

MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS COMPRESSIBLES À FAIBLE NOMBRE DE MACH

H. Paillerre
(DMT/SYSCO),
S. Clerc
(DMT/SERMA),
F. Dabbene
(DMT/SEMT),
O. Cueto
(DTP/SMTH)

ISOMACHS D'UN
ÉCOULEMENT
DE CONVECTION
NATURELLE DANS
UNE CAVITÉ CARRÉE,
DONT LES PAROIS
VERTICALES SONT
MAINTENUES À
DES TEMPÉRATURES
DIFFÉRENTES. LES
NOMBRES DE MACH
DANS CES ÉCOULEMENTS
SONT TRÈS FAIBLES,
EN GÉNÉRAL
INFÉRIEUR À 10^{-3}

CONTEXTE DES ÉTUDES

Les écoulements de la thermohydraulique monophasique ou diphasique sont la plupart du temps caractérisés par des faibles nombres de Mach, c'est à dire que la vitesse de l'écoulement est très inférieure à celle du son. Lorsque les écarts de densité et/ou de température sont importants, ce qui est le cas des écoulements réactifs (combustion) ou diphasiques (liquide/vapeur), il convient de prendre en compte les effets de compressibilité du fluide et de l'écoulement. Les équipes de la DRN ont développé depuis quelques années une réelle compétence dans le domaine, en vue, notamment, d'améliorer la précision des codes applicatifs multi-dimensionnels tels que TONUS [1] (outil d'analyse du risque hydrogène développé par le SEMT pour le compte de l'IPSN), ou FLICA-4 [2] (code de thermohydraulique du coeur). Pour ce faire, des méthodes numériques ont été développées, soit à base d'extension de méthodes adaptées aux écoulements incompressibles, soit en corrigeant les déficiences des schémas compressibles utilisés dans des régimes d'écoulement proches de l'incompressible. Cet article a pour objectif de faire une présentation synthétique de ces travaux, et de les situer dans le cadre des réflexions sur les développements numériques évoquées dans le rapport FASTNET [3], et au niveau européen, dans le cadre du réseau ERCOFTAC, Quality and Trust in Industrial CFD [4].

INTRODUCTION

Les écoulements de fluides soumis aux forces de flottabilité sont habituellement modélisés par l'approximation de Boussinesq, en supposant que les écarts de températures sont faibles et l'écoulement incompressible. Ainsi, on prend en compte les différences de flottabilité dues aux variations de densité, mais pas les différences d'inertie. Il y a deux avantages à cette approche : les équations font intervenir une variable de moins puisque la masse volumique est supposée constante dans tous les termes différentiels, et la limite de stabilité des schémas explicites en temps est indépendante de la vitesse du son. L'hypothèse de Boussinesq cesse cependant d'être valide lorsque l'écoulement

est soumis à de larges variations de température, à d'importantes sources de chaleur internes dues par exemple à des réactions chimiques exothermiques, ou encore à une pressurisation ou dépressurisation dans le cas où l'écoulement est confiné. Ces écoulements sont presque toujours caractérisés par des nombres de Mach très petits, et des rapports de masse volumique importants. De même, dans le cas des écoulements diphasiques à bulles tel que ceux rencontrés dans un coeur de réacteur nucléaire, l'écoulement est typiquement caractérisé par des nombres de Mach de l'ordre de 10^{-4} , puisque composé essentiellement d'eau sous forme liquide, alors que des variations de densité de l'ordre de 10% peuvent exister. Une difficulté supplémentaire est introduite par le fait que la température d'ébullition dépend fortement de la pression. On doit donc prendre en compte dans le calcul la valeur locale de la pression et non simplement une valeur de référence globale.

La simulation numérique des écoulements compressibles en régime transsonique ou supersonique a atteint aujourd'hui un grand degré de maturité, avec des schémas précis et efficaces. De même, la simulation des écoulements incompressibles est aujourd'hui bien maîtrisée. Le développement de méthodes numériques pour traiter les écoulements compressibles à faible nombre de Mach est quant à lui beaucoup plus récent, et passe essentiellement par deux approches : l'extension de solveurs incompressibles à des écoulements où la masse volumique peut varier fortement, ou l'amélioration de la précision et de la performance des schémas compressibles lorsque le nombre de Mach tend vers zéro. En dehors du contexte nucléaire et de la thermohydraulique [5], les écoulements à faible nombre de Mach se rencontrent dans plusieurs secteurs industriels comme l'aéronautique, l'automobile ou encore les procédés de combustion.

Les différents systèmes d'équations

On peut classer les différents systèmes en fonction du degré de couplage entre les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie (tableau 1).

