



Phénomènes critiques, Réactions Chimiques et Milieux hétérogènes en Micropesanteur (PR2M) Groupement de Recherche 1185 Programme de Recherche Concerté

Bernard Zappoli, Roger Prud'Homme

► To cite this version:

Bernard Zappoli, Roger Prud'Homme. Phénomènes critiques, Réactions Chimiques et Milieux hétérogènes en Micropesanteur (PR2M) Groupement de Recherche 1185 Programme de Recherche Concerté. 1999. hal-02514002

HAL Id: hal-02514002

<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-02514002>

Submitted on 2 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CNRS

CNES

**Phénomènes critiques,
Réactions Chimiques et
Milieux hétérogènes en Micropesanteur
(PR2M)**

Groupement de Recherche 1185
Programme de Recherche Concerté

Codirecteurs : Bernard ZAPPOLI et Roger PRUD'HOMME



Rapport d'Activités

1^{er} janvier 1996 – 31 décembre 1999

Adresse :

Université Pierre et Marie Curie
Case 162
4 place Jussieu
75252 Paris Cedex 05

Téléphone : 01 44 27 49 28, Télécopie : 01 44 27 52 59
e-mail prudhom@ccr.jussieu.fr

Autre adresse du PRC GDR PR2M :

Programme de Sciences Physiques en Microgravité
C. N. E. S. - 18 avenue Edouard Belin
31055 TOULOUSE Cedex
Tél : 05 61 27 44 68- Fax:0561 273091
e-mail : Bernard.Zappoli@cnes.fr

SOMMAIRE¹

Introduction	5
Résumé des activités et résultats	7
Données budgétaires	13
Comité scientifique et comité directeur	15
Formations de recherche du groupement	17
Liste des membres du GDR PR2M	19
Rapport des équipes	27
Etude des transferts de masse et de chaleur dans les fluides et les mélanges de Fluides proches de leur point critique (resp. Y. Garrabos)	29
Acoustique et phénomènes non linéaires (resp. S. Fauve)	39
Thermomécanique des interfaces. Applications aux fluides critiques et à la microgravité (resp. H. Gouin)	43
Instabilités hydrodynamiques et écoulements bas Reynolds convection thermique, thermovibrationnelle et thermosolutale (resp. A. Mojtabi)	51
Ecoulements diphasiques en micropesanteur : rupture, coalescence et distribution de taux vide (resp. J. Fabre et C. Colin)	55
Phénomènes de transport dans les mélanges (resp. M. Vignes-Adler)	63
Etudes sur la combustion en micropesanteur (resp. I. Gökalp et C. Chauveau)	69
Etude de la structure des flammes de diffusion représentatives de situation d'incendie dans un environnement de microgravité (resp. P. Joulain)	73
Ecoulements instationnaires induisant des défauts de striation en solidification dirigée (resp. : P. Haldenwang)	81
Convection vibrationnelle dans les milieux hétérogènes (resp. B. Roux)	85
Modélisation numérique des systèmes complexes en convection : fluides supercritiques et interfaces liquides (resp. P. Bontoux)	95
Instabilités, croissance cristalline et microgravité (resp. H. Benhadid et D. Henry)	103
Mécanique des fluides et matériaux (resp. E. Arquis)	109
Convection sous champ magnétique : application à la mesure de diffusivités chimiques dans les métaux liquides (resp. R. Moreau)	115
Changements de phase, milieux réactifs, forts gradients (resp. R. Prud'homme)	119
Perspectives	123

¹ Les travaux scientifiques des auteurs cités ici, ont été publiés ensuite dans l'ouvrage : « **R. PRUD'HOMME**, D. LANGEVIN, G. FAIVRE, Eds. – Sciences de la matière et microgravité » - *Journal de Physique IV*, **11**, Pr6, Octobre 2001, (352 pages).

Introduction

Le Groupement de Recherche « Phénomènes critiques, Réactions chimiques et Milieux hétérogènes » et qui est en même temps Programme de recherche concertée et GDR n° 1185 du CNES et du CNRS (codirecteurs : Bernard Zappoli et Roger Prud'hon Web :

<http://www.ccr.jussieu.fr/gdr-pr2m> (PRC GDR PR2M), créé en janvier 1996 pour une durée de quatre ans, fait suite à un autre GDR du CNES et du CNRS, intitulé 'Mécanique des Fluides et Phénomènes de transport en Microgravité' qui a existé entre janvier 1992 et décembre 1995. Il a obtenu le soutien du MENESR en tant que PRC.

L'objectif du précédent GDR (n° 1028), était de rassembler une communauté scientifique d'utilisation du grand instrument que représente la microgravité à propos de milieux sensibles au champ de la pesanteur et comprenant une phase fluide au moins. Créer un tel groupement était un souhait exprimé en 1991 au séminaire de prospective microgravité (Sciences Physiques et Sciences de la Vie) du CNES dont l'une des recommandations était "la structuration de cette communauté de moyens et de diagnostics que sont les fluides en microgravité au sein d'un Groupement de Recherche CNES-CNRS". Ce souhait était partagé par le CNRS qui a proposé la création du GDR lors de la session d'automne 1991 de son Comité National. Le financement a été assuré par le CNES en ce qui concerne les projets des équipes, par le CNRS, et en partie par les universités pour les salaires. Une dotation de 100 KF par an du SPI a permis le fonctionnement. Ce GDR a atteint son but, c'est-à-dire 1) le rôle fédérateur, et 2) les résultats scientifiques.

La base du nouveau GDR (n° 1185) est d'accentuer et de développer les travaux ayant conduit à des résultats estimés pertinents, ce qui était le cas des phénomènes critiques, tout en gardant une communauté suffisamment différenciée pour permettre l'émergence de nouvelles idées. Trois grands thèmes apparaissent donc dans le sigle du nouveau GDR :

- **Les phénomènes critiques** : au voisinage du point critique les densités sont proches de celle du liquide mais la compressibilité est très grande de sorte que le fluide est très sensible au champ d'accélération extérieur. L'expérimentation en microgravité a permis d'étudier les comportements critiques et les prévisions théoriques sur l'effet piston ont pu être vérifiées. On peut mieux discerner maintenant l'effet piston et l'effet de gravité dans l'expérimentation au sol pour laquelle l'analyse numérique est par ailleurs d'une aide certaine. La dynamique des changements de phase est un autre thème étudié.
- **Les réactions chimiques** : celles-ci interviennent en particulier dans le domaine de la combustion à propos 1) de la sécurité incendie dans les véhicules spatiaux, 2) de l'étude fondamentale de la combustion de gouttes en vue de l'application aux lanceurs.
- **Les milieux hétérogènes** : il s'agit des interfaces, des écoulements à bulles et de l'étude et du contrôle de la zone fluide lors de la solidification.

Les activités et résultats seront résumés ci-dessous. Les rapports détaillés de chaque équipe figurent ensuite.

Le financement du GDR est assuré par :

- 1) le CNES : aides à la recherche sous forme de contrats avec les équipes,
- 2) le CNRS et l'université : les salaires,
- 3) le département Sciences Physiques pour l'Ingénieur/CNRS : 50 KF en 1996, 100 KF en 1997, 80 KF en 1998 et 50 KF en 1999,
- 4) le département Sciences Chimiques/CNRS : 30KF en 1996, 1997, 1998 et 1999.
- 5) le ministère dans le cadre des Programmes de Recherche Concertés : 100 KF en 1996 et 150 KF en 1997.

Un état budgétaire sommaire sera présenté plus loin.

Les équipes :

- 1) 9 des équipes de l'ancien GDR dont 2 étaient membres tacites (Benhadid-Henry et Gouin),
- 2) 4 nouvelles équipes. La liste des équipes membres est donnée ci-dessous, avec leur composition ainsi que la liste des laboratoires.

La mission du GDR, telle qu'elle était précisée lors de la demande de création en 1995, consiste d'une part à continuer la réflexion de base sur le rôle de la pesanteur sur les systèmes comportant au moins une phase fluide et à soutenir et amplifier d'autre part la dynamique actuelle du développement des recherches sur les phénomènes critiques par leur extension à la chimie (combustion, corrosion...) et à la dynamique des fluides supercritiques (instabilités dans les milieux hypercompressibles, formation de structures, transport de chaleur). Ce GDR est aussi le lieu d'identification, en coordination avec les équipes techniques du CNES, des actions de recherche à conduire afin de préparer le développement des instruments ou des systèmes appelés à fonctionner en micropesanteur utilisés par exemple dans l'industrie spatiale. La promotion thématique enfin, est assurée par l'organisation de séminaires, par le maintien des liens avec la communauté scientifique internationale et la promotion d'actions d'enseignement et de formation par la recherche.

Une réunion thématique sur les phénomènes critiques a eu lieu le 25 novembre 1996 avec 40 participants. Trois journées d'étude du groupement se sont déroulées du 13 au 16 avril 1997 avec 50 participants. Trois journées ont eu lieu à l'Ile d'Oléron du 10 au 14 mai 1998 avec 37 participants et les travaux ont été publiés en juin 1999 par le Journal de Chimie Physique.

Enfin une journée thématique « Interfaces et forts gradients » s'est déroulée le 21 juin 1999 à l'ESPCI avec 35 participants.

Les publications sont indiquées à la fin du rapport de chaque équipe.

Enfin, notons que si une majorité des travaux relève des disciplines du Département des Sciences pour l'ingénieur du CNRS, plusieurs thèmes intéressent les Sciences Chimiques et certains touchent aux Mathématiques et Physique de Base.

Résumé des activités et résultats

Décrivons succinctement les travaux de la quinzaine d'équipes constituant le groupement de recherche. Les activités concernent les thèmes suivants 1. Phénomènes critiques, 2. Ecoulements diphasiques et interfaces, 3. Combustion, 4. Solidification des métaux et des alliages, 5. Matière granulaire.

1. *Phénomènes critiques*

Des expériences spatiales effectuées avec l'instrument ALICE sur des fluides proches de leur point critique (Y. Garrabos, ICMCB Bordeaux et D. Beysens, CEA Grenoble) ont, d'une part confirmé l'existence de la thermalisation par "l'effet piston" [on désigne ainsi le fait qu'une paroi chauffée brutalement conduit à la formation d'une couche de diffusion -la diffusion est lente pour un fluide faiblement supercritique- qui se dilate fortement -la compressibilité est très grande- et agit comme un piston qui comprime, donc réchauffe, le fluide qui se trouve devant] en permettant l'observation pour un écart de température imposé en paroi et pour des impulsions de chaleur internes. En présence de deux phases gaz et liquide la contribution de l'effet piston se complexifie. D'autre part, la dynamique des transitions de phase a été analysée et l'étude se poursuit pour mieux quantifier la notion de fraction volumique de seuil.

Au sol, l'étude de l'interface gaz-liquide soumise à une accélération périodique, parallèlement à la gravité donne lieu à une instabilité de type Faraday (D. Beysens et Y. Garrabos). Les vibrations parallèles à la surface donnent en revanche une instabilité de Kelvin-Helmholtz. S. Fauve (ENS, Paris) a déduit de l'étude de la stabilité linéaire une nouvelle méthode de mesure de la tension de surface et a analysé le passage d'une texture canéée (Faraday "usuel") à une onde plane. L'étude des vibrations a été poursuivie en microgravité avec la fusée sonde Mini Texus et de nouvelles expériences sont programmées sur MIR.

Les expériences réalisées en 1997 avec ALICE 2 ont permis de nouvelles observations sur la séparation de phase et sur l'ébullition (avec un mouillage hors d'équilibre de la vapeur sur la paroi chauffée dont une première interprétation fait intervenir le recul différentiel de la vapeur. Restent aussi à analyser les digitations observées lors d'un chauffage continu d'une cellule de CO₂ en microgravité. Sont prévues des expériences d'observation des fluctuations critiques ainsi que l'étude de réactions chimiques près du point critique (densités élevées, diffusité faible sont de bonnes conditions pour étudier des réactions chimiques à basse température). Un nouvel instrument, DECLIC (Dispositif d'Etude de la Croissance et des Liquides Critiques), est en cours de mise au point à l'ICMCB, en vue d'étudier les fluides (dont l'eau) à haute pression et à haute température dans la station Spatiale Internationale.

S. Fauve envisage d'étudier la convection thermique près du point critique. En particulier, l'étude des régimes non Boussinesq paraît intéressante.

Sur le plan de l'analyse numérique, B. Roux (IRPHE, Marseille) a étudié l'influence des vibrations sur la nucléation, près du point critique, ainsi que l'écoulement moyen et le transport de chaleur en fluide légèrement supercritique et se propose d'analyser les états de quasi-équilibre, les origines nonlinéaires et d'étudier la convection-thermovibrationnelle d'amplitude finie.

P. Bontoux (IRPHE, Marseille) a obtenu des résultats notables en étudiant numériquement les écoulements de fluides légèrement supercritiques dans deux configurations : cavité soumise à un chauffage latéral, configuration de Rayleigh-Bénard.

H. Gouin et A. Sanfeld (LMMT, Marseille) ont étudié la tension superficielle au voisinage du point critique en présence d'un champ électrique. [L'existence d'un tel effet du champ électrique pourrait servir à commander l'émulsification]. Une autre étude théorique d'H. Gouin concerne l'établissement d'un modèle de mélange de fluides près du point critique. Des conditions de type Rankine-Hugoniot ont été établies et une modélisation en second gradient a été utilisée.

Enfin les interactions fluides-paroi ont été étudiées.

E. Arquis et N. Bonneton (MASTER, Bordeaux) étudient numériquement les fluides supercritiques en milieux poreux à partir d'une loi d'état simplifiée. L'étude mésoscopique à l'échelle du pore reste à faire.

A. Mojtabi (IMFT, Toulouse) étudie le transfert thermique par effet piston, son couplage avec la convection naturelle, ainsi que l'influence des vibrations sur la convection.

Enfin des problèmes de stabilité de bulles et de mécanique des fluides au voisinage du point critique liquide-vapeur sont étudiés par R. Prud'homme, L. Gottesdiener et P. Carlès (LMM, Paris). Les études menées par P. Carlès ont également porté sur la viscosité de volume et le couplage avec la convection naturelle.

2. Ecoulements diphasiques

J. Fabre et C. Colin (IMFF, Toulouse) étudient les écoulements diphasiques et prévoient une expérience en orbite en collaboration avec le Lewis Research Center de la NASA. Il s'agit d'écoulements à bulles et d'écoulements à poches et l'intérêt s'est porté en particulier sur la transition bulles/poches. Sur le glissement entre phases, il a été montré que les vitesses moyennes des phases gazeuse et liquide résultaient d'un effet global de répartition du gaz (qui se trouve en majorité suivant l'axe du tube où la vitesse est plus grande). La distribution spatiale des phases est, sous gravité normale, contrôlée par la force de portance induite par la gravité alors qu'en microgravité (vols paraboliques) elle est contrôlée par la turbulence. Le coefficient de frottement à la paroi et la transition laminaire/turbulent sont étudiés et certains mécanismes ont été identifiés. La microgravité apparaît comme un cadre simplificateur privilégié pour étudier l'interaction bulle isolée/turbulence liquide, les effets d'accélération ou de décélération sur des bulles ou poches isolées, l'interaction entre poches (rattrapage et coalescence). La visualisation 3D à grande vitesse avec traitement d'image sera mise en

oeuvre et les expériences vont de pair avec le calcul numérique déjà au point à l'IMFT. L'intérêt s'est porté sur les changements de phase et l'influence des surfactants.

M. Adler (LPTM, Meudon) étudie différents problèmes d'interfaces et de mousses. La première de ces études porte sur l'effet Marangoni de soluté avec ou sans réaction chimique. En laboratoire, des résultats portent sur les ondes solitaires obtenues en présence de gradients de tension superficielle dus à la dissolution. Un système expérimental à deux gouttes a fonctionné d'autre part en microgravité (fusée sonde MASER 6) et a permis de caractériser l'effet d'une réaction chimique empêchant le transfert de masse à la surface. La seconde étude de M. Adler concerne la morphologie des mousses à trois dimensions. Trois types d'expériences : sur le drainage gravitaire, le disproportionnement et la conductivité d'une mousse, ont été réalisées. Une loi d'évolution de la taille des bulles de mousse en fonction du nombre de leurs faces est obtenue en particulier. Une méthode de tomographie optique originale a été mise au point.

Sur le plan de la théorie fondamentale, H. Gouin (LMMT, Marseille) étudie de petites bulles ou gouttes de très petites dimensions lorsque l'équation de Laplace n'est plus valable. A. Steinchen cherche à modéliser l'ébullition en tenant compte de l'effet Marangoni et du recul différentiel de la vapeur. Elle a étudié également l'action d'un champ microonde sur l'évaporation de liquides polaires. A. Sanfeld a étudié l'influence de la taille des gouttes de dimensions capillaires et de charges de surface sur la réactivité atmosphérique et P. Seppacher (Toulon) compare modèles classiques et modèles du second gradient par homogénéisation en élasticité linéaire.

B. Roux étudie l'influence de vibrations sur une inclusion gazeuse ou liquide dans un fluide et se propose de poursuivre des études sur les systèmes diphasiques près du point critique.

3. Combustion

I. Gökalp (LCSR, Orléans) étudie la vaporisation et la combustion de gouttes. Ces recherches utilisent essentiellement les vols paraboliques d'avion et depuis 1996, un puits de mine au Japon. L'évaporation constitue la phase de gazéification qui est préalable à la combustion et dont les temps caractéristiques doivent être étudiés avec précision. Les études ont été conduites dans le domaine des hautes pressions pour lesquelles l'approche du point critique rend encore plus intéressante l'utilisation de la gravité réduite. Les résultats marquants portent sur l'influence de la pression sur les temps de gazéification dans les régimes de combustion en vaporisation dans les conditions supercritique ou subcritique. Une expérience en fusée sonde est prévue. Par ailleurs, il est prévu de déterminer la température de la goutte pendant la vaporisation à l'aide de techniques de fluorescence induite par laser. L'étude de la combustion de brouillard en microgravité est prévue.

L'étude de l'influence de la gravité sur les flammes représentatives d'incendies est effectuée par P. Joulain (LCD, Poitiers). Il s'agit en fait, au-delà de l'étude du rôle de tel ou tel paramètre dont l'influence est masquée au sol par la convection, d'apprendre aussi comment se déroule la combustion de combustibles solides en micropesanteur. Ces études sont fortement liées à des questions très finalisées comme la sécurité incendie à bord des

véhicules orbitaux et utilisent les tours de chute libre du ZARM à Brême ou celle de l'INTA à Madrid. Dans le cas des feux de nappe qui sont simulés par un brûleur poreux, il apparaît nettement que l'influence de la gravité se fait par l'interaction de la flamme avec l'air entraîné par le gradient de température. Les modèles théoriques en cours de mise en place montrent qu'une onde mécanique créée par une instabilité du type Rayleigh-Taylor se propage grâce à la gravité depuis le bord du brûleur en provoquant les bouffées caractéristiques du battement de la flamme. Dans le domaine de la combustion en présence d'écoulement parallèle à la paroi (problème d'Emmons) la micropesanteur permet d'avoir accès à des vitesses d'écoulement très faibles bien inférieures à la valeur minimale au sol qui est celle imposée par la convection naturelle. Les différentes formes de la flamme ont été cartographiées et modélisées par des analyses numériques et en ordre de grandeur. Des expériences sur la combustion des solides en situation non simulée (plaque de PMMA) ont eu lieu et une théorie d'Emmons tenant compte des pertes thermiques a été proposée. Ce travail doit être continué, de nouvelles expériences auront lieu en microgravité (tour d'apesanteur, vols paraboliques) et un projet a été déposé pour la station Spatiale Internationale. Par ailleurs il est prévu de poursuivre le développement des diagnostics optiques afin d'aborder l'étude des transferts radiatifs et des mécanismes de formation des suies. Ces recherches fondamentales devraient amener à une meilleure caractérisation de la tenue au feu des matériaux d'utilisation spatiale.

