

## *Projet SINUS*

*Simulation Numérique dans les Sciences de l'Ingénieur*

*Sophia Antipolis, Rhône-Alpes*

THÈME 4B

*R* **apport**  
*A* **d'Activité**

2001



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>5</b>
3.1	Méthodes d'approximation . . . . .	5
3.2	Algorithmes de résolution . . . . .	6
3.3	Algorithmes pour l'optimisation . . . . .	9
3.4	Plate-formes d'intégration . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>10</b>
4.1	Panorama . . . . .	10
4.2	Aéronautique . . . . .	11
4.3	Espace . . . . .	11
4.4	Automobile . . . . .	11
4.5	Énergie . . . . .	11
4.6	Autres applications . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>12</b>
5.1	N3S-NATUR . . . . .	12
5.2	AERO . . . . .	12
5.3	CAST . . . . .	12
5.4	THOR . . . . .	12
5.5	BCGA, HBCGA, PARBCGA . . . . .	13
5.6	VIGIE . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>13</b>
6.1	Modélisation et Approximation en Mécanique des Fluides . . . . .	13
6.1.1	Validation numérique en mécanique des fluides . . . . .	13
6.1.2	Adaptation de maillage . . . . .	13
6.1.3	Modélisation numérique d'écoulements turbulents . . . . .	14
6.2	Systèmes de réaction-diffusion liés à l'électrophysiologie du cœur . . . . .	15
6.3	Réduction de modèle . . . . .	16
6.4	Algorithmes d'optimisation et conception optimale de forme . . . . .	17
6.4.1	Théorie des jeux pour la décomposition de domaine . . . . .	17
6.4.2	Optimisation multicritère . . . . .	18
6.4.3	Optimisation multidisciplinaire . . . . .	19
6.4.4	Paramétrisation . . . . .	19
6.5	Optimisation par Grande Evolution de Frontières Géométriques . . . . .	19
6.5.1	Optimisation et identification en électromagnétisme . . . . .	20
6.5.2	Modèles et optimisation d'artères . . . . .	21
6.5.3	Optimisation de coques élastiques . . . . .	21

6.5.4	Contrôle de frontières mobiles, couplages fluide- structure, frontières libres et dynamiques . . . . .	21
6.6	Plate-forme coopérative . . . . .	21
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>22</b>
7.1	Contrats . . . . .	22
<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>22</b>
8.1	Actions nationales et régionales . . . . .	22
8.1.1	Actions régionales . . . . .	22
8.1.2	Actions coopératives nationales . . . . .	22
8.2	Actions européennes . . . . .	24
8.2.1	IDeMAS . . . . .	24
8.3	Réseaux et groupes de travail internationaux . . . . .	25
8.3.1	FLOWNET . . . . .	25
8.3.2	INGENET . . . . .	26
8.3.3	Réseau d'Excellence Européen MACSINET . . . . .	26
8.4	Relations bilatérales internationales . . . . .	27
8.5	Accueils de chercheurs étrangers . . . . .	27
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>27</b>
9.1	Enseignement universitaire . . . . .	27
9.2	Thèses et Stages . . . . .	28
9.3	Animation de la recherche . . . . .	28
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>29</b>

## 1 Composition de l'équipe

### Responsable scientifique

Jean-Antoine Désidéri [DR]

### Assistant(e) de projet

Patricia Maleyran [jusqu'au 30 Octobre 2001]

Philippe Dereymez [à mi-temps, depuis le 23 Octobre 2001]

### Chercheurs Permanents

Alain Dervieux [DR, jusqu'au 31 Janvier 2001]

Abderrahmane Habbal [MdC UNSA, à temps partiel depuis Juillet 2001]

Gia-Toan Nguyen [DR, Grenoble]

Jean-Paul Zolésio [DR CNRS, mis à disposition le 1er Juillet 2001]

### Conseiller scientifique

Jacques Périaux [Dassault Aviation, Direction de la Prospective]

### Ingénieurs experts

Jérôme Blachon [UR de Grenoble, jusqu'au 15 Janvier 2001]

Emmanuel Briand [jusqu'au 30 Juin 2001]

### Ingénieur Associé

Christine Plumejeaud [du 1er octobre 2000 au 30 septembre 2001]

### Chercheurs post-doctorants

Yves Coudière [post-doc ICEMA, jusqu'au 31 Août 2001]

Patrick Dutto [post-doc COUPLAGE, du 1er mars au 30 mai 2001]

Zhi Li Tang [post-doc EGIDE, à partir du 1er Mai 2001]

### Chercheurs doctorants

Pierre Dubois [Ecole des Mines]

Jamel Ferchichi

### Stagiaires

Simon Baudot-Roux [Université de Montpellier]

Hélène Lièvre [ENSAM, Paris]

Mickaël Marchand [Ecole des Mines de Douai]

Julien Oniboni [INSA, Toulouse]

## 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, 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, avec lequel nous avons déjà significativement coopéré. En revanche, notre composante Génie Logiciel a pris son envol hors du projet pour créer le 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).

---

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

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

### 3 Fondements scientifiques

#### 3.1 Méthodes d'approximation

**Mots clés :** élément fini, volume fini, problème de Riemann, théorie TVD, schéma MUSCL, théorie LED, méthode POD.

**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 assez complète 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.

[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.

L'émergence, sous l'impulsion de Rémi Abgrall (université de Bordeaux, ancien de SINUS), Richard Saurel (université de Provence à Marseille) et Hervé Guillard (SINUS), d'une nouvelle famille de méthodes d'approximation décentrées applicables à des écoulement très inhomogènes est une des motivations pour la création du projet SMASH en 2001.

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  $\Delta t$  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 [5], l'analyse théorique des propriétés de convergence [3] et la construction de variantes précises au second-ordre en temps [9].

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<sup>[Hac85].[Wes91]</sup> 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, l'enseignement et l'application de méthodes multigrilles en Mécanique des Fluides constituent un axe important de l'activité du projet [7]-[KLD94]-[2]-[FD98]-[4]. 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 » [8].

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

- 
- [KLD94] B. KOOBUS, M.-H. LALLEMAND, A. DERVIEUX, « Agglomeration multigrid for two-dimensional viscous flows », *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 18, 1994, p. 27–42.
- [FD98] J. FRANCESCETTO, A. DERVIEUX, « A semi-coarsening strategy for unstructured multigrid based on agglomeration », *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 26, 1998, p. 927–957.
- [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.

du premier ordre, non-symétriques, à solutions essentiellement singulières. Dans ce domaine, le 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<sup>[GG93],[Qua90]</sup>. 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<sup>[Xu92]</sup> (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.

L'implication de SINUS dans le développement de *méthodes de gradient* via le calcul d'un *état adjoint* a conduit récemment à la création de TROPICS, un projet focalisé sur la *Différentiation Automatique de programme*, par Laurent Hascoet (ex-SINUS).