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla p' + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \mathbf{g} + \frac{\mu_0}{\rho_0} \Delta \mathbf{u} \quad (a) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T &= \frac{\lambda_0}{\rho_0 C_p} \Delta T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0 \\ \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) &= -\nabla p' + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}} \\ \rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right] + \frac{dP}{dt} &= -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) \quad (b) \\ \rho &= \frac{P(t)}{RT} \quad \mu = \mu(T), \lambda = \lambda(T) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0 \\ \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) &= -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}} \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) &= -\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \cdot \mathbf{u}) \quad (c) \\ P &= \rho RT \quad \mu = \mu(T), \lambda = \lambda(T) \end{aligned}$$

Tableau 1 : Différents systèmes d'équations gouvernant les écoulements de fluide compressible :

- (a) approximation de Boussinesq,
 (b) modèle asymptotique
 (c) modèle compressible écrit sous forme conservative

● **l'approximation de Boussinesq.** Ce système d'équations (système (a) dans le tableau 1) représente le premier niveau de couplage entre équations de Navier-Stokes (continuité et quantité de mouvement) et équation de l'énergie, par l'intermédiaire du seul terme de flottabilité dû aux forces de pesanteur. L'écoulement est supposé incompressible. La vitesse et la pression dynamique sont couplées par l'intermédiaire d'une équation de Poisson, soulignant ainsi la nature elliptique du système vitesse - pression.

● **les modèles asymptotiques.** Ces modèles (tel que le système (b) dans le tableau 1), très souvent utilisés dans la modélisation de la combustion [6], permettent de coupler la densité, la température et une pression thermodynamique globale, uniforme en espace mais variable en temps, au travers de la loi d'état du fluide [7]. Le couplage vitesse (ou plus exactement quantité de mouvement) - pression dynamique conserve un caractère elliptique. Ce couplage, qui se fait par l'intermédiaire de l'équation de continuité, est plus délicat à prendre en compte que dans le cas incompressible.

● **les équations compressibles.** Ce système d'équations (système (c) dans le tableau 1), qui ne comporte aucune hypothèse restrictive, exprime la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie totale. La partie convective du système a un caractère hyperbolique quel que soit le nombre de Mach. Dans le cas stationnaire, il a un caractère mixte hyperbolique/ellip-

tique. Le couplage entre les équations est complet : on prend en compte les variations de la densité avec la température mais aussi avec la pression.

Les différentes méthodes numériques

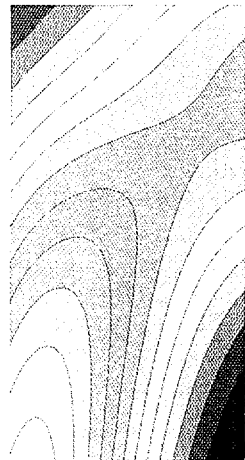
On distingue :

● **les solveurs compressibles.** Ils sont caractérisés par l'utilisation d'un seul maillage pour la vitesse et la pression - on parle de méthodes colocalisées. La stabilisation du schéma est assurée au travers de schémas de type solveurs de Riemann (tels que le schéma de Godounov ou le schéma de Roe), dont la dissipation numérique tient compte non seulement de la vitesse matérielle du fluide mais aussi de la propagation des ondes acoustiques. Ces solveurs sont de ce fait à la fois robustes et précis dans une large gamme de nombre de Mach. Malheureusement, ces solveurs s'avèrent peu précis dans le cas d'écoulements à faible nombre de Mach pour lesquels les ondes acoustiques jouent un rôle négligeable. La technique dite du pré-conditionnement, initialement proposée par Turkel et van Leer [8], consiste à pondérer les termes de stabilisation en tenant compte de la faiblesse des ondes acoustiques.

Ce type de technique a fait l'objet de travaux au DMT depuis plusieurs années, notamment dans le cadre du développement du code FLICA-4 [9,10], ainsi qu'à l'INRIA [11].

Au vu des bons résultats obtenus, il a été décidé de mettre en œuvre ce type de solveur dans le code TRIO_U. La méthode numérique choisie pour traiter les écoulements compressibles à faible nombre de Mach est une méthode de volumes finis centrés, basée sur le schéma de Roe, pré-conditionné par la matrice de Turkel [8]. Cette méthode, déjà testée avec succès dans le code développé à l'INRIA pour la dynamique des gaz parfaits [11], sera étendue par la suite aux fluides compressibles à lois d'états réelles.

● **les solveurs pression ou pressure-based solvers.** Contrairement aux solveurs compressibles, ces méthodes utilisent des maillages différents pour calculer la vitesse et la pression - on parle de méthodes à maillages décalés. La méthode ICE (Implicit Continuous Eulerian) de Harlow et Amsden [12] est l'un des premiers schémas numériques permettant de traiter à la fois les écoulements incompressibles et les écoulements compressibles. Ce schéma, qui utilise la pression et non la densité comme variable principale, utilise des maillages de type "différences finies" entrelacés. L'algorithme de résolution est basé sur une méthode à pas fractionnaires élaborée, permettant de coupler la vitesse et la pression, et de traiter de façon



implicite la densité dans l'équation de continuité et dans l'équation d'état afin de s'affranchir de la condition CFL basée sur les ondes acoustiques. Des variantes de cette méthode ont été proposées depuis, dont la méthode PISO [13], ou au CEA, le solveur diphasique du code CATHARE [14].

Les méthodes d'éléments finis développés au CEA dans les codes CASTEM2000 ou GENEPI appartiennent aussi à la classe des solveurs pression. La stabilisation se fait en général par l'utilisation d'éléments différents pour la vitesse et la pression. Ces méthodes diffèrent par la façon dont le couplage est pris en compte. Dans [15], on calcule la dérivée en temps de la densité de façon explicite, ce qui permet de se ramener formellement au cas incompressible. Dans [16], cette dérivée en temps est négligée, ce qui est légitime pour les calculs d'écoulements stationnaires.

