

Thèse

présentée à l'Université Paris 6

pour obtenir

l'Habilitation à Diriger des Recherches en Mathématiques

par

François DUBOIS

SUR L'APPROXIMATION NUMERIQUE DE QUELQUES PROBLEMES EN MECANIQUE DES FLUIDES

Soutenue le **16 décembre 1992** devant le jury composé de

MM. Jacques-Louis LIONS	Président
Alain-Yves LEROUX	Rapporteur
Olivier PIRONNEAU	Rapporteur
Denis SERRE	Rapporteur
Bertrand MERCIER	Examineur
Jean-Claude NEDELEC	Examineur
Pierre-Arnaud RAVIART	Examineur

1.4. Calcul scientifique

La réalisation pratique de codes de calcul industriels constitue l'un des aboutissements naturels d'une recherche en analyse numérique. Le développement de nouveaux outils est soutenu par diverses actions dites "de recherche" en contexte industriel. Il s'agit le plus souvent de développements informatiques qui s'appuient sur des recherches amont ou les suscitent en cas de problème majeur rencontré lors d'une exploitation industrielle. Cette partie consacrée au calcul scientifique regroupe trois travaux présentés à diverses conférences et ateliers scientifiques. Les codes de calcul CEL3GR (résolution approchée des équations d'Euler), NS3GR (de Navier Stokes) et FLU3PNS (approximation parabolisée des équations de Navier Stokes) y sont successivement présentés.

La résolution numérique des équations d'Euler de la dynamique des gaz est de nos jours (1990 en ce qui concerne le Chapitre 5.1, voir Dubois-Michaux [1992]) accessible aux ordinateurs de type Cray XMP pour des géométries tridimensionnelles relativement complexes telles le double ellipsoïde proposé par les organisateurs du workshop hypersonique d'Antibes de janvier 1990. Le double ellipsoïde est une forme modèle de l'avion spatial Hermès. Nous avons effectué un maillage faiblement non structuré afin d'une part d'utiliser les utilitaires de pré et post traitement facilement accessibles à l'Aérospatiale les Mureaux à cette époque et d'autre part de discrétiser la ligne d'intersection entre les deux ellipsoïdes de façon à ce qu'elle soit une réunion d'arêtes appartenant au maillage, c'est à dire au graphe défini par les sommets du maillage. La figure 5.1 illustre le résultat obtenu. Pour un encombrement machine induit par un maillage tridimensionnel de 100 000 mailles environ et un temps calcul machine de une heure, la prévision du champ de pression permet la prédiction avec une bonne précision des coefficients aérodynamiques.

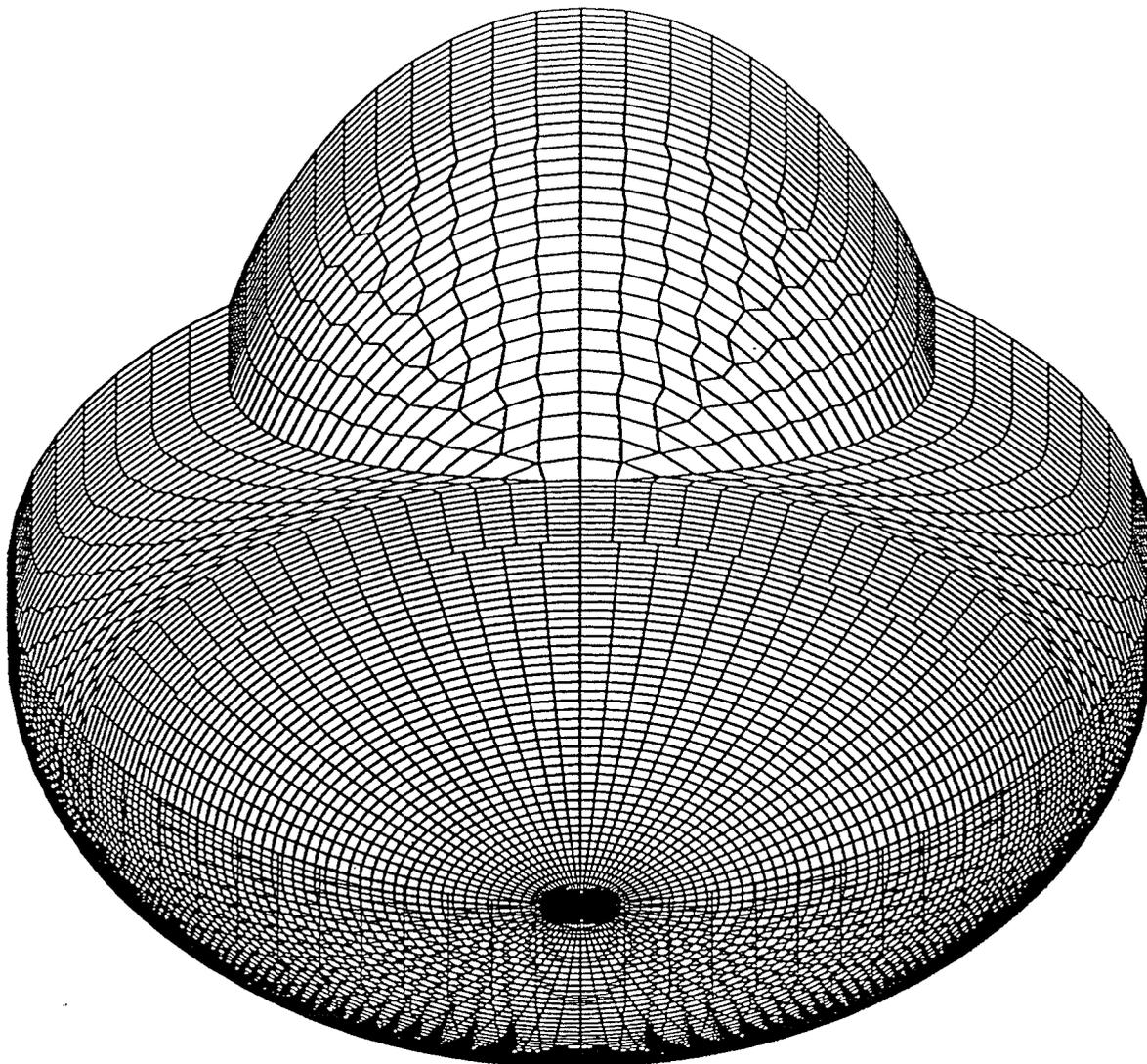


Figure 5.1. Maillage non structuré autour du double ellipsoïde.