SINUS continue de travailler avec TROPICS sur l'assemblage de gradients assisté par ordinateur et avec ESTIME sur la mise en place de stratégies d'optimisation utilisant l'adjoint, avec pour application pilote l'optimisation de forme en aérodynamique.

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 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 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 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 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. Un effort particulier a été entrepris cette année pour permettre leur exécution sur des grilles de grappes de PC connectées à des réseaux à très haut débit.

## 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 ; 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 assise théorique, et notamment notre expertise en approximation et en méthodes multiniveaux et multidomains, 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 N3S-NATUR

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

Le projet est co-fondateur et partenaire du consortium N3S-NATUR. Ce consortium développe pour ses besoins propres le logiciel "propriétaire" N3S-NATUR. Via la participation du projet, l'INRIA est donc codéveloppeur et co-propriétaire de N3S-NATUR. Le consortium regroupe outre l' INRIA les partenaires suivants : École Centrale de Lyon, Électricité de France, Metraflu, Simulog, Snecma, Renault. Le logiciel est constitué d'un noyau généraliste de calcul d'écoulement gazeux (Navier-Stokes, turbulence, combustion, maillages mobiles), et d'extensions à physique plus focalisée sur différents métiers de l'aéronautique et de l'énergie.

Cette année N3S-NATUR a notamment été utilisé intensivement par SINUS dans le cadre d'une collaboration INRIA-SNECMA pour la validation d'une nouvelle approche en maillage adaptatif.

### 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.

Le logiciel AERO est au centre des études de cas réalisées d'une part dans le cadre du consortium Aérostructure et d'autre part dans le cadre du projet européen UNSI.

### 5.3 CAST

**Participants** : Patrick Dutto, Mickael Marchand, Gia-Toan Nguyen, Christine Plumejeaud.

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++. Elle continue à être développée dans le cadre de l'ARC COUPLAGE et du réseau national VTHD. Elle permet désormais de coupler des codes parallèles tournant sur des grilles de grappes de PC.

### 5.4 THOR

**Participants** : Gilles Carte, Emmanuel Briand, 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. Le développement de THOR-MG s'est continué cette année. À noter, l'application de X2Y, bibliothèque multigrille de THOR-MG, à l'interpolation de solutions en adaptation de maillage.

## 5.5 BCGA, HBCGA, PARBCGA

**Participant** : Nathalie Marco [ingénieur expert].

Noyaux d'optimisation par algorithmes génétiques réalisés dans le cadre du projet européen IT-DECISION, mis au standard NAG en vue commercialisation.

## 5.6 VIGIE

**Participant** : Robert Fournier [projet ROBOTVIS].

Ce logiciel continue d'évoluer et d'être l'outil par excellence des réunions scientifiques des différents réseaux dans lesquels SINUS est partie prenante (INGENET, FLOWNET, MACSINET).

# 6 Résultats nouveaux

## 6.1 Modélisation et Approximation en Mécanique des Fluides

### 6.1.1 Validation numérique en mécanique des fluides

**Participants** : Jérôme Blachon, Roberto Paoli [Université de Rome], Jean-Antoine Désidéri, Bruno Koobus, Jacques Périaux.

Cette activité se poursuit dans le cadre du réseau thématique FLOWnet (voir Actions Internationales) et a donné lieu à la coorganisation de l'atelier annuel au DLR Göttingen, à des contributions numériques dans le domaine du couplage fluide-structure installées sur la base de données, ainsi qu'à la publication [37]. Site consultable : <http://www.inria.fr/sinus/flownet/index.php3>.

### 6.1.2 Adaptation de maillage

**Participants** : Yves Coudière, Alain Dervieux, Paul-Louis George [Projet GAMMA], David Leservoisier, Olivier Penanhoat [SNECMA, Villaroche].

Le coût de mise en œuvre des méthodes numériques en calcul scientifique est étroitement

lié à l'ordre de précision de l'approximation. Celui-ci dépend bien évidemment de la méthode elle-même, mais aussi, pour une méthode donnée, de la régularité des solutions recherchées. En particulier, les singularités observées dans les solutions diminuent la précision des méthodes.

Depuis quelques années, nous avons cherché à mettre en évidence le fait que les méthodes de maillage adaptatif, et seulement celles-ci, permettent de retrouver, dans les régions où la solution est irrégulière, l'ordre de précision théorique, tel qu'on le définit dans la région où la solution est régulière.

En complément des travaux de B. Palmerio (U. de Nice Sophia-Antipolis), nous étudions les limites des techniques de raffinement par divisions isotropes (du type AMR – *Automatic Mesh Refinement*) : l'ordre de précision ne peut dépasser 2 en 2D, et 3/2 en 3D, quelle que soit la méthode numérique employée [DLPY00]. Ce résultat, dont une version plus complète fait l'objet d'un article en cours de rédaction, constitue une motivation supplémentaire pour 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, le projet GAMMA, et le projet SINUS.

Une nouvelle approche théorique, appelée *modèle de la métrique continue* ouvre la voie à la détermination théorique du meilleur senseur d'adaptation, c'est à dire du champ spécifiant la finesse locale du maillage. Ce travail avait été présenté au congrès ICCFD 2000 [DLPY00] et un article est en préparation.

D'autre part, après avoir démontré les qualités spécifiques de convergence des méthodes adaptatives vers les solutions continues, nous avons commencé la mise en place d'une méthodologie de la *certification des calculs numériques* reposant sur le contrôle de l'ordre de convergence vers la solution continue. Il s'agit du sujet central de la thèse de David Leservoisier. Ce travail, également présenté au congrès ICCFD 2000 [LGPD00] fait l'objet d'une rédaction détaillée pour un rapport INRIA.

### 6.1.3 Modélisation numérique d'écoulements turbulents

**Participants** : Emmanuel Briand, Hervé Guillard [Projet SMASH], Stéphane Lanteri [Projet CAIMAN], Alain Dervieux [Projet TROPICS].

La participation du Projet SINUS au projet Européen IDEMAS à titre d'expert en multigrilles s'est conclue avec ce projet par des travaux de mise en œuvre des multigrilles sur des modèles turbulents

---

[DLPY00] A. DERVIEUX, D. LESERVOISIER, B. PALMERIO, Y. COUDIÈRE, « Isotropic and Anisotropic Adaptive meshes : Models and Convergence Properties », *in* : *CFD21*, Kyoto, Japon, 2000.

[LGPD00] D. LESERVOISIER, P.-L. GEORGE, O. PENANHOAT, A. DERVIEUX, « Mesh Adptation as a tool for certified numerics », *in* : *ICCFD*, Kyoto, Japon, 2000.



## 6.2 Systèmes de réaction-diffusion liés à l'électrophysiologie du cœur

**Participants :** Yves Coudière, Alain Dervieux, Jean-Antoine Désidéri, Julien Oniboni.

Les systèmes d'EDP de type « réaction-diffusion », étudiés par SINUS depuis de nombreuses années dans le cadre de problèmes de combustion, ont aussi une grande importance dans les problèmes de physiologie.