Dans les paragraphes suivants, ces différentes méthodes numériques sont discutées au travers de deux applications (thermo-hydraulique cœur et enceinte). Un exercice de benchmark visant à établir des solutions de référence pour la validation des différents solveurs est également décrit.

THERMOHYDRAULIQUE CŒUR : ÉCOULEMENTS MULTI-DIMENSIONNELS ET EFFETS FAIBLE MACH

Historiquement, les codes de calcul pour l'analyse du risque thermo-hydraulique des échangeurs reposaient souvent sur des hypothèses restrictives quant à la structure de l'écoulement. La plus courante consistait à définir une direction privilégiée pour cet écoulement, et à négliger les effets d'inertie dans la direction transverse. Cette hypothèse, dite "approximation du sous-canal", est généralement légitime dans les géométries de type "faisceaux de tubes", tant que les vitesses transverses restent faibles par rapport aux vitesses axiales. Derrière cette approximation, se cache une hypothèse non-formulée mais généralement acceptée, à savoir que les calculs mono-dimensionnels sont conservatifs par rapport aux effets multi-dimensionnels. En d'autres termes, les effets multi-dimensionnels sont supposés jouer toujours dans le sens d'une meilleure sûreté. Cette hypothèse n'est malheureusement pas toujours vraie dans la pratique. Le but de cette section est d'illustrer cette remarque sur un exemple simple, afin de justifier l'importance d'un traitement rigoureux des effets multi-dimensionnels.

Notre exemple consiste à calculer un écoulement stationnaire dans un canal bidimensionnel ascendant, chauffé de façon non-uniforme, et vérifiant les équations de conservation suivantes :

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

$$\frac{\partial \rho u H}{\partial x} + \frac{\partial \rho v H}{\partial z} = \Phi$$

La source de chaleur a un profil radial non-uniforme donné (figure 1a). Par souci de simplicité, le fluide considéré est un mélange diphasique homogène équilibré, ce qui revient à négliger les déséquilibres cinématiques et thermodynamiques entre phases. La principale caractéristique du mélange diphasique, considéré comme un seul fluide, est sa dilatabilité thermique importante. En d'autres termes, un apport de chaleur se traduit par une variation importante de la densité du fluide, ce qui n'est pas le cas pour l'eau liquide.

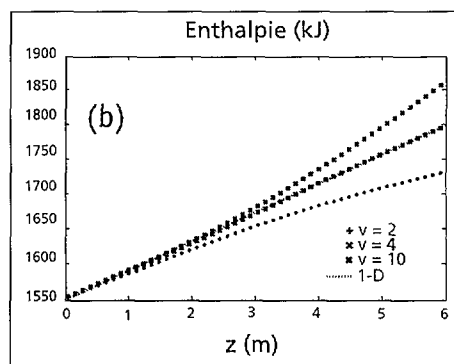
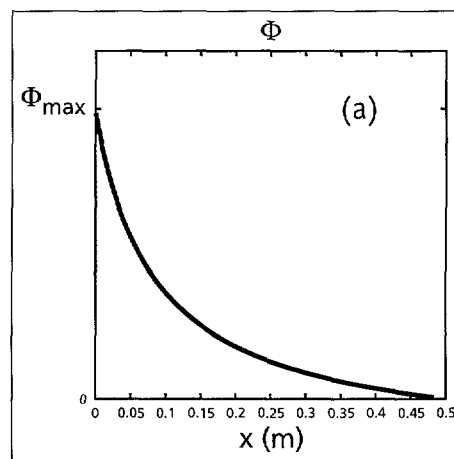
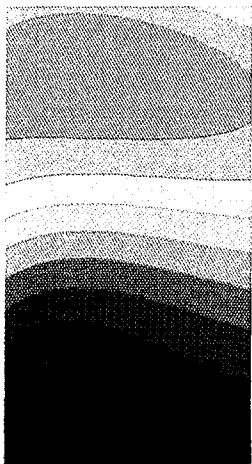


Figure 1 : (a) profil de la source volumique de chaleur Φ le long de l'axe dans un écoulement diphasique bidimensionnel ascendant, modélisé par le modèle homogène équilibré ; (b) profils d'enthalpie sur la paroi chaude pour des débits d'entrée différents et comparaison entre prédiction 1D et prédiction 2D



L'analyse mono-dimensionnelle du problème, supposée "conservative", consiste à faire comme si le flux de chaleur était toujours égal à sa valeur maximale. La solution ne dépend alors que du rapport entre ce flux de chaleur et le débit de fluide dans le canal.

Le calcul bidimensionnel, effectué avec un schéma compressible préconditionné [17,18], montre que cette solution n'est pas toujours conservative (figure 1b). En effet, pour un même rapport flux de chaleur / débit massique, on peut observer des profils d'enthalpie différents dans la zone chaude. Or cette solution n'est pas toujours conservative, comme le montre la figure 2. Sur cette figure, on montre les profils d'enthalpie sur la paroi chaude, obtenus par le calcul bidimensionnel. Ces différents calculs correspondent à des débits d'entrée G différents, et des valeurs de F ajustées de façon à garder le rapport G/F_{max} constant. Pour la valeur nominale du débit, qui correspond à une vitesse de 4 m/s, l'approximation 1D est très bonne. Pour une valeur flux faible du débit d'entrée (2 m/s), l'approximation est conservative, car l'enthalpie croît moins vite que pour le calcul 1D. En revanche, lorsque le débit est plus fort (10 m/s), l'approximation 1D n'est plus conservative.