Le travail de modélisation effectué par l'équipe de P. Haldenwang (IRPHE, Marseille), consiste à modéliser l'évolution d'une zone gazeuse de forte densité entourée par une zone gazeuse de beaucoup plus faible densité pour simuler l'évaporation d'une goutte dans un milieu supercritique, la goutte étant elle-même supercritique, et l'ensemble étant éloigné, dans le diagramme de phase, des conditions critiques. La diminution du temps de vie avec la pression se corrèle bien avec les résultats obtenus par l'équipe de Gökalp et ceux de Sato au Japon.

La modélisation numérique et théorique des flammes de prémélange sous champ d'accélération permet à l'équipe de R. Prud'homme (LMM, Paris) d'analyser, par confrontation avec l'expérience, les phénomènes qui sont à la source des instabilités.

4. Solidification des métaux et des alliages

➤ Analyse de la phase liquide :

B. Roux (IRPHE Marseille) a depuis plusieurs années, développé des codes numériques pour étudier la cristallogénèse en rapport avec les expérimentateurs.

L'analyse de la phase liquide a progressé fortement ces dernières années. H. Benhadid et D. Henry (LMFA/ECL, Lyon) étudient numériquement les instabilités convectives. Après avoir mené des études sur la solidification des alliages concentrés (les concentrations changent continuellement au niveau du front de croissance, ce qui, couplé aux mouvements hydrodynamiques, change la macroségrégation donc la qualité des cristaux obtenus) ils ont considéré les instabilités convectives avec surface libre plane en mélange binaire avec notamment effet Soret. En bidimensionnel, ils ont utilisé une méthode de continuation originale permettant de suivre les branches stationnaires du diagramme de bifurcation. Les études ont été poursuivies en configuration tridimensionnelle.

P. Bontoux (IRPHE, Marseille) s'est attaché à perfectionner les méthodes numériques de la mécanique des fluides (méthodes spectrales, méthode d'enthalpie, méthode des volumes finis). Parmi les résultats et développements récents, citons l'étude de l'amplification d'une instabilité oscillatoire en interaction avec une interface de solidification en tenant compte de conductivités thermiques différentes. L'approche enthalpique a par ailleurs été appliquée à une configuration de type Bridgman et validée dans le cas axisymétrique. Des calculs ont eu lieu en présence d'un champ magnétique vertical. Les développements concernent les alliages pour lesquels les effets de concentration sont étudiés.

R. Moreau (MADYLAM, Grenoble), utilise les avantages du freinage des convections par champ magnétique. Il mesure un coefficient de diffusion effectif qu'il corrige grâce à une théorie asymptotique pour obtenir le coefficient réel. Les couples Sn-SnIn 1 % et Sn-SnBiO 0,5 % ont été étudiés expérimentalement. La méthode sera prolongée au domaine des alliages non dilués.

A. Mojtabi (IMFT, Toulouse) étudie la diffusion massique et thermique (double diffusion) en présence de surfaces tensio-actives ou de g-jitters (fluctuations de l'accélération en microgravité). Ses études, numériques, sont applicables à la croissance cristalline mais aussi à la séparation des composés chimiques. Enfin E. Arquis (MASTER, Bordeaux) étudie numériquement la structure des interfaces en formation au cours de la solidification des solutions.

➤ **Contrôle :**

Contrôle vibrationnel En ce qui concerne les procédés de contrôle par un champ vibratoire, citons les résultats de B. Roux (IRPHE, Marseille) qui a montré que l'action des vibrations sur les interfaces de solidification en zone flottante pouvaient orienter celles-ci perpendiculairement à leur direction, Il a étudié également l'action des vibrations sur des inclusions gazeuses déformables en phase liquide et actuellement l'interaction bulle/paroi et le cas de grosses bulles. Il étudie aussi le transport pulsatoire de la chaleur et de la vorticité. A. Mojtabi (Toulouse) s'est également intéressé à l'influence de la vibration sur la double diffusion.

Contrôle par champ magnétique. Différentes configurations ont été étudiées expérimentalement et théoriquement par R. Moreau (MADYLAM, Grenoble) et numériquement par H. Benhadid (LMFA/ECL, Lyon). Une collaboration fructueuse s'est instaurée entre ces deux équipes notamment autour de deux expériences soutenues par le CNES : MASCOT (bain liquide de mercure) et BRAHMS (alliage bismuth-étain). Cette coopération a concerné également des équipes extérieures au GDR (Favier, Camel et Garandet : CEA, Grenoble). Les configurations étudiées concernent les cavités horizontales où il est montré (Benhadid et Henry) que l'évolution de l'écoulement en convection stationnaire, est régie par la distribution de courant électrique dans le liquide métallique. Les auteurs étudient actuellement la stabilité d'écoulements parallèles sous champ magnétique vertical, y compris avec surface libre et effet Marangoni, une cavité cylindrique chauffée par le bas avec champ magnétique vertical ou transverse. Les codes numériques sont mis en œuvre avec ou sans gravité.

Contrôle par encapsulation. Des études numériques ont été menées par P. Bontoux qui a trouvé d'assez bons résultats comparés à ceux obtenus en microgravité.

5. Matière granulaire

Le second axe des recherches de S. Fauve (LPS-ENS, Paris), effectuées jusqu'en 1997 à l'ENS de Lyon, porte sur les comportements collectifs de la matière granulaire sous l'effet de vibrations. Une couche de billes sphériques soumis à un mouvement vibratoire vertical, présente des analogies avec un fluide. Pour les oscillations d'une bille rebondissant sur une surface horizontale, on trouve un coefficient de restitution voisin de l'unité sauf en fin de rebond. Avec un modèle non dissipatif, le coefficient de restitution tend vers zéro en fin de rebond car le système dissipe alors plus d'énergie du fait que la force de gravité devient prépondérante devant la force élastique. Un projet consiste à s'affranchir de la gravité et à faire osciller une bille entre deux plans pour mesurer son temps d'amortissement. Enfin, une colonne de N billes initialement au repos en contact mutuel, situées à une même altitude initiale, a été lâchée au-dessus d'un plan. La dynamique de milieux granulaires 3-D vibrés a été étudiée notamment à partir de l'expérience réalisée, en collaboration avec D. Beysens, P. Evesque et Y. Garrabos dans Mini Texus 5 début 1998. La formation observée d'un « amas » dense de particules interagissant par collisions inélastiques constitue une situation analogue à la coexistence diphasique gaz-liquide. Les simulations au sol, dans une autre configuration ont mis en évidence un phénomène analogue et des lois de comportement ont pu être établies pour ces « gaz granulaires » dissipatifs.

B. Roux, en collaboration avec D. Lyubimov a étudié le comportement de milieux granulaires saturés par des liquides et soumis à des vibrations hautes fréquences. Une méthode à échelles multiples a permis l'étude de suspensions diluées en cavité fermée à l'aide d'un modèle à deux fluides. Un nouveau modèle permet de traiter des suspensions concentrées puisqu'il tient compte de la répulsion effective des particules. Les résultats théoriques sont confrontés à ceux d'une expérience au sol sable/alcool. Les perspectives portent sur la stabilité de l'interface suspension-liquide pur en présence de divers types de vibrations.

Etat budgétaire du PRC-GDR 1185

Crédits alloués :

	1996	
Dotation	30.000,00	
Participation du SPI aux travaux du GDR	20.000,00	
Transfert du solde du GDR 1028	3.367,67	
	53.367,67	
	1997	
Dotation SPI	100.000,00	
Dotation SC	30.000,00	
	130.000,00	
Dotation du MENESR (15/10/97)	70.481,00	
Dotation du MENESR (12/12/97)	105.722,00	
	176.203,00	
	1998	
Dotation SPI	80.000,00	
Dotation SC	30.000,00	
	110.000,00	
	1999	
Dotation SPI	50.000,00	
Dotation SC	30.000,00	
	80.000,00	

Total des crédits : 549.570,67 F

Dépenses :

Soutiens aux équipes de :	
Patrick BONTOUX	8.291,88
Henri GOUIN et Pierre SEPPECHER	12.437,82
Bernard ROUX	8.291,88
Roger PRUD'HOMME/Pierre CARLES	8.291,88 #
Pierre HALDENWANG	12.437,82
René MOREAU (bourse CES M. Boguslawski)	29.996,50
	79.747,78
Achat d'un matériel PIV (Equipes Gökalp, Fabre-Colin, Joulain)	82.918,74
Soutien à 1Euromech 383 organisé par D. Henry et H. Benhadid	6.377,92

Journée du 25 novembre 1996 à Paris	14.577,00
Journées du 14-16 avril 1997 à Aussois	79.393,26
Journées du 11-13 mai 1998 à Oléron	52.335,49
Journée du 21 juin 1999 à Paris	15.000 ,00*
	161.305,75

Réunion du 25 février 1998 à Paris	2.007,80
------------------------------------	-----------------

Autres missions :

1996-97	15.695,20
1998	3.185,00
1999	1.651,00
	20.531,20

Actes des journées d'Oléron parus dans le journal de Chimie	20.045,76
---	------------------

Autres dépenses :

Achat d'un portable (pour moitié)	7.000,00
Rapport d'activité du GDR 96-97	1.749,20
Participation à la bibliothèque du LMM (UMR 7607)	3.192,20
Bourse CIES (M. Samba)	12.703,00
Fournitures divers	0.322,15
	24.966,55

Total des dépenses : 397.901,50 F

Aucun virement n'a été effectué concernant cette subvention ; les dépenses de l'équipes sont débitées directement sur les comptes du GDR à concurrence de la somme affectée.

* Estimation des dépenses : les engagements concernant la journée du 21/06/99 ne sont pas encore tous connus.

Comité scientifique

Membres de droit :

- Le directeur scientifique du Département SPI ou son représentant,
- le délégué régional du CNRS-Paris B ou son représentant,
- les codirecteurs du groupement,

Membres nommés :

- M. Roland BORGHI, *Professeur*
IRPHE, Marseille
- M. Jean-Marc DELHAYE, *Directeur de Recherche*
CEREM, Grenoble
- Mme Renée GATIGNOL, *Professeur*
LMM, Paris
- M. Patrick GUENOUN, *Ingénieur*
CEA, Saclay
- M. Michel RIBES, *Professeur*
LPMC, Montpellier

Membres représentant le comité national :

- un représentant de la section 10
- un représentant de la section 19



Comité directeur

- | | |
|--------------------------|------|
| • M. Richard BONNEVILLE, | CNES |
| • M. Michel CHAMPION, | CNRS |
| • M. Roger PRUD'HOMME, | CNRS |
| • M. Bernard ZAPPOLI, | CNES |

Formations de recherche du groupement

- ICMCB (UPR 9048), Equipe Fluides Critiques, BORDEAUX,
(*M. Y. Garrabos*)
- Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors d'Equilibre (UMR 6594), Equipes de Modélisation Numérique dépendant des Universités d'Aix-Marseille I et II, MARSEILLE
(*M.M. P. Bontoux, B. Roux et P. Haldenwang*)
- Institut de Mécanique des fluides (UMR 5502), Groupe de Recherche Interfaces, TOULOUSE
(*M. J. Fabre, Mine C. Colin, M.A. Mojtabi*)
- Centre de Recherches sur la Chimie de la Combustion et des Hautes Températures, (UPR 4211), Equipe de Combustion et Turbulence, ORLEANS
(*M. L Gökalp, M. C. Chauveau*)
- Laboratoire des Phénomènes de Transport dans les Mélanges, CNRS, MEUDON
(*Mme Vignes-Adler*)
- Laboratoire de Combustion et de Détonique (UPR 9028), Equipe Flamme de Diffusion et Brûleurs, POITIERS
(*M. P. Joulain*)
- Laboratoire de Modélisation Avancée des Systèmes Thermiques et des Ecoulements Réels, dépendant de l'ENSCPB, Université de Bordeaux, BORDEAUX
(*M. E. Arquis*)
- Laboratoire de Modélisation en Mécanique et Thermodynamique (UPRES JE 2047), l'Université Aix-Marseille III, MARSEILLE
(*M. H. Gouin*)
- Laboratoire de Physique Statistique de l'ENS, PARIS
(*M. S. Fauve*)

- Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (UMR 5509), Equipe Instabilités, Croissance Cristalline et Microgravité, dépendant de l'Ecole Centrale de Lyon et de l'Université Claude Bernard, LYON

(M.M. H. Benhadid et D. Henry)

- Elaboration par Procédés Magnétiques (UPR 9033), dépendant de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, GRENOBLE

(M. R. Moreau)

- Laboratoire & Modélisation en Mécanique (UMR 7607), Equipe « Changements de phase, milieux réactifs, forts gradients », dépendant de l'Université Paris 6, PARIS

(M.R. Prud'homme)

Liste des membres du groupement

Equipe « Etudes des transferts de masse et de chaleur dans les fluides et les mélanges de fluides proches de leur point critique »

Laboratoire : LCMCB (UPR 9048 CNRS)
Université Bordeaux I
Château Brivazac
Avenue du Docteur Schweitzer
33608 PESSAC CEDEX
Responsable : **Yves GARRABOS** (DR2)

F. CANSELL (DR2)
C. CHABOT(1R2)
A. DEJOAN (IR CDI))
M.H. DELVILLE (CR1)
G. DEMAZEAU (Pr)
A. LARGETEAU (IR)
C. MORTEAU (doctorante)
F. PALENCIA (AI CDD)
R. SALMON (Pr)
C. TARTEJX (AI CDD)
O. VIRAPHONG (AI)
R. WUNENBURGER (doctorant)

Collaborateurs extérieurs :

DRFMC - CEA, Grenoble
IRPHE, Marseille
SBT - CEA, Grenoble
CPMOH, Bordeaux
EC Paris
ENS-Paris
LIMHP, Villetaneuse
CNES, Toulouse
3AR-AEROSPATIALE
AIR LIQUIDE
ARCOFLUID
Technical Univ. München
Univ. Of New Orleans
Univ. of Moscow
Perm State Univ.
Van der Waals Zeeman Lab.

D. BEYSENS
P. BONTOUX, B. ROUX
D. CHATAIN
J.P. DELVILLE
P. EVESQUE
S. FAUVE
B. LE NEINDRE
B. ZAPPOLI, P. CARLES
R. MARCOUT
P. BRAVAIS
J. OUAZZANI
J. STRAUB
J. HEGSETH
V. POLEZAEV, V. EMELYANOV
G. PUTIN D. LYUBIMOV
A.C. MICHELS, F. KAYSEL

- **Equipe « Acoustique et phénomènes non linéaires »**

Laboratoire : Laboratoire de Physique Statistique
Ecole Normale Supérieure
24 rue Lhomond
75231 PANS CEDEX 05

Responsable : **Stéphane FAUVE** (Pr ENS)

S. AÏJMAITRE (doctorant)
E. FALCON (Post doc CNES)
S. RESIDORI (MC associé Paris 7 ; poste permanent : chercheur à l'Institut d'optique de Florence, Italie ; dans l'équipe pour un an)

- **Equipe « Thermomécanique des interfaces »**

Laboratoire : Modélisation en Mécanique et Thermodynamique (UPRES-EA 2596)
Faculté des Sciences et Techniques
Case 322
Université Aix-Marseille III
Avenue Escadrille Normandie-Niemen
13397 MARSEILLE CEDEX 20

Responsable : **Henri GOUIN** (Pr1)

D. BENIELLI, (post-doc 97-99)
O. CHEVALIER (ATER)
S. GAVRILYUK (Pr2)
J.P. PULICANI (MCFI)
A. STEINCHEN-SANFELD (Pr2)
A. S. ANFELD (Pr émérite, Université libre de Bruxelles)
K. SEFIANE (doctorant jusqu'au 07 98, post-doc 98-99)
P. SEPPECFIER (MCF1, Université de Toulon et du Var)

- **Equipe « Instabilités hydrodynamiques et écoulements bas Reynolds : convection thermique, thermovibrationnelle et thermosolutale »**

Laboratoire : Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (UMR 5502 CNRS)
INP/UPS
118 route de Narbonne
31062 TOULOUSE CEDEX 4

Responsable : **Abdelkader MOJTABI** (Pr UPS)

G. BARDAN (doctorant, boursier MRS)
A. BERGEON (MC UPS)
M.C. CHARRIER-MOJTABI (MC UPS)
I. CISSE (doctorant, boursier du gouvernement du Sénégal)
K. GHORAYEB (thèse soutenue en juillet 97, post doc aux USA)
A. JOUNET (thèse soutenue en janvier 99, ATER)
H. KHALLOUF (W)
B. ZAPPOLI (Prof. Ass. UPS)

• **Equipe « Ecoulements diphasiques en micropesanteur : rupture, coalescence et distribution de taux de vide »**

Laboratoire : Institut de Mécanique des Fluides (UMR 5502 CNRS)
INPT/UPS
Allée du Professeur Camille Soula
31400 TOULOUSE
Responsables : **Jean FABRE** (Pr INPT)
Catherine COLIN (CR1)

A. KAMP(Dr)
D. LEGENDRE (post doc CNES)
J. MAGNAUDET (DR)
R. POUJOL (AI IMFF)
F. RISSO (CR)

• **Equipe « Phénomènes de transport dans les mélanges »**

Laboratoire : Laboratoire des Phénomènes de Transport dans les Mélanges
CNRS
4 ter route des Gardes
92190 MEUDON

Responsable : **Michèle VIGNES-ADLER** (DR2)

H.G. BIN (thésard 1996)
F. LEGAY (IR2 - départ le 13/02/99)
C. MONNEREAU (thésarde 1998)
B. PRUNET-FOCH (CRI)

- **Equipe « Etudes sur la combustion en micropesanteur »**

Laboratoire : Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs
1C avenue de la Recherche Scientifique
45071 ORLEANS CEDEX 2

Responsables : **Iskender GOKALP** (DR2)
Christian CHAUVEAU (CR1)
L. GAGNEPAIN (doctorant)
B. LEGRAND (doctorant)
J. SABATIER (IE)
E. SHAFIROVICH (chercheur associé)
B. VIEILLE (post-doctorant)

- **Equipe « Etude de la structure des flammes de diffusion représentatives de situation d'incendie dans un environnement de microgravité »**

Laboratoire : Laboratoire de Combustion et de Détonique (UPR 9028 CNRS)
ENSMA
Université de Poitiers
Téléport 2 - BP 109
86960 FUTUROSOCPE CEDEX

Responsable: **Pierre JOULAIN** (DR1)

L. BRAHMI (doctorante)
J.M. MOST (DR2)
J.L. TORERO (Pr assistant Department of fire safety engineering, Univ. of Maryland, College Parc, MD 20742)
T. VIETORIS (doctorant)

- **Equipe « Ecoulements instationnaires induisant des défauts de striation en solidification dirigée »**

Laboratoire : IRPFIE (UMR 6594 CNRS)
Université d'Aix-Marseille II
Technopôle de Château-Combert
38 rue Frédéric Joliot-Curie
13451 MARSEILLE CEDEX 20

Responsable : **Pierre HALDENWANG** (Pr Aix-Marseille I)

Collaborateurs :

J. DAOU (post doc, Universidad Politecnica de Madrid, ETSJ-Aero)
R. GUERIN (MCR Aix-Marseille III, MATOP)
C. LE MAREC (doctorant)
C. NICOLI (CR)

• **Equipe « Convection vibrationnelle dans les milieux hétérogènes »**

Laboratoire : IRPHE (UMR 6594 CNRS)
Université d'Aix-Marseille II
Technopôle de Château-Gombert
38 rue Frédéric Joliot-Curie
13451 MARSEILLE CEDEX 20