Ainsi les retrouvons nous dans les modèles de propagation de l'influx électrique dans le muscle cardiaque, qui apparaît comme sujet dans l'ARC ICEMA à laquelle SINUS participe.

Dans ce domaine, une première étude sur des modèles unidimensionnels simplifiés (équations de *FitzHugh Nagumo*) a permis :

- d'identifier quelques comportements des ondes électriques se propageant dans le muscle cardiaque, à travers un travail bibliographique et une étude numérique (voir <http://www-sop.inria.fr/sinus/personnel/Yves.Coudiere> ;
- de fixer pour un temps le modèle choisi pour les développements réalisés dans le cadre de l'ARC ICEMA,
- de déterminer la méthode numérique utilisée,
- dernièrement, de tester la technique de réduction de modèle POD dans ce cadre (stage de J. Oniboni, rapport en cours).

Grâce au soutien des projets MACS et GAMMA pour la conception de maillages « anatomiques », SOSSO pour l'aspect modélisation, et EPIDAURE pour la visualisation, une première version d'un logiciel de simulation de la propagation en 3D de l'influx cardiaque a été réalisée. Celui-ci prend en compte la géométrie 3D du myocarde, l'anisotropie des phénomènes due à l'enroulement des fibres musculaires, et tente de rendre de manière réaliste l'initiation de cette propagation (depuis le nœud sinusal).

Ces travaux ont fait l'objet de présentations à une conférence d'imagerie médicale [41], et à un workshop [21]. Un article complet exposant ces résultats sera soumis très prochainement.

La version suivante, en cours de réalisation devrait bénéficier d'améliorations logicielles (lecture de la structure de donnée de `Yav++`, assignation locale des paramètres de l'EDP, discrétisation en temps plus efficace) et d'améliorations possibles du modèle (modèle à trois équations de M. Sorine, ou plus complet encore).

Toutefois, une innovation conceptuelle sur le plan des mathématiques est nécessaire pour aller encore plus loin, à savoir préciser les parties du modèle anatomique ou physiologique qui sont encore floues, en l'absence de données expérimentales précises, ou même techniquement réalisables à l'heure actuelle, tel que la localisation du réseau spécial de conduction. Il s'agira ici de résoudre des problèmes d'identification de paramètres dans des systèmes pluridisciplinaires.

Finalement, un stage (J. Oniboni) a permis de tester la mise en place de la POD pour ce

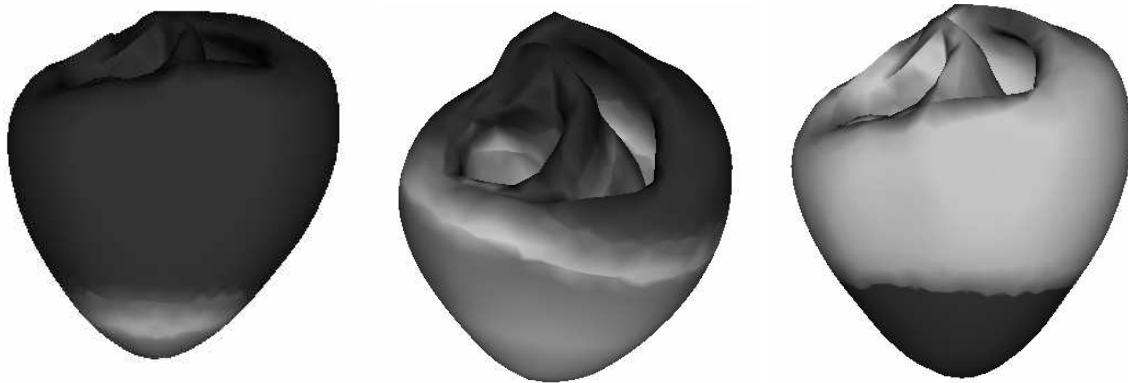


FIG. 1 – Potentiel 3D à la surface du cœur

problème, comme cela était prévu initialement dans le cadre de l'ARC ICEMA. Les premiers résultats sont assez concluants et très intéressants dans la perspective d'une mise en œuvre tridimensionnelle [48].

### 6.3 Réduction de modèle

**Participants :** Yves Coudière, Alain Dervieux, Jean-Antoine Désidéri, Julien Oniboni, 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, mais 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.

Dans le cadre d'une convention CIFRE avec Dassault Aviation, G. Vigo a adapté la méthode POD au calcul d'écoulements visqueux instationnaires. L'approche utilisée minimise le coût du calcul qui est, dans certains cas, mille fois plus petit que le coût en éléments finis. Trois modèles ont été mis au point, d'Euler jusqu'à Navier-Stokes couplé à un modèle de turbulence, et appliqués à des problèmes de contrôle optimal.

Une synthèse est en cours de préparation pour rassembler les connaissances acquises sur la POD comme approximation spatiale.

La qualité des résultats obtenus a motivé une nouvelle étude, dans le cadre d'une Action de Recherche Coopérative intitulée ICEMA. Les contraintes dans ce cas sont liées à la complexité dynamique des phénomènes électromécaniques dans le myocarde, et à la vitesse nécessaire du calcul. Elles justifient l'emploi d'une technique de réduction de modèle.

Une étude monodimensionnelle (stage de J. Oniboni) a démontré l'intérêt et les limites de la POD dans ce cas. Ces résultats seront exposés dans un rapport INRIA résumant l'activité de SINUS dans le cadre de l'ARC ICEMA [48].

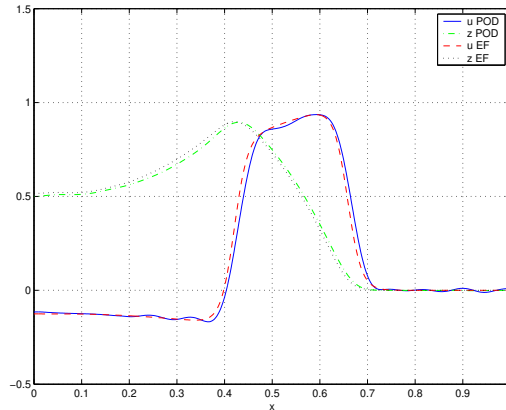


FIG. 2 – Propagation 1D de l'excitation cardiaque : méthode POD

## 6.4 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).

### 6.4.1 Théorie des jeux pour la décomposition de domaine

**Participants :** Hong Quan Chen [Pôle Scientifique Dassault Aviation, NUAA], Jean-Antoine Désidéri, Akin Ecer [IUPUI, USA], Abderrahmane Habbal, Nathalie Marco-Blaszca [Ingénieur expert], Jacques Périaux [Dassault Aviation], Mourad Sefrioui [Pôle Scientifique Dassault Aviation], E. Whitney [USYD].