Pour mieux comprendre ce phénomène, il faut examiner les profils de la vitesse transverse (figure 2). Pour la valeur nominale du débit, les vitesses transverses sont très faibles, ce qui explique la pertinence de l'approximation 1D. Pour le débit le plus faible, on observe un courant transverse au voisinage de la paroi chaude, et dirigé vers celle-ci : l'écoulement amène donc du fluide plus froid au contact de la paroi chaude. Pour le débit le plus fort, le courant transverse est

dirigé dans l'autre sens. Le fluide se détend et ralentit, ce qui dégrade l'échange thermique. A la lumière de ces observations, on comprend qu'il y a compétition entre deux effets qui se compensent dans le cas du débit nominal. Un autre enseignement à tirer de ce calcul est qu'un courant transverse relativement faible peut avoir un impact significatif sur le transfert de chaleur.

Quelle est la nature de ces effets? Ils mettent en jeu deux phénomènes distincts : la poussée d'Archimède et la dilatation thermique. A faible vitesse, la poussée d'Archimède domine. Elle a tendance à accélérer le fluide chaud par rapport au fluide froid, ce qui crée un mouvement d'aspiration. C'est "l'effet cheminée". A plus forte vitesse, c'est la dilatation thermique qui domine. Le fluide chaud, en se dilatant, repousse le fluide froid. Cet effet est négligeable pour l'eau liquide, mais devient important dans un écoulement diphasique. Cet exemple très simple montre l'importance d'une bonne prise en compte des effets multi-dimensionnels dans les analyses thermohydrauliques.

THERMOHYDRAULIQUE ENCEINTE : LE RISQUE HYDROGÈNE

Depuis quelques années, l'IPSN et le DMT collaborent au développement d'un logiciel d'analyse du "risque hydrogène" appelé TONUS. Pour cette analyse, il est nécessaire de pouvoir simuler les différents comportements thermohydrauliques susceptibles de se produire dans une enceinte de REP dans l'hypothèse où se produirait une brèche dans le circuit primaire. Parmi les phénomènes qui peuvent découler de cette rupture, on peut citer la pressurisation de l'enceinte par

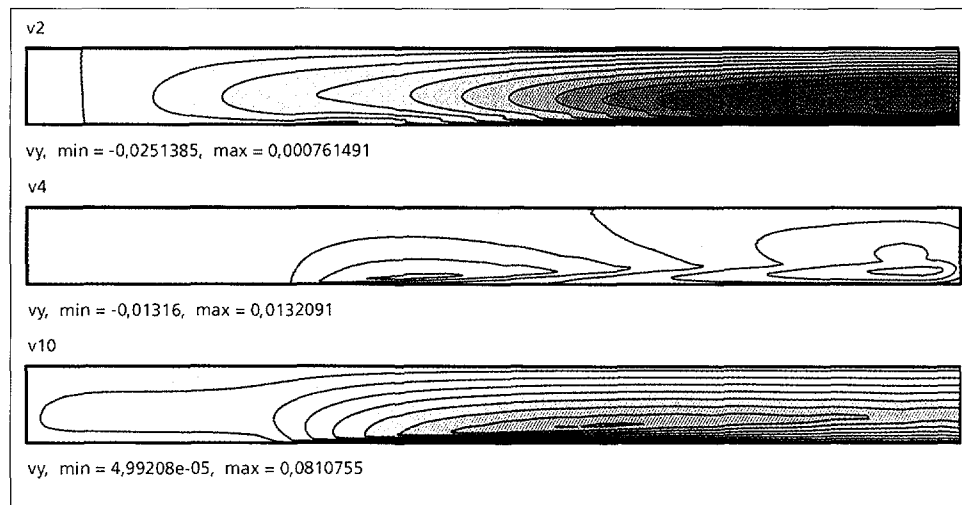


Figure 2 : De haut en bas, isocontours de la vitesse transverse pour débits d'entrée croissants (2 m/s, 4 m/s et 10 m/s), montrant que dans le premier cas se crée un courant transverse dirigé vers la plaque chaude, dans le deuxième cas, l'écoulement transverse est très faible et donc l'approximation 1D est justifiée, et dans le troisième cas, se crée un courant transverse issu de la plaque chaude.



vaporisation du réfrigérant du circuit primaire, la condensation, l'injection d'hydrogène (produit lors de la dégradation du cœur) au niveau de la brèche et sa répartition dans le volume de l'enceinte. Si les concentrations de l'hydrogène dépassent localement le seuil d'inflammabilité, le mélange gazeux pourrait alors s'enflammer et la combustion se propager sous forme de déflagration. Il est donc important d'étudier les moyens de limitation du risque à mettre en œuvre afin d'éviter la transition déflagration-détonation (TDD) qui pourrait représenter un risque pour l'intégrité des structures de l'enceinte de confinement.

