est la régularité "optimale" des solutions du système considéré (écoulement aérodynamique, champ électromagnétique,....) à la frontière des domaines, lesquelles frontières sont elles-mêmes de régularité contrôlée par l'évolution. Ceci amène à analyser les propriétés "fines" de régularité des solutions via la notion fondamentale dégagée ces dernières années sous le nom de "méthode de l'extracteur". Par exemple il était bien connu que si un domaine Ω a une frontière avec courbures continues et si le second membre f est de carré sommable, alors la solution u du problème de potentiel $-\Delta u = f$ est elle même dans l'espace de Sobolev $H^2(\Omega)$. Si bien que la dérivée normale de u sur le bord est elle même de carré sommable sur le bord. Mais qu'en est-il de cette dernière propriété fondamentale dans notre analyse si la frontière de l'ouvert Ω n'est pas régulière ? Il est connu par exemple que si cet ouvert est *convexe* alors la propriété de régularité, ainsi que sa conséquence demeurent. Si le bord n'est que localement le graphe d'une fonction lipschitzienne, la solution n'est pas, en général, de régularité $H^2(\Omega)$ mais la technique dite de la "régularité cachée" developpée dans les années 80 par Irena Lasiecka (Virginia University) pour les problèmes de nature hyperbolique (où de manière structurelle les régularités envisagées précédemmment n'ont jamais lieu, même avec des frontières infiniment lisses) s'appliquent. Ainsi *sans que la solution* soit dans un espace de type $H^{\frac{1}{2}+\epsilon}(\Omega)$ on obtient la dérivée normale de carré sommable sur le bord du domaine. En un sens il s'agit de généralisation des conditions de Lopatinski developpées pour certains systèmes hyperboliques. Pour établir l'existence et la stabilité des solutions de l'équation différentielle de domaine avec opérateur de dualité "minimal" (au sens de l'ordre de l'opérateur différentiel impliqué dans la construction de la géométrie perturbée) cette régularité cachée minimale n'est pas encore suffisante dans la mesure où, travaillant avec des méthodes de point fixe, des estimations globales "effectives" des normes considérées sont nécessaires. La méthode dite "de l'extracteur" qui attire une partie importante de nos efforts dans cette démarche consiste alors à fournir ces estimations. L'idée est fondée sur l'analyse perturbative de domaine.

En amont de l'algorithmique pour les méthodes d'optimisation de domaines, on considère l'évolution continue Ω_t d'une géométrie où t peut être le temps (celui de l'évolution dans l'EDP qui gouverne la modélisation du problème continu) ; on a alors un problème de géométrie dynamique (problèmes non cylindriques, incluant les situations de frontières libres dynamiques) où t peut être simplement la « version continue » des itérations de l'optimisation (t est alors un paramètre continu de la déformation virtuelle de la géométrie) . Le problème étudié est la validité de cette évolution lorsque t est grand, idéalement lorsque $t \to \infty$. Un des objectifs numériques est d'éviter l'utilisation de "lisseurs" ad hoc et de développer des méthodes de type "shape-Newton" ([43]). Ces dernières années, la communauté de l'imagerie a mis l'accent sur les paramétrisations par courbes de niveaux et sur les équations de Hamilton Jacobi associées. Une partie de ces activités s'apparente à ces techniques. Dans ce cas, on l'applique à l'optimisation topologique ([21]).

Equation différentielle de domaine On désigne par $G(\Omega)$ le gradient d'une fonctionnelle de domaine J en la géométrie Ω. Il existe $s \in R^+$ tel que $G(\Omega) \in H^{-s}(D, R^N)$, où D est l'univers contenant l'analyse , par exemple $D = R^N$. La régularité des domaines solutions de l'équation est classiquement déterminée par la régularité dans le voisinage "immédiat" des frontières de la fonction distance orientée b_Ω qui est l'outil de la géométrie intrinsèque. Le cas limite $b_\Omega \in C^{1,1}(\mathcal{U})$ ($\mathcal{U}$ est un voisinage tubulaire de la frontière Γ) est le cas d'importance et représente le seuil de difficulté dans ce type d'analyse. Si les géométries sont des domaines de Sobolev, i.e. $b_\Omega \in H^r(\mathcal{U})$, alors on considère un opérateur de dualité, $\mathcal{A} \in \mathcal{L}(H^r, H^{-s})$, ayant la propriété de positivité du type $< \mathcal{A}\phi, \phi >\geq |\phi|^2_H$ où H désigne un espace "intermédiaire". On considére alors le problème suivant : étant donné Ω_0, trouver un champ non autonome $V \in C^0([0, \infty[, H^r(D, R^N)) \cap C([0, , \infty[, L^\infty(D, R^N))$ tel que, $T_t(V)$ désignant le flot du champ V,

$$\forall t > 0, \;\; \mathcal{A}.V(t) + G(T_t(V)(\Omega_0)) = 0$$

Différents résultats d'existence pour cette équation différentielle de domaine sont établis, généralement sous l'hypothèse de bornitude "universelle" du gradient, du type suivant :

$$\text{il existe } \; M > 0 \;\; \text{ tel que, } \forall \Omega, \;\; ||G(\Omega)|| \leq \; M$$

L'existence d'une telle bornitude fut établie d'abord pour des problèmes de meilleur positionnement d'un contrôle optimal. Ce type de résultat a été étendu à une grande classe de fonctionnelles gouvernées par des problèmes aux limites, voir une introduction dans [54] où le cas asymptotique est analysé complètement dans la situation bidimensionnelle grâce au résultats de continuité de V. Sverak. Ces développements nécessitent un cadre intrinsèque pour l'analyse des géométries variables qui permet d'éviter l'usage des cartes locales, des atlas, mais aussi des symboles de Christoffel et de travailler en régularité minimale . La fonction distance orientée s'est avérée un allié majeur dans notre approche dont la caractéristique est de décrire le mouvement des géométries par la convection avec des champs de vitesse V. Un tel champ construit un tube à partir d'un champ initial. L'utilisation des périmètres BV permet d'étendre ces évolutions (par convection) à des champs de vitesse V non régulière, modélisant ainsi les possibles *changements de topologies.* La notion de champ transverse Z est developpée dans ce cadre pour plusieurs type de résultats en cours d'exploitation en relation avec les couplages fluide-structure et les méthode de “Shape-Newton”. Les résultats récents se trouvent dans trois livres [2] [8] [1].

3.3 Plates-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 heurtent 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 conduit 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 multiphysiques 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, ou qu'il est impossible de faire migrer (machines vectorielles, logiciels propriétaires...).

Le projet OPALE 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 (1). L'objectif est de fournir un environnement de calcul qui permette d'expérimenter les méthodes numériques mises au point par le projet en bénéficiant des dernières avancées technologiques en matière de traitement de l'information et de calcul.

A ce titre, le projet poursuit le développement d'une plateforme logicielle de couplage de codes parallèles, répartis sur des grappes de PC connectées à des réseaux à haut débit. Cette plateforme, appelée CAST, offre une interface de couplage destinée aux ingénieurs experts dans leur domaine, l'aérodynamique par exemple, pour définir, configurer, déployer et exécuter des applications de simulation et d'optimisation multidisciplines en bénéficiant de la puissance de calcul et des performances offertes par les grappes de PC et les réseaux rapides actuels.

Des expérimentations d'applications mettant en jeu des méthodes hybrides (gradient/génétique) d'optimisation de formes en aérodynamique ont ainsi été réalisées. Elles utilisent les grappes de PC des sites INRIA de Grenoble, Sophia-Antipolis et Rennes, ainsi que le réseau VTHD.