Responsable : **Bernard ROUX**

G. CHEN
A. CHEREPANOV
D. FOUGERE
G. GERSHUNI
Q.-S. LIU
A. LIZEE
D. LYUBIMOV
T. LYUBIMOVA
S. MERADJI

• **Equipe « Modélisation numérique de systèmes complexes en convection: fluides supercritiques et interfaces liquides »**

Laboratoire : IRPHE (UMR 6594 CNRS)
Université d'Aix-Marseille II
Technopôle de Château-Gombert
38 rue Frédéric Joliot-Curie
13451 MARSEILLE CEDEX 20

Responsable : **Patrick BONToux (DR2)**

S. AUMAÎTRE (post doc.)
S. AMIROUDIINE (MC, Université des Antilles, Guyane)
M. EL GANAOUÏ (ATER)
B. GILLY (MC, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille)
A. LAMAZOUADE (doctorant)
Ph. LARROUDE (MC, Université de Grenoble, laboratoire LEGI)
D. MORVAN (CR)
I. RASPO (CR)

- **Equipe « Instabilités, croissance cristalline et microgravité »**

Laboratoire : Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (UMR 550 CNRS)
Ecole Centrale de Lyon
Université Claude Bernard (Lyon 1)
B.P 163
69131 ECULLY CEDEX

Responsables : **Hamda BEN HADID** (PR2)
Daniel HENRY (CR1)

A. BERGEON (thèse soutenue en 1997)
F. HADDAD (doctorante)
T. PUTELAT (doctorant)
E. TOUIHRI (post-doctorant)
S. VAUX (stagiaire de DEA)

- **Equipe « Mécanique des fluides et matériaux »**

Laboratoire : Laboratoire Modélisation Avancée des Systèmes Thermiques et Ecoulements Réels (MASTER)
ENSCPB
B.P. 108
33402 TALENCE CEDEX

Responsable : **Eric ARQUIS** (Pr)

O. BERTRAND (Doctorant ClFRE/Aérospatiale)
N. BONNETON (MC)

- **Equipe « Convection sous champ magnétique : application à la mesure de diffusivités chimiques dans les métaux liquides »**

Laboratoire : EPM-MADYLAM (UPR A 9033 CNRS)
ENS HMG
BP 95
38402 SAINT MARTIN D'HERES CEDEX

Responsable : **René MOREAU** (PR, INPG, membre de l'Académie des Sciences)

G. AUTHIE (stagiaire DEA)
R. BOLCATO (I E)
V. BOTTON (doctorant CNES)
P. LEHMANN (CR)

- **Equipe « Changements de phase, milieux réactifs, forts gradient »**

Laboratoire : LMM (UMR 7607)
UPMC - Case 162
4 place Jussieu
75252 PARIS CEDEX 05

Responsable : **Roger PRUD'HOMME** (DR)

P. CARLES (MC)
L. GOTFESDIENER (MC)
N. JAMET (doctorant)
M. SAMBA (doctorant)
B. URGUTAS (stagiaire DEA)

Collaborateurs extérieurs :

S. AMIROUDINE (MC), (Université des Antilles et de la Guyane)
B. ZAPPOLI (Pr) (UPS/CNES, Toulouse)

- **Secrétariat du GDR :**

C. DROUET (SAR)

Rapport des équipes



ETUDE DES TRANSFERTS DE MASSE ET DE CHALEUR DANS LES FLUIDES ET LES MELANGES DE FLUIDES PROCHES DE LEUR POINT CRITIQUE.

Yves Garrabos

Equipe "Fluides Supercritiques" (Groupe Ib)
ICMCB - UPR 9048 - CNRS
Université Bordeaux 1
Avenue du Docteur Schweitzer
33608 PESSAC CEDEX

1. - Le contexte scientifique et instrumental de la mécanique des fluides denses compressibles

1.1 Les objectifs scientifiques

Aujourd'hui, les schémas conceptuels décrivant les comportements des systèmes physiques près d'un point de transition de phase continue sont définis en regroupant tous ces systèmes au sein d'un nombre limité de classes d'universalité. Chacune est caractérisée par les dimensions respectives D et n de l'espace physique et du paramètre d'ordre de la transition. Un fluide pur proche de son point critique liquide-vapeur appartient à la classe d'universalité $D=3$ $n=1$. Dans ce cas, le paramètre d'ordre de la transition, défini par l'écart de densité par rapport à la densité critique, montre que liquide et gaz deviennent indiscernables au point critique conférant à ce fluide critique des propriétés singulières universelles. Tout fluide pur proche de son point critique peut donc être considéré comme le système réel représentatif de cette classe d'universalité. L'observation de ses comportements singuliers devient alors une étape essentielle de la validation des schémas théoriques.

Les propriétés singulières des fluides purs près de leur point critique sont donc un exemple de ce que la nature offre au voisinage des points de transitions de phase dans les mélanges de liquides simples ou plus complexes, comme les polymères, les microémulsions et les métaux liquides. La transition paramagnétique-ferromagnétique dans un solide appartient aussi à la classe d'universalité $D=3$ $n=1$. Toutefois un aimant incompressible ou un mélange très peu compressible de deux liquides ne sont guères comparables à un fluide critique pur hypercompressible qui présente la double caractéristique d'être instable mécaniquement et thermiquement. Des nombres sans dimensions conditionnant ses comportements dynamiques tels que nombre de Rayleigh, nombre de Grashof, nombre de Prandtl, etc., sont infinis au point critique. Ainsi, la gravité terrestre impose la nature convective des échanges de chaleur et de masse dans un fluide pur, gouverne ses mécanismes de transformation de phase, stabilise ses équilibres stratifiés sous son propre poids ou son interface gaz-liquide, etc., mais n'affecte pratiquement pas un système magnétique. L'hydrodynamique, aidée ici par le champ de gravité terrestre, peut donc fortement limiter le rôle des comportements universels d'un fluide pur et masquer la surprenante réalité d'interactions plus subtiles que nous devons analyser et comprendre. S'affranchir de la gravité devient donc le seul moyen d'observer les mécanismes hors équilibre propres à leur hypercompressibilité caractéristique.

Entre les schémas classiques de l'hydrodynamique (étude des liquides incompressibles) et de l'aérodynamique (étude des gaz peu denses, généralement compressibles), la dynamique des fluides critiques est le nouveau pont à construire. L'exploration des mécanismes de base dans des fluides à la fois denses et hypercompressibles nous amène alors à une révision profonde - parfois même à l'encontre de l'intuition depuis la

découverte de l'Effet Piston - de la plupart des couplages thermomécaniques et des comportements énergétiques établis dans les deux schémas extrêmes. Il s'agit de comprendre comment les spécificités de ces fluides et l'universalité critique interagissent en exploitant le voisinage du point critique gaz-liquide pour ajuster continûment les paramètres d'état et de transport. Cette adaptation du modèle expérimental est à notre connaissance unique, tant par les amplitudes offertes que par le contrôle aisé des propriétés spécifiques souhaitées. Elle offre de multiples possibilités pour tester les fondements de la mécanique des fluides denses hypercompressibles. Les différents résultats obtenus en absence de gravité pour diverses conditions de proximité du point critique gaz-liquide et diverses conditions d'excitations hors-équilibre confirment pleinement l'originalité des problèmes fondamentaux posés par ce nouveau challenge [5, 6].

1.2. Le Contexte national et international du programme scientifique

Notre programme de recherche en apesanteur, regroupé sous le sigle ALICE (Analyse des Liquides Critiques dans l'Espace) est soutenu prioritairement par le CNES, le CNRS, le MEN et le CEA. Il est actuellement conduit sous la double responsabilité de l'ICMCB-CNRS à Bordeaux et du DRFMC-CEA à Grenoble. Il s'inscrit aussi dans le cadre d'un Accord Général de collaboration signé entre le CNRS et AEROSPATIALE pour une Action Aquitaine de Recherche en Apesanteur (3AR). Ceci nous a permis de développer en Aquitaine un pôle de compétence scientifique et technique basé sur la pertinence spatiale des programmes envisagés. Ce pôle de compétence a été récemment présenté aux membres de l'International Microgravity Strategic and Planning Working Group (IMSPG) au cours d'une journée de travail centrée sur les futures orientations possibles du programme de recherche (voir § 4).

Sur le plan national, plusieurs autres équipes scientifiques collaborent activement dans la réalisation de ce programme, tant sur le plan de l'expérimentation que sur celui de la modélisation. De plus ce programme est partiellement relié aux activités R&T du CNES et de plusieurs autres partenaires industriels. Ces collaborations sont listées en tête du rapport.

Au plan international, la période 1995-1999 a été caractérisée par le développement d'accords bilatéraux sur ce programme de recherche en microgravité entre le CNES et plusieurs autres Agences spatiales (DLR, NASA, RKK ENERGIA, ESA). Dans ce cadre nous avons développé des coopérations avec des équipes scientifiques en Allemagne [13] aux Etats-Unis [14, 17] et en Russie [15]. Ces coopérations ont déjà permis la réalisation de plusieurs expériences communes [15, 16, 20].

1.3. Deux exemples d'instruments spatiaux : ALICE2/CNES et le module TEM-FER-05/ESA

Les développements majeurs de ce programme de recherche sont évidemment associés à la mise au point et à l'amélioration d'instruments dédiés. L'instrument spatial ALICE2-MV est opérationnel à bord de la Station orbitale MIR depuis la mission française CASSIOPEE (Août 1996) [19]. Cet instrument est un ensemble de facilités thermiques et optiques. Il présente plusieurs spécifications répondant aux exigences nées des découvertes de nouveaux phénomènes comme l'Effet Piston (voir § 2.3) et autorise des expériences de 1 heure (à caractère *exploratoire*) à plusieurs dizaines de jours (qui permettent alors la caractérisation détaillée des phénomènes découverts). Le dispositif expérimental de base est l'ensemble thermostat+SCU (Sample Cell Unit) contenant une ou deux cellules fluides de mesure. C'est le véritable cœur de l'instrument spatial qui, mission après mission, bénéficie des acquis de cette approche expérimentale progressive et rigoureuse associant expériences exploratoires et de caractérisation. Chaque ensemble thermostat+SCU, conçu et défini en fonction des objectifs scientifiques visés, permet les diagnostics les plus performants des réponses du fluide critique aux excitations thermiques et mécaniques. Sur cette base instrumentale, nous

avons abordé avec succès la compréhension détaillée des mécanismes thermocompressibles associés à l'ébullition, au mouillage, aux jets, aux instabilités d'interfaces, etc., autant de comportements hors équilibre remarquables des fluides critiques observés en micropesanteur.

Avec la mise en oeuvre en 1998 du module instrumental TEM-FER-05 dans une fusée sonde MiniTEXUS/ESA, il s'agissait d'associer le haut niveau d'une régulation thermique (1 mK) nécessaire à une expérience près d'un point critique avec des oscillations mécaniques contrôlées de la cellule fluide dans une large gamme de fréquence (0.1 <-> 60 Hz) et d'amplitude (0.1 <-> 2.5 mm). En parallèle, une instrumentation similaire était dédiée à l'étude des comportements fluides de la matière granulaire soumise à ces mêmes conditions d'excitation paramétrique. Le succès de ces deux expériences exploratoires effectuées en utilisant ce nouveau module instrumental au cours des 3 minutes de microgravité du vol de la fusée sonde ouvre de nouvelles perspectives d'études des réponses dynamiques de ces systèmes aux excitations vibratoires (voir § 2.6 et § 2.7).

1.4. Les principales étapes des expériences spatiales effectuées depuis 1995.

1995 Livraison de l'instrument ALICE2-MQ (Modèle de Qualification) (Juin) et de l'instrument ALICE2-MV (Modèle de Vol) (Septembre) à l'ICMCB.

1996 Mission CASSIOPEE de la cosmonaute Claudie André-Dehays (Août). L'instrument ALICE2-MV est installé à bord de la Station MIR et rendu opérationnel. Deux nouveaux thermostats sont ajoutés aux deux réutilisables de la génération ALICE1 déjà dans MIR. Sept expériences réalisées dans ces 4 thermostats durant 263 heures de fonctionnement d'ALICE2.

1997 Mission GERMAN-MIR'97 du cosmonaute H. Schlegel (Février). Un nouveau thermostat (conçu par le LATITUM et qualifié à l'ICMCB) est monté à bord de la Station MIR. Neuf expériences réalisées dans ce thermostat durant 250 heures de fonctionnement d'ALICE2.

1997 Tests sol du module TEM-FER-05 (septembre - décembre). Etudes des instabilités de Faraday et de Kelvin-Helmholtz des interfaces gaz-liquides soumises à des vibrations verticales et horizontales. Qualification et Test de l'expérience sur les milieux granulaires.

1998 Vol de la fusée sonde MiniTEXUS 05 (Kiruna, Suède, Février). Deux expériences dans le module TEM-FER-05 sous vibrations pendant 3 minutes de microgravité.

1998 Mission PEGASE du cosmonaute Léopold Eyharts (Février). Dix expériences réalisées dans 4 thermostats durant 410 heures de fonctionnement d'ALICE2.

1998 Mission à bord de MIR de la Navette américaine STS-91 (Juin). Trois nouveaux thermostats (dont le thermostat microscopique réalisé grâce à la contribution de la NASA) et le nouveau dispositif d'acquisition d'images numériques sont montés dans la Station MIR.

1998 Mission GMSF / franco-américaine (Novembre - Décembre). Sept expériences réalisées dans trois nouveaux thermostats durant 470 heures de fonctionnement d'ALICE2.

1999 Mission GMSF / franco-russe (Janvier). Cinq expériences dans un thermostat sous vibrations sont réalisées durant 188 heures de fonctionnement d'ALICE2.

1999 Mission PERSEUS du cosmonaute Jean Pierre Haigneré (Février-Juin). Un nouveau thermostat (conçu par le LATTUM et qualifié à l'ICMCB) est monté à bord de la Station MIR. Seize expériences programmées durant plus de 2000 heures de fonctionnement d'ALICE2.

1999 Extension de la Mission PERSEUS (Juillet - Août). Quatre expériences (dont deux effectuées sous vibrations) définies après exploitation préliminaire des résultats de GMSF.

Ces nombreuses opportunités de vols en micropesanteur ont certainement contribué au bon avancement de notre programme de recherche et à la mise en évidence des comportements originaux des fluides critiques hors équilibre (voir § 2). Mais cette succession d'expériences souligne aussi la part instrumentale très importante qui accompagne ce type de programme de recherche et qui, bien qu'essentielle pour l'analyse correcte des phénomènes, ne peut pas être détaillée dans le présent rapport (caractérisation thermodynamique de plusieurs cellules ayant des caractéristiques propres très différentes - microscopie à immersion - volume variable - volumes multicellulaires - cellules cubiques pour milieux granulaires; mise au point et qualification de six thermostats de vol; qualification et utilisation d'un nouveau système d'acquisition d'images numériques; qualification et utilisation du module TEM-FER-05; etc.).

2. - Principaux résultats scientifiques obtenus depuis 1995

2.1. Les mécanismes de séparation de phase.

Rappelons d'abord que l'évolution de la morphologie et de la croissance d'une nouvelle phase s'effectue selon deux lois universelles qui se différencient par la fraction volumique à l'équilibre (volume offert à une phase par rapport au volume total). Ce résultat peut se comprendre en termes de fréquence des coalescences de gouttes dont la cause serait le reflet, soit du seul mouvement brownien (croissance lente en puissance $1/3$ du temps, gouttes éloignées, faibles fractions volumiques), soit d'un enchaînement de coalescences induit par les écoulements hydrodynamiques locaux (croissance rapide proportionnelle au temps, gouttes interconnectées, fortes fractions volumiques). La fraction volumique seuil serait environ 30%. La généralité de ces phénomènes permettrait de les appliquer à l'évolution de nombreux systèmes où la pesanteur ne joue aucun rôle comme les tissus biologiques par exemple.

Nous poursuivons cette étude détaillée de la séparation de phase gaz-liquide pour mieux quantifier la notion de fraction volumique de seuil dans la cinétique et la morphologie de la croissance des phases. En effet, différentes causes (Effet Piston, hydrodynamique, mouillage, etc.) peuvent induire des inhomogénéités locales de température et de densité qui à leur tour pourraient être responsables de certaines non-universalités notées dans les régimes de croissance. De plus, le niveau de contrôle des mesures locales nous a permis de programmer des expériences à très faible fraction volumique (<3%). L'objet est ici de tester la validité d'approches théoriques (croissance de Lifschitz-Slyozov) dont la généralité a pu être récemment remise en cause,

Publications : [4-6, 8, 12-14, 17, 19, 20, 22, 26]

Collaborations : J. Hegseth.

2.2. L'étude des fluctuations critiques.

Ce thème amont a pour objectif principal l'observation des fluctuations critiques dans l'espace direct. Il s'agit ici d'un test expérimental des fondements mêmes des théories des phénomènes critique dont nous avons récemment démontré la faisabilité. Ce projet a notamment été soutenu par la NASA dans le programme de recherche en collaboration avec l'Université de New-Orleans (J. Hegseth). Cette étude est aussi fortement liée aux études des mécanismes de séparation de phase (§2.1) puisque ces mêmes fluctuations critiques donnent naissance aux nucléations généralisées lors de la trempe du système dans le domaine instable près du point critique.

Publications : [5, 6, 11, 17, 28]

Collaborations : J. Hegseth.

2.3. La thermalisation d'un fluide critique par effet piston.

Rappelons brièvement que le mode de transport de chaleur à considérer dans le problème de la thermalisation d'un échantillon clos de fluide critique en microgravité est lié à l'expansion de la couche limite thermique. Associée à la très grande compressibilité du fluide critique, cette expansion de couche limite thermique diffusive agit alors comme un piston pour comprimer (et donc chauffer) tout le reste du fluide : c'est le chauffage par effet piston. Les temps caractéristiques associés à ces phénomènes sont à l'évidence beaucoup plus courts puisque, à l'échelle de toute la cellule, il s'agit principalement de quelques temps acoustiques et non plus d'un temps diffusif contraint au *ralentissement critique*. Par ailleurs, c'est la température moyenne à cette échelle la plus grande qui est rapidement changée, ce qui permet aussi de qualifier ce mode de transport près du point critique comme étant un chauffage adiabatique thermocompressible. Les résultats de nos expériences spatiales effectuées avant 1995 ont largement contribué à la meilleure compréhension de ce nouveau mécanisme de transport en phase homogène.

Les expériences conduites depuis 1996 ont eu pour objet principal l'analyse de phénomènes compliqués par la présence des deux phases gaz et liquide. La contribution de l'effet piston s'avère en effet remarquable en prenant la forme d'une surchauffe du gaz au-delà de la température de la

source. Dans cette perspective, les réponses d'un système diphasique à des échelons de température, à des pulses d'énergie et à des variations mécaniques de volume (effet piston forcé) ont été étudiées pour différentes configurations expérimentales. Nous soulignons que ces études sont d'autant plus complexes que la localisation de l'interface gaz-liquide reste précisément un problème non-résolu en microgravité. Une très récente modélisation théorique devrait précisément rendre compte de l'influence du mouillage sur le transfert thermique par effet piston.

Publications : [1, 2, 3, 7, 15, 16, 21]

Collaborations : B. Zappoli, P. Bontoux, B. Roux, J. Ouazzani.