Au plan conceptuel, on aimerait pouvoir identifier, dans une optimisation complexe couplant plusieurs applications par multidisciplinarité, décomposition de domaine ou calcul distribué, quelle est l'information minimale qui doit être échangée par les « joueurs » qui calculent indépendamment.

Pour aborder cette difficile question théorique, on a d'abord étudié le problème du couplage de sous-domaines régis par une équation elliptique, lorsque le raccord est effectué par moindres

carrés sur une partie seulement du recouvrement. Suivant le choix qui est fait de cette partie, on observe des comportements différents de convergence, soulevant même des questions d'unicité de la solution. Voir [31].

Au plan des applications, ces concepts ont été utilisés pour construire des méthodes de calcul parallèle par décomposition de domaine [25] [26] [27] [28].

#### 6.4.2 Optimisation multicritère

**Participants** : Hong Quan Chen [Pôle Scientifique Dassault Aviation, NUAA], Jean-Antoine Désidéri, Abderrahmane Habbal, Hélène Lièvre [ENSAM], Nathalie Marco-Blaszca [Ingénieur expert], Jacques Périaux [Dassault Aviation], 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, structurale ou sa signature électromagnétique, notamment. En ce qui concerne l'aérodynamique seule, plusieurs points de vol (décollage, croisière, atterrissage) sont à considérer.

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 correspondants 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 alternative intéressante 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.

N. Marco avait utilisé cette approche « coopérative » dans laquelle les différents critères ne sont pas en conflit, pour optimiser la performance aérodynamique d'un profil d'aile vis-à-vis des critères associés à deux cas de vol. [31]. Pour des problèmes de nature voisine, H.Q. Chen *et al.*, J.F. Wang *et al.* et H. Lièvre *et al.* ont étudié différentes alternatives algorithmiques basées sur des stratégies « compétitives » (jeux de Nash) ou « hiérarchisées » (jeux de Stackelberg) [43] [47]. Enfin, Z.L. Tang *et al.* a utilisé une méthode d'optimisation réalisant une descente basée sur le calcul du gradient exact par l'équation adjointe, pour étudier, dans le cadre d'une stratégie de Nash pour la réduction de traînée d'un profil d'aile en régime croisière en compétition avec la maximisation de portance en régime de décollage, comment des territoires géométriques pouvaient être systématiquement adaptés aux différents critères pris en considération [42].

### 6.4.3 Optimisation multidisciplinaire

**Participants :** Hong Quan Chen [Pôle Scientifique Dassault Aviation, NUAA], Jean-Antoine Désidéri, Jacques Périaux [Dassault Aviation].

On vise des optimisations multidisciplinaires complexes pour lesquelles, dans un premier temps au moins, l'approche globale consistant à déterminer le front des équilibres de Pareto est perçue comme trop coûteuse. On s'intéresse alors aux stratégies de Nash (ou de Stakelberg) comme alternatives. Mathématiquement, le formalisme est comparable à celui de l'optimisation multicritère, mais les applications sont encore plus complexes d'une part parce qu'il faut évaluer des disciplines différentes traitées par des méthodes numériques distinctes (complexité logicielle et de coût), et d'autre part, la répartition des « territoires » et des paramètres de conception n'est pas simple, et constitue un enjeu algorithmique.

Lors de sa visite à l'INRIA, H.Q. Chen avait traité un problème inverse d'optimisation de profil d'aile vis-à-vis de critères aérodynamique (portance) et électromagnétique (section efficace radar) par distribution des paramètres à deux joueurs. Les calculs ont été effectués dans un environnement parallèle MPI. La méthode, bien qu'encore peu générale, met en évidence la faisabilité et l'efficacité de l'approche de Nash pour une application multidisciplinaire. Un article soumis est en cours de finalisation.

### 6.4.4 Paramétrisation

**Participants :** Alberto Clarich [en thèse à l'Université de Trieste], Jean-Antoine Désidéri, Carlo Poloni [Dept. Energétique, Université de Trieste], Zhi Li Tang.

Dans le cadre de l'Action Color FORMES, on cherche, en amont d'études plus appliquées en optimisation de formes, à identifier, sous l'angle de la Théorie de l'Approximation des fonctions, des paramétrisations quasi-optimales pour la représentation de formes, principalement en aérodynamique (profils d'aile). Deux types d'approche sont utilisées pour optimiser la localisation de points de contrôle dans une représentation de Bézier : dans l'une on cherche un meilleur approximant au sens des moindres carrés (approximation directe de la géométrie), dans l'autre, on cherche à adapter l'approximation numérique d'une fonctionnelle de la géométrie (coefficient de trainée ou de portance) par identification à une quadrature de Gauss. L'impact des choix algorithmiques qui en résultent sur la qualité du champ optimisé est évaluée par expérimentation numérique.

Ces études amont, soutenues par Dassault Aviation, sont actuellement en cours d'application pour des problèmes d'optimisation de voilure (aérodynamique tridimensionnelle), en collaboration avec l'Université de Trieste.

## 6.5 Optimisation par Grande Evolution de Frontières Géométriques

En amont de l'algorithmique pour les méthodes d'optimisation de domaines, on considère l'évolution continue  $\Omega_t$  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  $t \rightarrow \infty$ . Un des objectifs numériques est d'éviter l'utilisation de "lisseurs" ad hoc et aussi de développer des méthodes de type "shape-Newton". 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'apparentent à ces techniques. Dans ce cas, on l'applique à l'optimisation topologique.

### Equation différentielle de domaine

On désigne par  $G(\Omega)$  le gradient d'une fonctionnelle de domaine  $J$  en la géométrie  $\Omega$ . Il existe  $s \in \mathbb{R}^+$  tel que  $G(\Omega) \in H^{-s}(D, \mathbb{R}^N)$ , où  $D$  est l'univers contenant l'analyse, par exemple  $D = \mathbb{R}^N$ . 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  $b_\Omega$  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  $\Gamma$ ) 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  $\langle \mathcal{A}\phi, \phi \rangle \geq |\phi|_H^2$  où  $H$  désigne un espace "intermédiaire". On considère alors le problème suivant : étant donné  $\Omega_0$ , trouver un champ non autonome  $V \in C^0([0, \infty[, H^r(D, \mathbb{R}^N)) \cap C([0, \infty[, L^\infty(D, \mathbb{R}^N))$  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.

Les résultats récents se trouvent dans trois livres [6] [11] [12].

#### 6.5.1 Optimisation et identification en électromagnétisme

**Participants** : C. Dedebean [France Telecom], Pierre Dubois [Thèse Ecole des Mines], D. Lesselier [Supelec], Jean-Paul Marmorat [CMA, Ecole des Mines], Jean-Paul Zolesio.

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 » [16].

