



An adaptation of the low Mach number approximation for supercritical fluid buoyant flows

Gilbert Accary^{a,*}, Isabelle Raspo^a, Patrick Bontoux^a, Bernard Zappoli^b

^a *Laboratoire de modélisation et simulation numérique en mécanique, UMR 6181 du CNRS, les universités Aix-Marseille, technopôle de Château Gombert, 38, rue Frédéric-Joliot-Curie, 13451 Marseille cedex 20, France*

^b *CNES, 18, avenue Edouard-Belin, 31401 Toulouse cedex 4, France*

Received 7 June 2004; accepted 8 March 2005

Presented by René Moreau

Abstract

This Note describes an acoustic filtering of the equations governing the supercritical fluid buoyant flow driven by a weak heating. The resulting low Mach number approximation takes into account the compressibility of the fluid with respect to the hydrostatic pressure. Using the direct numerical simulation of a supercritical fluid flow in the Rayleigh–Bénard configuration, we show that the density stratification may be taken into account without further numerical effort and is fundamental for the prediction of the convective instability threshold induced by a weak heating. **To cite this article:** *G. Accary et al., C. R. Mecanique 333 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Résumé

Une adaptation de l'approximation faible nombre de Mach aux écoulements de convection naturelle dans les fluides supercritiques. Cette Note décrit un filtrage acoustique des équations régissant la convection naturelle dans un fluide supercritique due à un faible chauffage. L'approximation faible nombre de Mach obtenue prend en compte la compressibilité du fluide par rapport à la pression hydrostatique. Par la simulation numérique directe de l'écoulement d'un fluide supercritique en configuration de Rayleigh–Bénard, nous montrons que la stratification en densité peut être prise en compte sans effort numérique supplémentaire et qu'elle est fondamentale pour la prédiction du seuil d'instabilité convective induite par un faible chauffage. **Pour citer cet article :** *G. Accary et al., C. R. Mecanique 333 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Published by Elsevier SAS. All rights reserved.

Keywords: Fluid mechanics; Supercritical fluid; Low Mach number; Rayleigh–Bénard instability; Piston effect

* Corresponding author.

E-mail address: accary@L3m.univ-mrs.fr (G. Accary).

Mots-clés : Mécanique des fluides ; Fluide supercritique ; Faible nombre de Mach ; Instabilité de Rayleigh–Bénard ; Effet piston

Version française abrégée

Dans les simulations numériques directes (DNS) d'écoulements de fluides supercritiques (FSC) en configuration de Rayleigh–Bénard [1–3], le modèle mathématique [13] est résolu dans une approximation à faible nombre de Mach (FNM) qui fait intervenir la stratification en densité alors que le filtrage acoustique classique des équations proposé dans [14] suggère un champ de densité initial homogène. La validité de cette modélisation est discutée ici pour la prédiction de l'instabilité convective.

Une couche de FSC d'épaisseur L est contenue entre deux plaques horizontales infinies (Fig. 1). Le fluide est initialement en équilibre thermodynamique à température constante T_i légèrement supérieure à la température critique T_c , et stratifié en densité et en pression. La simulation numérique commence par l'application d'un faible chauffage à la plaque inférieure ($\Delta T \sim$ quelques mK) tout en maintenant la plaque supérieure à sa température initiale. Le modèle mathématique proposé dans [13] est considéré pour le CO_2 avec $T_i - T_c = 1$ K.

Soit V , T_c , ρ_c et $R\rho_c T_c$ les échelles respectives de la vitesse \mathbf{v} , de la température T , de la densité ρ et de la pression P , où V est une vitesse caractéristique de l'écoulement, ρ_c est la densité critique et R est la constante des gaz parfaits. Les variables d'espace $\mathbf{x}(x, y)$ et de temps t sont respectivement adimensionnées par L et L/V . Pour un faible nombre de Mach (Ma), les variables primaires sont développées en séries de Ma^2 [14]. Les ordres $O(1)$ et $O(Ma^2)$ du bilan de quantité de mouvement sont respectivement donnés par les Éqs. (2) et (3), où l'exposant 0 (resp. 1) désigne les termes d'ordre 1 (resp. Ma^2), $\gamma = 1.4$ est l'exposant adiabatique du gaz parfait, \mathbf{e}_g est le vecteur unitaire parallèle à la gravité terrestre \mathbf{g} , Fr et Re sont respectivement les nombres de Froude et de Reynolds. Dans ces équations, on suppose que $O(Ma^2/Fr) > O(Ma^2)$ puisque, du fait de la divergence de la compressibilité du FSC, la pression hydrostatique entraîne une variation de densité du même ordre que celle induite par le faible chauffage considéré (quelques mK). En négligeant la variation de la masse volumique $\delta\rho^{(0)}$ devant le champ de densité initial stratifié $\rho_i = \rho_s$, les ordres $O(1)$ et $O(Ma^2)$ du bilan de quantité de mouvement sont finalement décrits par les Éqs. (4) et (5) respectivement, avec $\Pi = P^{(0)} - P_s$ où P_s est la pression hydrostatique. Le filtrage acoustique des autres équations (continuité, énergie et équation d'état de van der Waals) est réalisé comme dans [14] ; le modèle obtenu noté FNMA (pour FNM Adapté aux FSC) diffère légèrement (par $\rho_i \neq 1$) du modèle FNMC (pour FNM Classique) dans lequel la compressibilité du FSC est complètement négligée. Ces deux modèles sont résolus pour les mêmes paramètres numériques par une méthode du type volumes finis [15], le domaine de calcul étant un carré de côté L avec des conditions périodiques dans la direction x .

Pour différents cas de chauffage, la Fig. 2 montre l'évolution de la perturbation de température δT dans la couche limite chaude d'épaisseur h induite par le chauffage de la plaque inférieure. La zone d'instabilité est délimitée par la ligne pleine et épaisse déduite du critère établi dans [5,6] comportant l'effet stabilisateur du gradient adiabatique de température (critère de Schwarzschild) lié à la pression hydrostatique. Les symboles correspondent aux instants d'effondrement de la couche limite chaude provoqué par l'apparition des panaches thermiques générés par l'instabilité convective. Pour les faibles chauffages, les variations de densité d'origine thermique deviennent du même ordre que celles dues à la stratification ; le modèle FNMA reproduit bien l'allure de la courbe de stabilité et aucune déformation couche limite chaude n'est observée pour $\Delta T < 0,2$ mK ; par contre le modèle FNMC, ne tenant pas compte de l'effet stabilisateur de la pression hydrostatique, continue à prédire une instabilité convective selon le critère de Rayleigh classique obtenu en ignorant le gradient adiabatique de température. Pour $\Delta T = 0,3$ mK, la Fig. 3 montre les champs instantanés de température $100t_{EP}$ secondes après l'effondrement de la couche limite chaude (t_{EP} est l'échelle de temps caractéristique de l'effet piston responsable de l'équilibre rapide de la température dans les FSC [9–12]) ; les panaches thermiques obtenus avec le modèle FNMC sont nettement plus développés que ceux prédits par le modèle FNMA et se déplacent plus vite puisque leur mouvement n'est pas gêné par la stratification.

Download English Version:

<https://daneshyari.com/en/article/10426102>

Download Persian Version:

<https://daneshyari.com/article/10426102>

[Daneshyari.com](https://daneshyari.com)