2.4. Instabilités de domaines chauds, jets, couplage convection-effet piston.

Rappelons que certaines expériences effectuées avec l'instrument ALICE1 à bord de MIR avaient révélé des instabilités des domaines chauds se manifestant sous différentes formes de jets, soit *localisés* immédiatement après le début du chauffage, soit *aléatoires* après un temps fini de chauffage. Nous avons pu reproduire certaines de ces instabilités sur terre et les observer avant qu'elles soient tuées par les convections gravitationnelles. Leur origine, associée aux défauts de surface de la thermistance de chauffe, a pu être clairement identifiée. Une modélisation de l'effet piston *confiné* conduit à retrouver l'ordre de grandeur des vitesses de propagation de ces jets à partir de l'estimation de la vitesse hydrodynamique en sortie de couche limite (thèse de T. Fröhlich). Il reste encore à trouver l'origine des jets *aléatoires* observés après des temps finis de chauffage. A cette fin, différentes conditions opératoires ont été utilisées au cours des expériences effectuées sur ALICE2 depuis 1996. L'analyse des résultats est en cours. Ces études sont accompagnées d'un programme de modélisation du couplage convection-effet piston qui devrait être validé par des expériences sol effectuées avec une cellule de forme cubique en utilisant l'instrument ALICE2-MQ.

Publications : [2, 5 10]

Collaborations : J. P. Delville, B. Zappoli, P. Bontoux, J. Ouazzani.

2.5. Ebullition et Mouillage critique de la vapeur.

Nous avons étudié le couplage entre le mécanisme de changement de phase diphasique - monophasique et les effets thermocompressibles responsables des importantes inhomogénéités locales de température et de densité. Nous observons un *mouillage* hors-équilibre de la vapeur sur la paroi *chauffée*. Une première tentative d'interprétation de ce phénomène met en jeu la force de recul associée à la production de vapeur à l'interface et établit une analogie avec la *crise d'ébullition* observée dans les échangeurs de chaleur à haut flux thermique.

Publications : [9, 10, 17, 19, 20, 24, 29]

Collaborations : J.P. Delville, J. Hegseth, J. Ouazzani.

2.6. Systèmes diphasiques sous vibration

Dans un premier temps, l'étude du comportement des fluides critiques sous vibrations mécaniques a été réalisée sous gravité terrestre. Nous avons caractérisé l'instabilité apparaissant à l'interface entre deux fluides de densité proche vibrés horizontalement comme étant du type Kelvin Helmholtz. C'est donc une instabilité différente de l'instabilité de Faraday précédemment étudiée sous vibrations verticales.

Puis l'expérience en fusée sonde MiniTEXUS a permis d'étudier le comportement de ces systèmes diphasiques sous vibration en absence de gravité. Une accélération de la cinétique de coalescence des bulles de vapeur a été observée. Elle conduit à la structuration des interfaces du système diphasique en domaines plans orientés perpendiculairement à la direction des vibrations qui reflète l'alternance des domaines liquide et vapeur. Le mouillage et les énergies capillaires pourraient être déterminants pour expliquer la dynamique et la forme de ces domaines stabilisés sous vibrations. Nous avons récemment programmé des expériences utilisant l'instrument ALICE2 vibré à bord de MIR pour vérifier la robustesse de nos premières tentatives d'interprétation. Ces premiers résultats seront aussi à confirmer à partir de l'expérience de lévitation magnétique sur

l'hydrogène diphasique actuellement en cours de développement au SBT-CEA-Grenoble (D. Chatain) et à laquelle nous collaborons.

Publications : [23, 25]

Collaborations : P. Evesque, S. Fauve, B. Roux, D. Chatain, V. Polezaev, D. Lyubimov

2.7. Milieux Granulaires sous vibration.

L'étude du comportement des milieux granulaires sous vibrations en absence de gravité a été effectuée dans le même vol de la fusée-sonde MiniTEXUS (voir § 1.3.). Rappelons que les natures dissipatives et non-cohésive des interactions ajoutées au couplage mécanique avec le milieu fluide interstitiel confèrent à la matière solide divisée une grande variété de comportements mécaniques reliés à sa *température*, allant du type gaz jusqu'au type *solide*. Ainsi, dans cette première expérience où nous avons vibré des billes de bronze de 0.3 mm de diamètre moyen, nous observons la formation d'agrégats denses entourés de grains isolés, situation analogue à la coexistence diphasique du type gaz-liquide. Ce résultat dû à la nature dissipative des collisions entre grains dépend sans ambiguïté de la densité numérique du système. Il nous permet de progresser maintenant dans la description thermostatique des fluides granulaires puisque nous avons simultanément effectué une première mesure de la distribution de pression en fonction de la température cinématique au sein de ces systèmes sous vibrations.

Publications : [27]

Collaborations : P. Evesque, S. Fauve.

3. – Perspectives

Les spécificités des systèmes critiques hypercompressibles sont encore loin d'avoir été toutes comprises, notamment celles pouvant être à l'origine des instabilités hydrodynamiques très caractéristiques observées en absence de gravité. Nous souhaitons donc élargir la problématique à la *frontière* entre *phénomènes critiques* et *combustion* en introduisant les processus chimiques dans l'ensemble des phénomènes de transferts susceptibles de prendre naissance dans un système fluide [6] C'est plus précisément les couplages entre les effets thermocompressibles et les processus chimiques qui vont nous intéresser dans la mesure où les processus chimiques peuvent être modifiés de façon significative (en temps et dans l'espace suivant les natures *diffusive* des couches limites ou *adiabatique* des volumes, caractéristiques de l'Effet Piston). La pertinence spatiale du sujet reste entière dans la mesure où l'Effet Piston est rapidement modifié sur Terre par les instabilités d'origine convective.

Cette présentation des objectifs scientifiques conduit aux spécifications de DECLIC (Dispositif d'Etude de la Croissance et des LIquides Critiques) [18] le futur instrument automatique permettant d'étudier des fluides - notamment l'eau - à haute pression et haute température à bord de la future Station Spatiale Internationale. Dans la phase A de développement de DECLIC, nous avons réalisé au sein de 3AR, avec le soutien du CNES et de la Région Aquitaine, un thermostat "optique et/ou spectroscopique". Ce dispositif contrôle les conditions thermodynamiques du fluide en incluant des diagnostics in situ optiques du type ALICE (ou FSL) ou bien spectrométriques (NIR, FIR, UV, etc.). Il fonctionne dans un domaine de température et de pression pouvant atteindre 600 °C et 500 bars et permet de placer l'eau dans les conditions supercritiques (température et pression critiques de l'eau : $T_c=347\text{ °C}$ et $P_c= 22\text{ MPa}$).

Nos projets d'expériences spatiales utilisant DECLIC et FSL à bord de la Station Spatiale Internationales ainsi que les futures opportunités des vols paraboliques et des vols en fusées sondes ont fait l'objet de 2 propositions à l'ESA (AO.99. 107 : Vibrational Phenomena in inhomogeneous media ; AO.99.118 : Chemical-Physics in Near Critical and Supercritical Fluids) et de 1 proposition

à la NASA (NRA-98-HEDS-03/99-229). Par ailleurs nous avons proposé à PESA la création de de 1 Topical Team (TT.AO.99. 17: Chemical-Physics in Near Critical and Supercritical Fluids).

4. - Bilan analytique succinct

Financements : CNES, Région Aquitaine, ESA, AEROSPATIALE, LATTUM, UNO.

Communications, Rapports, Séminaires : > 60

<i>Thèses</i>	1 soutenue	T. Fröhlich/CEA (CNES-CEA) /1997
	1 (déposée)	C. Morteau/ICMCB (CNES-AEROSPATIALE)
	1 (en cours)	R. Wunenburger/ICMCB (MEN)

5. - Principales publications parues depuis 1995

[1] BEYSENS D. (1995) *Scaling anti gravity effects in critical point phenomena*, Microgravity Quarterly, **5**, 34.

[2] FRÖHLICH T., BOUQUET S., BONETTI M., GARRABOS Y., BEYSENS D. (1995) Self similar solutions for the non-linear diffusion and application to near-critical fluids, *Physica* **A218**, 419-436.

[3] BONETTI M., PERROT F., BEYSENS D., GARRABOS Y. (1995) Fast adiabatic heating anti temperature relaxation in near-critical fluids under zero gravity, *International Journal of Thermodynamics*, **16**, 1059-1067.

[4] LALAUE C., DELVILLE J.P., GARRABOS Y., FREYSZ E., DUCASSE A. (1995) *Scaled Growth of an Isolated Droplet Generated by Laser-Induced Phase Separation in a Microemulsion - Comparison with Systems of the same Ising Class*, *J. de Physique IV*, Colloque C3, Sup. J. Phys III, **5**, C3-267-272.

[5] BEYSENS D. (1996) *New critical phenomena observed under Weightlessness*, *Proceedings of the Ninth European Symposium on Gravity-dependent Phenomena in Physical Sciences, Material and Fluids under Low Gravity*, Ed. L. Ratke, H. Walter, B. Feuerbacher, *Lecture Notes in Physics*, Springer-Verlag, **Vol. 464**, pp. 3-25.

[6] BEYSENS D., GARRABOS Y. (1996) *Critical Fluids under Weightlessness*, *Space Station Utilisation Symposium Proceeding*, ESOC, Darmstadt, Germany, 30 Sept. - 2 Oct. 1996, Ed. T. D. Guyenne, **ESA SP-385**, ESTEC, Noordwijk, pp. 647-655.

[7] FRÖLICH T., GUENOUN P., BONETTI M., PERROT F., BEYSENS D., GARRABOS Y., LE NEINDRE B., BRAVAIS P. (1996) Adiabatic versus conductive heat transfer in off critical SF6 in the absence of convection, *Physical Review* **E54**, 1544-1549.

[8] NIKOLAYEV V.S., BEYSENS D., GUENOUN P. (1996) *New hydrodynamic mechanism for drop coarsening*, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3144-3147.

[9] DELVILLE J.P., LALAUE C., DUCASSE A., GARRABOS Y. (1996) *Wetting-free finite size effects on the late stage phase-separation of a binary fluid in compensated gravity*, *Proceedings of the Second European Symposium "Fluids in Space"*, Ed. A. Viviani, J. Gilder Congressi SRL, Naples, Italy, 22-26 April, 344-347.

- [10] DELVILLE J.P., SALZMANN M., GARRABOS Y., BEYSENS D. (1996) Boiling, gravitational instabilities and pattern formation in critical pure fluids, Proceedings of the Second European Symposium 'Fluids in Space', Ed. A. Viviani, J. Gilder Congressi SRL, Naples, Italy, 22-26 April, 43-48.
- [11] MORTEAU C., SALZMANN M., GARRABOS Y., BEYSENS D. (1996) Density characterization of slightly off-critical fluid cells using the ALICE2 facility, Proceedings of the Second European Symposium "Fluids in Space", Ed. A. Viviani, J. Gilder Congressi SRL, Naples, Italy, 22-26 April, 327-333.
- [12] PERROT F., BEYSENS D., GARRABOS Y., FRÖHLICH T., GUENOUN, BONETTI M., LE NEINDRE B., BRAVAIS P. (1996) *Kinetics of phase ordering in fluids under reduced gravity*, Proceedings of the Second European Symposium "Fluids in Space", Ed. A. Viviani, J. Gilder Congressi SRL, Naples, Italy, 22-26 April, 339-343.
- [13] STRAUB J., BARTSCHER C., GARRABOS Y., BEYSENS D., FRÖHLICH T. (1996) Kinetics of Phase Transition around the Critical Point of Pure Fluids, Research Program of the German-Russian Space Mission MIR '97, Ed. P.R. Sahm, B. Schiewe, B. Fischer, M. H. Keller, (RWTH Aachen, Germany), 345-352.
- [14] HEGSETH J., BEYSENS D., PERROT F., NTKOLAYEV V., GARRABOS Y. (1996) Growth and Morphology of Phase Separating Supercritical Fluids, 3rd Microgravity Fluid Physics Conference, Cleveland, Ohio, USA, Jun. 13-15, NASA Conf. Publ., **NASA D-1338**, 35-40.
- [15] AVDEEV S.V., IVANOV A.L., KALMIKOV A., GORBUNOV A.A., NIKITIN S.A., POLEZHAEV V.I., PUTIN G.F., ZUZGIN A.V., SAZONOV V.V., BEYSENS D., GARRABOS Y., ZAPPOLI B., FRÖHLICH T. (1997) *Experiments in the far and near Critical fluids aboard Mir Station with the use of the ALIGE-1 instrument*, Proceedings of the Joint Xth European and VIth Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity, Ed. Yu. S. Osipov, V. S. Avduevsky, V.A. Briskman, H. U. Walter, Russian Acad. Sci., St. Petersburg, Russia, 15-21 June, 333-340.
- [16] BARTSCHER C., STRAUB J., GARRABOS Y., BEYSENS D. (1997) The investigation of the forced piston effect at various densities of pure fluid around the critical point, Proceedings of the Thirteenth Symposium on Thermophysical Properties, Ed. W. M. Haynes and B.A. Stevenson, NIST, Boulder, Colorado, USA, June 22-27, CD-ROM.
- [17] FIEGSETH J., NIKOLAYEV V., BEYSENS D., GARRABOS Y., CHABOT C. (1997) Growth and Morphology, Boiling, and Critical Fluctuations in Phase Separating Supercritical Fluids (GMSF), Science Concept Review, Cleveland, Ohio, USA, September 19, 1997, NASA Pub., Science Requirements Document, 1997, 1-44.
- [18] CAMBON G., ZAPPOLI B., MARCOUT R., GARRABOS Y., CANSELL F., BEYSENS D., BILLIA B., JAMGOTCHIAN H. (1997) *DECLIC : A facility to investigate critical fluids behavior, chemical reactivity in supercritical water and directional solidification in transparent media*, Proceedings of the 48th International Astronautical Congress, JAF, Turin, Italy, October 6-10, **IAF-97-J5.03**.

- [19] CHABOT C., GARRABOS Y., CANSELL F., BEYSENS D., MARCOUT R., ZAPPOLI B., ZV J.F. (1997) *ALICE2 First results of the Cassiopee mission*, Proceedings of the 48th International Astronautical Congress, IAF, Turin, Italy, October 6-10, **IAF-97-J3.O1**.
- [20] HEGSETH J., BEYSENS D., NIKOLAYEV V., GARRABOS Y., CHABOT C. (1998) *Phase Separation and Boiling near the Critical Point in Pure Fluids*, Proceedings of the 1997 Microgravity Fundamental Physics Workshop, Santa Barbara, California, USA, May 19, 1997, NASA Conf. Publ., **NASA D-15677**, 127-132.
- [21] GARRABOS Y., BONETTI M., BEYSENS D., PERROT F., FRÖHLICH T., CARLES P., ZAPPOLI B. (1998) *Relaxation of a supercritical fluid after a heat pulse in absence of gravity effect. Theory and experiments*, Phys. Rev. **E57**, 5665-5681.
- [22] PERROT F., BEYSENS D., GARRABOS Y., FRÖHLICH T., GUENOUN P., BONETTI M., BRAVAIS P. (1998) *Morphology transition observed in a phase separating fluid*, Phys. Rev. **E59**, 3079-3083.
- [23] WUNENBURGER R., EVESQUE P., CHABOT C., GARRABOS Y., FAUVE S., BEYSENS D. (1999) *Frozen wave induced by high frequency horizontal vibrations on a CO₂ liquid-gas interface near the critical point*, Phys. Rev. **E59**, 5440-5445.
- [24] GARRABOS Y., CHABOT C., WUNENBURGER R., DELVILLE J.P., BEYSENS D. (1999) *Critical boiling observed in microgravity*, J. Chem. Phys. **96**, 1066-1073.
- [25] BEYSENS D., WUNENBURGER R., CHABOT C., GARRABOS Y. (1999) *Effect of Oscillatory Accelerations on Two-Phase Fluids*, Proceedings of the “g-sensitivity Workshop”, ESA-ESTEC, Sept. 1998, Ed. D.T.J. Hurle, Microgravity Sci. Technol., **XII/1**, x-x.
- [26] BEYSENS D., GARRABOS Y., CHABOT C. (1999) *Hydrodynamics and phase separation in simple fluids*, CP469, Slow Dynamics in Complex Systems: Proceedings of the 8th Tohwa University International Symposium, Fukuoka, Japan, 9-13 Nov., 1998, Ed. M. Tokuyama and I. Oppenheim, AIP, 222-235.
- [27] FALCON E., WUNENBURGER R., EVESQUE P., FAUVE S., CHABOT C., GARRABOS Y., BEYSENS D. (1999) *Cluster formation in a granular medium fluidized by vibrations in low gravity*, Phys. Rev. Lett., to be published (July).
- [28] BEYSENS D., ASCHAUER R., GARRABOS Y. (1999) *Imaging fluctuations in simple and complex fluids extremely close to a critical point*, Phys. Rev. E, submitted.
- [29] GARRABOS Y., HEGSETH J., NIKOLAYEV V., CHABOT C., DELVILLE J.P., BEYSENS D. (1999) *Gas “wets” the wall in orbit*, Preprint.

ACOUSTIQUE ET PHENOMENES NON LINEAIRES

Stéphan Fauve

Laboratoire de Physique Statistique
Ecole Normale Supérieure
24, rue Lhomond
75005 Paris

L'étude de la matière granulaire a connu un regain d'intérêt parmi les physiciens au cours de ces dernières années. Les problèmes considérés concernent principalement la statique ou les écoulements des matériaux granulaires. Les thèmes de recherche, effectués jusqu'en 1997 à l'ENS Lyon et actuellement à L'ENS Paris, se situent à un niveau intermédiaire et concernent la dynamique du contact entre grains, l'étude de la propagation des déformations au sein d'un milieu granulaire 1-D et les comportements cinétiques et dynamiques, résultant de l'inélasticité des collisions, dans un gaz granulaire 3-D fluidisé par vibrations. Le rôle des contacts de nature non linéaire ainsi que le rôle des collisions inélastiques se sont avérés déterminant pour la compréhension du comportement dynamique d'un milieu granulaire. Dans cet esprit, l'étude des collisions binaires normales [3] a facilité la compréhension des propriétés de ces contacts et a constitué une première étape vers l'étude des processus collectifs de collision [1, 4] et des milieux granulaires vibrés [5 - 8]. Ces axes de recherche ont été abordés autour de diverses expériences présentées ci-dessous.

1. - Dynamique de milieux granulaires modèles 1-D (Publications 1 à 4)

Pour des corps élastiques sphériques, la loi de contact, appelée loi de Hertz, est non linéaire à cause de la géométrie des corps en contacts. Une chaîne de billes identiques est une configuration idéale, car les propriétés microscopiques du milieu sont parfaitement connues et très simples, et la géométrie de l'empilement triviale. L'étude de ses propriétés dynamiques donne donc accès de manière directe à la dynamique des contacts. On s'attend à des effets importants des non-linéarités, et la propagation d'ondes solitaires a été prédite. Nous avons mis en évidence ces ondes, dont nous avons précisément caractérisé la forme et la vitesse de propagation, trouvant un excellent accord quantitatif avec la théorie, sans paramètres ajustables. Ces résultats sont exposés dans la référence [1].

Un problème fondamental lié au contact est la prise en compte des mécanismes dissipatifs, en particulier dans la limite de collisions à faible vitesse, où les déformations engendrées restent dans la limite élastique. La collision entre deux grains devient-elle parfaitement élastique à la limite de vitesse nulle, i.e. le coefficient de restitution tend-il vers 1, ou garde-t-on une dissipation finie dans cette limite ? L'étude expérimentale du choc entre une bille en chute libre et un plan horizontal immobile a été entreprise afin de répondre à cette question. Lorsque la durée d'une collision devient de l'ordre du temps de vol entre deux rebonds successifs, on observe que la bille ne rebondit plus mais oscille sur la surface déformée élastiquement, avec une période caractéristique, avant de s'immobiliser. Pour chaque rebond, les mesures du

coefficient de restitution et de la durée de la collision ont été effectuées. Le coefficient de restitution est essentiellement constant et proche de 1 pour pratiquement tous les rebonds, avant de décroître vers zéro lorsque la vitesse d'impact tend vers zéro. Dans cette limite de basses vitesses d'impact, la durée de la collision est plus longue que celle prévue par la théorie de Hertz de l'impact entre deux corps élastiques. Un modèle non dissipatif, fondé sur le contact de Hertz, donne des résultats en bon accord avec les expériences lorsque la gravité est prise en compte au cours de l'interaction. Ce modèle permet alors de décrire à la fois la dynamique du contact de tous les rebonds et les oscillations de la bille sur le plan. Un modèle numérique dissipatif, fondé sur un mécanisme exclusivement viscoélastique, conduit à une évolution du coefficient de restitution similaire à celle obtenue expérimentalement. Cette étude est exposée dans [3].