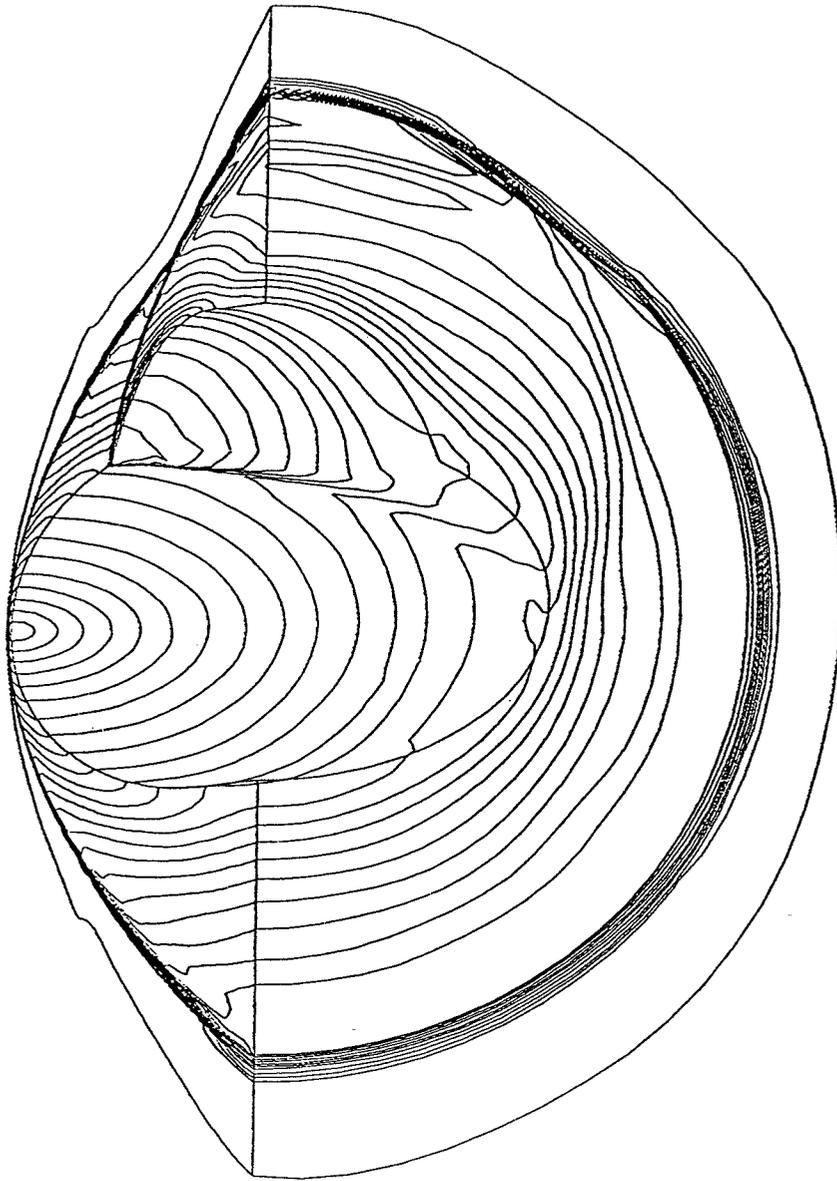


Figure 5.2. Isovaleurs du nombre de Mach.

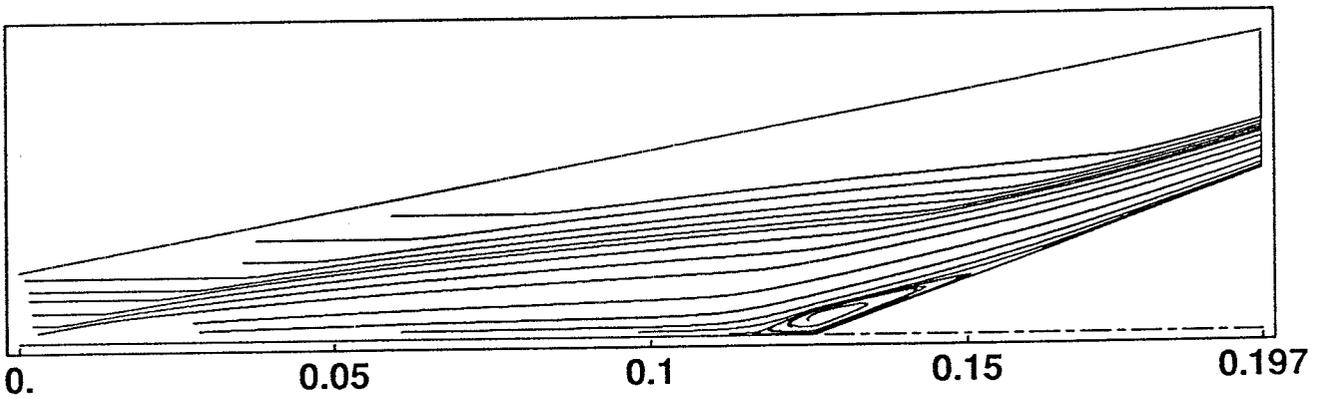
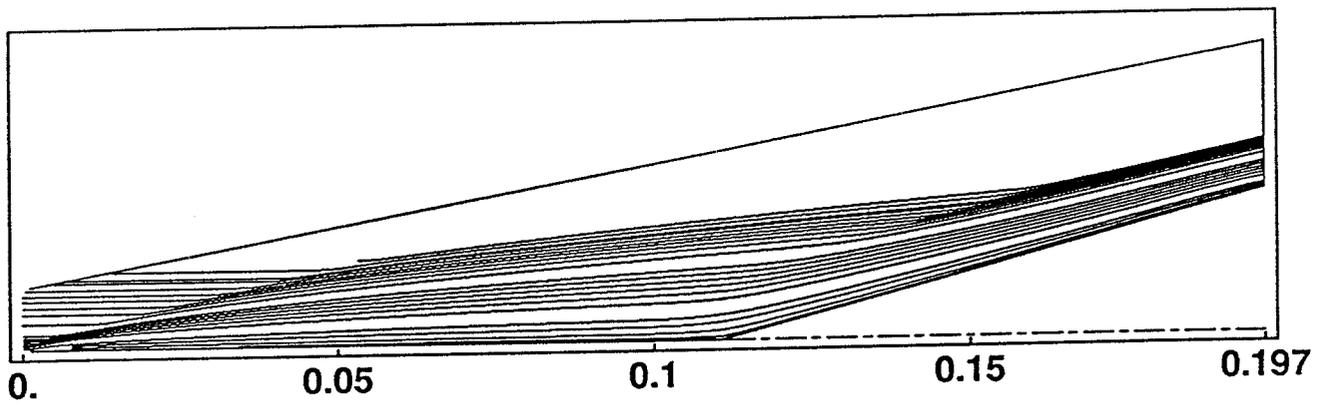


Figure 5.3. Lignes de courant d'écoulements autour de deux rampes hypersoniques dont l'angle de braquage diffère de 5 degrés.

Au cours de l'atelier scientifique tenu à Antibes en janvier 1990, nous avons constaté que l'approximation décentrée permettant également l'emploi d'un maillage non-structuré développée à l'Aérospatiale (code CEL3GR), un maillage précis autour de la ligne de singularité (figure 5.1) et un bon ajustement de la frontière extérieure afin de ne pas perdre de mailles dans la région où l'écoulement est uniforme, permet une prévision de l'écoulement avec une qualité excellente tout à fait comparable à celle obtenue par des méthodes plus classiques (schémas aux différences centrés avec viscosité artificielle) proposées par exemple par Jameson pour l'industriel allemand Dornier, tout en utilisant un maillage comportant deux à quatre fois moins de mailles.

Nous décrivons au chapitre 5.1 les grands choix de schémas de résolution du problème fluide. Le lecteur attentif y retrouvera des idées développées au chapitre 4.1 pour les conditions aux limites, l'utilisation d'un schéma en temps à deux pas analysé au chapitre 4.4, mais une approximation du problème de Riemann plus rustique que celles présentées aux chapitres 4.2 et 4.3. Les résultats sont également détaillés au chapitre 5.1. Nous en extrayons la figure 5.2, relative à un écoulement de nombre de Mach égal à 25, une incidence de 30° et l'utilisation de tables thermodynamiques pour la prise en compte des effets d'équilibre chimique.

Les idées proposées au chapitre 4.7 sur l'approximation des flux visqueux des équations de Navier Stokes par une méthodes de volumes finis non structurés ont été testées pour la première fois en avril 1991 lors du second workshop hypersonique d'Antibes (voir Dubois-Michaux [1991] et le Chapitre 5.2). Il s'agit d'un test très simple de dièdre bidimensionnel pour lequel le calcul de la zone décollée est essentiel. En effet, à haute altitude, lors de la rentrée dans l'atmosphère de l'avion spatial Hermès par exemple, les nombres de Reynolds sont faibles et la prédiction des efforts supplémentaires induits par le braquage des gouvernes ne peut pas être obtenu par des modélisations simplifiées. Une géométrie modèle telle par exemple une rampe hypersonique étudiée en détail à l'aide de codes de calcul très élaborés, c'est à dire fondés sur la résolution des équations de Navier Stokes permet d'avoir un point de référence pour "recaler" les approches plus empiriques qu'on applique ensuite à la géométrie tridimensionnelle réelle.

Les résultats obtenus pour diverses rampes hypersoniques lors du workshop d'Antibes d'avril 1991 ont montré qu'une variation de cinq degrés de l'angle du dièdre peut changer qualitativement l'allure de l'écoulement : on passe d'un écoulement attaché à la paroi (susceptible d'être traité par l'approximation parabolisée des équations de Navier Stokes par exemple) à un écoulement décollé qui ne peut être simulé que par des modèles

de type Navier Stokes complet ou certaines approximations dites de couche mince. La figure 5.3 illustre cette apparition d'une zone de recirculation caractéristique de ce type d'écoulement hypersonique.