L'outil TONUS est un ensemble de procédures et d'opérateurs développés dans le code CASTEM 2000. Il comporte plusieurs modules : un module OD multi-compartiments, un module multi-dimensionnel dédié à l'étude de la distribution d'hydrogène dans l'enceinte, ainsi qu'un module dédié à la simulation de la combustion sous plusieurs modes (déflagrations ou détonations). Nous nous intéressons ici aux modules multi-dimensionnels simulant les écoulements thermohydrauliques dans l'enceinte.

Nature des écoulements et modèles physiques associés

A l'exception des déflagrations rapides et des détonations, et du voisinage immédiat de la brèche, les écoulements sont des écoulements compressibles à très faible nombre de Mach, de type convection naturelle ou convection mixte. La condensation en paroi, au même titre que l'injection, agit en tant que moteur pour les mouvements de convection et influe beaucoup sur la distribution du mélange.

Les mécanismes physiques en jeu peuvent avoir des effets contradictoires sur les concentrations locales en hydrogène. La turbulence due au panache ou aux couches de cisaillement (couches limites) va favoriser la dilution de l'hydrogène et l'homogénéisation du mélange gazeux. Une stratification thermique ou massique au contraire s'opposera à l'homogénéisation du mélange alors que la condensation en paroi vont avoir un effet de reconcentration. Il est donc important de bien modéliser ces trois mécanismes et leurs interactions. La modélisation de ces phénomènes physiques est intégrée à une approximation faible Mach des équations de Navier-Stokes compressibles, inspirée par le modèle de Paolucci [7]. Le même modèle d'écoulement sert également de base à la modélisation de la combustion de l'hydrogène, avec l'introduction de termes sources du type loi d'Arrhénius ou modèle Eddy Break-Up [19], et cela tant que les flammes restent suffisamment lentes, de l'ordre de quelques dizaines de mètres par secondes.

Modèles à faible nombre de Mach

Nous avons dans un premier temps utilisé un modèle à faible nombre de Mach conduisant à une résolution en vitesse et pression [1], très proche de la discrétisation des équations de Navier-Stokes incompressibles, avec approximation de Boussinesq. Pour cela, la pression est décomposée en une pression thermodynamique reliée à la loi d'état et uniforme dans l'enceinte et une pression dynamique, d'amplitude beaucoup plus faible. On filtre ainsi les ondes sonores qui sont responsables du mauvais conditionnement des équations à faible nombre de Mach. Le système d'équations issu de cette décomposition est résolu par un algorithme semi-explicite qui permet de découpler les équations en vitesse et en pression, la densité étant évaluée à partir de la pression thermodynamique et de la loi d'état. L'évolution au cours du temps de la pression thermodynamique est évaluée à partir des bilans de masse et d'énergie dans le volume considéré. On doit alors résoudre un problème elliptique implicite en pression, la vitesse étant calculée explicitement à partir du nouveau champ de pression. Les figures 3 et 4 montrent à titre d'illustration des simulations réalisées avec cet algorithme, avec dans le premier cas un calcul de distribution d'hydrogène dans une géométrie à plusieurs compartiments (casemates) [1], ou un calcul de propagation d'une flamme turbulente dans un canal partiellement obstrué [19]. Afin de traiter les transitoires longs, une version implicite de cette méthode a également été développée.

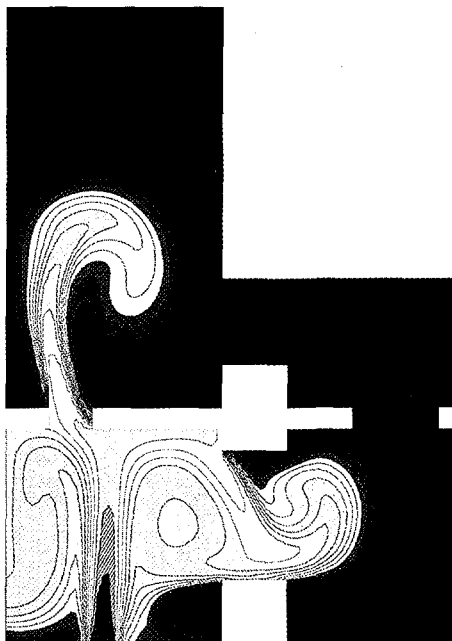
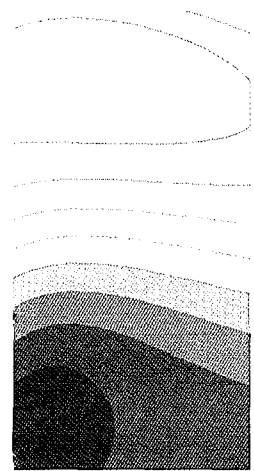


Figure 3: Distribution d'hydrogène dans une enceinte sous pression par injection d'un mélange vapeur-hydrogène : concentration volumique d'hydrogène, comprise entre 0 et 10% [4]