Nous avons ensuite étudié la chute libre, sous l'action de la gravité, d'une colonne de N billes sur un capteur horizontal. L'expérience consistait à enregistrer l'évolution temporelle de la force exercée sur le capteur. Le résultat le plus surprenant est que la force maximale subie par le capteur est indépendante du nombre de billes ! L'interprétation de cet effet met en jeu une onde de compression/dilatation qui se propage dans la colonne avec une vitesse indépendante du nombre de billes. Une expression analytique de la vitesse a été obtenue, en accord avec les résultats expérimentaux, un ordre de grandeur plus faible que la vitesse des ondes longitudinales dans le matériau constituant les billes. La mesure du coefficient de restitution effectif de l'ensemble de la colonne montre que l'énergie dissipée lors de la collision augmente avec N . L'ensemble de ces résultats ont été retrouvé numériquement à l'aide d'un modèle non dissipatif, fondé sur le contact de Hertz, qui montre qu'après la phase de compression entre la colonne et le mur, les billes se séparent les unes des autres avec des vitesses et des distances inter-billes très différentes. Deux sortes de détachements des billes de la colonne ont alors été observés numériquement : un en dessous du nombre critique $N=5$ et un pour $N > 5$. Pour $N > 5$, les billes du haut de la colonne se détachent les unes après les autres de la colonne avec une vitesse plus grande que leur vitesse initiale. Les billes du bas rebondissent alors, vers le haut, en bloc avec une vitesse inférieure à leur vitesse initiale. L'effet de détachement des billes de la colonne conduisant à une distance typique de séparation entre chaque bille provient de la redistribution de l'énergie, au cours de la collision, à l'intérieur de tout le système. Cette redistribution est due à la nature discrète du réseau (non--linéarité de rupture des contacts) et dépend de la loi de compression entre les billes. Le détachement en bloc est associé à un effet purement non linéaire (loi de compression) du réseau discret et plus particulièrement à un train d'ondes solitaires de taille typique de l'ordre de 5 billes. Cette étude est présentée dans [4].

Ces travaux ont fait l'objet de la thèse d'Eric Falcon, soutenue à l'UCB-Lyon I en Juillet 1997 [2]. Ils ont bénéficié d'un contrat CNRS de 80 kF, sur deux ans, dans le cadre du réseau de laboratoires GEO.

2. - Dynamique de milieux granulaires 3-D vibrés (Publications 7 à 10)

Le principal objet de ce travail concerne l'expérience réalisée en collaboration avec D. Beysens, P. Evesque et le groupe d'Y. Garrabos dans la fusée-sonde Mini-Texus 5, qui a été lancée le 11 février 1998 à Esrange (Suède), à son bord, trois cellules, avec des densités de billes différentes, ont été soumises à des vibrations sinusoïdales d'amplitude et de fréquence variables. L'intérêt de la micro-gravité est de se placer dans une situation expérimentale où les collisions sont le seul mécanisme d'interaction. L'enregistrement vidéo a montré que lorsque la densité du milieu augmente, l'état fluidisé homogène spatialement ("gaz") n'est plus stable et un remarquable phénomène d'agrégation de particules se produit, sous la forme d'un amas immobile, au sein de la cellule. C'est à notre connaissance la première observation convaincante qui montre qu'un ensemble de particules solides en mouvement erratique, interagissant seulement par l'intermédiaire de collisions inélastiques, peut engendrer la formation d'un "amas" dense de particules. L'évolution temporelle des signaux de pression (relatives au comportement des particules en collisions inélastiques) a montré une succession de pics correspondant aux collisions des particules sur le mur. Du fait de l'inélasticité des collisions, l'amplitude moyenne de ces fluctuations de pression diminue lorsque la densité de billes augmente, s'annulant même lorsque le régime d'amas est atteint. Dans le régime dilué ("gaz"), la densité de probabilité des fluctuations de pression d'un milieu granulaire suit une loi en puissance $3/2$ de la vitesse de vibration. Comme la valeur moyenne des fluctuations de pression, pour un tel milieu dilué homogène spatialement, doit être une quantité proportionnelle à la température granulaire, T (énergie cinétique moyenne par particule), nous avons pu trancher quant au problème énormément étudié mais encore ouvert qu'est la dépendance de T avec la vitesse d'excitation. Ces résultats sont exposés dans [5].

Au sol, l'expérience ci-dessus a été réalisée en mettant en mouvement un ensemble de billes à l'aide d'un piston oscillant dans un cylindre vertical. Dans le but d'accéder à l'analogue de l'équation d'état du gaz usuel, un deuxième piston, se trouvant à la partie supérieure du cylindre, est soit fixé à une hauteur donnée (expérience à volume constant), soit se stabilise à une hauteur donnée sous l'effet des chocs des billes (expérience à pression constante). Nous avons mesuré, d'une part, la pression moyenne P exercée par les billes (resp. le volume Ω) en fonction du nombre de couches n de particules au repos, et des paramètres de vibration à Ω (resp. P) fixé et, d'autre part, la densité locale de billes en fonction de l'altitude. Lorsque le nombre de billes est supérieur à un nombre critique, une transition apparaît entre un régime où les particules ont un mouvement désordonné et un régime de comportement collectif (l'analogue de l'amas en micro-gravité) où les particules rebondissent à la manière d'un corps solide. Pour Ω (resp. P) fixé, la pression (resp. le volume) passe par un maximum pour un nombre critique de particules, avant de décroître lorsque le nombre de billes augmente. Ces comportements, différents de ceux des gaz usuels, proviennent de la dissipation d'énergie due aux collisions inélastiques. Cependant, comme pour un gaz usuel, l'atmosphère est exponentielle suffisamment loin du piston, mais sur des échelles de longueur très différentes. De façon indépendante, les mesures de pression, de volume et les queues exponentielles des profils de densités permettent alors d'avoir accès à la dépendance de la température granulaire, T , avec la vitesse d'excitation, V , selon T proportionnelle à V^θ où θ est une fonction décroissante de n , déterminée empiriquement. Nous avons donc montré, pour la première fois, que la loi $P \propto \Omega$ proportionnel à T avec T proportionnel à V^θ , où $\theta(n)$ a été obtenu par 3 mesures indépendantes sous des conditions expérimentales différentes, fournit une équation d'état empirique acceptable pour un gaz granulaire dissipatif dans le régime cinétique. Ce travail explique les résultats numériques conflictuels antérieurs pour la détermination de la valeur de l'exposant θ . Cette étude est présentée dans [6, 7].

En marge des travaux précédent, E. Falcon a débuté une collaboration avec K. Kumar and K.M.S. Bajaj du Indian Statistical Institute de Calcutta. Ils ont mis en évidence l'apparition de nouvelles instabilités à la surface d'une couche épaisse de poudre soumise à une excitation sinusoïdale verticale, à basse fréquence d'excitation, le tas conique dû à l'écoulement convectif se déstabilise au-delà d'une amplitude de vibration critique en présentant une dépendance azimutale qui conduit à la formation de "cannelures" à sa surface. À amplitude de vibration plus élevée, le tas s'affaisse en se scindant en petits tas cannelés qui se placent sur un réseau hexagonal. À haute fréquence, la surface horizontale du matériau granulaire présente, au-delà d'une accélération critique, un régime d'ondes stationnaires constituées de lignes de grains vibrant à la même fréquence que la fréquence excitatrice. Le principal mécanisme pour leur formation est le mouvement convectif des grains induit par la présence du gaz interstitiel, i.e. l'air (la petite taille des grains ainsi que l'épaisseur relativement importante de la couche rendant prépondérant son effet), ces phénomènes disparaissant lorsque les expériences sont répétées sous vide. Ces travaux sont présentés dans [8].

Publications

[1] C. COSTE, E. FALCON and S. FAUVE, Solitary waves in a chain of beads under Hertz contact, *Physical Review E* **56**, 6104(1997).

[2] E. FALCON, *Comportements dynamiques associés au contact de Hertz processus collectifs de collision et propagation d'ondes solitaires dans les milieux granulaires*, Thèse de doctorat de l'Université Lyon I (1997).

[3] E. FALCON, C. LAROCHE, S. FAUVE and C. COSTE, *Behavior of one inelastic ball bouncing repeatedly off the ground*, *European Physical Journal B*, **3**, 45--57 (1998).

[4] E. FALCON, C. LAROCHE, S. FAUVE, and C. COSTE, *Collision of a 1--D column of beads with a wall*, *European Physical Journal B*, **5**, 111--131 (1998).

[5] E. FALCON, R. WUNENBURGER, P. EVESQUE, S. FAUVE, C. CHABOT, Y. GARRABOS and D. BEYSENS, *Cluster formation in a granular medium fluidized by vibrations in low gravity*, accepté dans *Physical Review Letters* (1999).

[6] E. FALCON, S. FAUVE, and C. LAROCHE, *Cluster formation, pressure and density measurements in a granular medium fluidized by vibrations*, accepté dans *European Physical Journal B*, Rapid Note (1999).

[7] E. FALCON, S. FAUVE and C. LAROCHE, *Experimental determination of a state equation for dissipative granular gases*, accepté dans *Journal de Chimie Physique*, Juin (1999).

[8] E. FALCON, K. KUMAR, K. M. S. BAJAJ and J. K. BHATTACHARJEE, *Heap corrugation anti hexagon formation of powder under vertical vibrations*, accepté dans *Physical Review E*, May (1999).

TIERMOMECHANIQUE DES INTERFACES. APPLICATION AUX FLUIDES CRITIQUES ET A LA MICROGRAVITE

Henri Gouin

Laboratoire de Modélisation en Mécanique et Thermodynamique
(UPRES EA 2596)
Faculté des Sciences — Case 322
Université Aix-Marseille III
Avenue Escadrille Normandie-Niemen
13397 MARSEILLE CEDEX 20

Activité du groupe 1 :

H. Gouin, S. Gavriluk, J.P. Pulicani, O. Chevalier

L'activité relève à la fois des théories de mécanique des milieux continus à l'aide de modèles non locaux du type second gradient (ou non-linéaire à la Landau-Ginzburg) et de théories moléculaires du type champ moyen.

La recherche effectuée s'est répartie en plusieurs chapitres relevant de cette philosophie.

1. - Étude des bulles et des gouttes

Les bulles et les gouttes de petite dimension ne permettent plus l'utilisation de la théorie de Laplace, la tension superficielle n'est plus envisagée comme constante. Le modèle est susceptible de représenter les brouillards et les aérosols pour lesquels les dimensions caractéristiques sont de l'ordre de 50 Angströms.

Plusieurs articles ou proceedings ont été présentés [A1 A2 A7 C16 C20 C22 1 10 18]

2. - Étude de la dynamique des fluides et des mélanges de fluides au voisinage des points critiques et en l'absence de pesanteur

Pour les mélanges de fluides nous utilisons un modèle à deux vitesses. La méthode est "variationnelle". Elle permet de modéliser les termes de diffusion à l'aide d'une énergie interne tenant compte de la différence des vitesses.

Nous obtenons des conditions de Rankine-Hugoniot inédites. Nous avons constaté que le système conduisait à des équations hyperboliques.

L'approche du point critique nécessite une modélisation de l'énergie libre du mélange des fluides. Un développement de l'énergie libre dans un cadre "non local" fait intervenir des développements en gradients des masses volumiques des divers constituants.

Les échelles de temps, de longueur et de masse des mouvements à travers les zones de transition de phases sont associées à des échelles "moléculaires". Dans le cas de la micropesanteur, les mouvements ont une modélisation simplifiée : ils conduisent à des systèmes d'équations aux dérivées partielles ou différentielles autonomes. Les problèmes d'ondes matérielles sont analysés pour les divers constituants du mélange.

Les conditions aux limites associées à ces problèmes font intervenir des énergies liées aux parois du récipient d'expérience. La transition vers le chaos est envisagée.

Ces divers résultats ont fait l'objet de publications ou proceedings, actes et conférences

[A3 A4 A5 A6 A8 A10 A12 A13 A14 C17 C18 C19 C21 3 4 5 6 7 8 9 11 12 13 14 15 16 17 19 20 21 22 23 24 25].

Une thèse a été soutenue (Odile Chevalier, le 2 novembre 1998).

3. - Interactions entre fluides et parois

Les méthodes de la mécanique statistique conduisent en mécanique des milieux continus à une approche de la mouillabilité pour les fluides et les mélanges de fluides au voisinage de points critiques. Des résultats nouveaux ont été obtenus mettant en cause certaines idées phénoménologiques. Ils pourraient être l'objet d'expériences en micropesanteur.

Plusieurs articles ou proceedings ont été présentés [A9 A11 A15]

Les publications (A) et communications majeures (C).

- A1** H. GOUIN, *The second gradient theory applied to interfaces: models of continuum mechanics for fluid interfaces*, in "Dynamics of Multiphase Flows across interfaces", Lecture Notes in Physics, **467**, p. 8-15, 1996.
- A2** F. DELL'ISOLA, H. GOUIN, G. ROTOLI, *Nucleation of spherical shell-like interfaces by second gradient theory: numerical simulations*. European Journal of Mechanics/B-Fluids. **15**, n° 4, p. 545-568. 1996.
- A3** S. GAVRILYUK and J. FABRE, *Lagrangian coordinates for a drift-flux model of a gas-liquid mixture*, Int. Journal Multiphase Flow, **22**, n° 3, p. 453-460, 1996.
- A4** S. GAVRILYUK and S.M. SHUGRIN, *Media with equations of state that depend on derivatives*, Journ. Appl. Mech and Techn. Physics, **37**, n° 2, p. 179- 189, 1996.
- A5** S. GAVRTLYUIK, *Solitary waves in bubbly liquids are linearly unstable*, Eur. J. Mech., B/Fluids, **15**, n° 1, p. 37-53, 1996.
- A6** S. GAVRILYUK, H. GOUIN, Yu PEREPECHKO, *A variational principle for two-fluid models*. Comptes Rendus à l'Acad. des Sciences Paris, t. **324**, Serie IIb, p. 1-8, 1997.
- A7** H. GOUIN, G. ROTOLI, *An analytical approximation of density profile and surface tension of microscopic bubbles for van der Waals fluids*, Mech. Research Communications, **24**, n° 3 p 255-260, 1997.
- A8** S. GAVRILYUK and Yu PEREPECHKO, *Variational approach to modelling hyperbolic two-fluid models*, Journ. Appl. Mech and Techn. Physics. **39**, n° 5, p. 39-54, 1998.

- A9** H. GOUIN, *Energy of interaction between solid surface and liquids*, Journal of Physical Chemistry, **102**, p. 1212-1219, 1998.
- A10** S. GAVRILYUK, H. GOUIN, Yu PEREPECHKO, *Hyperbolic models of homogeneous two-fluid mixtures*, Meccanica, 33, n° 4, p. 161-175, 1998.
- A11** H. GOUIN and W. KOSINSKI, *Boundary conditions for a capillary fluid in contact with a wall*, Archives of Mechanics, 50, n° 5, p. 907-916, 1998.
- A12** H. GOUIN and S. GAVRILYUK, *Hamilton's principle and Rankine-Hugoniot conditions for general motions of mixtures*, Meccanica, 34, n° 1, p. 39-47, 1999.
- A13** S. GAVRILYUK and H. GOUIN, *A new form of governing equations of fluids arising from Hamilton's principle*, Int. J. Eng. Sci., ref. IJES 720, accepté, 1999.
- A14** O. CHEVALIER, H. GOUIN, S. GAVRILYUK, *Non-dissipative phase transitions in a two-component fluid mixture in the vicinity of a critical point*, Journal de Chimie-Physique, accepté, 1999.
- A15** H. GOUIN and S. GAVRILYUK, *Wetting problem for multicomponent fluid mixtures*, Physica A, ref. Physica A 4733, accepté, 1999.
- C16** H. GOUIN and F. CUBISOL, *Microscopic drops and bubbles of pure fluids in microgravity and vicinity of the critical point*, Fluids in space, Naples, Italy, 22- 26 April 1996, ESA and ELGRA, proceedings of E.S.A. p.348-353, 1996.
- C17** S. GAVRILYUK, H. GOUIN, Yu PEREPECHKO, *Variational approach to homogeneous two-velocity media*, ASME, Fluids vol. 2, p. 206- 210, 1997.
- C18** O. CHEVALIER and H. GOUIN, *Ondes dans les mélanges au voisinage des points critiques : un système dynamique*, Actes du 13 congrès français de mécanique, Vol. 1, Instabilités, transition, p. 435-438, 1997.
- C19** S. GAVRILYUK et H. GOUIN, *Méthode variationnelle pour des mélanges binaires homogènes*, Actes du 13 congrès français de mécanique, Vol. 1, p. 285-288, 1997.
- C20** L. ESPANET and H. GOUIN, *Method of similarity for cavitation*, Proceedings of the third international symposium on cavitation, Vol. 1, Ed. J.M. Michel and H. Kato, Presses de l'Université de Grenoble, p. 179-183, 1998.
- C21** S. GAVRILYUK and H. GOUIN, *Symmetric form of governing equations for capillary fluids waves in "Trends in applications of mathematics "*, Ed. G. Iooss, Pitman Research Notes in Mathematics, accepté 1999.
- C22** L. ESPANET et H. GOUIN, *Estimation du nombre de bulles en écoulements cavitants, Ecoulements polyphasiques*, Actes du quatorzième congrès français de mécanique, n° 534, 6 pages, accepté, 1999.

Les conférences.

- 1 H. GOUIN, *Boundary conditions in thermodynamics of second gradient theory*, 31st Solid conference, Pologne, 09/1996.
- 2 A. SANFELD and H. GOUIN, *Influence of an electric field on a pure interface near the critical point*, Colloque HCM — Contrat ER CHRXCT 0940481, Wavre, Angleterre, 01/1997.
- 3 S. GAVRJLYUK and H. GOUIN, *Hyperbolic models of homogeneous two-fluid mixtures derived from Hamilton's principle*, First Euro-Conference 1997, Hyperbolic Conservation laws, Network TMREEC, ENS de Lyon, 02/1997.
- 4 S. GAVRILYUK and H. GOUIN, First Euro-Conference 1997, ENS Lyon, Hyperbolic Conservation laws, Network TMR-EEC, February 5-7, 1997.
- 5 H. GOUIN, *Ondes solitaires dans les mélanges de fluides au voisinage des points critiques : une approche par surfaces singulière et système dynamique*. Exposé aux Journées du GdR 1185 CNES-CNRS, Aussois, 10-13 avril 1997.
- 6 S. GAVRJLYUK, Meeting ASME, *Fluids, Hyperbolic models of mixtures*, Vancouver Canada, 06/1997.
- 7 S. GAVRILYUK and YU PEREPECHKO, European Fluid mechanics conferences, Göttingen, RFA, 09/1997.
- 8 H. GOUIN, *Modèles conservatifs et dissipatifs pour les mélanges de fluides*. Conférence au Laboratoire Energétique et de Mécanique théorique et appliquée, INPL/Univ H. Poincaré, Nancy, le 23 octobre 1997.
- 9 S. GAVRILYUK and H. GOUIN, *Nouvelle forme des équations du mouvement des fluides obtenues à partir du principe d'Hamilton*. Séminaire de mathématiques appliquées, C.M.I, Marseille, le 4 novembre 1997.
- 10 H. GOUIN, *Second gradient theory of non-Cauchy materials*, Seminarium Osrodka Mechaniki, Académie des Sciences de Varsovie, Pologne, 12/1997.
- 11 H. GOUIN, *Conservative and dissipative models for fluid mixtures*, Université de Varsovie, Pologne, 12/1997.
- 12 S. GAVRILYUK and H. GOUIN, *Conservative models of fluid mixtures and hyperbolicity*, Université de Lisbonne, Département de mathématiques, Portugal, 01 / 1998.
- 13 S. GAVRILYUK and H. GOUIN, *Les équations des mélanges de fluides et l'hyperbolicité*, Conférence invité, Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, le 29 janvier 1998.