En collaboration avec l'industrie, des expérimentations locales ont également été menées sur des codes parallèles hiérarchiques et génétiques mettant en oeuvre la théorie des jeux pour l'optimisation de profils complexes hypersustentateurs. Des facteurs d'accélération de 15 ont ainsi été obtenus sur des profils aérodynamiques en 2D. A terme, l'objectif est de banaliser l'utilisation des grappes de PC connectées dans les applications de simulation et d'optimisation en 3D, dont la nécessité est patente dans de nombreux secteurs industriels comme l'aérospa-

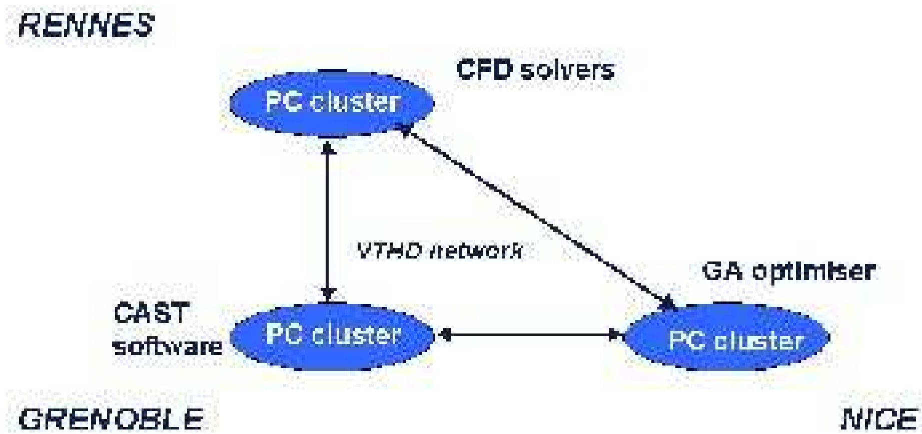


FIG. 1 – Mise en réseau VTHD des grappes de PCs.

tial, le nucléaire, et l'automobile. On sait en effet que des environnements mettant en oeuvre plusieurs milliers de processeurs sont en cours de déploiement outre-atlantique dans le domaine de la simulation nucléaire, et que des réseaux à 40 Gbits/sec y seront opérationnels dans un futur proche. Il est donc essentiel que les applications citées ci-dessus puissent bénéficier en Europe et en France en particulier d'environnements similaires. A cette fin, des collaborations à l'échelle européenne sont actuellement en cours de gestation dans le domaine de la simulation et de l'optimisation numérique (réseaux PROMUVAL, MOPART, etc). Le projet OPALE y participe activement, en collaboration avec l'industrie aéronautique française et étrangère (Dassault-Aviation, SNECMA, EADS, ALENIA, etc), et d'autres instituts de recherche européens (DLR, CENAERO, ONERA, etc).

4 Domaines d'applications

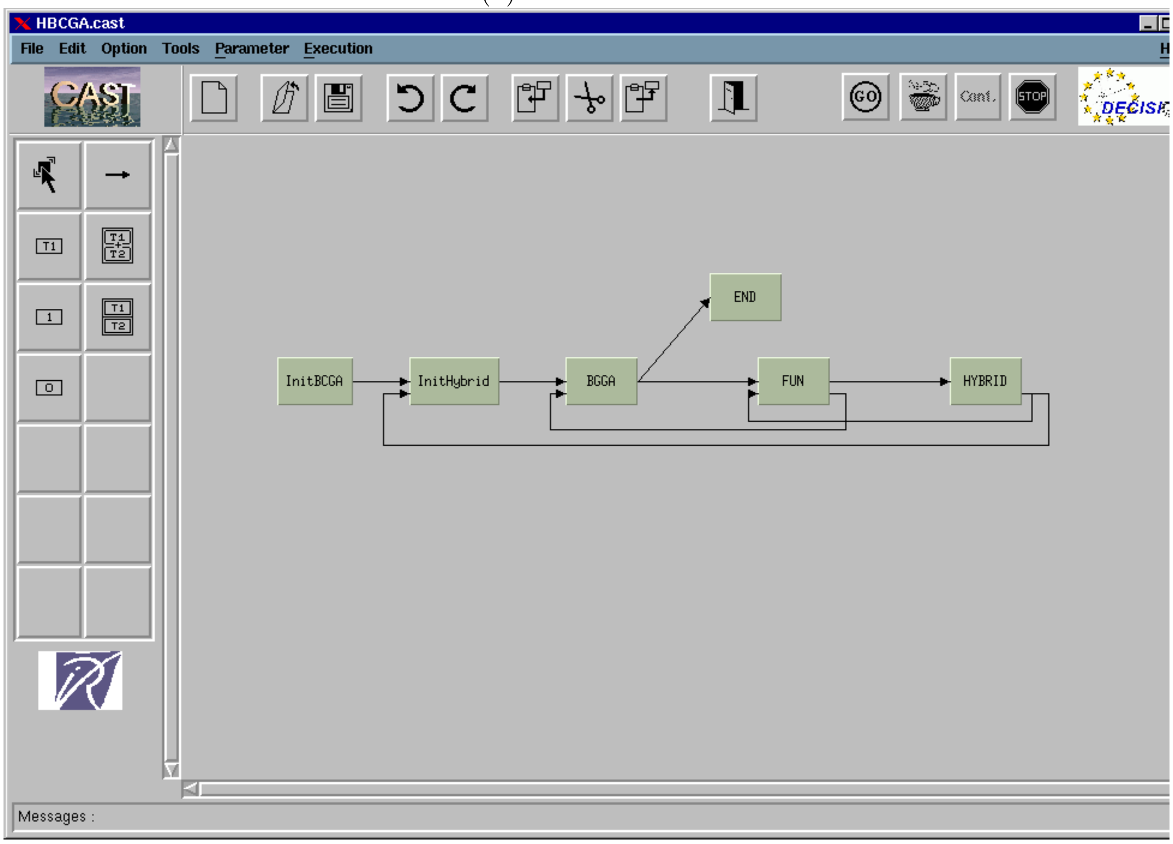
4.1 Panorama

Spécialisé dans le développement de méthodes numériques pour l'optimisation et l'analyse des questions mathématiques et informatiques associées, le projet mène des études en conception optimale de forme en aérodynamique (réduction de traînée, réduction de critère de bruit, *bang sonique*) et en électromagnétisme (placement et mouvement optimal de capteurs) qui s'appliquent aux problèmes d'ingéniérie des transports dans le cadre des nouvelles technologies. La composante du projet en Rhône-Alpes développe des plates-formes logicielles pour le calcul réparti des applications multidisciplinaires envisagées (*grid computing*).

4.2 Aéronautique et Espace

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,

(a) Serveur CAST



(b) Champs initial et optimisé de nombre de Mach

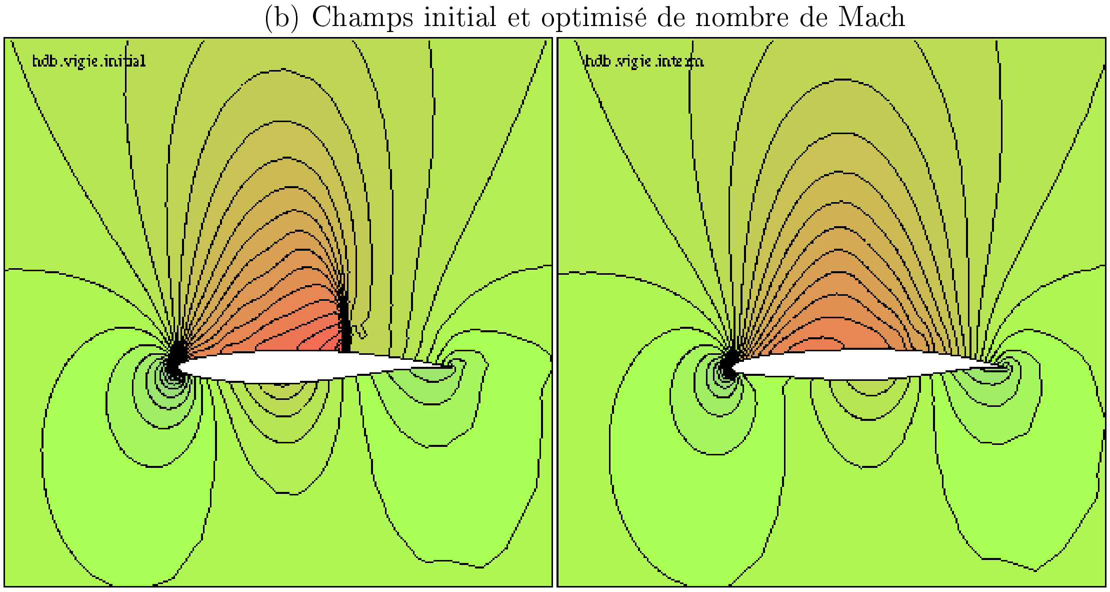


FIG. 2 – Algorithme d'optimisation hybride gradient-génétique en démonstration sur la plate-forme du projet européen DECISION ; noter que la diminution de traînée résulte de la quasi-disparition du choc sur l'extrados du profil d'aile.

et d'émission de tourbillons au dessus des pistes, que pour les avions de l'avenir, gros porteurs ou supersoniques. Notre implication concerne l'optimisation de forme de voilure.

Nos méthodes d'optimisation, notamment les algorithmes génétiques, peuvent également s'appliquer aux optimisations des systèmes de fusée.