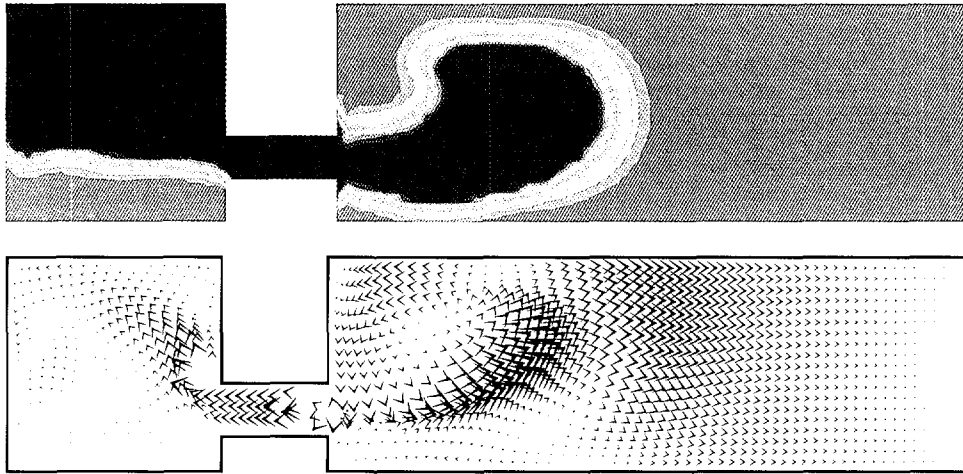


Figure 4 : Flamme turbulente se propageant dans une géométrie compartimentée, remplie d'un mélange air-hydrogène pauvre (7,5% en volume) : isoconcentration d'hydrogène et champ de vitesse [13]

UN BENCHMARK POUR LES SOLVEURS COMPRESSIBLES À FAIBLE NOMBRE DE MACH

Ce benchmark, qui fait l'objet d'un workshop international intégré au 12^{ème} séminaire DRN "Mécanique des Fluides Numérique", a pour objet la modélisation et la simulation des écoulements de convection naturelle engendrés par de grands écarts de température, pour lesquels il n'est pas légitime de faire appel à l'hypothèse de Boussinesq. La résolution des équations de Navier-Stokes compressibles est quant à elle rendue difficile par l'extrême raideur du système, due essentiellement à la disparité entre vitesse du fluide et vitesse des ondes acoustiques. Les nombres de Mach dans les écoulements de convection naturelle sont en effet extrêmement faibles, de l'ordre de 10^{-4} . Le cas test sélectionné est celui de la cavité carrée à parois verticales chauffantes. Ce problème a fait l'objet d'une comparaison entre solveurs incompressibles avec approximation de Boussinesq [20], pour laquelle une série de solutions de référence a été proposée pour des nombres de Rayleigh compris entre 10^3 et 10^6 . L'objectif ici est de proposer des solutions de référence pour le cas où l'approximation de Boussinesq n'est plus

valable, et les effets de compressibilité doivent être pris en compte.

Sans anticiper sur les conclusions de ce workshop, on peut déjà avancer quelques conclusions, tirées de comparaisons effectuées entre les différents solveurs développés au CEA, et basés sur des modèles physiques et des méthodes numériques différents. Un très bon accord a en effet été trouvé [21], que ce soit entre transferts de chaleur représentés par les distributions locales du Nusselt, pression thermodynamique régnant dans la cavité, et conservation de la masse et de l'énergie. La figure 5 montre différents paramètres de l'écoulement de convection naturelle à Rayleigh 10^6 , dont le nombre de Mach qui ne dépasse pas $5,6 \cdot 10^{-4}$. La figure 6 montre une comparaison du Nusselt sur les parois de la cavité pour le cas Rayleigh 10^3 , entre solveur à faible nombre de Mach basé sur un modèle asymptotique, et schéma de Roe-Turkel basé sur les équations compressibles complètes. Un excellent accord a été obtenu. De par son intérêt, ce benchmark fait également l'objet d'un chapitre du Best Practice Guidelines in Industrial CFD, produit par le groupe d'experts européens du réseau ERCOFTAC [4].

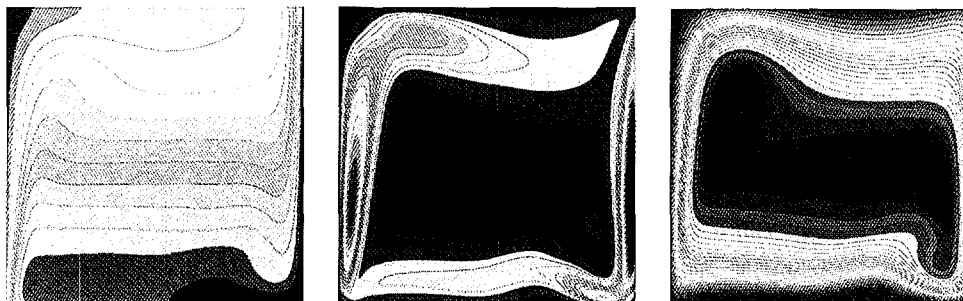


Figure 5 : Simulation de l'écoulement de convection naturelle dans une cavité carrée à Rayleigh 10^6 et grand écart de température ($e = \Delta T / 2T_0 = 0,6$), calculée par le solveur à faible nombre de Mach [2] : de gauche à droite, les isothermes ($240 < T < 960 \text{ K}$), les isomachs ($0 < M < 5,6 \cdot 10^{-4}$) et les lignes de courant