- 14 H. GOUIN and S. GAVRILYUK, *Dissipative models of mixtures*, Euromech 376, Waves in Two-Phase flows, Istanbul, Turquie, 04/1998.
- 15 S. GAVRILYUK and H. GOUIN, *A new form of governing equations of fluids arising from variational principle*, Euromech 376, Waves in Two-Phase flows, Istanbul, Turquie, 04/1998.
- 16 S. GAVRILYUK and H. GOUIN, *A new appropriate form for governing equations for fluids arising from Hamilton's principle*, Symposium on trends in Applications of Mathematics to Mechanics, STAMM 98, Nice, 05/1998.
- 17 S. GAVRILYUK, *Les formes symétriques des équations des fluides et des mélanges de fluides*, Invitation au séminaire de mécanique théorique de l'Université Paris 6, 11/1998.
- 18 H. GOUIN, *Second gradient theory in continuum mechanics and boundary conditions*, Seminarium Mechaniki, Académie des Sciences à Gdansk, Pologne, 11/1998.
- 19 H. GOUIN, *Shock waves in fluid mixtures, Rankine-Hugoniot conditions*, Seminarium Osrodka Mechaniki, Académie des Sciences de Varsovie, Pologne, 12/1998.
- 20 S. GAVRILYUK, *A new form of governing equations of fluids arising from Hamilton's principle*, Seminarium Osrodka Mechaniki, Académie des Sciences de Varsovie, Pologne, 12/1998.
- 21 J.P. PULICANI, *Les méthodes numériques d'ordre élevé*, Colloque International, Nice, 01/1999.
- 22 H. GOUIN, *Invited Lecture: Two-component flows: hyperbolicity and shock waves*, Waskom 99 (10th International Conference), Vulcano, Iles Eoliennes, Italie, 06/1999.
- 23 S. GAVRILYUK, *Symmetric forms for a class of dispersive Lagrangian models*, Wacom 99 (10th International Conference), Vulcano, Iles Eoliennes, Italie, 06/1999.
- 24 H. GOUIN, *Invited Lecture: Rankine-Hugoniot conditions for multiphase non conservative models*, International Conference "Mathematics in applications in honour of Prof S.K. Godunov" Novosibirsk, Russie, 08/1999.
- 25 S. GAVRILYUK, *A new form of governing equations of fluids arising from Hamilton's principle*, International Conference "Mathematics in applications in honour of Prof S.K. Godunov" Novosibirsk, Russie, 08/1999.

Activité du groupe II :
A. Steinchen, A. Sanfeld, K. Séfiane, D. Benielli

1. - Activités de recherche

1.1. Etude de la dynamique des processus aux interfaces liquide-liquide.

Cette étude a été menée en collaboration avec le laboratoire de Physico-Chimie Appliquée des matériaux (ICFAM) du CNR de Gênes. Elle s'inscrit dans une Topical Team Microgravité de l'ESA. L'étude des transferts aux interfaces liquide-liquide se fait sur terre et en microgravité dans le module FAST développé par l'ICFAM. La modélisation théorique a été faite conjointement par le laboratoire de Thermo dynamique de Marseille et par l'ICFAM [5]

2.2. Rôle de la capillarité et des charges de surface dans les systèmes dispersés.

Les sciences de l'environnement sont très souvent confrontées au problème de la réactivité et la stabilité de très fines dispersions (brouillards, aérosols, émulsions, gels, sols). Ces systèmes finement dispersés sont aussi présents au voisinage des points critiques. Les études théoriques faites au sein de l'équipe modélisation en thermodynamique mettent en relief les effets capillaires et les effets électriques sur le comportement des fines dispersions, [18] et [19]

2.3. Etudes sur l'interaction champ-matière lors de l'évaporation de liquides polaires soumis au champ microonde.

Ce travail est fait en collaboration avec le Laboratoire de Réactivité des Solides de l'Université de Bourgogne (Pr. M. Lallemant et D. Stuerge). Il a pour but de mettre en évidence les instabilités de surface (Marangoni et Hickman) lors de l'évaporation de liquides polaires en présence de champ microonde ainsi que l'influence de la gravité sur ces instabilités [1], [2] et [7]

2.4. Rôle de l'effet Marangoni et du recul de la vapeur sur les phénomènes d'ébullition.

Etude théorique en vue d'interpréter les observations expérimentales de L. Tadrist et al. (Lab. Transfert thermiques IUSTI U. Provence) et J. Straub et al. (U. München) publi. [4], [8], [9], [10], [16] et [17]. Un même mécanisme de la crise d'ébullition a été proposé en présence et en l'absence de pesanteur (cf. : thèse K. Séfiane, Marseille) [18]

2.5. Modélisation de la séparation par membranes.

Etude en collaboration avec l'équipe des Prs. F. Charbit et G. Charbit Laboratoire d'Etude des procédés membranaires [12], [13], [14] et [15].

2.6 Equations constitutives pour les interfaces

Approche de la thermodynamique des interfaces par intégration à travers la surface des équations de la mécanique des milieux continus publi [3]

2. - Contrat de Recherche

Le responsable du groupe a été de 94 à 97 responsable scientifique et coordinateur du **Réseau Européen** "DYNAMICS OF MULTIPHASE FLOWS ACROSS INTER FACES", projet regroupant 12 laboratoires Européens, contrat de 250000 ECU pour 30 mois (à partir du 1er octobre 94) dans le cadre d'un réseau **Capital Humain Mobilité**.

3. - Publications des 4 dernières années

- [1] STEINCHEN A., LALLEMANT M. and STUERGA D. (1995), “*Hydrodynamical Instabilities in Evaporating Liquids*” in “Fluid Physics”, Eds. M.G. Velarde and C.I. Christov, World Scientific, London 250-264
- [2] STUERGA D., LALLEMANT M., STEINCHEN A. and BERTRAND G., (1995), “*Microwave heating and selection of hydrodynamic instabilities*” in “Fluid Physics”, Eds. M.G. Velarde and C.I. Christov, World Scientific, London 259-265
- [3] SANFELD A. and STEINCHEN A., (1996), “*Surface excess momentum balances by integration across the surface of the volume balances*” in “Dynamics of Multiphase Flows across Interfaces”, Ed. STEINCHEN A., Lecture Notes in Physics, **467**, 28-37
- [4] SEFIANE K. and STEINCHEN A., (1996), “*Modelling Of Transient Nucleate Pool Boiling in Microgravity*” in ‘Dynamics of Multiphase Flows across Interfaces’, Ed. A. STEINCHEN, Lecture Notes in Physics **467**, 154-169
- [5] LIGGIERI L., RAVERA F., PASSERONE A., SANFELD A. and STEINCFIEN A., (1996), “*The capillary pressure method: a new tool for interfacial tension measurements*” in “Dynamics of Multiphase Flows across Interfaces”, Ed. STEINCHEN, Lecture Notes in Physics **467**, 179-189,
- [6] CUADROS F., OKRASIINSKI W. and SANFELD A., “*Dependence of the vapour-liquid equilibrium on the attractive intermolecular force*” J. Chem. Phys., **104**, 5594-5599, (1996)
- [7] STUERGA D., STEINCHEN A. and LALLEMANT M., (1996), “*Microwave heating as a tool to couple Marangoni and Hickman instabilities*”, in “Dynamics of Multiphase Flows across Interfaces”, Ed. STEINCHEN A., Lecture Notes in Physics **467**, 231-243
- [8] SEFIANE K. and STEINCHEN A., (1996), “*Pool Boiling in Microgravity-A model of transient states of maximum heat flux*”, Microgravity Science and Technology, **VIII/3**, 180-187.

Activité du groupe III : P. Seppecher

Ces recherches sont liées à l'étude des propriétés des interfaces. On sait que les énergies interfaciales sont le moteur principal de mouvements et d'instabilités dans des conditions de faible gravité. Les recherches décrites ici se situent en amont de cette problématique et approfondissent la modélisation des interfaces considérées comme des couches de faible épaisseur. Ces couches ne peuvent être décrites par la mécanique des fluides classiques. Elles sont fort bien décrites par le modèle de Cahn-Hilliard ou par des modèles voisins dont une propriété commune est de posséder une longueur intrinsèque.

Des forces d'arêtes

La modélisation des fluides de Cahn-Hilliard nécessitent l'utilisation du principe des puissances virtuelles dans le cadre de la théorie du second gradient. Cela étant rédhibitoire pour nombre de scientifiques, il nous est apparu nécessaire de replacer cette modélisation dans le cadre de la théorie de Cauchy. La construction de Cauchy du tenseur des contraintes suppose l'absence de forces d'arêtes. Nous avons montré qu'en présence de telles forces, une construction analogue à celle de Cauchy permet de retrouver le cadre de la théorie du second gradient [1]

Des relations entre modèles classiques et modèles du second gradient

Une étude d'homogénéisation en élasticité linéaire [2] montre que les théories du premier et du second gradient sont intimement liées. Cela montre en particulier que l'on ne saurait exclure les modèles de second gradient comme « non naturels ». Cela donne de plus un exemple simple de tels milieux et donne une interprétation microscopique de certaines de leurs caractéristiques.

Des micro-gouttes

La tension superficielle diminue lorsque le rayon des gouttes tend vers zéro. Cela est vérifié expérimentalement mais est mal compris du point de vue de la modélisation ; une approche mathématique (étude asymptotique d'un problème à deux petits paramètres : masse de la goutte et épaisseur de l'interface) éclaire ce problème et a fait l'objet d'une publication [3] et d'une thèse par C. Dubs.

- [1] F. DELL'ISOLA and P. SEPPECHER, «Edge contact forces and quasi balanced power », *Meccanica*, 32, p. 33-52 (1997).
- [2] C. PIDERI et P. SEPPECHER, «A second gradient material resulting from the homogenization of a heterogeneous linear elastic medium », *Continuum Mech. And Thermodyn.*, 9, p. 241-247, 1997.
- [3] G. BOUCHITTÉ, C. DUBS et P. SEPPECHER, « Transitions de phases avec un potentiel dégénéré à l'infini, application à l'équilibre de petites gouttes », *C. R. Acad. Sci.*, t. 323, série L p. 1103-1108, 1996.

INSTABILITES HYDRODYNAMIQUES ET ECOULEMENTS BAS REYNOLDS : CONVECTION THERMIQUE, THERMOVIBRATIONNELLE ET THERMOSOLUTALE

Abdelkhader Mojtabi

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
UMRS502 CNRS-INP/UPS
118 Route de Narbonne
31062 Toulouse Cedex 4

L'étude des transferts convectifs en milieu fluide, dans le cadre de l'approximation de Boussinesq, ou dans les fluides supercritiques fait actuellement l'objet de nombreux travaux au niveau international. Il s'agit d'étudier les mouvements convectifs induits par un gradient de température ou un gradient de concentration au sein d'un fluide multiconstituant. Les mouvements convectifs dus aux variations de la masse volumique du fluide multiconstituant en fonction de la température et de la concentration peuvent être très différents du cas classique de la convection naturelle.

La double-diffusion convection peut être d'origine gravitationnelle ou en l'absence de gravité due à des effets de tension superficielle (effet Marangoni thermique et solutal) ou des phénomènes vibratoires (g—jitters).

De nombreuses études sont développées dans les principaux pays industrialisés avec des objectifs variés (croissance cristalline en microgravité, en microgravité, procédé de séparation de phase ...)

Notre équipe de recherche, à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, a développé d'une part des codes de calcul en volumes finis, ou par méthode spectrale dans le but de simuler des écoulements convectifs et d'autre part des méthodes d'analyse de la stabilité linéaire, faiblement non linéaire (Méthode de l'énergie, Equation d'amplitudes) et la méthode de continuation en vue d'établir des diagrammes de bifurcations permettant la compréhension de l'ensemble de ces régimes de double diffusion convective.

Une collaboration étroite et suivie s'est développée autour de ce thème entre notre groupe, celui du professeur Platten, à Mons, et celui du professeur J.P. Caltagirone, à Bordeaux. Récemment une expérience préparatoire au sol a été élaborée en collaboration avec l'équipe "Instabilités hydrodynamiques et diphasiques" des Professeurs M. Souhar et J.P. Brancher du LEMTA Nancy en vue d'étudier l'influence des vibrations, de faibles amplitudes, sur la naissance de la double diffusion convective.

L'étude des transferts convectifs dans les fluides supercritiques a également été développée en microgravité ou en présence du champ de la pesanteur dans le cadre d'une collaboration avec B. Zappoli.

OBJECTIFS

Nous nous proposons, à travers ces différentes études sur la double diffusion convection avec ou sans prise en compte de l'effet Soret et en présence ou non de vibration ou de convection dans les fluides supercritiques en microgravité ou dans le champ de pesanteur de :

- Contribuer à une meilleure compréhension et maîtrise des processus de diffusion massique ou de diffusion thermogravitationnelle qui sont nécessaires pour la mise en oeuvre de toute expérimentation relative au problème de croissance cristalline ou de séparation de composés chimiques difficilement extractibles par d'autres procédés.
- Analyser l'influence des phénomènes de vibration, tant en direction qu'en fréquence sur le développement de la double diffusion convection. En effet il est possible d'avancer ou de retarder la naissance de la convection thermosolutale ou d'amplifier les échanges thermiques et massiques jouant sur la fréquence et sur la direction de la vibration
- Utiliser des vibrations en tant que moyen de contrôle des écoulements convectifs.
- Analyser des phénomènes de résonance liés au forçage par des vibrations ou par des conditions aux limites instationnaires. Ces phénomènes peuvent-être mis facilement en évidence en microgravité, alors que sur terre la convection thermique masque complètement ce phénomène.
- Prendre en compte la conductivité thermique finie des parois dans la simulation numérique, des écoulements convectifs dans les fluides supercritiques. Toutes les simulations numériques précédentes ont considéré les parois de confinement des fluides comme soit adiabatiques, soit parfaitement conductrices ; seules certaines modélisations d'expériences prennent indirectement en compte la conduction dans les parois sous la forme d'un retard à la lois de chauffage par rapport à la condition réellement vue par le fluide.

THESES SOUTENUES

- 1 - *Développement des travaux numériques, théoriques et expérimentaux relatifs aux multiples aspects de la double diffusion massique et thermique en phase liquide*, (thèse de Kassem GHORAYEB soutenue le 9 Juillet 1997, UPS Toulouse III).
- 2 - *Rôle de la gravité sur le transfert thermique par effet Piston dans un fluide supercritique, prise en compte des transferts thermiques dans la paroi et Influence des vibrations sur la convection dans les fluides supercritiques*. (thèse de Arnaud JOUNET, soutenue en Janvier 1999).
- 3 - *Influence des Vibrations sur le développement des écoulements de double diffusion convective en Microgravité et en présence de la gravité* (Etude numérique, Analytique et expérimentale, thèse en Cours de Gérald BARDAN, 3^{ème} année de thèse.)

4 - *Influence des Vibrations sur le développement des écoulements de double diffusion convective. Extension du problème de Rayleigh Bénard à une cellule d'extension finie en présence de vibrations* (Etude numérique, Analytique, thèse en cours d'Issa CISSE, 1^{ère} année de thèse.)

PUBLICATIONS

KHALLOUF H. GERSHUNI G.Z. and S MOJTABI A., "Some properties of convective oscillations in porous medium", Numerical Heat Transfer, Part A, **30**, 605-618, (1996).

NICOLAS X., MOJTABI A., PLATTEN J.K., *Two-dimensional numerical analysis of Poiseuille-Bénard Flow in rectangular channel heated from Below*, Physics of Fluids, **9** (2), 337-348, February (1997)

GHORAYEB K. and MOJTABI A., *Etude de la convection thermosolutale dans une cavité rectangulaire verticale fluide*, Compte Rendus Acad. Sciences, t. **324**, Série 11 b, 19-27, (1997).

GHORAYEB K. and MOJTABI A., *Double diffusive convection in a vertical rectangular cavity*, Physics of Fluids, **9**, **8**, August (1997).

NICOLAS X., TRAORE P., MOJTABI A. and CALTAGIRONE J.P., *Augmented Lagrangian method and open boundary conditions in 2D simulation of Poiseuille-Bénard channel flow*. Int. J. for Numerical Methods in Fluids, **25**, p. 265-283 (1997).

JOUNET A., AMIROUDINE S., MOJTABI A. and ZAPPOLI B., *Cancellation of the heating Piston effect by convective enhancement of cooling piston effect*, Int. Journal of Thermophysics, **19**, n°4, (1998).

BARDAN G. et MOJTABI A., *Stabilité des écoulements de convection thermosolutale en cavité carrée*. C.R. Acad. Sci. Paris, t. **326**, Série 11h, p 851-857, (1998).

DYKO K., VAFI K. and MOJTABI A., *Experimental Investigation of stability of Natural Convective Flows within a Horizontal Annulus*, J. Fluids Mech., **381**. pp 27-61 February (1999).

BERGEON A., GHORAYEB K. and MOJTABI A., *Double diffusive instability in an inclined cavity*. Physics of Fluids, **11**, Number 3, March (1999).

ZAPPOLI B., JOUNET A., AMIROUDINE S. and MOJTABI A., *Thermoacoustic heating and cooling in hypercompressible fluids in the presence of thermal plume*, J. Fluids Mech., à paraître (1999).

KARIMI-FARD M., CHARRIER- MOJTABI M.C., and MOJTABI A., *Onset of stationary and Oscillatory convection in a tilted Porous cavity saturated with a binary fluid: Linear Stability Analysis*, Physics of Fluids, (1999).

BARDAN G., MOJTABI A., and SOUHAR M., *Numerical investigation of vibrational high frequency field upon double diffusive convection in micro gravity*. Article soumis à Quaterly Microgravity Journal, Février 1999.

PUBLICATIONS DANS DES CONGRES AVEC ACTES SUR CETTE TITREMATIQUE

GHORAYEB K. and MOJTABI A., *Stability of double diffusive convection in a rectangular cavity with constant heat and mass fluxes in the vertical sidewalls*. EUROTHIERM seminar N. 53, sept. 1997, Mons, Belgique.

BARDAN G., KHALLOUF H. et MOJTABI A., *Effet des vibrations sur la convection thermosolutale*. 13 Congrès Français de Mécanique, Poitiers, 1-5 sept 1997.

BARDAN G. et MOJTABI A., *Détermination analytique des nombres de Nusselt et de Sherwood lors de la naissance de la double d convective*. Congrès S.F.T, Toulouse, Mai 1997.

JOUNET A., ZAPPOLI B., AMIROUDINE S. et MOJTABI A., *Rôle de la gravité sur le transfert thermique par effet Piston dans un fluide supercritique*. 13^{ème} Congrès Français de Mécanique, Poitiers, 1 sept. 1997.

GHORAYEB K. and MOJTABI A., *Stability of double-diffusive convection*, Eurotherm Mons Belgique 1997.

BARDAN G. et MOJTABI A., *Détermination analytique des nombres de Nusselt et de Sherwood lors de la naissance de la double diffusion convection*, Congrès Français de Thermique 20-22 mai 1997.