Le dernier travail de cette cinquième partie est une note technique de l'American Institute of Aeronautics and Astronautics présentée à Reno en janvier 1991 par une équipe issue de l'Aérospatiale Les Mureaux et d'un de ses sous-traitants, la Ségime (Chaput et al [1991] et Chapitre 5.3). Nous y présentons le code FLU3PNS, qui est un outil opérationnel de prédictions d'écoulements aérodynamiques. Il permet de résoudre numériquement l'approximation de couche mince ou l'approximation parabolisée des équations de Navier-Stokes. Ces approximations, inventées par les ingénieurs spécialistes d'aérodynamique supersonique permettent d'accéder au coefficient de frottement à la paroi et au flux de chaleur à des coûts d'exploitation raisonnables puisqu'un calcul PNS coûte seulement cinq fois plus cher environ qu'un calcul non visqueux, ce surcoût étant dû avant tout au grand nombre de mailles dans la couche limite.

Toutefois, même si on y injecte des techniques numériques sophistiquées (flux d'Osher pour FLU3PNS par exemple), les fondements mathématiques de cette approximation PNS restent à notre avis mal compris, même si son origine physique est claire : on néglige les effets visqueux le long de la ligne de courant (ligne de maillage en pratique) ainsi que la remontée des ondes acoustiques dans la couche limite subsonique (voir à ce sujet Chang et Merkle [1989]). Le pragmatisme impose d'utiliser une approximation PNS pour le calcul d'effets visqueux des écoulements supersoniques, attitude très populaire aux USA par exemple, mais le manque de modèle physique intrinsèque la rend suspecte aux yeux de beaucoup de mathématiciens appliqués. Nous pensons qu'il y a là un thème porteur pour de nombreuses recherches mathématiques, tant fondamentales qu'appliquées au calcul scientifique.

Nous présentons dans cet "AIAA Paper" divers cas tests allant de problèmes très simples (plaque plane) à des configurations industrielles (Hermès) tout à fait caractéristiques de processus de validation d'un code industriel : on vérifie à la fois la pertinence de prédiction du code du point de vue scientifique et la faisabilité de calculs tridimensionnels de grande taille.

1.5. Annexe

Les deux textes que recouvre cette annexe sont issus de collaborations de recherche fort intéressantes où nous avons été l'un des participants mais non le pilote du travail mené.

Le premier travail présenté ici est d'abord le fruit du dynamisme de Guillaume Mehlman et Frédéric Thivet. Partant d'un code de recherche bidimensionnel de résolution des équations d'Euler et de Navier Stokes pour un gaz parfait polytropique que nous avons développé à l'Aérospatiale Les Mureaux (NSI2D), ces deux jeunes chercheurs ont travaillé d'arrache pied afin d'y inclure le fruit de leurs recherches respectives sur les schémas numériques pour les fluides réactifs et la modélisation des couplages entre les modes de vibration et dissociation des molécules polyatomiques afin d'obtenir un outil d'expérimentation numérique très flexible (METHI2D). En effet, des effets de cinétique chimique et de déséquilibre thermodynamique peuvent être pris en compte avec une grande flexibilité dans le choix du modèle physique.

De façon précise le chapitre 6.1 (Mehlman et al [1991]) présente l'étude menée pour le second workshop hypersonique d'Antibes et relative à la modélisation de tuyères de souffleries hypersoniques. Il s'agit de connaître avec précision la composition et l'état physique du gaz qui est envoyé sur une maquette, sachant que celui-ci n'est **pas** représentatif de tout ce qui se passe en vol. Cette étude précise permet de prévoir par le calcul la pertinence physique des divers effets physiques qu'on valide par comparaison expérimentale et qu'on utilise ensuite dans une autre gamme de validité des paramètres, ce qui donne toute sa puissance à des outils de simulation fondés sur la résolution numérique d'équations aux dérivées partielles. Dans un tel écoulement interne, la composition est à l'équilibre chimique dans le convergent de la tuyère et jusqu'au col puis la composition se fige lors de la détente dans le divergent. La prise en compte de l'ensemble de ces effets de déséquilibre au sein du modèle discret permet une prédiction correcte de la transition vers le déséquilibre chimique et thermodynamique.

L'étude a montré que l'écoulement reste quasi-monodimensionnel. Pour cela, nous avons également élaboré un mode d'utilisation de l'outil bidimensionnel pour simuler une géométrie axisymétrique dans l'approximation des tranches planes, sans avoir à utiliser explicitement la version du code admettant des géométries axisymétriques

et développée ensuite par Mehlman et Thivet. Il convient simplement d'utiliser des volumes de contrôle dont la loi de section est donnée et dont la variation longitudinale reste modérée, sans hypothèse a priori sur la forme de ces volumes. Ce choix induit un maillage approprié le long de l'axe, compte tenu de la loi de variation de la section de la tuyère.

Le second travail s'inscrit dans le thème relatif aux méthodes de décomposition d'opérateurs étudiées par Alain-Yves Leroux ces dernières années. Il s'agit dans la Note de Baraille et al [1992] (et Chapitre 6.2) de faire un splitting peu naturel pour les équations de Saint Venant de l'hydrodynamique qui représentent également un gaz en évolution barotrope. Pour résoudre le système classique

$$(5.1) \quad \begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2 + p(\rho)) = 0 \end{cases}$$

on effectue deux étapes où s'enchaînent successivement la résolution de deux systèmes auxiliaires, à savoir

$$(5.2) \quad \begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2) = 0 \end{cases}$$

et

$$(5.3) \quad \begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (p(\rho)) = 0 \end{cases} .$$

Pour l'étape de convection (5.2), les techniques classiques fondées sur les systèmes hyperboliques de lois de conservation sont inopérantes a priori car ce système n'est pas hyperbolique au sens de Lax puisque sa jacobienne n'est pas diagonalisable. En effet, la valeur propre double $\lambda = u$ relative au système (5.2) n'admet qu'une droite vectorielle de vecteurs propres. Il est tout de même possible de donner un sens (au moins numériquement) à la résolution de l'étape (5.2) par l'intermédiaire d'un problème de Riemann. Avec Rémy Baraille, nous avons eu l'idée de regarder le comportement limite ($\varepsilon \rightarrow 0, \varepsilon > 0$) du système de Saint Venant suivant obtenu par perturbation de (5.2) :

$$(5.4) \quad \begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2 + \varepsilon p(\rho)) = 0 \end{cases}$$

ce qui revient à faire tendre la vitesse du son vers zéro dans le système initial (5.1). De façon curieuse (voir les détails dans Baraille [1991]), dans le cas de figure ($u_g > u_d$), la solution du problème de Riemann relatif au système (5.4) fait apparaître pour ε tendant vers zéro, une discontinuité de célérité u^* donnée par la relation

$$(5.5) \quad u^* = \frac{\sqrt{\rho_g} u_g + \sqrt{\rho_d} u_d}{\sqrt{\rho_g} + \sqrt{\rho_d}}$$

qui coïncide avec la moyenne de vitesse de Roe [1981] !

Ce résultat quelque peu surprenant (et contradictoire avec d'autres relations proposées par ailleurs de façon empirique) a été confirmé numériquement à l'aide du schéma de Lax-Friedrichs dont la construction n'utilise pas de solution du problème de Riemann. Dans l'autre cas de figure ($u_g < u_d$), la densité et l'impulsion tendent vers zéro avec ε si $u_g < \frac{x}{t} < u_d$. Le système en pression (5.3) se traite de façon analogue en le perturbant par des termes convectifs d'ordre ε^2 .

A l'aide de ces comportements limites, on peut utiliser la méthode des pas fractionnaires pour approcher le système (5.1) de Saint Venant. Notons que le pas de temps n'est limité pour l'approximation du système (5.1) que par les conditions de stabilité relatives aux deux systèmes (5.2) et (5.3), c'est à dire la valeur maximale de la vitesse. On peut de cette façon utiliser, avec un schéma en temps complètement explicite, des pas de temps qui, classiquement, sont associés à des nombres de Courant-Friedrichs-Lewy supérieurs à un.