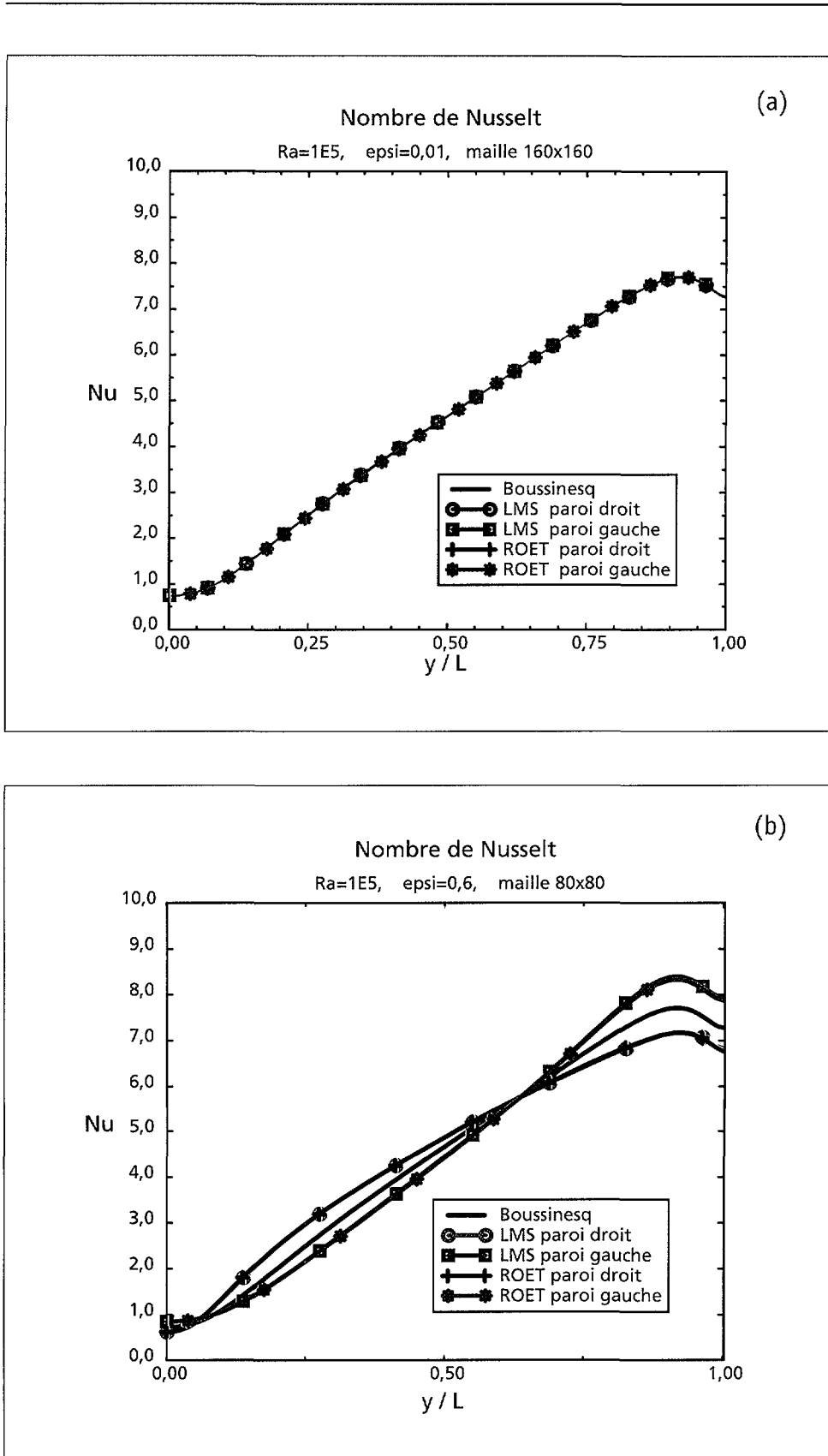


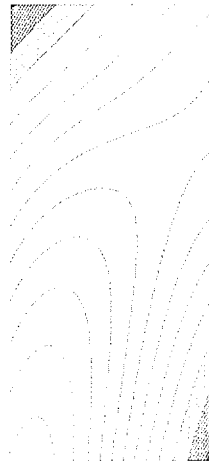
Figure 6 : Comparaison des distributions du nombre de Nusselt local calculé par un solveur compressible (schéma de Roe-Turkel) et par un solveur à faible nombre de Mach basé sur un modèle asymptotique pour les cas $Ra=10^5$ et faible écart de température (a) $e=0,001$ et grand écart de température (b) $e=0,6$, montrant un excellent accord [2]

CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons abordé différents aspects de la modélisation des écoulements compressibles à faible nombre de Mach, celui du choix du modèle physique comme celui du choix de la discrétisation numérique. Au cours des cinq dernières années, différentes méthodes ont été développées à la DRN, souvent dans un cadre applicatif précis, comme la thermohydraulique cœur ou la thermohydraulique enceinte. Ces solveurs, méthodes éléments finis ou volumes finis non-structurés, solveurs compressibles ou solveurs pression, ont été comparés sur plusieurs cas tests significatifs, afin d'évaluer leurs qualités et leurs faiblesses. Cette démarche de comparaison et de validation, transverse aux différentes équipes de la DRN s'inscrit naturellement dans les propositions d'actions en thermohydraulique FASTNET, puisque les écoulements à faible nombre de Mach y ont été identifiés comme une difficulté numérique à résoudre. En ouvrant également la réflexion au niveau international, que ce soit par l'intermédiaire d'exercices de benchmarks ou de groupes de travail d'experts européens comme ceux d'ERCOFTAC, on s'assure que les équipes de la DRN restent à la pointe de la simulation numérique en mécanique des fluides.