### 6.5.2 Modèles et optimisation d'artères

**Participants :** Michel Delfour [Université de Montreal], Marc Thiriet [INRIA Rocquencourt et CNRS], Jean-Paul Zolesio.

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.

### 6.5.3 Optimisation de coques élastiques

**Participants :** John Cagnol [Pôle Léonard de Vinci], Jean-Paul Zolesio.

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 [17] [18] [19].

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

**Participants :** J. Ferchichi [Thèse Ecole des Mines], R. Dziri [Lamsin, Tunis], M. Moubachir [Ecole des Ponts], Jean-Paul Zolesio.

On étudie formellement le contrôle de frontières libres soulevés par la modélisation de problèmes de laminage et de couplage fluide-structure en ingénierie mécanique (ponts suspendus) [45] [34] [23] [36] [35] [22] [29].

## 6.6 Plate-forme coopérative

**Participants :** Patrick Dutto, Mickael Marchand, Gia-Toan Nguyen, Christine Plumejeaud.

Les principales activités du projet dans ce domaine sont développées à l'UR Rhône-Alpes. Une présentation en est faite sur un serveur Web local : <http://www.inrialpes.fr/sinus> 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 et du projet VTHD, 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 généraux, des réseaux de stations et des grappes de PC. L'ARC COUPLAGE implique également les projets APACHE, NUMATH et PARIS.

Les travaux portent en particulier sur l'extension de la plateforme CAST dans le cadre du projet VTHD pour l'exécution des applications de simulation sur grilles de grappes de PC. Afin de contribuer à ces travaux, le projet SINUS a bénéficié d'un poste d'ingénieur associé jusqu'en septembre 2001. Voir Figures 3-4; Plateforme CAST, voir : <http://www.inrialpes.fr/sinus/cast>.

Ces travaux ont donné lieu aux conférences [38] [40] [39] et à la publication [20].

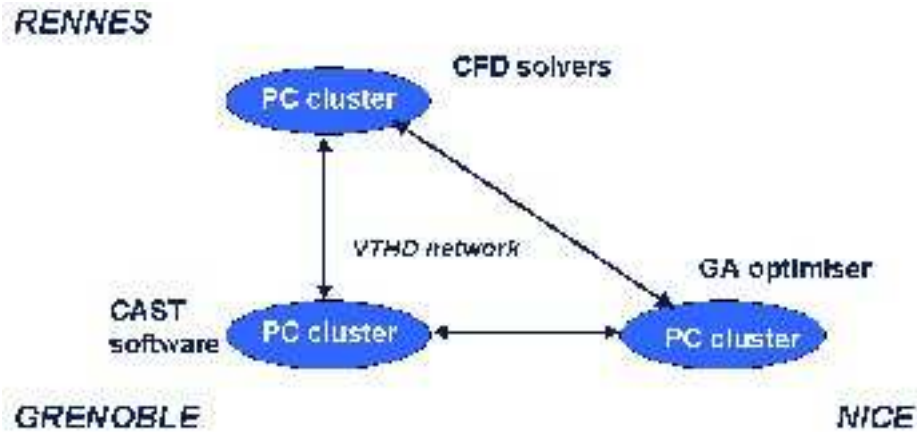


FIG. 3 – Mise en réseau VTHD des grappes de PCs.

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 7.1 Contrats

Outre les contrats européens (Réseaux Thématiques FLOWNET et INGENET et Réseau d'Excellence MACSINET), le projet engage des partenariats avec les industriels suivants :

- Dassault Aviation : Paramétrisation de formes (en collaboration avec l'Université de Trieste) ;
- France Telecom : optimisation d'antennes ;
- Thales (Bagneux) : optimisation des trajectoires les plus menaçantes en Radar.

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Actions nationales et régionales

#### 8.1.1 Actions régionales

Le Projet SINUS a lancé l'Action Color FORMES dans laquelle on collabore avec l'Université de Nice et les projets MIAOU ET GALAAD. Voir 6.4.4.

#### 8.1.2 Actions coopératives nationales

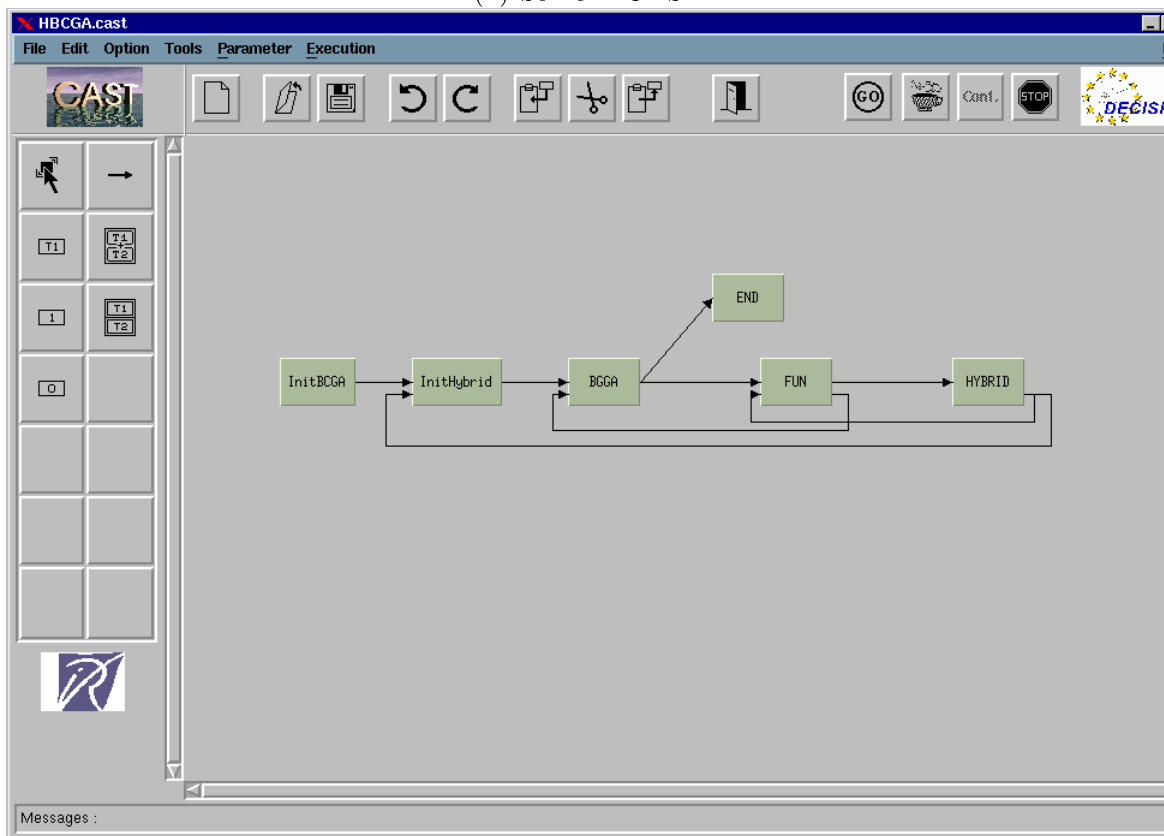
Ces actions sont soutenues par la Direction Scientifique de l'institut. Cette année, SINUS participe aux "ARC" suivantes :

COUPLAGE sur le couplage de codes parallèles,

Cette ARC développe une plateforme pour la simulation numérique distribuée. Elle est coordonnée par le projet SINUS et implique les projets APACHE, NUMATH et PARIS. Dans ce cadre, la plateforme CAST a été étendue pour permettre le couplage de codes parallèles tournant sur des grilles de grappes de PC.