1.6. Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons rappelé les principaux résultats obtenus dans diverses publications et rapports internes de l'Ecole Polytechnique et Aérospatiale Espace & Defense. Nous nous sommes d'abord intéressé à la modélisation physico-mathématique et plus particulièrement au lien entre l'entropie classique et la formalisation plus récente proposée par Lax pour les systèmes hyperboliques de lois de conservation. L'importance d'une écriture du second principe de la thermodynamique apparaît pour la prise en compte des conditions aux limites ainsi que pour l'écriture de la viscosité numérique des schémas aux différences. Cette propriété a pu être établie pour une correction du schéma de Roe, mais n'est pas en général à la base des schémas les plus précis actuellement utilisés. En effet, la méthode MUSCL par exemple est fondée sur les notions de monotonie et décroissance de la variation totale, et est paramétrée par les limiteurs de pente. Nous avons proposé une notion de préservation de la convexité qui a donné de bons résultats pour deux problèmes modèles. Nous avons utilisé les limiteurs les plus classiques pour développer un code de résolution des équations d'Euler de la dynamique des gaz permettant l'emploi d'un maillage non structuré. Le workshop d'Antibes de janvier 1990 nous a permis de juger de la qualité du solveur obtenu en comparaison avec quelques ténors du domaine. L'extension aux équations de Navier Stokes a demandé la mise au point d'une méthode générale de volumes finis qui s'adapte de façon naturelle aux maillages non structurés tridimensionnels les plus généraux. Les premiers tests, encourageants, doivent être confirmés par de nouvelles expériences numériques.

Bien entendu, les travaux présentés dans ce mémoire ne constituent pour l'essentiel qu'une étape pour le développement de techniques nouvelles non linéaires plus générales. Pour l'approximation des équations d'Euler de la dynamique des gaz par exemple, on peut envisager de calculer le flux d'interface par moyenne d'un flux d'ordre un entropique et d'un flux précis pouvant être instable. Cette idée ancienne, due à Boris et Book, peut être rénovée par un critère de pondération fondé sur la satisfaction de la condition d'entropie locale. Par ailleurs, il convient de s'assurer que le schéma de volumes finis que nous avons proposé a de bonnes propriétés mathématiques de stabilité et de convergence dans le cas de problèmes elliptiques élémentaires à deux ou trois dimensions d'espace. Les équations de Navier-Stokes parabolisées méritent elles aussi de futures études spécifiques. Il s'agit surtout dans ce dernier cas de définir cette

approximation de façon intrinsèque, l'approximation PNS étant issue avant tout de l'expérience des ingénieurs.

Enfin, l'effort de formalisation de la méthode MAC pour les maillages en triangles, concrétisé ici par une étude purement mathématique, doit être poursuivie prochainement par l'analyse numérique de la méthode aux éléments finis associée, avant l'implémentation sur ordinateur pour les équations de Navier Stokes des fluides incompressibles.

Nous voulons insister pour terminer sur la relative lenteur avec laquelle il est possible d'intégrer des idées numériques nouvelles dans les codes opérationnels. En effet, la conception d'un code industriel général peut demander plusieurs années mais surtout, la validation rigoureuse sur de nombreux cas tests, seul gage de qualité du produit final obtenu, demande de nombreuses étapes sans donner de garantie formelle à l'utilisateur. Nous pensons que seule la plus grande convivialité des machines jointe à des gains de puissance importants permettront dans l'avenir de favoriser le transfert d'idées nouvelles vers les applications, sans nuire à la fiabilité des outils de prévision fondés sur le calcul scientifique.

7. Références bibliographiques

- T. ABOUD. Etude mathématique et numérique de quelques problèmes de diffraction d'ondes électromagnétiques, Thèse de l'Ecole Polytechnique, 1991.
- T. ABOUD, F. STARLING. Diffraction d'ondes électromagnétiques par un écran mince, Rapport interne n° 246, Centre de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, juin 1991.
- R. ABGRALL. Généralisation du schéma de Roe pour le calcul d'écoulements de mélanges de gaz à concentration variable, La Recherche Aérospatiale, 1989-6, pp. 31-43, 1988.
- R. ABGRALL, J.L. MONTAGNE. Généralisation du schéma d'Osher pour le calcul d'écoulements de mélanges de gaz à concentrations variables et de gaz réels, La Recherche Aérospatiale, n° 1989-4, pp. 1-13, juillet 1989.
- A. ARAKAWA. Computational Design for Long-Term Numerical Integration of the Equations of Fluid Motion : Two-Dimensional Incompressible Flow. Part I, Journal of Computational Physics, vol 1, pp. 119-143, 1966.
- J. AUDOUNET. Solutions discontinues paramétriques des systèmes de lois de conservation et des problèmes aux limites associés, Séminaire de l'Université de Toulouse 3, 1983-1984.
- D. BALLOU. Solutions to Nonlinear Hyperbolic Cauchy Problems without Convexity Conditions, Trans. AMS, vol 152, pp. 441-460, 1970.
- R. BARAILLE. Développement de schémas numériques adaptés à l'hydrodynamique, Thèse de l'Université Bordeaux 1, décembre 1991.
- R. BARAILLE, G. BOURDIN, F. DUBOIS et A.Y. LE ROUX. Une version à pas fractionnaires du schéma de Godunov en hydrodynamique, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, t. 314, Série 1, pp. 147-152, 1992.
- C. BARDOS, A.Y. LEROUX, J.C. NEDELEC. First Order Quasilinear Equations with Boundary Conditions, Communications in Partial Differential Equations, vol 4, n° 9, pp. 1017-1034, 1979.
- C. BEGUE, C. CONCA, F. MURAT, O. PIRONNEAU. A nouveau sur les équations de Stokes et de Navier-Stokes avec des conditions aux limites sur la pression. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, vol 304, Série 1, pp. 23-28, 1987.
- A. BENABDALLAH. Le "p-système" sur un intervalle, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, vol 303, Série 1, n° 4, pp. 123-127, 1986.

- A. BENABDALLAH, D. SERRE. Problèmes aux limites pour les systèmes hyperboliques non-linéaires de deux équations à une dimension d'espace, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, tome 303, Série 1, pp. 677-680, 1987.
- A. BENDALI, J.M. DOMINGUEZ, S. GALLIC. A Variational Approach for the Vector Potential Formulation of the Stokes and Navier-Stokes Problems Arising in Three Dimensional Domains, Journal of Mathematical Analysis and Applications, vol 107, pp. 537-560, 1985.
- M. BORREL, J.L. MONTAGNE, J. DIET, P. GUILLEN, J. LORDON. Upwind Scheme for Computing Supersonic Flows Around a Tactical Missile, La Recherche Aérospatiale, n° 1988-2, pp. 43-55, 1988.
- F. BOURDEL, P. DELORME, P. MAZET. Convexity in Hyperbolic Problems. Application to a Discontinuous Galerkin Method for the Resolution of the Polydimensional Euler Equations, Proceedings of the 3th International Conference on Nonlinear Hyperbolic Problems, Notes on Num. Fluid Mech., vol 24, pp. 31-42, Vieweg, 1989.
- F. CHALOT, T.J.R. HUGHES, F. SHAKIB. Symmetrization of Conservation Laws with Entropy for High-Temperature Hypersonic Computations, Computing Systems in Engineering, vol 1, n° 2-4, pp. 495-521, 1990.
- C.L. CHANG, C.L. MERKLE. The Relation Between Flux Vector Splitting and Parabolized Schemes, Journal of Computational Physics, vol 80, pp. 344-361, 1989.
- E. CHAPUT, F. DUBOIS, D. LEMAIRE, G. MOULES, J.L. VAUDESCAL. FLU3PNS : A Three-Dimensional Thin Layer and Parabolized Navier-Stokes Solver Using the MUSCL Upwind Scheme, AIAA Paper 91-0728, 29th Aerospace and Sciences Meeting, Reno (Nevada, USA), january 1991.
- P.G. CIARLET. The Finite Element Method for Elliptic Problems, North Holland, Amsterdam, 1978.
- J.P. CROISILLE. Contribution à l'étude théorique et à l'approximation par éléments finis du système hyperbolique de la dynamique des gaz multidimensionnelle et multiespèces, Thèse de l'Université Paris 6, 1990.
- G. DE RHAM. Variétés différentiables, Hermann, Paris, 1960.
- F. DUBOIS. Boundary Conditions and the Osher Scheme for the Euler Equations of Gas Dynamics, Rapport Interne n° 170 du Centre de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Polytechnique, octobre 1987.
- F. DUBOIS. Quelques problèmes liés au calcul d'écoulements de fluides parfaits dans les tuyères, Thèse de l'Université Paris 6, janvier 1988 [1988-a].