RÉFÉRENCES

- [1] *Development of Hydrogen Distribution and Combustion Models for the TONUS Code*
PAILLERE H., DADA L., DABBENE F., MAGNAUD J.P., GAUVAIN J.
NURETH-8
Kyoto, JAPON
Du 30/09 au 04/10/98
- [2] *An Implicit Second-Order Numerical Method for Three-Dimensional Two-Phase Flow Applications*
TOUMI I., CARUGE D.
Nuclear Science and Engineering
Vol. 130, p. 1-13
1998
- [3] *Rapport de la FASTNET (Force d'Analyse Scientifique et Technique pour les Nouvelles Etudes en Thermohydraulique)*
BESTION D. et al.
Version 2.
Février 1998
- [4] *Best Practice Guidelines in Industrial CFD*
Ed. Sulzer Innotec, published by ERCOFTAC European Research Community in Flow Combustion and Turbulence
Octobre 1999
- [5] *Numerical Methods for Low Mach Number Thermalhydraulic Flows*
PAILLERE H., CLERC S., VIOZAT C., TOUMI I., MAGNAUD JP.
ECCOMAS 98
Athènes, GRECE
Du 7 au 11/09/98
- [6] *The Contribution of Asymptotics to Combustion*
BUCKMASTER J.
Physica 20D
P. 91-109
1986
- [7] *On the Filtering of Sound from the Navier-Stokes Equations*
PAOLUCCI S.
Technical Report
Sandia National Laboratories,
Livermore
SAND82-8257
1982
- [8] *Preconditioning and the limit of the compressible to the incompressible flow equations for finite difference schemes, in "Computing the Future : Advances and Prospects for Computational Aerodynamics"*
TURKEL E., FITERMAN A., VAN LEER B.
Wiley
1994
- [9] *Approximate Riemann Solvers and Flux Vector Splitting Schemes for Two-Phase Flow*
TOUMI I., KUMBARO A., PAILLERE H.
VKI Lecture Series CFD
Rhode St-Genèse, BELGIQUE
Du 3 au 7/03/99



- [10] *Étude de schémas décentrés implicites pour le calcul numérique en mécanique des fluides. Résolution par décomposition de domaine*
CLERC S.
Thèse Université Paris VI
1997
- [11] *Calcul d'écoulements stationnaires et instationnaires à petit nombre de Mach et en maillages étirés*
VIOZAT C.
Thèse Université de Nice
1998
- [12] *A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for All Flow Speeds*
HARLOW F.H., AMSDEN A.A.
Journal Comput. Physics
Vol. 8, p. 197-213
1971
- [13] *Solution of the Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting*
ISSA R.I.
Journal Comput. Physics
Vol. 62, p. 40-65
1985
- [14] *Advanced Numerical Methods for Thermalhydraulics*
BARRE F., PARENT M., BRUN B.
Nuclear Engineering and Design
Vol. 145, p. 147-158
1993
- [15] *A Finite Element Elliptic Flow Solver for Low Mach Number Compressible Flows*
PAILLERE H., MAGNAUD J.P.
10th Int. Conf. on Finite Elements in Fluids
Tucson, USA
Du 5 au 8/01/98
- [16] *Comparison of Finite Element and Finite Volume Algorithms for Thermalhydraulic Studies of Steam Generators and Nuclear Reactor Cores*
GRANDOTTO M., GOLDBRONN P., TOUMI I., FILLION P.
10 th Int. Conf. on Finite Elements in Fluids
Tucson, USA
Du 5 au 8/01/98
- [17] *Numerical Simulation of Equilibrium Two-Phase Flows*
CLERC S.
Accepted for Publication
Journal Comput. Physics
2000
- [18] *Accurate Computation of Contact Discontinuities in Flows with General Equations of State*
CLERC S.
Comp. Methods Appl. Mech. Engrg.
Vol 178, 245-255
1999
- [19] *Development of Hydrogen Combustion Models in the CASTEM2000 Code*
PAILLERE H., GALON P.
ICONES
Nice, FRANCE
Du 26 au 30/05/97
- [20] *Natural convection in a square cavity : a comparison exercise*
DE VAHL DAVIS G., JONES I.
Int. J. Numer. Meth. Fluids
Vol. 3, p. 227-248
1983
- [21] *Comparison of Low Mach Number Models for Natural Convection Problems*
PAILLERE H., VIOZAT C., KUMBARO A., TOUMI I.
EUROTHERM Seminar No. 63
"Single and Two-Phase Natural Circulation"
Gènes, ITALIE
Du 6 au 8/09/99