4.3 Electromagnétisme

Dans le cadre de l'optimisation des antennes electromagnétiques on distingue deux mondes : les modélisations bi-dimensionnelles qui traitent des cas TE et TM (transverse electrique et transverse magnétique) et la situation tridimensionnelle physique dont l'ambition est d'optimiser et d'identifier de véritables objets industriels tels que les antennes , les avions.....La grande majorité de la "littérature numérique" traitant de l'optimisation de formes en electromagnétique relève de la première catégorie et de l'utilisation de solveurs et de fonctions de Green bidimensionnels.

Notre approche procède d'une analyse complète du contrôle tridimensionnel en espace ouvert par l'approche des équations intégrales et l'analyse des sensibilités de l'isomorphisme de Colton et Kreiss. L'utilisation du logiciel SR3D de France Télécom nous permet alors d'implémenter directement les éléments de cette analyse dans une approche harmonique. Le calcul de la dérivée par rapport à la fréquence du gradient de forme (c'est une sorte de dérivée seconde) permet alors par interpolation judicieuse entre les fréquences de base de récupérer les dérivées par rapport aux géométries des champs E et H pour des situations temporelles "impulsionnelles" simples qui sont celles de la tomographie, du radar, etc.

4.4 Couplages multidisciplinaires

Notre assise théorique, et notamment notre expertise en approximation et en méthodes multiniveaux et multidomaines, nous permettent 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 CAST

Participants : Martial Mancip, Toan Nguyen, Pierre Pronchery.

La plate-forme CAST est un environnement de résolution de problèmes qui permet de faire coopérer des modules numériques répartis sur des grappes de PC interconnectées. Elle offre ainsi une structure d'accueil du type "grille de calcul" (GRID computing) pour les applications de simulation et d'optimisation numérique distribuée. Elle repose sur une approche à base de workflow : une application est décrite comme un ensemble de tâches coopérantes, réparties à travers un réseau de grappes de PC ; elle utilise une couche CORBA pour la communication, la synchronisation et l'échange de données entre les codes de calcul répartis. Ce logiciel est écrit en C++ sous Linux. Il a continué a être développé dans le cadre de l'ARC COUPLAGE pour l'expérimentation d'une application de mélange diphasique [48]. Il permet désormais de coupler des codes parallèles ou séquentiels exécutés sur une grille de calcul, connectée par un réseau à haut débit.

6 Résultats nouveaux

6.1 Analyse numérique générale et simulation

6.1.1 Problèmes d'interpolation pour l'analyse des schémas instationnaires

Participants : Jean-Antoine Désidéri.

On a montré de manière constructive que le problème de l'interpolation d'une suite infinie quelconque de données par une fonction entière de x (et éventuellement de t) admet une infinité non-dénombrable de solutions. Dans le cas d'une seule variable, si les données sont bornées, l'interpolant peut être construit borné, ainsi que ses dérivées. En outre, la construction se généralise à l'interpolation des valeurs de la fonction et de ses dérivées jusqu'à un ordre prescrit arbitrairement (interpolation hermitienne). L'interpolant proposé dépend d'un paramètre réel λ , et son comportement quand λ varie a été analysé [41].

Cette étude apporte un élément de justification de l'analyse des schémas discrets en instationnaire par l'équation équivalente.

6.1.2 Multigrille cascadique

Participants : Jean-Antoine Désidéri, Alès Janka [Projet SMASH], Xuejun Xu [CAS, Beijing, Dept. of Numerical Mathematics].

La variante "cascadique" des multigrilles dans laquelle on effectue seulement des transferts par prolongement vers une grille plus fine a été étudiée dans le cadre d'un problème modèle d'advection-diffusion. Cette variante présente l'avantage algorithmique d'une plus grande simplicité de mise en œuvre et dans certains cas (purement elliptiques) présente une efficacité comparable à celle de la méthode de base. Notre étude [53] a montré les limites de cette approche lorsque le nombre de Reynolds devient grand, auquel cas une procédure d'adaptation de maillage ou de semi-déraffinement semble indispensable.

Cette étude s'insère dans le cadre d'un projet avec le laboratoire franco chinois LIAMA.

6.1.3 Homogénéisation de coque oscillante

Participants : Abderrahmane Habbal.

Dans le cadre de la théorie de Koiter des coques minces élastiques, nous étudions le modèle limite pour une arche élastique linéaire plane dont la surface moyenne subit des oscillations périodiques, l'amplitude et la fréquence des oscillations étant de même ordre. On prouve la convergence vers un modèle effectif qui, bien que de forme moyenne apparente plane, exhibe un couplage entre la rotation de la normale et le tenseur de déformation membranaire [46].

6.1.4 Domaines fictifs

Participants : Hongquam Chen [National University of Aeronautics and Astronautics, Nankin], Roland Glowinski [University of Houston], Jacques Périaux.

Les méthodes de domaines fictifs sont très efficaces pour la résolution rapide des EDP. Dans le cas d'un phénomène de propagation d'ondes multi-directionnel, il est intéressant d'associer à la résolution d'EDP de type Maxwell dans le domaine autour d'un obstacle celle dans un domaine de type "boîte" contenant également l'obstacle. L'avantage évident d'une telle approche est double : la formulation donne accès à des solveurs linéaires rapides, et il n'est pas nécessaire de reconstruire le maillage dans un processus d'optimisation de forme avec ou sans revêtement. Une telle approche est une généralisation de la contrôlabilité exacte, inspirée de HUM (J.L. Lions), incluant des multiplicateurs de Lagrange, méthode développée par R. Glowinski *et al.*. Des résultats d'expériences numériques, présentés à l'Atelier PRA en octobre 2002 à Pékin, confirment l'intérêt d'une telle approche.

6.1.5 Validation en Mécanique des Fluides

Participants : Jean-Antoine Désidéri, Francesco Grasso [Université de Rome], Marco Marini [CIRA, Italie], Roberto Paoli [Université de Rome], Jacques Périaux.

Cette activité se poursuit dans le cadre du réseau thématique FLOWnet (voir Réseaux Européens) et a donné lieu à la co-organisation de l'atelier annuel à l'Université de Provence et du Congrès International WEHSFF '02 (*West East High Speed Flow Fields*), à des contributions numériques à la base de données dans le domaine de l'optimisation multicritère (Voir site dédié : `http://www.inria.fr/sinus/flownet/index.php3`), à deux communications [34] [24], ainsi qu'à la publication de synthèse [19].

6.2 Algorithmes d'optimisation et conception optimale de forme

Nos recherches concernent l'optimisation et le contrôle de systèmes complexes multidisciplinaires régis par des équations aux dérivées partielles. Elles comportent des volets algorithmiques (paramétrisation pour la conception optimale de forme, théorie des jeux, algorithmes évolutionnaires, hybridations d'algorithmes évolutionnaires et de gradient), théoriques (contrôle et décomposition de domaine) et informatiques (plateformes logicielles).

6.2.1 Paramétrisation

Participants : Alberto Clarich [en thèse à l'Université de Trieste], Jean-Antoine Désidéri, Jacques Morice, Carlo Poloni [Departement Energétique, Université de Trieste], Zhi Li Tang, Jean-Paul Zolésio.

On s'intéresse à des problèmes de conception optimale de forme, dans lesquels l'état s'obtient par résolution discrète d'une équation aux dérivées partielles (EDP) soumise à des conditions aux limites dont au moins une dépend de la forme. Lorsqu'on utilise une approche par gradient de fonctionnelle, une fois l'équation adjointe résolue (exactement ou de manière approchée), on obtient directement les dérivées du critère par rapport aux coordonnées des nœuds frontières. Dans ce cas, il n'est pas indispensable de posséder une représentation formelle de la frontière optimisée. A l'inverse, lorsque l'optimiseur est de type algorithme évolutionnaire (par exemple génétique), il est souhaitable de choisir explicitement un ensemble de paramètres de contrôle de la forme, en nombre modeste (bien inférieur au nombre de nœuds frontières) et définissant *formellement* une géométrie lisse. Il apparaît donc que le choix de cette représentation formelle, ou *paramétrisation* joue un rôle important dans la qualité de l'optimisation qui en résulte. Le thème de la paramétrisation est par conséquent l'objet de plusieurs études, dont une est financée par un contrat de Dassault Aviation, et nous permet de coopérer avec l'Université de Trieste (notamment dans les interfaces avec l'outil de CAO).

Dans une première étude ayant trait à l'optimisation de profils d'aile (en 2D) représentés par des courbes de Bézier de degré donné, on a évalué l'impact du choix *a priori* des abscisses des points de contrôle lorsqu'on optimise les ordonnées vis-à-vis de critères purement géométriques (*curvefitting*) ou de critères aérodynamiques. On a montré en particulier les gains substantiels en qualité de convergence qu'on pouvait atteindre en *régularisant* la paramétrisation par une procédure auto-adaptative de réduction de variation totale [52].