- F. DUBOIS. Interpolation non linéaire et schémas à variation totale décroissante, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/MI n° 40 348, novembre 1988 [1988-b].
- F. DUBOIS. Concavité de l'entropie thermodynamique et convexité de l'entropie mathématique de deux gaz quelconques sans interaction mutuelle, Rapport Aérospatiale, Programme Tebaldi, ST/MI n° 40 616, janvier 1989 [1989-a].
- F. DUBOIS. Evaluation du flux d'Osher pour l'air à l'équilibre chimique, Rapport Aérospatiale, Programme Tebaldi, Code Euler 3D en hypersonique et supersonique élevé, S/DT/MI n° 41 747, avril 1989 [1989-b].
- F. DUBOIS. Présentation de sous-programmes pour l'évaluation du flux d'Osher pour l'air à l'équilibre, Rapport Aérospatiale, Programme Tebaldi, Code Euler 3D en hypersonique et supersonique élevé, S/DT/MI n° 41 747, août 1989 [1989-c].
- F. DUBOIS. Calcul des flux visqueux dans un code de résolution des équations de Navier Stokes par une méthode de volumes finis non-structurés, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, S/DT/MI n° 105 / 89, juillet 1989 [1989-d].
- F. DUBOIS. Conditions aux limites fortement non linéaires pour les équations d'Euler, Cours CEA / EDF / INRIA "Méthodes de différences finies et équations hyperboliques" (organisateur P.L. LIONS), Rocquencourt, nov. 1988, in Rapport Aérospatiale, Programme RAF, S/DT/MI n° 44236, décembre 1989 [1989-e].
- F. DUBOIS. Concavité de l'entropie thermostatique et convexité de l'entropie mathématique au sens de Lax, La Recherche Aérospatiale, n° 1990-3, pp. 77-80, mai 1990 [1990-a].
- F. DUBOIS. Nonlinear Interpolation and Total Variation Diminishing Schemes, Rapport Aérospatiale ST/S n° 46 195, juin 1990 [1990-b].
- F. DUBOIS. Discrete Vector Potential Representation of a Divergence-Free Vector Field in Three-Dimensional Domains : Numerical Analysis of a Model Problem, SIAM Journal of Numerical Analysis, vol 27, n° 5, pp. 1103-1141, oct. 1990 [1990-c].
- F. DUBOIS. Nonlinear Interpolation and Total Variation Diminishing Schemes, Third International Conference on Hyperbolic Problems, Uppsala (Sweden), june 1990 (Engquist-Gustafsson Editors), Chartwell-Bratt, pp. 351-359, 1991 [1991-a].
- F. DUBOIS. Etude expérimentale de l'influence de quelques paramètres numériques sur la convergence vers l'état stationnaire d'un problème modèle pour l'aérodynamique, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 100 850, juin 1991 [1991-b].
- F. DUBOIS. Une formulation tourbillon-vitesse-pression pour le problème de Stokes, Rapport interne Aérospatiale ST/S n° 266 / 91, octobre 1991, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, t. 314, Série 1, pp. 277-280, 1992 [1991-92].

- F. DUBOIS. Interpolation de Lagrange et volumes finis. Une technique nouvelle pour calculer le gradient d'une fonction sur les faces d'un maillage non-structuré, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 104 109, février 1992.
- F. DUBOIS, J.M. DUPUY. A Three Dimensional Vector Potential Formulation for Solving Transonic Flow with Mixed Finite Elements, 6° International Symposium on Finite Elements in Flow Problems, Antibes (France), juin 1986.
- F. DUBOIS, P. LE FLOCH. Condition à la limite pour un système de lois de conservation, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Série 1, vol 304, n° 3, pp. 75-78, 1987.
- F. DUBOIS, P. LE FLOCH. Boundary Conditions for Nonlinear Hyperbolic Systems of Conservation laws, Journal of Differential Equations, vol 71, n°1, pp. 93-122, january 1988.
- F. DUBOIS, P. LE FLOCH. Boundary Conditions for Nonlinear Hyperbolic Systems of Conservation laws, Second International Conference on Hyperbolic Problems, Aachen (Federal Republic of Germany), march 1988 (Ballmann-Jeltsch Editors), Vieweg, Notes on Numerical Fluid Dynamics, vol 24, pp. 96-104, Vieweg, 1989.
- F. DUBOIS, G. MEHLMAN. A Non-Parameterized Entropy Correction for Roe's Approximate Riemann Solver, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 102 120, septembre 1991.
- F. DUBOIS, G. MEHLMAN. A Non-Parameterized "Entropy Fix" for Roe's Method, 10th AIAA Conference on Computational Fluid Dynamics, Honolulu, juin 1991, à paraître dans AIAA Journal, 1992 [1992-a].
- F. DUBOIS, G. MEHLMAN. A Non-Parameterized Entropy Correction for Roe's Approximate Riemann Solver, 10^{ème} Congrès de l'INRIA (R. Glowinski, Ed.), 11-14 février 1992, Nova Science Publishers, pp. 479-488, 1992 [1992-b].
- F. DUBOIS, O. MICHAUX. Solution of the Euler Equations Around a Double Ellipsoïdal Shape Using Unstructured Meshes and Including Real Gas Effects, Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems, Antibes (France), janvier 1990 (Désidéri-Glowinski-Périaux Editors), Springer Verlag, vol 2, pp. 358-373, 1992.
- F. DUBOIS, O. MICHAUX. Numerical Solution of the Navier Stokes Equations for Hypersonic Ramps with the NS3GR Solver, Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems (Part II), Antibes (France), avril 1991, Rapport Aérospatiale ST/S n° 48 899, janvier 1991.
- B. DUBROCA, G. GALLICE. Problème mixte hyperbolique pour un système de lois de conservation monodimensionnel, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, t 306, Série 1, pp. 317-320, 1988.

- G. DUVAUT, J.L. LIONS. Les inéquations en mécanique et en physique, Dunod, Paris, 1972.
- G. FERNANDEZ, B. LARROUTUROU, Hyperbolic Systems for Multicomponent Euler Equations, Second International Conference on Hyperbolic Problems, Aachen (Federal Republic of Germany), march 1988 (Ballmann-Jeltsch Editors), Vieweg, Notes on Numerical Fluid Dynamics, vol 24, pp. 128-138, Vieweg, 1989.
- C. FOIAS, R. TEMAM. Remarques sur les équations de Navier Stokes stationnaires et les phénomènes successifs de bifurcation, Annales Scuola Normale de Pisa, Sciences, vol 5, n° 1, pp. 29-63, 1978.
- K.O. FRIEDRICHS. Differential Forms on Riemannian Manifolds, Communications on Pure and Applied Mathematics, vol 8, 1955, pp. 551-590.
- K.O. FRIEDRICHS, P.D. LAX. Systems of Conservation Laws with a Convex Extension, Proc. Acad. Sci. USA, vol 68, pp. 1686-1688, 1971.
- V. GIRAULT. A Combined Finite Element and Marker and Cell Method for Solving Navier-Stokes Equations, Numerische Mathematik, vol 26, pp. 39-59, 1976.
- V. GIRAULT, P.A. RAVIART. Finite Element Methods for Navier Stokes Equations, Theory and Applications, Springer Verlag, Berlin, 1986.
- S. K. GODUNOV. A Finite Difference Method for the Numerical Computation of Discontinuous Solutions for the Equations of Fluid Dynamics, Mat. Sbornik, vol 47, pp. 271-290, 1959.
- S.K. GODUNOV. An Interesting Class of Quasilinear Systems, Dok. Akad. Nauk. SSSR, vol 139, pp. 521-523 et Soviet Math., vol 2, pp. 947-949, 1961.
- S.K. GODUNOV, A. ZABRODINE, M. IVANOV, A. KRAIKO, G. PROKOPOV, Résolution numérique des problèmes multidimensionnels de la dynamique des gaz, Editions de Moscou, 1979.
- B. GUSTAFSSON, H.O. KREISS, A. SUNDSTROM. Stability Theory of Difference Approximations for Mixed Initial Boundary Value Problems, II, Mathematics of Computation, vol 26, pp. 649-686, 1972.
- F. HARLOW, J. WELCH. Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface, Physics of Fluids, vol 8, 1965, pp. 2182-2189.
- R.P. HARPER, C.W. HIRT, J.M. SICILIAN. FLOW2D : A Computer Program for Transient, Two-Dimensional Fluid Flow Analysis, Flow-Science, Inc. Report FSI-83-00-01, 1983.
- A. HARTEN. On the Symmetric Form of Systems of Conservation Laws, Journal of Computational Physics, vol 49, pp. 151-169, 1983 [1983-a].