(a) Serveur CAST



(b) Champs initial et optimisé de nombre de Mach

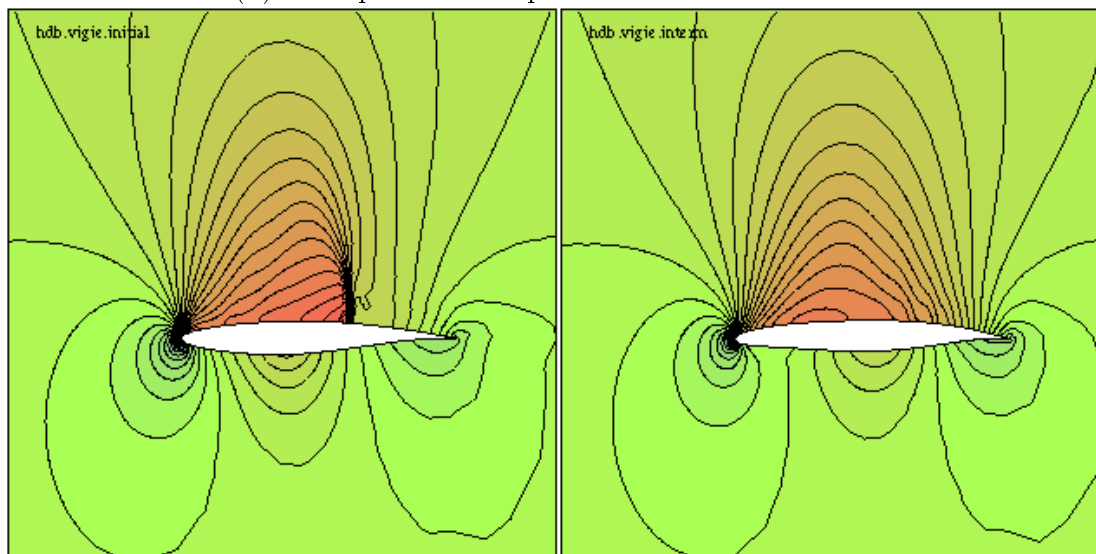


FIG. 4 – Algorithme d’optimisation hybride gradient-génétique en démonstration sur la plateforme du projet européen DECISION ; noter que la diminution de traînée résulte de la quasi-disparition du choc sur l’extrados du profil d’aile.

VTHD sur les calculs sur réseaux à très haut débit.

Un déploiement de la plateforme CAST a été réalisé sur le réseau VTHD qui permet l'exécution de codes de simulation et d'optimisation parallèles répartis sur les 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. Ceci a été réalisé dans le cadre du stage de Mickael Marchand.

ICEMA : images du cœur

L'ARC ICEMA (EPIDAURE, MACS, SINUS, SOSSO) propose d'associer 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>

Dans ce cadre, les travaux réalisés par SINUS sont décrits dans les parties concernant la modélisation et la simulation de l'excitation cardiaque, et la technique de réduction de modèle POD.

## 8.2 Actions européennes

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

### 8.2.1 IDeMAS

**Participants :** Emmanuel Briand, 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 Simulations*) 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. La dernière étape de IDEMAS est entamée avec le démarrage à l'INRIA de la dernière phase de développement de THOR-MG, qui consistera à adapter la formulation multi-grille au calcul d'écoulements turbulents.

### 8.3 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 :

#### 8.3.1 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 l'atelier a eu lieu au DLR, Göttingen, les 7 et 8 février et a été couplé avec l'atelier du réseau thématique PIVNET (*Particle Image Velocimetry*). 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>. Un séminaire de démonstration de ces cas-tests est prévu les 24-25 janvier 2002 au CIRA (*Centro Italianp per la Ricerche Aerospaziale*).

### 8.3.2 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 troisième atelier du réseau s'est tenu à l'université de Las Palmas (co-coordonateur du réseau) les 13 et 14 décembre 2000, en s'appuyant 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>. Par ailleurs, une journée de démonstration a été organisée à Bruxelles le 8 Juin 2001 [40].

### 8.3.3 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> (géré par le projet).

J.-A. Désidéri et J. Périaux sont membres du Comité Exécutif, respectivement en tant que chargé de l'infrastructure et responsable de la liaison avec l'industrie.

Le projet a été sollicité pour coordonner les activités techniques du Groupe de Travail en Acoustique [33].

## 8.4 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 ICES a Pékin en Mars 2001.

**Action intégrée avec le Maroc :** en cours de mise en place.

**Coopération Franco-Finlandaise** Le projet (J.-A. Désidéri, T. Nguyen et J. Périaux) a participé les 15-16 Novembre, à Helsinki, au lancement du projet de coopération franco-finlandais *Innovative Tools for Scientific Computing* associant le CNRS (Paris VI), le Pôle Scientifique de Dassault Aviation et l'INRIA à l'Université de Jyväskylä, Nokia et le Centre for Scientific Computing (CSC). Le Projet participe à deux groupes de travail scientifiques du réseau (optimisation et plates-formes), mais également, en liaison avec le CSC, coordonnera l'installation de la base de données numérique du réseau franco-finlandais.

## 8.5 Accueils de chercheurs étrangers

- Roberto Paoli, Université de Rome : séjour d'un mois dans le cadre de l'activité de validation de codes du réseau thématique FLOWNET. Voir 6.1.1.
- Zhi Li Tang, NUAA (Nankin) : séjour Post-doctoral partiellement financé par l'Ambassade de France à Pékin.
- Alberto Clarich, Université de Trieste : séjour prévu de 3 mois, démarrage en fin d'année. Sujet : Optimisation de voilure.
- Marios Karakasis, Université d'Athènes : séjour prévu de 3 mois, démarrage en fin d'année. Sujet : identification de territoires optimaux dans une approche de Nash.
- Josiane Paoli, Pôle scientifique de Dassault Aviation : séjour prévu de 3 mois, démarrage en fin d'année. Sujet : optimisation couplée fluide/électromagnétisme.