L'étude précédente a été étendue au cas tridimensionnel de l'optimisation aérodynamique d'une voilure d'avion, représentée par une série de sections. Quatre optimisations statiques permettent d'obtenir à moindre coût une paramétrisation adaptée d'aussi bonne qualité que l'adaptation simultanée des abscisses et des ordonnées des points de contrôle. En conséquence la traînée de pression a été réduite de 26 % (au lieu de 6 %) [38].

Dans notre réflexion méthodologique, on s'intéresse également à identifier une base de fonctions (pour représenter les perturbations de la géométrie) qui maximise la sensibilité des champs calculés, en vue d'une optimisation plus pertinente. Dans le cas d'un écoulement dont les perturbations liées à la géométrie dérivent d'un potentiel, on met en évidence un opérateur symétrique anti-compact dont les fonctions propres caractérisent la base [49].

6.2.2 Réduction de modèle, réseaux de neurones

Participants : Jean-Antoine Désidéri, Marios Karakasis [en thèse à l'Université d'Athènes].

On a proposé une méthode pour réduire la dimension de l'espace de recherche dans un problème d'optimisation. La méthode consiste à construire un modèle formel de la fonctionnelle par réseaux de neurones (dont l'apprentissage se fait par le processus d'optimisation initial), puis à identifier le sous-espace engendré par les vecteurs propres de la matrice hessienne qui ont le plus d'influence sur la réduction de la fonctionnelle coût. Quand l'optimisation est limitée à un tel sous-espace, des réductions substantielles du coût de calcul sont observées grâce à une exploration plus efficace. La réduction de modèle est couplée à des algorithmes génétiques de manière auto-adaptative tout au long du processus d'évolution [47].

6.2.3 Stratégies de jeux pour l'optimisation multicritère distribuée

Participants : Hong Quan Chen [Pôle Scientifique Dassault Aviation, NUAA], Jean-Antoine Désidéri, Abderrahmane Habbal, Jacques Périaux, Mourad Sefrioui [Pôle Scientifique Dassault Aviation], Zhi Li Tang, Jiang Feng Wang [Pôle Scientifique Dassault Aviation, NUAA].

Dans la conception de produits industriels, la performance d'une solution est généralement évaluée au moyen de plusieurs critères simultanément, en raison du contexte multidisciplinaire et/ou de la nécessité de prendre en compte plusieurs modes de fonctionnement. Par exemple, en aéronautique, une voilure peut être qualifiée pour sa performance aérodynamique (et/ou *bang* supersonique), structurale ou sa signature électromagnétique, notamment. En ce qui concerne l'aérodynamique seule, plusieurs points de vol (décollage, croisière, atterrissage) sont à considérer (optimisation multipoint).

Une manière classique de traiter les problèmes multicritères est fournie par l'approche par pénalisation dans laquelle on résout un grand nombre de problèmes monocritères correspondant aux valeurs d'une fonctionnelle fictive définies par des combinaisons linéaires différentes des divers critères. Outre le caractère assez arbitraire des combinaisons considérées, cette approche présente le grave inconvénient de n'avoir aucune extension simple lorsqu'on rajoute un critère à la liste des paramètres à considérer.

Les algorithmes évolutionnaires offrent une intéressante alternative à la pénalisation, particulièrement séduisante pour l'ingénieur concepteur par la construction des « fronts de Pareto ». Cette construction de fronts est un post-traitement et le coût réside seulement dans le nombre de points calculés. Les mêmes points peuvent être réévalués vis-à-vis d'un autre ensemble de critères, et d'autres équilibres de Pareto identifiés.

Les équilibres de Pareto ont cependant le grave inconvénient d'être très coûteux à identifier. Une alternative très interessante est fournie par les stratégies de « jeux ». Chaque critère est associé à un joueur, et des règles de « coopération » ou de « compétition » (jeu de Nash) sont définies afin d'atteindre un équilibre réalisant un compromis de conception.

En particulier, on a étudié comment construire des algorithmes distribués pour résoudre des problèmes d'optimisation de profils aérodynamiques vis-à-vis de la réduction de traînée en régime transsonique (correspondant à la croisière d'un avion commercial), en compétition avec la maximisation de portance en régime subsonique (correspondant aux manœuvres de décollage et d'atterrissage pour lesquelles l'hypersustentation est indispensable) [51] [34].

Dans notre collaboration avec le Pôle Scientifique de Dassault Aviation et des laboratoires avec lequel il coopère (Université de las Palmas et Université de Sydney, notamment), le thème majeur est l'optimisation distribuée utilisant la théorie des jeux et la hiérarchie de modèles et s'appuyant sur des algorithmes évolutionnaires synchrones ou asynchrones (*grid computing*). L'approche par jeu qui permet de traiter efficacement un problème multicritère sans introduire de combinaison de criteres pondérés, a été reconnue comme un outil très innovant pour la conception optimale multi-objectif [Deb01]. L'efficacité de l'approche a été vérifiée et analysée pour de nombreux problèmes en aéronuatique [29] [22] [23] [36] [26] [35].

[Deb01] K. Deb, *Multi-Objective Optimisation using Evolutionary Algorithms*, J. Wiley, Chichester, UK, 2001.

6.2.4 Algorithmes hiérarchiques

Participants : Alberto Clarich [en thèse à l'Université de Trieste], Jean-Antoine Désidéri.

On a montré comment on pouvait exploiter le concept classique d'*élévation du degré* dans une paramétrisation de Bézier d'une forme pour construire une hiérarchie d'espaces de recherche rigoureusement emboîtés. Cette construction permet naturellement de proposer : *(i)* des algorithmes d'*optimisation* multiniveaux par analogie aux maillages emboîtés des algorithmes multigrilles pour la *résolution* des EDP, *(ii)* des techniques d'*hybridization* (gradient-génétique), et *(iii)* des méthodes de couplage avec des *modèles réduits* [25]. Ces nombreuses variantes sont en cours d'expérimentation, mais dès à présent, une expérience menée à Trieste de simple enrichissement progressif de la paramétrisation a révélé un meilleur résultat d'optimisation (meilleure réduction de la traînée par auto-adaptation), et un gain en efficacité de calcul d'un facteur 3 (en nombre de générations nécessaires).

6.2.5 Optimisation topologique du couplage chaleur-thermoélasticité

Participants : Abderrahmane Habbal, Joakim Petersson [Université de Linköping (Suède)], Mikael Thellner [Université de Linköping (Suède)].

On aborde le problème d'optimisation de topologie d'un domaine où a lieu un phénomène régi par un système couplant l'équation de la chaleur à celles de la thermoélasticité. Vis-à-vis de la thermique, on veut maximiser le flux diffusé et en thermoélasticité la rigidité de la structure. Ce modèle d'optimisation concurrente est traité par jeux de Nash. Les résultats numériques sont en cours.

6.3 Evolution de frontières Géométriques

6.3.1 Optimisation et identification en électromagnétisme

Participants : Claude Dedeban [France Télécom], Michel Delfour [CRM, Montréal], Pierre Dubois [Thèse Ecole des Mines], Dominique Lesselier [Supélec], Jean-Paul Zolésio.

Dans ces applications, on calcule formellement le gradient de forme tridimensionnel par représentation intégrale. Pour l'identification, on développe une équation de type Hamilton-Jacobi faisant intervenir les méthodes « level-set » [33].

Par ailleurs, on a développé avec France Télécom une méthode basée sur l'interpolation en fréquence pour la dérivation et l'optimisation dans les équations de Maxwell 3-D [27].

6.3.2 Identification géométrique

Participants : Michel Delfour [CRM, Montréal], Pierre Dubois, Dominique Lesselier [Supélec], C. Ramananjaona [post doc INRIA], Jean-Paul Zolésio.

Il s'agit ici d'une contribution à l'optimisation de fonctionnelles "purement" géométriques ne dépendant pas de la géométrie via "une équation d'état" (comme plus fréquemment dans les problèmes de contrôle géométriques). La dépendance directe sur la géométrie s'exprime par ses invariants tels que les courbures. Dans le cadre de la conférence à MIA02 (août 2002, Institut Poincaré), nous avons revisité la présentation de l'équation différentielle de domaine en termes de "level sets". Cette théorie est confirmée par certains résultats numériques [21]. Par ailleurs, on a également obtenu des résultats théoriques d'existence et de choix de topologie [40].

6.3.3 Modèles et optimisation d'artères

Participants : Michel Delfour [CRM, Montréal], Marc Thiriet [Projet M3N, Rocquencourt et CNRS], Jean-Paul Zolésio.