BARDAN G., KHALLOUF H. et MOJTABI A., *Effet des vibrations sur la convection thermosolutale*. Actes du 13 Congrès Français de Mécanique 1-5 Septembre 1997.

ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES EN MICROPESANTEUR : RUPTURE, COALESCENCE ET DISTRIBUTION DE TAUX DE VIDE

Jean Fabre, Catherine Colin

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
UMR CNRSJINP-UPS 5502
Allée du professeur Camille Soula
31400 Toulouse

Au cours des dix dernières années, de nombreuses études ont été menées sur les écoulements gaz- liquide en tube en conditions de micropesanteur. Elles ont été encouragées par la forte demande de l'industrie spatiale, confrontée à la conception des systèmes de production et de transport de l'énergie pour les engins orbitaux. La recherche sur les écoulements diphasiques en micropesanteur s'est naturellement orientée dans un premier temps vers l'analyse des configurations d'écoulements, des gradients de pression, des transferts de chaleur et de la fraction de gaz dans les boucles thermo hydrauliques. C'est dans ce cadre qu'en 1987, des recherches en collaboration avec A.E. Dukler de l'Université de Houston, ont été entreprises à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. Des résultats originaux ont été obtenus¹⁻² mais leur analyse physique pose plus de problèmes qu'elle n'en résout [3]. Par exemple la transition entre écoulements à bulles et écoulements à poches est maintenant prédite de manière acceptable en fonction des propriétés physiques et du diamètre, mais la prédominance du mécanisme de coalescence dans certains cas n'est pas bien comprise. En ce qui concerne le frottement pariétal, les modèles actuels sont loin de donner des résultats acceptables, notamment en écoulement intermittent.

Les études menées dans le cadre du GDR ont porté plus particulièrement sur la dynamique des écoulements turbulents à bulles afin d'analyser le rôle respectif de la gravité, des forces interfaciales et de la turbulence sur le mouvement, la déformation, la rupture et la coalescence des bulles. Ces études réalisées grâce au soutien du CNES et du CNRS font l'objet d'une collaboration avec John McQuillen, ingénieur de la NASA au Glenn Research Center (Cleveland OHIO). Une réponse commune au NASA Research Announcement - 94-OLMSA-05 "Microgravity Fluid Physics : Research and Flight Experiments Opportunities" a été faite en 1994 par J. McQuillen, J. Fabre et C. Colin et acceptée par la NASA.

Les recherches menées par l'IMFT peuvent se diviser en deux parties portant sur :

- les écoulements à bulles en tube : coalescence et distribution des phases,
- la déformation et la rupture des bulles dans un champ turbulent

¹ DUKLER A.E., FABRE J.A., MCQUILLEN J.B., VERNON R. (1988), *Gas-liquid flow at microgravity conditions: Flow pattern anti their transitions*, Int. J. Multiphase Flow, **14**,389-400.

² COLIN C., FABRE J., DUKLER A.E. (1991), *Gas Liquid Flow at Microgravity Conditions I. Dispersed Bubble and Slug Flow*, International Journal of Multiphase Flow, **17**, 533-544,

1. - Les écoulements à bulles en tube

L'étude des écoulements turbulents à bulles en conditions de micropesanteur est particulièrement intéressante car l'absence de glissement moyen entre phases permet de mettre en évidence l'influence de la turbulence de la phase liquide sur la distribution des bulles et leur coalescence. Ceci est vrai en particulier pour les écoulements en conduite qui ont une grande importance dans les applications spatiales, notamment dans la réalisation des échangeurs de chaleur pour les vols de longue durée.

a) Coalescence des bulles et transition entre écoulements à bulles et à poches.

De nombreux résultats concernant les régimes d'écoulement et la prédiction de la transition entre ces régimes ont été publiés. Ces résultats ont été obtenus en vols paraboliques ou en tour à chute libre, avec des écoulements d'eau et d'air ou en écoulement bouillant de R114 ou R12. Les expériences de l'IMFT ont été réalisées avec la boucle EDIA en écoulement eau-air en tube de 6, 10, 19 et 40 mm de diamètre au cours de campagnes de vols paraboliques à bord de la caravelle "Zero G". La transition entre les écoulements à bulles et à poches est contrôlée par le mécanisme de coalescence qui dans certains cas est inhibé (essais avec de l'eau et de l'air en tube de diamètre inférieur à 20mm) et dans d'autres cas favorisé (essais avec de l'eau et de l'air en tube de 40mm de diamètre ou avec du Fréon 12). Un critère empirique [3] basé sur les propriétés physiques des fluides et le diamètre du tube a été établi et permet d'identifier ces deux régimes de coalescence. Si le critère précédent permet de prédire correctement la transition entre écoulements à bulles et à poches il reste néanmoins empirique et ne fournit aucune indication sur le taux de coalescence des bulles et ne permet pas de tenir compte de la taille initiale des bulles et de la longueur du tube.

Parallèlement à cette étude paramétrique, une prédiction de la coalescence des bulles dans un écoulement en tube en microgravité a également été tentée [7] à partir d'un modèle mécanistique faisant intervenir la fréquence de collision entre les bulles et la probabilité de coalescence entre 2 bulles entrant en collision. En considérant une distribution homogène des diamètres de bulles, une équation de transport de la densité du nombre de bulles est résolue. Cette équation de transport comprend un terme d'advection par la vitesse moyenne du gaz et un terme source dû au changement de diamètre moyen par le mécanisme de coalescence. Dans le cas général des écoulements influencés par la gravité, les causes de collisions entre les bulles dues à des différences de vitesse sont multiples et on imagine bien qu'il est très difficile d'estimer un temps d'interaction entre les bulles ou une échelle de vitesse caractéristique de leur collision. En micropesanteur, par contre, en absence de glissement des bulles, on peut considérer que la turbulence de la phase liquide est seule responsable des collisions et de la coalescence des bulles. Dans le cas où le diamètre de bulles est nettement plus petit que le diamètre du tube et que les bulles sont peu déformées, les résultats du modèle sont en bon accord avec les histogrammes de tailles mesurés en tube de 40 mm (*Colin et al.*²). Ce modèle sera prochainement étendu à des bulles de diamètre proche du diamètre du tube pour lesquelles la coalescence est contrôlée par la vitesse moyenne du liquide. Il devrait ainsi permettre de prédire la transition vers les écoulements à poches et bouchons.

b) Distribution de taux de vide

Dans le cadre de la thèse d'Arjan Kamp [1], une étude originale de la structure locale de l'écoulement turbulent à bulles en tube a été entreprise, afin de comprendre le rôle respectif des forces en présence (gravité, contraintes aux interfaces) dans le mouvement relatif des deux phases.

En écoulement turbulent à bulles, ces forces contrôlent la distribution radiale des phases. En se plaçant dans des conditions différentes de gravité, il a donc été possible de quantifier le rôle de la gravité dans cette distribution : l'étude a mis en oeuvre des expériences comparatives menées d'une part en écoulement ascendant ou descendant en laboratoire et d'autre part en conditions de micropesanteur lors de vols paraboliques. Il faut noter que lors des expériences en vol, les films chauds et les sondes optiques ont été utilisées pour la première fois avec succès, ouvrant ainsi des perspectives nouvelles dans l'étude des écoulements diphasiques turbulents. Des résultats particulièrement originaux (Kamp et al ³) ont été obtenus, montrant des différences spectaculaires sur la distribution radiale des bulles et la turbulence entre écoulements au sol et en micropesanteur. Ces différences proviennent du fait qu'au sol, la répartition des bulles est contrôlée par la force de portance, alors qu'en micropesanteur cette force disparaît à cause de l'absence de glissement moyen entre les phases, les bulles étant alors distribuées par la turbulence de la phase liquide. Cette première analyse expérimentale a été conduite avec une approche eulérienne : les caractéristiques statistiques des champs de vitesse et de présence de phase ont été mesurées au point. Une telle approche a un avantage déterminant : elle permet une comparaison directe avec les résultats des modèles de turbulence. Elle a permis de montrer que les modèles eulériens moyens (basés sur une représentation statistique en un point de la turbulence) se révèlent incapables de prédire des distributions radiales observées en micropesanteur (figure 1).

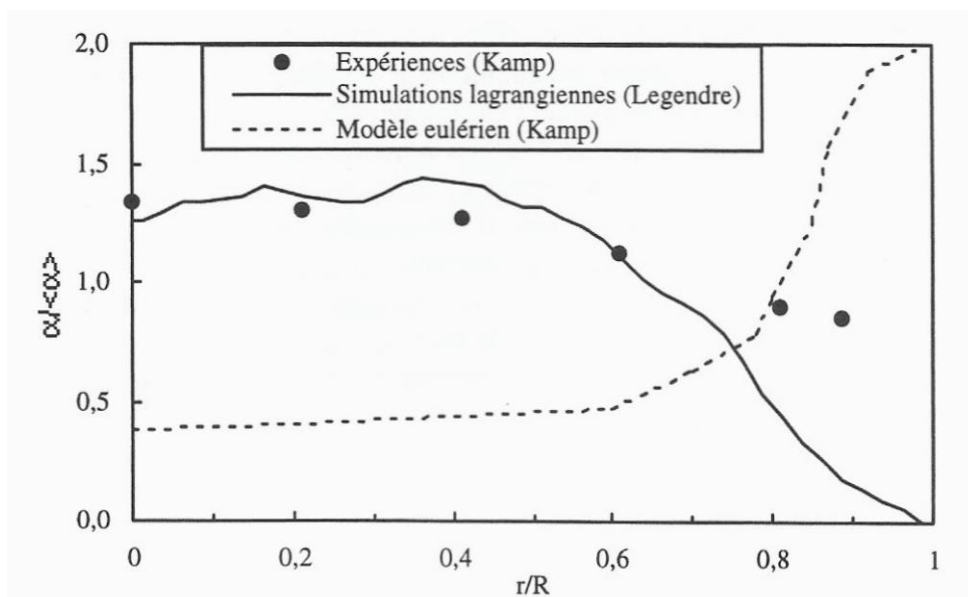


Figure 1 : Distributions radiales du taux de vide adimensionnel à 2 m de l'injecteur: Comparaison entre les expériences, les simulations numériques réalisées avec un modèle eulérien classique et les simulations numériques de suivi lagrangien de bulles isolées.

Dans le but d'améliorer la compréhension des interactions bulles/turbulence, des expériences physiques portant sur un petit nombre de bulles et des simulations numériques de suivi lagrangien de bulles en écoulement turbulent de paroi ont également été entreprises dans le

³ KAMP A., COLIN C., FABRE J. (1995), *The local structure of a turbulent bubbly pipe flow under different gravity conditions*, 2nd International Conference on Multiphase Flow, Kyoto, Japan.

cadre du programme post-doctoral de D. Legendre [4] financé par le CNES. Dans les expériences, la trajectoire de bulles isolées de taille millimétrique injectées une à une au centre du tube a été obtenue par visualisation tridimensionnelle à grande vitesse (réalisée à l'aide de deux caméras placées dans deux plans perpendiculaires), numérisation et traitement d'images. Les expériences ont été réalisées avec l'installation expérimentale EDIA en écoulement vertical ascendant au laboratoire [2] et en micropesanteur. Les simulations numériques correspondantes ont été réalisées en associant la simulation des grandes échelles de la turbulence de paroi et le suivi lagrangien des bulles. Cette approche a été rendue possible par l'utilisation conjointe des outils numériques développés pour la simulation de la turbulence monophasique (supposée ici non perturbée par la présence des bulles) et des résultats théoriques ou numériques obtenus dans la description des forces hydrodynamiques sur des bulles en mouvement dans des écoulements complexes. Cette approche nous a permis de déterminer les trajectoires instantanées de bulles isolées dans un écoulement turbulent en conduite dans des situations tout à fait comparables à celles des expériences. L'analyse statistique de ces résultats a confirmé les tendances observées expérimentalement dans le cas de l'injection d'un grand nombre de bulles sous l'effet de la force de portance, les bulles migrent préférentiellement vers la paroi en écoulement vertical ascendant (figure 2b) et vers le centre de la conduite en écoulement vertical descendant (figure 2c). En micropesanteur (figure 2a), elles occupent de manière plus homogène la conduite sous l'action des grosses structures de la turbulence. On peut donc conclure qu'en situation de micropesanteur c'est l'accélération locale et instantanée associée aux bouffées turbulentes de grande échelle qui décide du mouvement (et donc de la répartition moyenne) des bulles, ce qui explique l'échec des modèles moyennés dans lesquels l'accélération de l'écoulement pris en compte est nulle puisque cet écoulement est pleinement développé. Pour une distance à l'aval de l'injecteur égale à $100 R$ ($R=2\text{cm}$ est le rayon du tube) les distributions radiales adimensionnelles de taux de vide obtenues par simulations numériques sont comparées sur la figure 1 aux expériences menées par Kamp [1] avec injection simultanée de plusieurs bulles dans un écoulement d'eau correspondant au même nombre de Reynolds (40 000). Dans cet essai, la turbulence de la phase liquide est très proche de celle observée en écoulement monophasique ce qui autorise la comparaison avec les simulations numériques. Les tendances expérimentales sont assez bien reproduites avec cependant une sous-estimation du taux de vide près de la paroi. Les résultats des simulations seront prochainement comparés aux résultats obtenus en vols paraboliques où les bulles ont été injectées individuellement.

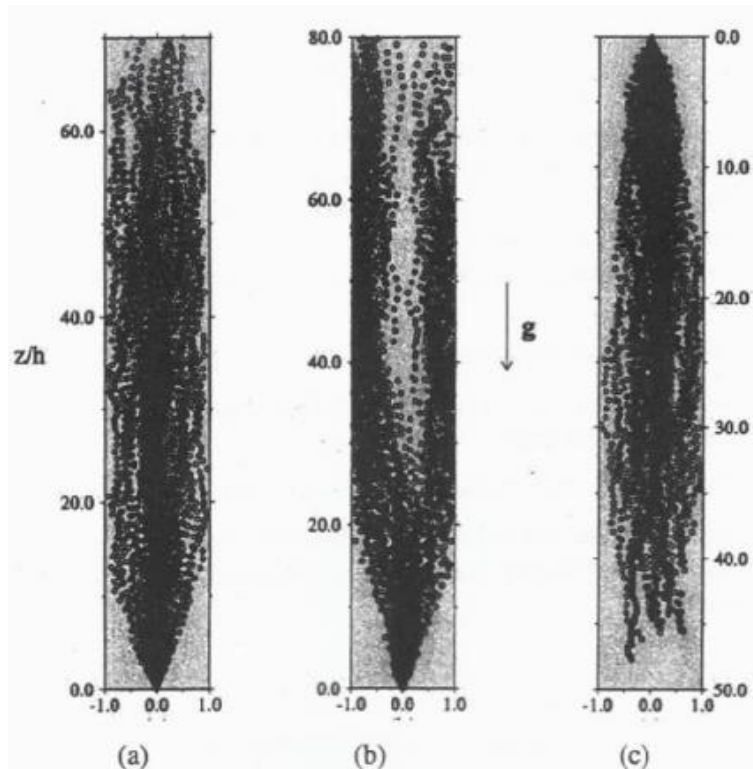


Figure 2 : trajectoires de bulles dans un écoulement en conduite : (a) conditions de micropesanteur ; (b) pesanteur terrestre, écoulement vertical ascendant ; (c) pesanteur terrestre, écoulement vertical descendant.

2. - Déformation et rupture d'une bulle sous l'effet de la turbulence

L'objectif de cette étude était de déterminer le rôle spécifique joué par la turbulence dans la déformation et la rupture des bulles. Sa première étape, conduite dans le cadre de la thèse de F. Risso⁴ avait été expérimentale : obtention d'une veine turbulente calibrée isotrope et 2D-homogène [5] ; étude de la déformation de bulles isolées placées dans le champ turbulent en condition de micropesanteur (expérience ORBIA). Elle avait démontré l'importance de la dynamique propre de l'interface.

La suite de ce travail a consisté à proposer une analyse théorique fondée sur la résolution numérique de la réponse d'un système modèle à l'excitation turbulente. Dans cette approche, la dynamique de l'interface a été modélisée par un oscillateur harmonique dont la fréquence propre et l'amortissement sont issus de la théorie linéaire. Le forçage turbulent, exprimé par un nombre de Weber instantané, n'a pas été modélisé mais obtenu à partir des enregistrements expérimentaux de la vitesse fluctuante. Les résultats ont montré que les simulations reproduisent correctement tous les types de comportements observés expérimentalement.

Cela a permis d'identifier les deux mécanismes responsables de l'accroissement des déformations avec le temps de résidence de la bulle dans le champ turbulent : l'augmentation de la probabilité de rencontrer des bouffées turbulentes intenses ;

⁴ RISSO F. (1994), *Déformation et rupture d'une bulle dans une turbulence diffusive*, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

l'accumulation d'énergie au sein du processus d'oscillation des bulles. Le second mécanisme conduit des bulles de tailles différentes à avoir un comportement différent pour un même nombre de Weber. Cela contredit la théorie classique de Hinze-Kolmogorov qui postule que la rupture a lieu lorsque le nombre de Weber dépasse une valeur critique We_c . La description du problème nécessite donc l'introduction d'un nouveau paramètre statistique le coefficient d'efficacité $C_d(t)$, rapport entre les moyennes des maxima de déformation et d'intensité turbulente observés sur un temps t . Ce paramètre a été calculé à partir des simulations pour chaque gamme de diamètres. Associé au nombre de Weber, il permet de prédire l'apparition des trois situations possibles :

- $We C_d(t \rightarrow \bullet) < We_c$ rupture impossible ;
- $We C_d(t \rightarrow 0) < We_c$ • $We C_d(t \rightarrow \bullet)$, rupture due à l'accumulation de l'énergie fournie par une succession de structures turbulentes ;
- $We C_d(t \rightarrow \infty) > We_c$, rupture par interaction avec une unique structure turbulente.

Ces conclusions, rapportées dans un article de synthèse [6] ont de fortes implications pratiques. Elles peuvent en particulier permettre d'améliorer la prédiction de la taille des bulles dans les écoulements turbulents.

3. – Perspectives

A travers ces études, les expériences en micropesanteur se sont révélées être un champ d'investigation original pour les écoulements diphasiques. En effet l'absence de vitesse de glissement entre le gaz et le liquide constatée expérimentalement a des conséquences importantes : les bulles sont sphériques, elles ont des trajectoires quasi rectilignes, la pseudo-turbulence induite par les bulles disparaît, certaines forces agissant sur les bulles deviennent très faibles (portance, traînée). Les interactions entre les bulles et la phase continue se trouvent donc considérablement simplifiées en micropesanteur, contrairement au sol, où la gravité et la turbulence agissent de manière couplée et complexe sur la dynamique des bulles.

Le programme scientifique futur sur les écoulements en tube a fait l'objet d'une réponse au NASA Research Announcement -98-HEDS-03 "Microgravity Fluid Physics : Research and Flight Opportunities", en collaboration avec John Mc Quillen du Glenn Research Center de la NASA, en février 1999. Le programme de l'IMFT portera sur deux points particuliers :

- *les écoulements en tube à bulles et à poches* : la transitions entre régimes d'écoulement à bulles et à poches, le rôle de la coalescence, distribution spatio-temporelle des phases, les transferts pariétaux,
- *le comportement de bulles ou de poches isolées en microgravité* : mouvement et déformation de bulles ou poches dans des convergents, divergents ou des écoulements turbulents cisailés, afin d'affiner la modélisation des interactions entre les bulles et l'écoulement de liquide et avec les parois.

4. - Liste des publications récentes (1996-1999)

Thèses et DEA

- [1] KAMP A. (1996), Ecoulements turbulents à bulles dans une conduite en micropesanteur, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

- [2] LARUE DE TOURNEMINE A. (1997), *Dispersion de bulles dans un écoulement turbulent en tube*, DEA de Mécanique des Fluides de l'ENSICA.