- A. HARTEN. High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws, *Journal of Computational Physics*, vol 49, pp. 357-393, 1983 [1983-b].
- A. HARTEN, J.M. HYMAN. Self-Adjusting Grid Methods for One-Dimensional Hyperbolic Conservation Laws, *Journal of Computational Physics*, vol 50, pp. 235-269, 1983.
- A. HARTEN, P.D. LAX, B. VAN LEER. On Upstream Differencing and Godunov-type Schemes for Hyperbolic Conservation Laws, *SIAM Review*, vol 25, n° 1, pp. 35-61, janvier 1983.
- A. HARTEN, S. OSHER. Uniformly High Order Accurate Nonoscillatory Schemes I, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 24, pp. 279-309, 1987.
- J. HILSENATH, M. KLEIN. Tables of Thermodynamic Properties of Air in Chemical Equilibrium Including Second Virial Corrections from 1 500°K to 15 000°K, AEDC-TR n° 65-58, mars 1965.
- T. HUGHES, M. MALLET. A New Finite Element Formulation for Computational Fluid Dynamics: I. Symmetric Forms of the Compressible Euler and Navier-Stokes Equations and the Second Law of Thermodynamics, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol 54, pp. 223-234, 1986.
- C. JOHNSON, A. SZEPESSY. On the Convergence of a Finite Element Method for a Nonlinear Hyperbolic Conservation Law, *Mathematics of Computation*, vol 49, n° 180, pp. 427-444, 1987.
- D.S. KERSHAW. Differencing of the Diffusion Equation in Lagrangian Hydrodynamics Codes, *Journal of Computational Physics*, vol 39, pp. 375-395, 1981.
- K. KHALFALLAH, A. LERAT. Correction d'entropie pour les schémas numériques approchant un système hyperbolique, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, Série 2, tome 308, pp. 815-820, 1989.
- L. LANDAU, E. LIFCHITZ. *Physique statistique*, Editions de Moscou, 1967.
- P.D. LAX. Hyperbolic Systems of Conservation Laws and the Mathematical Theory of Shock Waves, *Conf. Board in Mathematical Sciences*, vol 11, SIAM, Philadelphia, 1973.
- P.D. LAX, B. WENDROFF. Systems of Conservation Laws, *Communications in Pure and Applied Mathematics*, vol 13, pp. 217-237, 1960.
- B.P. LEONARD. A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol 19, pp. 59-98, 1979.
- A. Y. LEROUX. Approximations de quelques problèmes hyperboliques non linéaires, *Thèse d'Etat*, Université de Rennes, 1979.

- V. LEVILLAIN. Couplage éléments finis-équations intégrales pour la résolution des équations de Maxwell en milieu homogène, Thèse de l'Ecole Polytechnique, 1991.
- P.L. LIONS, P. SOUGANIDIS. Convergence of MUSCL type methods for scalar conservation laws, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Série 1, tome 311, pp. 259-264, 1990.
- P. MAZET, F. BOURDEL. Analyse numérique des équations d'Euler pour l'étude des écoulements autour de corps élancés en incidence. Rapport CERT n° 1/3252, Toulouse, 1986.
- G. MEHLMAN. An Approximate Riemann Solver for Fluid Systems Based on a Shock Curve Decomposition, Third International Conference on Hyperbolic Problems, Uppsala (Sweden), june 1990 (Engquist-Gustafsson Editors), Chartwell-Bratt, pp. 727-741, 1991.
- G. MEHLMAN. Etude de quelques problèmes liés aux écoulements en déséquilibre chimique et thermique, Thèse de l'Ecole Polytechnique, novembre 1991.
- G. MEHLMAN, F. THIVET, S. CANDEL, F. DUBOIS. Computation of Hypersonic Flows with a Fully Coupled Implicit Solver and an Extension of the CVDV Model for Thermochemical Relaxation, Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems (Part II), Antibes (France), avril 1991, Rapport Aerospatiale ST/S n° 36/91, février 1991.
- M. MERRIAM. Smoothing and the Second Law, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol 64, n° 1-3, 1987.
- J.C. NEDELEC. Mixed Elements in \mathbf{R}^3 , Numerische Mathematik, vol 35, pp. 315-341, 1980.
- J.C. NEDELEC. Eléments finis mixtes incompressibles pour l'équation de Stokes dans \mathbf{R}^3 , Numerische Mathematik, vol 39, pp. 97-112, 1982.
- O. OLEINIK. On the Uniqueness of the Generalized Solution of the Cauchy Problem for a Nonlinear System of Equations Occuring in Mechanics, Usp. Math. Nauk., vol 12, pp. 169-176, 1957.
- S. OSHER. Numerical Solution of Singular Perturbation Problems and Hyperbolic Systems of Conservation Laws, in Math. Studies n° 47 (Axelsson-Franck-Van der Sluis Eds.), pp. 179-205, North Holland, Amsterdam, 1981.
- S. OSHER. Riemann Solvers, the Entropy Condition and Difference Approximations, SIAM Journal of Numerical Analysis, vol 21, pp. 217-235, 1984.
- S. OSHER. Convergence of Generalized MUSCL Schemes, SIAM Journal of Numerical Analysis, vol 22, pp. 947-961, 1985.
- S. OSHER, F. SOLOMON. Upwind Schemes for Hyperbolic Systems of Conservation Laws, Mathematics of Computation, vol 38, pp. 339-377, 1982.

- P.A. RAVIART, J.M. THOMAS. A Mixed Finite Element Method for 2nd Order Elliptic Problems, in Lectures Notes in Mathematics, vol 606 (Dold-Eckmann Eds.), Springer Verlag, Berlin, pp. 292-315, 1977.
- A. RIVAS. BE03. Programme de calcul tridimensionnel de la transmission de chaleur et de l'ablation, Note Technique, 1982.
- P. ROE. Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes, Journal of Computational Physics, vol 43, pp. 357-372, 1981.
- F.X. ROUX. Séminaire d'Analyse Numérique, Université Paris 6, mars 1984.
- R.H. SANDERS, K.H. PRENDERGAST. The Possible Relation of the 3-kiloparsec Arm to Explosions in the Galactic Nucleus, the Astrophysical Journal, vol 188, pp. 489-500, mars 1974.
- D.B. SPALDING. A Novel Finite-Difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives, International Journal of Numerical Methods in Engineering, vol 4, pp. 551-559, 1972.
- S. SRINIVASAN, J.C. TANNEHILL, K.J. WEILMUNSTER. Simplified Curve Fits for the Thermodynamic Properties of Equilibrium Air, NASA R.P. n° 1181, août 1987.
- A. SUREH, M. LIOU. The Osher Scheme for Real Gases, AIAA Paper 90-0397, 28th Aerospace and Sciences Meeting, Reno (Nevada, USA), january 1990.
- P. K. SWEBY. High Resolution Schemes Using Flux Limiters for Hyperbolic Conservation Laws, SIAM Journal on Numerical Analysis, vol 21, pp. 995-1011, 1984.
- E. TADMOR. The Numerical Viscosity of Entropy Stable Schemes for Systems of Conservation Laws. I, Mathematics of Computation, vol 49, n° 179, pp. 97-103, 1987.
- B. VAN LEER. Towards the Ultimate Conservative Scheme I. The quest of monotonicity, Lectures Notes in Physics, vol 18, pp. 163-168, Springer Verlag, 1973.
- B. VAN LEER. Towards the Ultimate Conservative Scheme V. A Second Order Sequel to Godunov's Method, Journal of Computational Physics, vol. 32, pp. 101-136, 1979.
- B. VAN LEER, J.L. THOMAS, P.L. ROE, R.W. NEWSOME. A Comparison of Numerical Flux Formulas for the Euler and Navier Stokes Equations, AIAA Paper n° 87-1104, AIAA 8th CFD Conference, 1987.
- H. VIVIAND, J.P. VEUILLOT. Méthodes pseudo-instationnaires pour le calcul d'écoulements transsoniques, Publication ONERA n° 1978-4, 1978.