On cherche à construire un modèle mathématique de couplage dynamique fluide-structure pour l'aorte en vue du contrôle. Le détail de la géométrie de surface gauche 3D joue un rôle critique dans le caractère tourbillonnaire de l'écoulement qui actionne les valves. Dans un premier temps on propose un modèle et une algorithmique pour le fluide en domaine non cylindrique avec une condition de frontière libre en pression, ce travail a donné lieu à un premier rapport du CRM avec Michel Delfour, [39].

6.3.4 Optimisation de coques élastiques

Participants : John Cagnol, Jean-Paul Zolésio.

Il s'agit de la modélisation et du contrôle des vibrations de coques élastiques précontraintes, un problème soulevé par le déploiement de panneaux solaires d'un satellite. On a calculé le gradient par rapport à la forme et établi des estimations sur les contraintes normales au bord [16],[17].

6.3.5 Stabilisation de système élasto-acoustique

Participants : John Cagnol, Pierre Dubois, Dominique Lesselier [Supélec], Mike Polis [Oakland University], Raja Dziri [Lamsin, Tunis], Irena Lasiecka [University of Virginia], Catherine Lebiedzik [University of Virginia], Jean-Paul Zolésio.

Il s'agit d'un travail récurrent concernant le contrôle du son dans une enceinte dont les parois sont modélisées par des coques élastiques en géométrie intrinsèque. Ce travail a été en partie réalisé grâce à une invitation de six mois de Raja Dziri à Oakland University [28] [15].

6.3.6 Contrôle de frontières mobiles, couplages fluide- structure, frontières libres et dynamiques

Participants : Jamel Ferchichi, Raja Dziri [Lamsin, Tunis], Marwan Moubachir [Ecole des Ponts], Jean-Paul Zolésio.

On étudie formellement la question du contrôle de frontières libres soulevée par la modélisation de problèmes de laminage et de couplage fluide-structure en ingénierie mécanique (ponts suspendus). L'utilisation du champ transverse conduit à des états adjoints eulériens exprimés en variables intrinsèques [37] [42]. Des résultats d'existence en régularité minimale ont été obtenus dans le cas d'équations de Navier-Stokes en géométrie dynamique non cylindrique [43].

6.3.7 Contrôle et frontière libre dans les écoulements visco-plasto-thermiques

Participants : Jamel Ferchichi, Jean-Paul Zolésio.

Le système des équations d'un écoulement visco-plastique (loi de Norton-Hoff dynamique pour un polymère) couplé à l'équation de la chaleur admet des solutions qui ne sont pas différentiables par rapport aux paramètres de contrôle (paramètres de mise en forme). En conséquence, l'utilisation de méthodes de pénalisation-lagrangien conduisent à définir une "fonctionnelle de pessimisation" différentiable et à un concept d'optimalité faible [45],[44].

6.3.8 Quantum Control

Participants : Michel Delfour [CRM, Montréal], Jean-Paul Zolésio.

A l'occasion d'une conférence invitée à la conférence Quantum Control, Mathematical Challenges, Montréal 6-11 Octobre 2002, on a développé un modèle eulérien tenant compte des liaisons coulombiennes dans les hamiltoniens quantiques pour un grand nombre de particules avec une loi de contrôle agissant non linéairement sous la forme d'une force f proportionnelle aux vitesses $f = V \times E$ où E est un champ électrique appliqué par un laser.

6.4 Plates-formes coopératives

Participants : Martial Mancip, Toan Nguyen, Pierre Pronchery.

Les principales activités du projet dans ce domaine sont développées à l'UR Rhône-Alpes. Une présentation en est faite sur le serveur Web local : http ://www.inrialpes.fr/opale. Les activités de développement et d'expérimentation se sont renforcées dans le domaine du couplage de codes parallèles dans le cadre de l'ARC COUPLAGE, en particulier pour l'exécution sur grilles de grappes connectées à des réseaux à très haut débit (http ://www.inrialpes.fr/sinus/couplage). L'objectif est d'étudier les techniques de couplage de codes parallèles dans des applications de simulation numérique réparties sur des réseaux de grappes de PC.

Les travaux portent en particulier sur l'extension de la plateforme CAST pour l'allocation dynamique de ressources dans les applications de simulation sur grilles de grappes de PC. Afin de contribuer à ces travaux, le projet OPALE a bénéficié d'un post-doctorant dans le cadre de l'ARC COUPLAGE jusqu'en juin 2002 [48]. Voir Figures 1-2 ; Plateforme CAST, voir : http ://www.inrialpes.fr/sinus/cast.

Ces travaux ont donné lieu aux conférences [30] [32] [31] et à la publication [20].

Une étude a également été proposée dans la thèse de J.F. Wang qui montre que le couplage de codes parallèles qui incluent des algorithmes génétiques, alliés à la théorie des jeux, permet de développer de nouvelles méthodes d'optimisation évolutionnaires (optimisation coopérative, compétitive ou hiérarchique). Elles combinent à la fois des méthodes génétiques, de jeux coopératifs ou compétitifs et de critères d'affinement hiérarchiques. Elles se prêtent bien à une parallélisation des algortithmes associés. Ces méthodes accélèrent la convergence et augmentent l'efficacité des processus d'optimisation, au prix d'une complexité de développement certaine. Il est cependant prouvé numériquement que leur exécution sur des architectures parallèles et distribuées est très efficace, sous réserve que leur déploiement tienne compte, pour un jeu donné, des temps de communication inter-processeurs et de la charge instantanée de ceux-ci. En effet, il convient de tenir compte du coût des solveurs associés à l'optimisation, par exemple les solveurs de Navier-Stokes en aérodynamique, qui est très élévé en temps de calcul, et de la taille du problème considéré. Une expérimentation sur un profil à trois corps hypersustenté (aile, bec de bord d'attaque et volets de bord de fuite) et en 2D, où les objectifs sont de maximiser la portance en configuration d'atterrissage et de diminuer la trainée en croisière, a ainsi montré qu'au delà de 150 processeurs, le gain en performance se détériorait. Il sera donc nécessaire, à terme, d'être capable de classer après expérimentation les algorithmes et les jeux de données selon une typologie à définir, afin de réaliser les déploiements optimums sur les configurations matérielles de calcul.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Contrats

Outre les contrats européens (Réseaux Thématiques FLOWNET et INGENET pour lesquels certaines activités de diffusion des résultats sont maintenues, et l'implication dans le Réseau d'Excellence MACSINET), on démarre :

- un nouveau projet européen PROMUVAL de prospective en matière de validation multidisciplinaire en aéronautique ;
- un projet des Ministères de la Recherche et des Transports sur l'Avion Supersonique,
- un contrat avec Dassault Aviation sur la paramétrisation de forme pour l'optimisation aérodynamique (en collaboration avec l'Université de Trieste).

Par ailleurs, d'autres activités industrie-recherche sont en perspective :

- Piaggio Aéronautique France (Nice) : optimisation aérodynamique d'un avion d'affaires (paramétrisation de formes ; optimisation aérodynamique ; calcul des structures ; couplage fluide-structure) ;
- France Télécom : optimisation d'antennes ;
- Thalès (Bagneux) : optimisation des trajectoires les plus menaçantes pour les applications radar.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales et régionales

8.1.1 Actions régionales

Le Projet OPALE a lancé l'Action Color FORMES dans laquelle il collabore avec l'Université de Nice et les projets MIAOU ET GALAAD. Voir 6.2.1 [52] [38] [25].

8.1.2 Actions coopératives nationales

Ces actions sont soutenues par la Direction Scientifique de l'institut. Cette année, Opale participe aux "ARC" suivantes :

COUPLAGE sur le couplage de codes parallèles,

Cette ARC s'est terminée en juin 2002. Elle a eu pour objet l'étude et le développement de plateformes pour la simulation numérique distribuée. Elle était coordonnée par le projet SINUS, puis OPALE, et a impliqué les projets APACHE, NUMATH et PARIS. Dans ce cadre, la plateforme CAST a été étendue pour permettre le couplage de codes parallèles tournant sur grilles de grappes de PC.