# 9 Diffusion de résultats

## 9.1 Enseignement universitaire

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

**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) ;

- Méthodes de Volumes Finis, 6h (J.-A. Désidéri et H. Guillard) ;

**Ecole de Printemps de Mécanique des Fluides Numérique du CNRS (Aussois)** –  
Méthodes Multigrilles, 4h (J.-A. Désidéri)

## 9.2 Thèses et Stages

Les stagiaires suivants ont été encadrés par le projet :

MICKAEL MARCHAND , *Controlle de processus pour l'exécution répartie sur grilles de grappes de PC*,

SIMON BAUDOT-ROUX , université de Montpellier, *Développement de bases de données* (avec le SEMIR),

HÉLÈNE LIÈVRE , ENSAM, Paris, *Optimisation multicritère par des algorithmes de Nash*,

JULIEN ONIBONI , INSA, Toulouse, *Réduction de modèle pour les images du cœur* (Action Coopérative ICEMA).

## 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 :

Atelier FLOWNET/PIVNET (DLR, Göttingen, 15-16 Février 2001)

INGENET Day (Bruxelles, 7 Juin 2001)

EUROGEN 2001, Athènes, 19-21 Septembre

Atelier ACOUSTIQUE, Pôle Léonard de Vinci, 27-28 Septembre 2001, dans le cadre de MAC-SInet

SHAPE ANALYSIS, Sessions I, II, and III, SIAM Conference on Control, San Diego, Juillet 2001.

Par ailleurs, 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" ;
- conseiller du CNES en matière de simulation numérique des écoulements hypersoniques ;
- direction du Comité Patronage de l'Unité de Recherche (avec Gérard Boudol) ;
- missionné pour suivre les questions concernant les relations de l'Unité de Recherche avec l'université.

T. Nguyen a visité le *National University of Singapore* du 11 au 14 décembre 2001 (IHPC, School of Computing, Temasek Labs et IMS).

J.P. Zolésio a donné une conférence invitée à la Conference *Inverse Problems*, Monte Catini, Juin 2001 portant sur l'optimisation de forme, et a fait un séjour de professeur invité au Centre de Recherche Mathématique de l'Université de Montréal (Septembre-Octobre 2001).

## 10 Bibliographie

### Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] J. CAGNOL, J. ZOLÉSIO, « Shape analysis in membrane vibration », *Math. Methods Appl. Sci.* 23, 11, 2000, p. 985–1010.
- [2] G. CARRÉ, « An implicit multigrid method by agglomeration applied to turbulent flows », *Comput. Fluids* 26, 1997, p. 299–320.
- [3] 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.
- [4] J.-A. DÉSIDÉRI, *Modèles discrets et schémas itératifs. Application aux algorithmes multigrilles et multidomaines*, Hermès, Paris, 1998.
- [5] 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.
- [6] B. KAWOLHL, O. PIRONNEAU, L. TARTAR, J. ZOLÉSIO, *Optimal Shape Design, Lecture Notes in Mathematics 1740*, Springer-Verlag, Berlin, CIME, Florence, 2000, Lectures given at the joint CIM/CIME Summer School held in Troia, June 1-6, 1998.
- [7] M.-H. LALLEMAND, H. STEVE, A. DERVIEUX, « Unstructured multigridding by volume agglomeration : current status », *Comput. Fluids* 21, 1992, p. 397–433.
- [8] S. LANTERI, « Parallel solutions of compressible flows using overlapping and non-overlapping mesh partitioning strategies », *Parallel Computing* 22, 7, 1996, p. 943–968.
- [9] R. MARTIN, H. GUILLARD, « A second order defect correction scheme for unsteady problems », *Comput. Fluids* 25, 1, 1996, p. 9–27.
- [10] 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.

### Livres et monographies

- [11] J. CAGNOL, M. P. POLIS, J.-P. ZOLÉSIO (éditeurs), *Shape Optimization and Optimal Design, Lecture Notes in Pure and Appl. Math.* 216, Dekker, New York, 2001.
- [12] M. C. DELFOUR, J.-P. ZOLÉSIO, *Shapes and Geometries, Advances in Design and Control*, SIAM, Philadelphia, 2001.
- [13] M. HAFEZ, K. MORINISHI, J. PÉRIAUX (éditeurs), *ICCFD 2000, Notes on Numerical Fluid Mechanics*, 78, Springer-Verlag, 2001, A Conference honouring Prof. Satofuka's 60th birthday, Kyoto, 15-17 July 2000.
- [14] C. B. JENSSEN, A. ECER, J. PÉRIAUX, N. SATOFUKA (éditeurs), *Parallel CFD 2000*, Elsevier, Trondheim, Norway, 2001.
- [15] J. PÉRIAUX, P. JOLY, O. PIRONNEAU, E. OÑATE (éditeurs), *Innovative Tools for Scientific Computation in Aeronautical Engineering, Theory and Engineering Applications of Computational Methods*, CIMNE, Barcelona, June 2001.

### Articles et chapitres de livre

- [16] M. L. D. L. C. RAMANJAONA, 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, 2001, p. 1087–1111.

- [17] J. CAGNOL, I. LASIECKA, C. LEBIEDZIK, J. ZOLÉSIO, « Uniform stability in Structural Acoustic Models with Flexible Curved Walls », *J. of Differential Equations*, 2001, à paraître.
- [18] J. CAGNOL, J. ZOLÉSIO, « Vibration of a Pre-Constrained Elastic Thin Shell I : Modelling and Regularity of the solutions », *Comptes-Rendus Acad. Sci.*, 2001, à paraître.
- [19] J. CAGNOL, J. ZOLÉSIO, « Vibration of a Pre-Constrained Elastic Thin Shell II : Intrinsic Exact Model », *Comptes-Rendus Acad. Sci.*, 2001, à paraître.
- [20] T. NGUYEN, C. PLUMEJEAUD, « Integration of multidiscipline applications in metacomputing environments », *Calculateurs Parallèles*, à paraître.