2° PARTIE MODELISATION

CHAPITRE 2.1

**Concavité de l'entropie thermostatique et
convexité de l'entropie mathématique au sens de Lax**

La Recherche Aérospatiale, n° 1990-3, pp. 77-80, mai 1990

2° PARTIE MODELISATION

CHAPITRE 2.2

**Concavité de l'entropie thermodynamique et convexité de
l'entropie mathématique de deux gaz quelconques sans
interaction mutuelle**

Rapport Aérospatiale, Programme Tebaldi,
ST/MI n° 40 616, janvier 1989

3° PARTIE ANALYSE MATHÉMATIQUE

**Une formulation tourbillon-vitesse-pression
pour le problème de Stokes**

Rapport interne Aérospatiale ST/S n° 266 / 91, octobre 1991
et Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris,
Tome 314, Série 1, pp. 277-280, 1992

4° PARTIE ANALYSE NUMERIQUE FONDAMENTALE

CHAPITRE 4.1

**Conditions aux limites fortement non linéaires
pour les équations d'Euler**

"Méthodes de différences finies et équations hyperboliques",
Cours CEA / EDF / INRIA (organisateur P.L. LIONS),
Rocquencourt, novembre 1988 in Rapport Aérospatiale,
Programme RAF, S/DT/MI n° 44236, décembre 1989

4° PARTIE ANALYSE NUMERIQUE FONDAMENTALE

CHAPITRE 4.2

Evaluation du flux d'Osher pour l'air à l'équilibre chimique

Rapport Aérospatiale, Programme Tebaldi,
Code Euler 3D en hypersonique et supersonique élevé,
S/DT/MI n° 41 747, avril 1989

4° PARTIE ANALYSE NUMERIQUE FONDAMENTALE

CHAPITRE 4.3

**A Non-Parameterized Entropy Correction for Roe's
Approximate Riemann Solver**

en collaboration avec Guillaume Mehlman

Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 102 120,
septembre 1991, soumis à *SIAM Journal of Numerical Analysis*

4° PARTIE ANALYSE NUMERIQUE FONDAMENTALE

CHAPITRE 4.4

**Nonlinear Interpolation and
Total Variation Diminishing Schemes**

Rapport Aérospatiale ST/S n° 46 195, juin 1990,
soumis à *Mathematics of Computation*

4° PARTIE ANALYSE NUMERIQUE FONDAMENTALE

CHAPITRE 4.5

Etude expérimentale de l'influence de quelques paramètres numériques sur la convergence vers l'état stationnaire d'un problème modèle pour l'aérodynamique

Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 100 850, juin 1991

4° PARTIE ANALYSE NUMERIQUE FONDAMENTALE

CHAPITRE 4.6

**Calcul des flux visqueux dans un code de résolution des
équations de Navier Stokes par une méthode
de volumes finis non-structurés**

Rapport Aerospatiale, Programme RAF,
S/DT/MI n° 105 / 89, juillet 1989

4° PARTIE ANALYSE NUMERIQUE FONDAMENTALE

CHAPITRE 4.7

**Interpolation de Lagrange et volumes finis.
Une technique nouvelle pour calculer le gradient d'une
fonction sur les faces d'un maillage non structuré**

Rapport Aerospatiale, Programme RAF,
ST/S n° 104 109, février 1992

5° PARTIE CALCUL SCIENTIFIQUE

CHAPITRE 5.1

**Solution of the Euler Equations Around a Double
Ellipsoïdal Shape Using Unstructured Meshes
and Including Real Gas Effects**

en collaboration avec Olivier Michaux

Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems,
Antibes (France), janvier 1990 (Désidéri-Glowinski-Périaux Editors),
Springer Verlag, vol 2, pp. 358-373, 1992

5° PARTIE CALCUL SCIENTIFIQUE

CHAPITRE 5.2

**Numerical Solution of the Navier Stokes Equations for
Hypersonic Ramps with the NS3GR Solver**

en collaboration avec Olivier Michaux

Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems, Part 2,
Antibes (France), avril 1991, à paraître, (Désidéri-Glowinski-Périaux
Editors), Springer Verlag, vol 3, Rapport Aérospatiale,
Programme RAF, ST/S n° 48 899, janvier 1991

5° PARTIE CALCUL SCIENTIFIQUE

CHAPITRE 5.3

**FLU3PNS : A Three-Dimensional Thin Layer and Parabolized
Navier-Stokes Solver Using the MUSCL Upwind Scheme**

en collaboration avec Eric Chaput, Didier Lemaire,
Gilles Moulès et Jean-Louis Vaudescal

AIAA Paper 91-0728, 29th Aerospace and Sciences Meeting,
Reno (Nevada, USA), january 1991

6° PARTIE ANNEXE

CHAPITRE 6.1

**Computation of Hypersonic Flows with a Fully Coupled
Implicit Solver and an Extension of the CVDV Model
for Thermochemical Relaxation**

en collaboration avec Guillaume Mehlman,
Frédéric Thivet et Sébastien Candel

Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems, Part 2,
Antibes (France), avril 1991, à paraître, (Désidéri-Glowinski-Périaux
Editors), Springer Verlag, vol 3, Rapport Aérospatiale,
Programme RAF, ST/S n° 36 / 91, février 1991

6° PARTIE ANNEXE

CHAPITRE 6.2

**Une version à pas fractionnaires du schéma de
Godunov en hydrodynamique**

en collaboration avec Rémy Baraille,
Ghislaine Bourdin et Alain-Yves Le Roux

Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris,
Tome 314, Série 1, pp. 147-152, 1992

7° PARTIE LISTE DE TRAVAUX SCIENTIFIQUES

Nous avons regroupé dans cette dernière partie la liste des travaux que nous avons évoqués dans ce mémoire, dans un ordre très conventionnel : Thèse de Doctorat, Articles dans des revues soumises à comité de lecture, Conférences publiées, Conférences non publiées, Rapports de recherche, participation à des cours de spécialité.

THESE

Quelques problèmes liés au calcul d'écoulements de fluides parfaits dans les tuyères, Thèse de l'Université Paris 6, janvier 1988.

ARTICLES

- F. DUBOIS, P. LE FLOCH. Condition à la limite pour un système de lois de conservation, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, Série 1, vol 304, n° 3, pp. 75-78, 1987.
- F. DUBOIS, P. LE FLOCH. Boundary Conditions for Nonlinear Hyperbolic Systems of Conservation laws, *Journal of Differential Equations*, vol 71, n°1, pp. 93-122, January 1988.
- F. DUBOIS. Concavité de l'entropie thermostatique et convexité de l'entropie mathématique au sens de Lax, *La Recherche Aéronautique*, n° 1990-3, pp. 77-80, mai 1990.
- F. DUBOIS. Discrete Vector Potential Representation of a Divergence-Free Vector Field in Three-Dimensional Domains : Numerical Analysis of a Model Problem, *SIAM Journal of Numerical Analysis*, vol 27, n° 5, pp. 1103-1141, October 1990.
- F. DUBOIS. Resolution of the Transonic Full Potential Model by Mixed Velocity Stream Function Finite Elements and the Engquist-Osher Numerical Scheme, à paraître dans *International Journal of Numerical Methods in Fluids*.