Un déploiement de la plateforme CAST a ainsi été réalisé sur le réseau VTHD qui permet l'exécution de codes de simulation et d'optimisation parallèles répartis sur des grappes de PC de l'IRISA, de l'INRIA Rhône-Alpes et de l'INRIA Sophia-Antipolis, connectées au réseau VTHD [ref 1]. Une application d'optimisation de forme aérodynamique a ainsi été réalisée qui permet de coupler un algorithme génétique parallèle tournant sur la grappe de PC de Sophia-Antipolis avec plusieurs instances d'un solveur CFD tournant sur la grappe de PC de l'IRISA et le logiciel CAST tournant sur la grappe de PC de Grenoble. Des mesures de performances ont été également réalisées afin d'optimiser le déploiement des différents codes sur les grappes. Le compte-rendu de ces mesures est disponible à l'URL http ://www.inrialpes.fr/sinus/realisations.html Des outils de contrôle de l'exécution répartie ont également été réalisés afin de permettre à terme d'évaluer les performances de ces applications. On peut ainsi suspendre, relancer ou stopper l'exécution de codes distants, ou obtenir les paramètres système de leur exécution (temps CPU, temps idle, etc). L'objectif est de pouvoir à terme permettre une allocation dynamique de ressources en fonction des besoins et des caractéristiques des applications. Une application de mélange de fluides diphasiques a également été étudiée dans le cadre du stage post-doctoral de Martial Mancip [48].

ICEMA : images du cœur

L'Arc Icema, *Images du Cœur*, pilotée par le projet Sosso et qui a d'abord impliqué les projets Epidaure, Macs, Sinus (dont Opale est l'héritier), associe des méthodes d'imagerie électrocardiographique et ultrasonore 3D à un modèle mathématique du comportement électromécanique du cœur, donné par le couplage de systèmes d'équations aux dérivées partielles. Voir :
`http ://www-rocq.inria.fr/who/Frederique.Clement/icema.html`

Le Projet Opale ne participe pas directement à Icema 2, mais garde un intérêt scientifique pour certaines des questions soulevées par ces problèmes : notamment les problèmes inverses liés à la modélisation des couplages multidisciplinaires et les techniques de réduction de modèles.

8.2 Réseaux et groupes de travail internationaux

Participants : Simon Baudot-Roux, Jean-Antoine Désidéri, Toan Nguyen, Jacques Périaux.

Le projet OPALE 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 avec 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).

Cette année nous avons organisé le 3ème atelier à Marseille conjointement à la Conférence Internationale sur les Ecoulements à Grande Vitesse (*West East High Speed Flow Field Conference*, 22-26 Avril 2002). Les informations techniques, notamment en ce qui concerne les cas-tests d'écoulements étudiés, sont disponibles sur le site suivant : `http22-26({\itWestEastHighSpeedFlowFieldConference}, 22-26Avril2002).://www.inria.fr/sinus/flownet/index.php3`. Par ailleurs, le projet rassemble ces informations sous la forme d'un CD-ROM largement diffusé en Europe.

8.2.2 PROMUVAL

A la suite de FLOWnet, démarre le nouveau Projet Européen PROMUVAL de prospective en matière de validation multidisciplinaire pour l'Aéronautique. Ce projet vise à identifier les nouvelles méthodes numériques et expérimentales pour la vérification et la validation de codes multi-physiques. Le cœur de l'activité du projet est d'installer des groupes d'experts en numérique, expérimentation et modélisation pour différentes applications aéronautiques à plusieurs disciplines (aéroélasticité, aéroacoustique, écoulements thermiques, écoulements contaminés, etc). Ces experts accèderont et contribueront à une nouvelle base de données multidisciplinaire qui permettra d'identifier les problèmes multiphysiques critiques à la validation industrielle. Ce projet européen est un levier pour le montage d'un réseau d'excellence de FP6 portant sur l'optimisation et la conception optimale multidisciplinaire en Aeéronautique auquel la participation du projet est prévue en analyse numérique, plateforme d'intégration et technologies du *grid computing*.

Dans l'immédiat, OPALE est responsable dans Promuval de la prospective en matière de mathématiques appliquées et de plateforme logicielle.

8.2.3 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 OPALE 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. Le projet gère la base de données du réseau dont les cas tests peuvent être consultés sur le site suivant : `http://www.inria.fr/sinus/ingenet/index.php3` ainsi que sur un CD-ROM à la conception duquel l'INRIA a contribué.

8.2.4 Réseau d'Excellence Européen MACSINET

Le Projet participe au démarrage du Réseau d'Excellence Européen MACSINET (*Mathematics, Computing and Simulation in Industry Network*) promu par les Directions DG XIII et

DG XII. Ce réseau est une initiative conjointe des associations ECCOMAS (*European Community for Computational Methods in Applied Sciences*) et ECMI (*European Community of Mathematics for Industry*). Il vise à donner corps à des initiatives européennes pour aborder des challenges industriels multidisciplinaires par les mathématiques, le calcul scientifique à haute performance et la modélisation. Voir le site suivant : `http://www.macsinet.org`.

8.3 Relations bilatérales internationales

Le projet est actuellement impliqué dans les actions suivantes :

Institut Sino-Français Liama **:** coordination (X. 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. Dans ce cadre, J. Périaux a visité le Liama et l'Université de Nankin (Département d'Aéronautique et d'Astronautique, NUAA) et participé à la Conférence organisé à Pékin par l'INRIA (octobre 2002).

Cette année, cette coopération s'est élargie à l'Université de Tsinghua et permettra en 2003 l'accès à de nouveaux moyens de calculs puissants (*grid computing*) au State Key Lab of Scientific and Engineering Computing Institute of Computational Mathematics, CAS.

J. Périaux a contribué au lancement du Programme PRA, dans lequel le projet particepera en 2003 par le calcul rapide de signatures électro-magnétiques d'obstacles aérodynamiques (profils, multi-profils, entrées d'air stylisées, etc) par des méthodes de domaines fictifs, et par des calculs de minimisation de la signature avec de tels solveurs et des algorithmes évolutionnaires (invitation en février 2003 au Mathematishes Forschungsinstitut Oberwolfach, Numerical Techniques for Optimization Problems with PDE Constraints, Feb. 16-22, 2003 sur le sujet suivant : Combining Fictitious Domain and Controllability Methods for the RCS computation and reduction of the electro-magnetic wave scattering on purely reflecting multi-obstacles).

Coopération Franco-Finlandaise J. Périaux a contribué à mettre en place une coopération franco-finlandaise sur le thème des méthodes innovantes pour les technologies avancées. Cette coopération fait intervenir le Department of Mathematical Information Technology (Université de Jyväskyla) et l'Association Franco-Finlandaise pour la Recherche et la Technologie (AFFRST). Cette année deux évènements scientifiques ont été organisés (avec la participation active du projet) dans ce cadre à l'Université de Jyväskyla (13-15 Juin) :

1. Séminaire "Numerical Methods for Scientific Computing, Optimization Methods, Parallel Computing and Applications" ;
2. Conférence "Numerical Methods for Scientific Computing, Variational Problems and Applications".

Le projet a également contribué par deux conférences invitées (J.-A. Désidéri, T. Nguyen).

Par ailleurs, le prochain Séminaire de l'AFFRST sera organisée par le projet à l'INRIA Rhône-Alpes en 2003 et sera focalisé sur les six sujets suivants :

1. Fast methods for virtual reality physics
2. Distributed Multi Disciplinary Optimization Methods
3. Two-grid schemes in fluid mechanics ; theoretical and computational aspects
4. Image restauration by efficient optimization techniques
5. Numerical Methods for Low Noise Design Combining Active/Passive ; noise control
6. Integration Platforms, Databases and Parallel Computing.

8.4 Accueils de chercheurs étrangers

- Alberto Clarich, Université de Trieste : séjour de 3 mois ; interfaçage de la paramétrisation d'une voilure d'avion et du système de CAO (Catia V5), et optimisation de la forme.
- Michel Delfour, CRM Montréal, un mois ; optimisation de forme.
- Raja Dziri, Lamsin, Tunis, 3 semaines ; champ transverse.
- Marios Karakasis, Université d'Athènes : séjour 3 mois, auto-adaptation des territoires dans une stratégie de jeu de Nash pour une optimisation aérodynamique multicritère.
- Roberto Paoli, Université de Rome : séjour d'une semaine dans le cadre de l'activité de validation de codes du réseau thématique FLOWNET. Voir 6.1.5.
- Pr. Gilbert Strang, MIT, une semaine (Filtres Multiéchelles).
- Zhi Li Tang, NUAA (Nankin) : séjour Post-doctoral partiellement financé par l'Ambassade de France à Pékin.

9 Diffusion de résultats

9.1 Enseignement universitaire

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

Mastère de Mécanique Numérique :
- Modèles Mathématiques pour la Mécanique (J.-A. Désidéri, 9h) ;
- Méthodes de Volumes Finis (J.-A. Désidéri, 6h et H. Guillard, Projet SMASH, 3h) ;

Ecole des Mines, option automatique :
Introduction aux systèmes de dimension infinie (J.P. Zolésio, 6h).