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

- [21] N. AYACHE, D. CHAPELLE, Y. COUDIÈRE, H. DELINGETTE, J.-A. DÉSIDÉRI, M. SERMESANT, M. SORINE, J. URQUIZA, « Towards model-based estimation of the cardiac electro-mechanical activity from ECG signals and ultrasound images », in : *Functional Imaging and Modeling of the Heart*, T. Katila, I. E. Magnin, P. Clarysse, J. Montagnat, J. Nenonen (éditeurs), LNCS, 2230, 2001.
- [22] S. BOISGÉRAULT, J. ZOLÉSIO, « Boundary variations in the Navier-Stokes equations and Lagrangian functionals », in : *Shape optimization and optimal design, Cambridge (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 216*, p. 289–300, Dekker, New York, 2001. (Review).
- [23] J. CAGNOL, J.-P. MARMORAT, J.-P. ZOLÉSIO, « Shape sensitivity analysis in the Maxwell's equations », in : *Shape optimization and optimal design, Cambridge (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 216*, p. 27–36, Dekker, New York, 2001.
- [24] J. CAGNOL, J.-P. ZOLÉSIO, « Shape sensitivity analysis in hyperbolic problems with nonsmooth domains », in : *Control of nonlinear distributed parameter systems, College Station, TX (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 218*, p. 1–14, Dekker, New York, 2001.
- [25] H. Q. CHEN, J.-A. DÉSIDÉRI, J. PÉRIAUX, M. SEFRIQUI, J. F. WANG, « Parallel Evolutionary Algorithms for complex design optimization problems in Aerospace engineering », in : *The 15th Toyota Conference*, Mikkabi, Japon, 28-31 Octobre 2001. à paraître dans *J. of Comput. and Appl. Math.*
- [26] H. Q. CHEN, J.-A. DÉSIDÉRI, J. PÉRIAUX, M. SEFRIQUI, E. WHITNEY, « Parallel Evolutionary Computing : a new IT design tool for complex optimization problems in Aerospace engineering », in : *ICSEC*, Beijing, 19-23 Mars 2001.
- [27] H. Q. CHEN, J. PÉRIAUX, A. ECER, « DDM using GAs and Game Theory for Parallel Solution of CFD Problems », in : *Parallel CFD 2000*, Elsevier, Trondheim, Norway, 2001.
- [28] H. Q. CHEN, J. PÉRIAUX, « DDM for flow simulation via GAs and Game Theory », in : *Innovative Tools for Scientific Computation in Aeronautical Engineering, Theory and Engineering Applications of Computational Methods*, CIMNE, p. 248–262, Barcelona, June 2001.
- [29] M. DELFOUR, J. ZOLÉSIO, « Tangential calculus and shape derivatives », in : *Shape optimization and optimal design, Cambridge (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 216*, p. 289–300, Dekker, New York, 2001.
- [30] J.-A. DÉSIDÉRI, F. GRASSO, J. PÉRIAUX, « The FLOWnet database CFD validation tool », in : *ECCOMAS CFD2001 Conference*, K. Morgan, P. Weatherill (éditeurs), Swansea, South Wales, 4-7 September 2001.
- [31] J.-A. DÉSIDÉRI, N. MARCO-BLASHKA, J. PÉRIAUX, M. SEFRIQUI, « Genetic Algorithms for optimization problems in CFD and CEM », in : *Innovative Tools for Scientific Computation in Aeronautical Engineering, Theory and Engineering Applications of Computational Methods*, CIMNE, p. 281–305, Barcelona, June 2001.



- [32] J.-A. DÉSIDÉRI, « Multi-objective shape-design optimization and inverse problems using Control Theory and Nash games », *in* : *Innovative methods for advanced technologies*, CSC, Helsinki, 22-23 Novembre 2001.
- [33] J.-A. DÉSIDÉRI, « Presentation of INRIA databases as code validation tools », *in* : *MACSInet Acoustics Working Group Seminar*, Pôle Léonard de Vinci, Paris, 27-28 Septembre 2001.
- [34] R. DZIRI, J.-P. ZOLÉSIO, « Eulerian derivative for non cylindrical functionals », *in* : *Shape optimization and optimal design, Cambridge (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 216*, p. 87–107, Dekker, New York, 2001.
- [35] J. FERCHICHI, J. ZOLÉSIO, « Shape derivative on a fractured manifold », *in* : *Shape optimization and optimal design, Cambridge (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 216*, p. 289–300, Dekker, New York, 2001. (Review).
- [36] N. GOMEZ, J.-P. ZOLÉSIO, « Existence of free-boundary for a two non-Newtonian fluids problem », *in* : *Shape optimization and optimal design, Cambridge (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 216*, p. 289–300, Dekker, New York, 2001. (Review).
- [37] M. MARINI, R. PAOLI, F. GRASSO, J. PÉRIAUX, J.-A. DÉSIDÉRI, « Verification and Validation Methodologies with the FLOWnet database : from Fluid Dynamics to Multi-Physics », *in* : *Advanced Fluid Information Conference*, Sendai, Japon, 4-5 Octobre 2001. à paraître dans Special Issue of Internat. J. of ASME.
- [38] T. NGUYEN, « Distributed integration platforms for parallel CFD applications », *in* : *European ParCFD Conference*, Amsterdam, Mai 2001.
- [39] T. NGUYEN, « Distributed integration platforms for parallel multidiscipline applications », *in* : *Innovative methods for advanced technologies*, CSC, Helsinki, 22-23 Novembre 2001.
- [40] T. NGUYEN, « The INGENET database », *in* : *How to improve advanced design with evolutionary computing*, 8 Juin 2001. Ingenet Case Studies Open Day, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-saint-Genese, Belgique.
- [41] M. SERMESANT, Y. COUDIÈRE, H. DELINGETTE, N. AYACHE, J.-A. DÉSIDÉRI, « An electro-mechanical model of the heart for cardiac image analysis », *in* : *Medical Image Computed and Computer-Assisted Intervention*, W. J. Niessen, M. A. Viergever (éditeurs), LNCS, 2208, p. 224–231, 2001.
- [42] Z. L. TANG, J.-A. DÉSIDÉRI, J. PÉRIAUX, « Multi-objective shape-design optimization and inverse problems using Control Theory and Nash games », *in* : *ECCOMAS CFD2001 Conference*, K. Morgan, P. Weatherill (éditeurs), Swansea, South Wales, 4-7 September 2001.
- [43] J. F. WANG, J. PÉRIAUX, « GAs and Game Theory for High-Lift Multi-Airfoil Design Problems in Aerodynamics », *in* : *ICCFD 2000, Notes on Numerical Fluid Mechanics*, 78, Springer-Verlag, à paraître. A Conference honouring Prof. Satofuka's 60th birthday, Kyoto, 15-17 July, 2000.
- [44] J.-P. ZOLÉSIO, « Method and Courant metric topologies in shape analysis of partial differential equations », *in* : *Control of nonlinear distributed parameter systems, College Station, TX (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 218*, p. 45–68, Dekker, New York, 2001.
- [45] J.-P. ZOLÉSIO, « Weak set evolution and variational applications », *in* : *Shape optimization and optimal design, Cambridge (1999), Lecture Notes in Pure and Appl. Math. 216*, p. 415–439, Dekker, New York, 2001.

## Rapports de recherche et publications internes

- [46] Y. COUDIÈRE, G. VIGO, A. DERVIEUX, J.-A. DÉSIDÉRI, « Approximation spatiale des équations aux dérivées partielles par décomposition orthogonale aux valeurs propres », *rapport de recherche*, INRIA, 2001.

- [47] H. LIÈVRE, J.-A. DÉSIDÉRI, A. HABBAL, « Optimisation numérique de profils d'aile par algorithmes génétiques et Jeux de Nash », *rapport de recherche n°4275*, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4275.html>.
- [48] J. ONIBONI, « Modélisation et simulation numérique de l'influx cardiaque », *rapport de recherche n°4245*, INRIA, 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4245.html>.