- F. DUBOIS. Nonlinear Interpolation and Total Variation Diminishing Schemes, Rapport Aérospatiale ST/S n° 46 195, juin 1990, soumis à *Mathematics of Computation*.
- R. BARAILLE, G. BOURDIN, F. DUBOIS et A.Y. LE ROUX, Une version à pas fractionnaires du schéma de Godounov en hydrodynamique, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, t. 314, Série 1, pp. 147-152, 1992.
- F. DUBOIS, G. MEHLMAN. A Non-Parameterized "Entropy Fix" for Roe's Method, à paraître dans *AIAA Journal*, 1992.
- F. DUBOIS, G. MEHLMAN. A Non-Parameterized Entropy Correction for Roe's Approximate Riemann Solver, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 102 120, septembre 1991, soumis à *SIAM Journal of Numerical Analysis*.
- F. DUBOIS. Une formulation tourbillon-vitesse-pression pour le problème de Stokes, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, t. 314, Série 1, pp. 277-280, 1992.

CONFERENCES PUBLIEES

- F. DUBOIS, P. LE FLOCH. Boundary Conditions for Nonlinear Hyperbolic Systems of Conservation laws, Second International Conference on Hyperbolic Problems, Aachen (Federal Republic of Germany), march 1988 (Ballmann-Jeltsch Editors), Vieweg, Notes on Numerical Fluid Dynamics, vol 24, pp. 96-104, Vieweg, 1989.
- F. DUBOIS, O. MICHAUX. Solution of the Euler Equations Around a Double Ellipsoïdal Shape Using Unstructured Meshes and Including Real Gas Effects, Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems, Antibes (France), janvier 1990 (Désidéri-Glowinski-Périaux Editors), Springer Verlag, vol 2, pp. 358-373, 1992.
- F. DUBOIS. Nonlinear Interpolation and Total Variation Diminishing Schemes, Third International Conference on Hyperbolic Problems, Uppsala (Sweden), june 1990 (Engquist-Gustafsson Editors), Chartwell-Bratt, pp. 351-359, 1991.
- F. DUBOIS, O. MICHAUX. Numerical Solution of the Navier Stokes Equations for Hypersonic Ramps with the NS3GR Solver, Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems (Part II), Antibes (France), avril 1991, Rapport Aérospatiale ST/S n° 48 899, janvier 1991.

- G. MEHLMAN, F. THIVET, S. CANDEL, F. DUBOIS. Computation of Hypersonic Flows with a Fully Coupled Implicit Solver and an Extension of the CVDV Model for Thermochemical Relaxation, Workshop on Hypersonic Flows for Reentry Problems (Part II), Antibes (France), avril 1991, Rapport Aerospatiale ST/S n° 36 / 91, février 1991.
- F. DUBOIS, G. MEHLMAN. A Non-Parameterized Entropy Correction for Roe's Approximate Riemann Solver, 10^{ème} Congrès de l'INRIA (R. Glowinski, Ed.), 11-14 février 1992, Nova Science Publishers, pp. 479-488, 1992.

CONFERENCES N'AYANT PAS DONNE LIEU A PUBLICATION

- F. DUBOIS. Calcul d'écoulements transsoniques dans des tuyères par une méthode d'éléments finis mixtes, Congrès National d'Analyse Numérique, Puy Saint Vincent (France), mai 1985.
- F. DUBOIS, J.M. DUPUY. A Three Dimensional Vector Potential Formulation for Solving Transonic Flow with Mixed Finite Elements, 6^o International Symposium on Finite Elements in Flow Problems, Antibes (France), juin 1986.
- F. DUBOIS, G. MEHLMAN, O. MICHAUX. Some Recent Developments on Hypersonic Flow at Aerospatiale Les Mureaux, Invited Paper, IMACS First International Conference on Computational Physics, Boulder (Colorado, USA), june 1990.
- E. CHAPUT, F. DUBOIS, D. LEMAIRE, G. MOULES, J.L. VAUDESCAL. FLU3PNS : A Three-Dimensional Thin Layer and Parabolized Navier-Stokes Solver Using the MUSCL Upwind Scheme, AIAA Paper 91-0728, 29th Aerospace and Sciences Meeting, Reno (Nevada, USA), january 1991.
- F. DUBOIS, G. MEHLMAN. A Non-Parameterized "Entropy Fix" for Roe's Method, 10th AIAA Conference on Computational Fluid Dynamics, Honolulu, june 1991.
- F. DUBOIS. Volumes finis non structurés, Quatrième séminaire sur les écoulements de fluides compressibles, CEA Saclay, janvier 1992.

RAPPORTS DE RECHERCHE

- F. DUBOIS. Boundary Conditions and the Osher Scheme for the Euler Equations of Gas Dynamics, Rapport Interne n° 170 du Centre de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Polytechnique, octobre 1987.
- F. DUBOIS. Interpolation non linéaire et schémas à variation totale décroissante, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/MI n° 40 348, novembre 1988.
- F. DUBOIS. Concavité de l'entropie thermodynamique et convexité de l'entropie mathématique de deux gaz quelconques sans interaction mutuelle, Rapport Aérospatiale, Programme Tebaldi, ST/MI n° 40 616, janvier 1989.
- F. DUBOIS. Evaluation du flux d'Osher pour l'air à l'équilibre chimique, Rapport Aérospatiale, Programme Tebaldi, S/DT/MI n° 41 747, avril 1989.
- F. DUBOIS. Calcul des flux visqueux dans un code de résolution des équations de Navier Stokes par une méthode de volumes finis non-structurés, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, S/DT/MI n° 105 / 89, juillet 1989.
- P. LABORIE, F. DUBOIS. Code CEL3GR de résolution des équations d'Euler tridimensionnelles en maillage non-structuré. Implémentation d'une phase implicite, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, S/DT/MI n° 44 236, décembre 1989.
- F. DUBOIS. Etude expérimentale de l'influence de quelques paramètres numériques sur la convergence vers l'état stationnaire d'un problème modèle pour l'aérodynamique, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 100 850, juin 1991.
- S. PAVSIC, F. DUBOIS, F. CORON. Prise en compte de conditions aux limites de glissement dans un code Navier Stokes bidimensionnel, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 102 329, octobre 1991.
- F. BERTAGNOLIO, F. DUBOIS, O. MICHAUX. Validation du code NS3GR de résolution des équations de Navier-Stokes d'un fluide compressible dans le cas de l'approximation de Boussinesq, Rapport Aérospatiale, Plan logiciel, ST/S n° 102 562, octobre 1991.
- F. DUBOIS. Une formulation tourbillon-vitesse-pression pour le problème de Stokes, Rapport interne Aérospatiale ST/S n° 266 / 91, octobre 1991.
- F. DUBOIS. Interpolation de Lagrange et volumes finis. Une technique nouvelle pour calculer le gradient d'une fonction sur les faces d'un maillage non structuré, Rapport Aérospatiale, Programme RAF, ST/S n° 104 109, février 1992.

PARTICIPATION A DES COURS SPECIALISES

"Journées Eléments Finis Mixtes", Cours GAMNI / SMAI (organisateur J.F. MAITRE), Ecole Centrale de Lyon, septembre 1986.

"Méthodes de différences finies et équations hyperboliques", Cours CEA / EDF / INRIA (organisateur P.L. LIONS), Rocquencourt, novembre 1988.

"Modélisation numérique des écoulements fluides", Cours du Collège de l'Ecole Polytechnique (organisateur Y. BRENIER), Palaiseau, janvier 1991.

"Résolution numérique des équations d'Euler multidimensionnelles", en collaboration avec A. LERAT et B. LARROUTUROU, Cours du Diplôme d'Etudes Approfondies d'Analyse Numérique des universités Paris 6 et Paris 13, de l'Ecole Polytechnique et de l'Ecole Normale Supérieure (responsables O. PIRONNEAU et P.A. RAVIART), Palaiseau, 1991 et 1992.