Ecole Supérieure en Sciences Informatiques (ESSI) :
A. Habbal a assuré le service d'enseignement suivant :
- Analyse (1ère année, 39h) ;
- Eléments Finis (2ème année, 48h) ;
- Méthodes numériques (2ème année, 24h) ;
- Evaluation numérique d'options (3ème année Imafa, 18h).

9.2 Thèses et Stages

Les thèses suivantes ont été soutenues :

Abderrahmane Habbal , Habilitation à Diriger des Recherches (Université de Nice Sophia Antipolis, Novembre 2002) : *Etude de quelques problèmes de contrôle par la forme et d'homogénéisation de structures oscillantes.*

Christophe Ramananjaona , (Université de Paris Orsay, Octobre 2002, co-encadrement)

Marwan Boumachir , (Ecole des Ponts, Novembre 2002, co-encadrement)

Jamel Ferchichi , (Ecole des Mines, Décembre 2002, encadrement) *Optimisation de forme dans les écoulements visco-élasto-plastiques.*

Les stagiaires suivants ont été encadrés par le projet :

Simon Baudot-Roux , université de Montpellier, *Développement de bases de données* (avec le SEMIR),

Alberto Clarich , université de Trieste, *Auto-adaptation de la paramétrisation dans une optimisation*,

Marios Karakasis , université d'Athènes, *Adaptation des directions de recherche dans une optimisation par réseau de neurones*,

Martial Mancip , PostDoc INRIA, *Couplage de codes hétérogènes*,

Jacques Morice , MathMeca, Bordeaux, *Formes Géométriques Principales pour l'Optimisation.*

Pierre Pronchery , IUT Informatique, Grenoble, *Interface pour le couplage de codes.*

9.3 Animation de la recherche

J.-A. Désidéri a les responsabilités suivantes :

- membre du Comité d'Orientation et du Secrétariat Exécutif (COSE) du Réseau de Recherche et d'Innovation Technologique (RRIT) "Recherche Aéronautique sur le Supersonique" (co-animateur avec C. Michaut, ONERA, de la filière "Optimisation Aérodynamique") ;
- membre du Comité Scientifique et Technique (CST) auprès du Centre National de Recherche Technologique "Aéronautique et Espace" (CNRT-AE au Cerfacs, Toulouse) ;
- conseiller du CNES en matière de simulation numérique des écoulements hypersoniques ;
- direction du Comité Patronage de l'Unité de Recherche (avec Gérard Boudol) ;
- co-organisation d'EUROGEN 2003 (*Evolutionary Methods for Design, Optimisation and Control with Applications to Industrial and Societal Problems, Barcelona, Spain, September 15-17, 2003*) ;

et a donné des conférences invitées au Séminaire Franco-Finlandais sur le Calcul Scientifique (Jyvaskyla, Juin 2002 ; *Multi-objective optimization in aerodynamics by game strategies*), et au workshop MACSInet sur la réduction de modèle (Milan, 12-13 Décembre 2002 ; *Review of POD techniques, Neural Networks and Embedded-Space Optimization Algorithms*).

T. Nguyen a présenté une conférence invitée au congrès International Conference on Applied Parallel Computing, PARA'O2 (Helsinki-Espoo, Juin 2002). Il était également conférencier invité au Séminaire Franco-Finlandais sur le Calcul Scientifique (Jyvaskyla, Juin 2002).

Jean-Paul Zolésio préside le groupe 7.2 de la fédération internationale IFIP et organise la conférence du groupe TC7-IFIP à Sophia Antipolis en juillet 2003, et a donné plusieurs conférences invitées :

– à la Conference *MIA02*,

– à l'Institut Henri Poincaré (Août 2002 ; *optimisation de forme*

– à Quantum Control (Montréal 6-11 octobre 2002) à l'occasion d'un séjour de professeur invité au Centre de Recherche Mathématique de l'Université de Montréal (Septembre-Octobre 2002) ;

– au JINA2002 (journée internationale d'antennes de Nice, 2 présentations).

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

[1] J. CAGNOL, M. P. POLIS, J.-P. ZOLÉSIO (éditeurs), *Shape optimization and optimal design*, *Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics*, *216*, New York, Marcel Dekker Inc., 2001, ii+442p.

[2] M. DELFOUR, J.-P. ZOLÉSIO, *Shapes and geometries*, *Advances in Design and Control*, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, PA, 2001, Analysis, differential calculus, and optimization.

[3] F. DESAINT, J.-P. ZOLÉSIO, « Manifold derivative in the Laplace-Beltrami equation », *J. Funct. Anal. 151*, 1, 1997, p. 234–269.

[4] J.-A. DÉSIDÉRI, *Modèles discrets et schémas itératifs. Application aux algorithmes multigrilles et multidomaines*, Editions Hermès, Paris, 1998.

[5] R. GUETARI, G.-T. NGUYEN, « A computer-aided specification tool for concurent engineering design », *in : Proc. 3rd Intl. Conf. on Concurrent Engineering : Research and Applications*, Toronto (Canada), 1996.

[6] A. HABBAL, « Boundary layer homogenization for periodic oscillating boundaries », *Control and Cybernetics 30*, 3, 2001, p. 279–301.

[7] A. IOLLO, A. DERVIEUX, S. LANTERI, J.-A. DÉSIDÉRI, « Stability Properties of POD-Galerkin Approximations for the Compressible Navier-Stokes Equations », *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2000, 13 : 377-396.

[8] B. KAWOHL, O. PIRONNEAU, L. TARTAR, J.-P. ZOLÉSIO, *Optimal shape design*, *Lecture Notes in Mathematics*, *1740*, Springer-Verlag, Berlin, 2000, Lectures given at the Joint C.I.M./C.I.M.E. Summer School held in Tróia, June 1–6, 1998, Edited by A. Cellina and A. Ornelas, Fondazione C.I.M.E.. [C.I.M.E. Foundation].

[9] N. MARCO, S. LANTERI, J.-A. DÉSIDÉRI, B. MANTEL, J. PÉRIAUX, « A parallelized Genetic Algorithm for a 2-D shape optimum design problem », *Surveys on Mathematics for Industry 9*, 2000, p. 207–221.

[10] G.-T. NGUYEN, *Ingénierie objet*, InterEditions, 1997, ch. 5 : Objets et évolution.

[11] G.-T. NGUYEN, « Distributed integration platforms for parallel CFD applications », *in : European Parallel CFD Conference*, Amsterdam (NL), 2001.

[12] G.-T. NGUYEN, « Distributed integration platforms for parallel multidiscipline applications », *in : French-Finnish seminar on Innovative methods for advanced technologies*, CSC. Helsinki (Finlande), 2001.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

[13] J. Ferchichi, *Optimisation de forme dans les écoulements visco-élasto-plastiques*, thèse de doctorat, Ecole des Mines, Décembre 2002.

[14] A. Habbal, *Etude de quelques problèmes de contrôle par la forme et d'homogénéisation de structures oscillantes*, Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université de Nice – Sophia Antipolis, Novembre 2002.

Articles et chapitres de livre

[15] J. Cagnol, I. Lasiecka, C. Lebiedzik, J.-P. Zolésio, « Uniform stability in structural acoustic models with flexible curved walls », *Journal of Differential Equations 186*, 2002, p. 88–121.

[16] J. Cagnol, J.-P. Zolésio, « Vibration of a pre-constrained elastic thin shell. I. Modeling and regularity of the solutions », *C. R. Math. Acad. Sci. Paris 334*, 2, 2002, p. 161–166.

[17] J. Cagnol, J.-P. Zolésio, « Vibration of a pre-constrained elastic thin shell. II. Intrinsic exact model », *C. R. Math. Acad. Sci. Paris 334*, 3, 2002, p. 251–256.

[18] A. Habbal, « Generation of Optimal Periodic Oscillations for the Control of Boundary Layers. », *SIAM Journal on Control and Optimization 41*, 3, 2002, p. 712–722.

[19] M. Marini, R. Paoli, F. Grasso, J. Périaux, J.-A. Désidéri, « Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics : the FLOWnet Database Experience », *JSME International Journal 45*, 1, 2002, p. 15–22.

[20] G.-T. Nguyen, C. Plumejeaud, *Calcul réparti à grande échelle, F. Baude Ed.*, 2002, ch. Intégration d'applications multidisciplines dans les environnements de metacomputing, Hermès Lavoisier Publish.

[21] C. Ramananjaona, M. Lambert, D. Lesselier, J.-P. Zolésio, « Shape reconstruction of buried obstacles by controlled evolution of a level set : from a min-max formulation to numerical experimentation », *Inverse Problems 17*, 4, 2002, p. 1087–1111, An International Journal on the Theory and Practice of Inverse Problems, Inverse Methods and Computerized Inversion of Data.

[22] J. Wang, J. Périaux, M. Sefrioui, « Parallel evolutionary algorithms for optimization problems in aerospace engineering », *Journal of Computational and Applied Mathematics, Elsevier*, 149, 2002, p. 155–169.

[23] J. Wang, J. Périaux, « Search Space Decomposition of Nash/Stackelberg games using GAs for Multi-Point design Optimization in Aerodynamics », *in : Domain Decomposition Methods in Sciences and Engineering*, N. Debit, M. Garbey, R. Hoppe, D. Keyes, Y. Kuznetsov, et E. J. Périaux (éditeurs), *A series of Handbooks on Theory and Engineering Applications of computational Methods*, CIMNE, Barcelona,, 2002.

Communications à des congrès, colloques, etc.

[24] J.-A. Désidéri, M. Marini, J. Périaux, « Validation Databases in Fluid Mechanics : from the European Space Shuttle Program Hermès to the European Thematic Network FLOWnet », *in : NFD'2000 New Trends in Fluid Dynamics, Paris, April 2000*, CIMNE, Barcelona, Spain, 2002. Conférence en l'honneur du 60è anniversaire de P. Perrier.

[25] J.-A. Désidéri, « Hierarchical optimum-shape algorithms using embedded Bézier parameterizations », *in : Finnish-French Seminar on Scientific Computing*, E. Heikkola, O. Pironneau (éditeurs), CIMNE, Barcelona, Spain, Jyväskyla, Finland, 2002. A scientific event honoring Jacques Périaux's 60th birthday.

[26] J.-A. DÉSIDÉRI, J. PÉRIAUX, M. SEFRIOUI, K. SRINIVAS, J. WANG, E. WHITNEY, « Parallel Hierarchical Evolutionary Algorithms and Game Strategies for solving CFD optimization problems in Aeronautics », *in : Proceedings of the ICCFD02 Conference*, Springer Verlag, Sydney, July 2002. to appear.

[27] P. DUBOIS, J.-P. DAMIANO, C. DEDEBAN, J.-P. ZOLÉSIO, « Applications de la dérivation formelle en fréquence d'une formulation intégrale basée sur la réaction de Rumsey pour l'étude de source », *in : Journées Internationales d'antennes de Nice*, S.E.E., 2002.

[28] R. DZIRI, M. POLIS, J.-P. ZOLÉSIO, « Shape Control of Noise in a Structural Acoustic System », *in : World Congress of the IFAC*, Barcelona, Spain, 21-26 July 2002. CD-Rom of the 15th Triennal World Congress.

[29] B. GALVAN, D. GREINER, J. PÉRIAUX, M. SEFRIOUI, G. WINTER, « Parallel Evolutionary computation for solving complex CFD optimization problems : a review and some nozzle applications », *in : Proceedings of the Parallel CFD02 Conference*, ELSEVIER, Nara, Japan, May 2002. to appear.

[30] G.-T. NGUYEN, C. PLUMEJEAUD, « An integration platform for metacomputing applications », *in : International Conference on Computational Science*, P. Sloot, J. Dongarra (éditeurs), Springer, Amsterdam, Hollande, 2002.

[31] G.-T. NGUYEN, « Distributed parallel multidiscipline applications », *in : French-Finnish Seminar on Scientific Computing*, *II*, 4, AFFRST, Jyväskyla, Finlande, 2002. Conférence invitée.

[32] G.-T. NGUYEN, « Integration of multidiscipline applications in GRID-computing environments », *in : 6th International Conference on Applied Parallel Computing*, 2002. Conférence invitée.

[33] C. RAMANANJAONA, J.-P. ZOLÉSIO, M. LAMBERT, D. LESSELIER, « Nonlinearized Inversion of Buried Scatterers : Fast Marching and Topology-free Solution Methods », *in : Journées Internationales d'antennes de Nice*, S.E.E., 2002.

[34] Z. L. TANG, J.-A. DÉSIDÉRI, J. PÉRIAUX, « Distributed Optimization using Virtual and Real Game Strategies for Aerodynamic Multi-Objective Design », *in : West East High Speed Flow Fields 2002*, D. Z. et al. (éditeur), CIMNE, Barcelona, Spain, Marseille, France, 2002.

[35] J. WANG, J. PÉRIAUX, P.THOMAS, « Parallel hierarchical Nash/Gas for lift optimization problems », *in : Proceedings of the EUROGEN01 Conference*, K. Giannakoglou, D. Tsahalis, J. Périaux, K.Papailiou, T. Fogarty (éditeurs), *A series of Handbooks on Theory and Engineering Applications of computational Methods*, CIMNE, Barcelona, Athens, Greece, 2002.

[36] E. WHITNEY, L. GONZALEZ, K. SRINIVAS, J. PÉRIAUX, « Multi-criteria Aerodynamic Shapes Design Problems in CFD using a Modern Evolutionary Algorithm on Distributed Computers », *in : Proceedings of the ICCFD02 Conference*, Springer Verlag, Sydney, July 2002. to appear.

Rapports de recherche et publications internes

[37] M. BOUBACHIR, J.-P. ZOLÉSIO, « Optimal control of fluid-structure interaction systems : the case of a rigid solid », *Rapport de recherche n°4611*, INRIA, october 2002.

[38] A. CLARICH, J.-A. DÉSIDÉRI, « Self-adaptive parameterisation for aerodynamic optimum-shape design », *Rapport de Recherche n°4428*, INRIA, March 2002.

[39] M. DELFOUR, J.-P. ZOLÉSIO, « Dynamical free boundary problem for an incompressible potential fluid flow in a time-varying domain », *Rapport de recherche n°CRM-2848*, CRM, juin 2002.

[40] M. DELFOUR, J.-P. ZOLÉSIO, « Shape identification via metrics constructed from the oriented distance function », *Rapport de recherche n°CRM-2851*, CRM, juillet 2002.

[41] J.-A. Désidéri, « Constructive Interpolation of Infinite Sequences by Entire Functions », *Rapport de Recherche n°4561*, INRIA, September 2002.

[42] R. Dziri, M. Boubachir, J.-P. Zolésio, « Navier-Stokes dynamical shape control : from state derivative to Min-Max principle », *Rapport de recherche n°4610*, INRIA, november 2002.

[43] R. Dziri, J.-P. Zolésio, « Tube Derivative and Shape-Newton Method », *Rapport de recherche*, INRIA, november 2002.

[44] J. Ferchichi, J.-P. Zolésio, « Free Boundary Problemin Norton-Hoff Steady Flow with Thermal Effects », *Rapport de recherche n°4417*, INRIA, mars 2002.

[45] J. Ferchichi, J.-P. Zolésio, « Study of the Quasi-Static Norton-Hoff Heat Problem », *Rapport de recherche n°4432*, INRIA, mars 2002.

[46] A. Habbal, « An effective model for critically wrinkled arches », *rapport de recherche n°4546*, INRIA, 2002.

[47] M. Karakasis, J.-A. Désidéri, « Model Reduction and Adaption of Optimum-Shape Design in Aerodynamics by Neural Networks », *Rapport de Recherche n°4503*, INRIA, July 2002.

[48] M. Mancip, « Couplage de codes hétérogènes », *Rapport de stage post-doctoral*, INRIA, Juin 2002.

[49] J. Morice, J.-A. Désidéri, J.-P. Zolésio, « Fonctions Géométriques Principales et Paramétrisation de Forme Adaptée à l'Optimisation en Aérodynamique », *Rapport de Recherche n°4643*, INRIA, Octobre 2002.

[50] P. Pronchery, « Interface pour le couplage de codes », *Rapport de stage*, INRIA, Septembre 2002.

[51] Z. L. Tang, J.-A. Désidéri, J. Périaux, « Distributed Optimization using Virtual and Real Game Strategies for Aerodynamic Design », *Rapport de Recherche n°4543*, INRIA, September 2002.

[52] Z. L. Tang, J.-A. Désidéri, « Towards Self-Adaptive Parameterization of Bézier curves for Airfoil Aerodynamic Design », *Rapport de Recherche n°4572*, INRIA, September 2002.

[53] X. Xu, A. Janka, J.-A. Désidéri, « Cascadic multigrid for the advection-diffusion equation », *Rapport de recherche n°4574*, INRIA, September 2002.

[54] J.-P. Zolésio, « Set Weak Evolution and Transverse Field Variational Applications ans Shape Differential Equation », *Rapport de recherche n°4649*, INRIA, november 2002.