Journaux

- [3] COLIN C., FABRE J. and MCQUILLEN J. (1996), *Bubble And Slug Flow At Microgravity Conditions: State Of Knowledge And Open Questions*, Chemical Engineering Communications, **141-142**, 155-173.
- [4] LEGENDRE D., COLIN C., FABRE J., MAGNATJDET J. (1999), *Influence of gravity upon the bubble distribution in a turbulent pipe flow: comparison between numerical simulations and experimental data*, à paraître dans le Journal de Chimie Physique.
- [5] RISSO F. & FABRE J. (1997), *Diffusive turbulence in a confined jet experiment*. J. Fluid Mech. **337**, 233-261.
- [6] RISSO F. & FABRE J. (1998), *Oscillations and Breakup of a Bubble Immersed in a Turbulent Field*, Journal of Fluid Mechanics, **372**, pp 323-355.

Congrès internationaux

- [7] COLIN C., KAMP A., CHESTERS A.K. (1998), *Measurement and prediction of bubble coalescence in turbulent pipe flows*, 3rd International Conference on Multiphase Flow, Lyon, France.
- [8] MCQUILLEN J., COLIN C., FABRE J. (1998), *Ground-based (Gas-Liquid Flow Research in Microgravity Conditions: State of Knowledge*, Space Forum, **3**, pp 165-203.
- [9] F. RISSO, (1997), *Motion of a bubble in a gradient of turbulence*, Euromech, 3rd European Fluid Mechanics Conference, Gottingen, Allemagne.
- [10] KAMP A., COLIN C. & FABRE J., (1996), *Prediction of bubble size in microgravity gas liquid pipe flow*, 2nd symposium on Fluids in Space, Naples, Italie.
- [11] RISSO F. & FABRE J., (1996), *Large amplitude oscillations and inertial break-up of a bubble in isotropic turbulence*, 19th ICTAM, Kyoto, Japon.

PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT DANS LES MÉLANGES

Michèle Vignes-Adler

Laboratoire des Phénomènes de Transport dans les Mélanges
CNRS
4ter Route des Gardes
92190 Meudon

Nos travaux ont porté sur l'étude des phénomènes capillaires en microgravité en général et plus précisément sur les instabilités associées à un effet Marangoni de soluté et sur la physique de la mousse.

Faute de force de travail le premier thème est actuellement en sommeil bien que nous ayons obtenu des résultats fort intéressants publiés [2] et présentés dans diverses conférences. Avec le soutien du CNES, nous avons mis beaucoup d'énergie dans l'étude de la physique de la mousse.

Notre objectif principal est **l'étude de la morphologie et de la dynamique des mousses en relation avec les propriétés de surface des solutions moussantes.**

Les mousses sont des dispersions aléatoires de bulles séparées par des films liquides minces. La formation d'une surface coûte de l'énergie : les films de liquide qui composent une mousse vont donc s'organiser pour minimiser leur surface à volume de gaz donné. La mousse se trouve alors dans un état métastable, ses bulles sont généralement polyédriques et sa durée de vie dépend du bilan des forces en présence. Les forces déstabilisatrices sont reliées principalement au drainage gravitaire des films liquides par gravité qui conduit soit à un assèchement de la mousse soit à la coalescence des bulles, et au disproportionnement au cours duquel les plus petites bulles se vident dans les plus grosses du fait de la pression capillaire. Les forces stabilisatrices sont essentiellement les forces à longue portée (électrostatiques ou stériques), l'effet Gibbs-Marangoni qui restaure l'épaisseur initiale des films lorsqu'ils ont subi des amincissements locaux et qui dépend des propriétés rhéologiques de dilatation de surface de la solution moussante. L'influence de l'effet Marangoni sur la stabilité globale d'une mousse est encore mal analysée.

La gravité agit non seulement au niveau de l'assèchement de la mousse mais encore par couplage avec le disproportionnement des bulles (effet de pression hydrostatique), l'effet Marangoni etc... Son action est dévastatrice sur les mousses instables ou proches de la transition critique mousse humide —> mousse sèche. Notre intérêt est donc centré sur l'étude des mousses dans des conditions où le drainage gravitaire, le disproportionnement et l'effet Marangoni sont découplés ce qui ne peut se rencontrer qu'en situation de microgravité.

Nous avons tout d'abord développé des études sur la morphologie des mousses bidimensionnelles en liaison avec la rhéologie de surface des solutions tensioactives [1]. Plus récemment, nous avons développé une étude de morphologie et dynamique des mousses tridimensionnelles par tomographie optique associée à une reconstruction numérique.

La gravité engendre dans la mousse des changements de topologie (transformations topologiques) et de morphologie (sphéricité des bulles) par drainage du liquide le long des arêtes des bulles (drainage gravitaire). Il est en général impossible sur terre d'étudier l'évolution d'une mousse sans qu'il y ait couplage avec le drainage gravitaire.

Une expérience de "disproportionnement pur" a pu être effectuée sur terre en minimisant le drainage gravitaire en formant une mousse tridimensionnelle à films très rigides (SDS+dodécanol) dans une cellule à pression capillaire "contrôlée". Enfin, nous avons mis au point une méthode originale d'investigation des mousses tridimensionnelles par tomographie optique que nous avons mis au point au laboratoire sur des mousses très stables à films rigides (mélanges de SDS et de dodécanol).

Le principe de la tomographie optique est d'acquérir les images des tranches successives d'une mousse transparente monodisperse ou polydisperse par un système optique de très faible profondeur de champ, puis de reconstruire numériquement la structure de l'échantillon de mousse en trois dimensions sur ordinateur. Les images obtenues sont constituées de parties nettes qui appartiennent au plan objet $z = \text{constant}$ et de parties floues qui lui sont extérieures. Pour chaque image, on détermine quels sont les sommets des bulles (polyèdres) qui lui appartiennent, ce qui définit leur coordonnée z , et les coordonnées (x, y) sont déterminées par un logiciel de traitement d'images. On crée alors un fichier où sont listés les sommets et leurs coordonnées respectives, les arêtes et les sommets qui les définissent, les faces et les arêtes qui les composent, et les bulles. Ce fichier est lisible par un logiciel de minimisation de surface [16] et les résultats sont exploités par un logiciel de reconstruction et de visualisation d'objets tridimensionnels. On obtient ainsi la structure de chaque bulle (nombre de faces, nombre d'arêtes par face, nombre de sommets), le volume et l'aire des bulles.

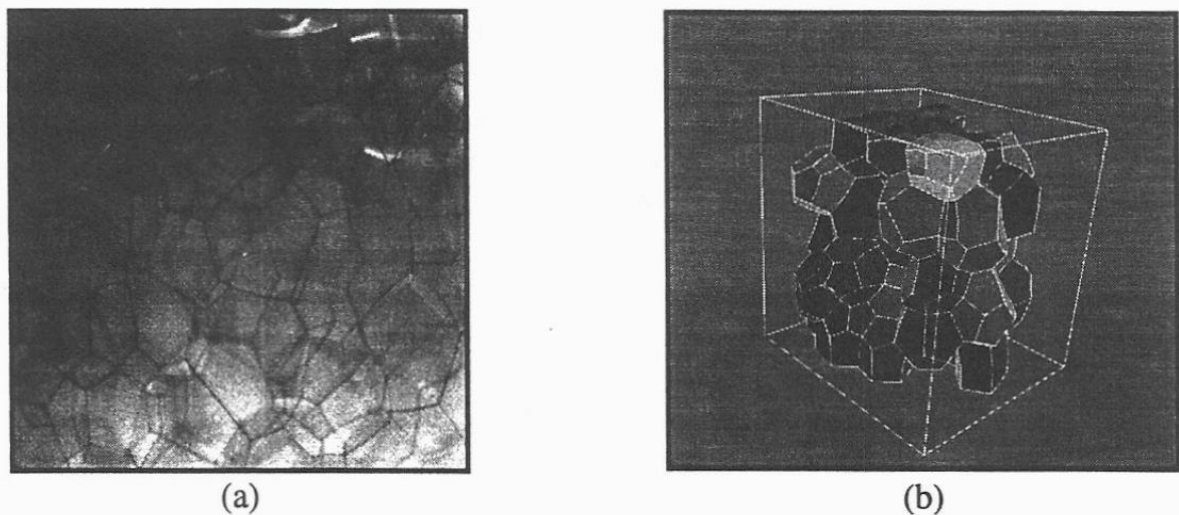


fig. 1 (a) Image d'une coupe d'une mousse tridimensionnelle ; (b) image de la mousse 3D reconstruite.

Nous avons réalisé trois types d'expérience, sur le drainage gravitaire, le disproportionnement, et la conductivité d'une mousse [3-6, 8].

Les résultats sont les suivants : (i) l'influence de la paroi sur la topologie d'une mousse ne se fait pas sentir au-delà d'une seule couche de bulle ; (ii) la dynamique de la mousse est donnée par un équivalent en 3D de la loi de Von Neumann des mousses bidimensionnelles :

$$\langle V_f \rangle^{-1/3} d\langle V_f \rangle / dt = k (f - \langle f \rangle),$$

où $\langle V_f \rangle$ est le volume moyen des bulles à f faces et k une constante obtenue par ajustement numérique, où k est égal au coefficient de diffusion mesuré dans une expérience indépendante de mesure de la perméabilité d'un film liquide à un gaz ; (iii) nous avons pu mesurer la quantité de liquide contenu dans une mousse humide et la comparer à la mesure de conductivité de la mousse ; (iv) enfin, nous avons réalisé une expérience de diffusion numérique sous Surface Evolver qui a donné des résultats comparables à l'expérience de disproportionnement.

En collaboration avec B. Kronberg de l'institut for Surface Chemistry (YKI) à Stockholm, nous avons réalisé des expériences en vol parabolique en Septembre 1997 afin d'étudier le montage expérimental nécessaire à la réalisation d'expériences sur engins lourds, et surtout de savoir s'il était possible de fabriquer une mousse en microgravité [7]

Les bulles ont pu être formées en 0g en injectant du gaz au travers d'un poreux de verre dans une cellule totalement remplie de liquide. Les mousses ainsi formées étaient parfaitement sphériques en 0g car plus aucune gravité ne les déformaient. Deux populations de taille de bulles ont pu être distinguées dues à des différences de mouillabilité des deux parties de la cellule (aluminium et verre). Le pourcentage de liquide était important en 0g ($\approx 20\%$) et une mousse polyédrique n'a pu être obtenue, ce qui n'a pas permis l'utilisation de la tomographie optique. L'analyse critique de nos résultats nous a conduits à modifier le montage qui sera testé en vol parabolique en Juin 99.

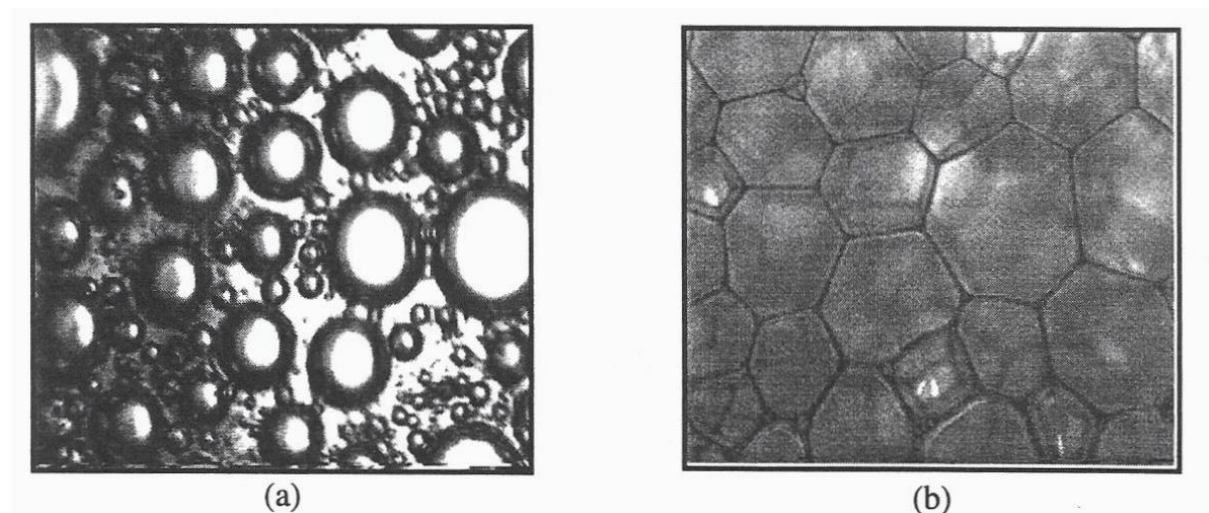


Fig. 2 Image d'une mousse formée en microgravité et asséchée sous 1.8g.

Nous avons répondu à un appel d'offre de l'ESA pour poursuivre la spatialisation de l'expérience, Il est prévu un vol sur une fusée Maxus.

Publications dans des revues ou ouvrages à comité de lecture

- [1] NEIMARK A., VIGNES-ADLER M. (1995) *Variations from the Plateau law in foams*, Physical Review E, **51**, 788-791.
- [2] SANTIAGO-ROSANNE M., VIGNES-ADLER M., VELARDE M.G. (1997) *Dissolution of a drop in a liquid surface leading to surface waves and interfacial turbulence* J. Col Interface Sci.,**191**, 65-80.
- [3] MONNIEREAU C., VIGNES-ADLER M. (1998) *Optical tomography of real three-dimensional foams*, J. Colloid Interface Sci., **202**, 1,45-53.
- [4] MONNHEREAU C., VIGNES-ADLER M. (1999) *Determination of real three-dimensional foams structure using optical tomography*, in "Foams and Emulsions" (Eds J.F. Sadoc and N. Rivier) NATO ASI Series E, Applied Sciences, Vol. 354, Kluwer, 359-278.
- [5] MONNHEREAU C., M. VIGNES-ADLER (1998) *Dynamics of real three-dimensional foams*, Phys. Rev. Lett., 80, 23, 5228-523 1.
- [6] GARCIA-GONZALES R., MONNHEREAU C., THOVERT J.-F., ADLER P.M., VIGNES-ADLER M. (1999) *Conductivity of real foams*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 151, 497-503.
- [7] MONNHEREAU C., VIGNES-ADLER M., KRONBERG B. (1999) *Influence of gravity on foams*, J. Chimie Physique (sous presse).
- [8] MONNHEREAU C., VIGNES-ADLER M., PLYFET N. (1999) *Coarsening of a 3D reconstructed foam under Surface-Evolver*, Phil. Mag. B, M. (sous presse).
- [9] MONNHEREAU C., PRUNET-FOCH B., VIGNES-ADLER M. *Morphology of slight polydisperse foams* (en préparation).

Communications dans les congrès

- [10] MONNHEREAU C., VIGNES-ADLER M. (1996) *Optical tomography of a three-dimensional foam* Foam Euroconference, Arcachon (Poster).
- [11] HAN G.B., VIGNES-ADLER M., DUSSAUD A., NEIMARK A. V. (1996) *Foam micro geometry*, Foam Euroconference, Arcachon (Poster).
- [12] VIGNES-ADLER M. AND SANTIAGO-ROSANNE M. (1996) *Solutal Marangoni effect and drop motions* UIMP, Santander (Conférence invitée).

- [13] SANTIAGO-ROSANNE M., VIGNES-ADLER M., VELARDE M.G. (1996) *Surface waves in dissipative system* Euromech Conference, Palaiseau (Poster).
- [14] MONNEREAU C., VIGNES-ADLER M. (1997) *Morphology and dynamics of 3D foams* Conference for the 10th anniversary of the Ouzo and Gas Research Institute, Moscou.
- [15] MONNEREAU C., VIGNES-ADLER M. (1998) *Morphologie et topologie des mousses tridimensionnelles réelles*, Journées thématiques du GDR, Oléron.
- [16] VIGNES-ADLER M., SANTIAGO-ROSANNE M., VELARDE M.G. (1998) *Surface waves sustained by a solutal Marangoni effect: interactions and collisions* Small Scale Dynamics of Physico-Chemical Processes at Interfaces, Dresden (Conférence invitée).
- [17] VIGNES-ADLER M., SANTIAGO-ROSANNE M., VELARDE M.G. (1998) *Surface waves sustained by a solutal Marangoni effect interactions and collisions* Workshop on Interfacial Phenomena, Satellite meeting of IUPAP- PHYSTAT 20 Conference, Madrid (Conférence invitée).
- [17b] VIGNES-ADLER M., MONNEREAU C. (1998) *Dynamics of real 3D foams*, Workshop on Interfacial Phenomena, Satellite meeting of IUPAP - PHYSTAT 20 Conference, Madrid (Conférence invitée).
- [18] MONNEREAU C., VIGNES-ADLER M. (1999) *Topology of real three-dimensional foams*, ESA Foams Workshop, Leuven, Belgique.

Thèses

- [19] HAN GB., *Influence des propriétés rhéologiques de surface sur la morphologie et la dynamique des mousses bidimensionnelles*, Thèse de l'Université de Poitiers, (Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées), Spécialité : Chimie Appliquée, 29 octobre 1996.
- [20] MONNEREAU C., *Morphologie et dynamique des mousses de savon tridimensionnelles*, Thèse de Doctorat de l'Université de Marne-la Vallée, 14 Janvier 1998.

Coopérations

B. KRONBERG (Institute for Surface Chemistry, Stockholm)
 ESA Topical Team on Foams (D. Weaire, chairman)

ETUDES SUR LA COMBUSTION EN MICROPESANTEUR

Iskender Gökalp, Christian Chauveau

Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs (UPR 4211)
1C, Av. de la Recherche Scientifique
45071 Orléans cedex 2

1. - Etudes sur la vaporisation et la combustion de gouttes

D'un point de vue fondamental, la combustion des brouillards fait partie des problèmes d'écoulements diphasiques, avec changement de phase et réactions chimiques. Leur caractère turbulent et à haute pression contribue à les rendre très complexes. La combustion des brouillards peut être considérée comme une succession de groupes de phénomènes: l'atomisation du combustible (ou de l'oxydant) liquide dans la chambre de combustion et la formation de gouttelettes à la suite de l'atomisation primaire et secondaire (cassure par cisaillement des gouttes primaires formées par l'atomisation) ; gazéification de ces gouttelettes et la formation de la phase vapeur ; mélange de la vapeur de combustible avec l'oxydant dans la chambre de combustion (ou inversement) et la formation du mélange réactif ; combustion du mélange réactif par des réactions chimiques en phase gazeuse.

La combustion et la vaporisation des gouttelettes correspondent donc à la phase de gazéification de la phase liquide et à la formation de la phase vapeur. Les temps caractéristiques de cette phase doivent être déterminés avec précision. La conduite de ces études en microgravité permet de s'affranchir des phénomènes induits par la convection naturelle et qui s'intensifient à haute pression [1]. Parmi ces phénomènes, on peut citer la distorsion de la symétrie sphérique des phénomènes de transport, qui empêche de les modéliser dans un cadre monodimensionnel ; et l'induction de phénomènes convectifs dans la phase gazeuse et au sein même de la phase liquide, qui modifient les phénomènes de transport diffusifs. De même, d'un point de vue technique, le recours à la microgravité apparaît comme le seul moyen pour conduire les expériences de gazéification de gouttes à haute pression, lorsque la réduction de la tension superficielle du liquide empêche l'utilisation de la technique de suspension des gouttes sur une fibre.

Les hautes pressions et températures qui règnent dans les chambres de combustion constituent un facteur important en ce qu'elles déterminent les régimes de gazéification, subcritique ou supercritique. Les temps caractéristiques de gazéification sont différents dans les deux régimes. L'objectif des études menées au LCSR est de caractériser les divers régimes de gazéification de gouttelettes dans des conditions pertinentes pour les applications de propulsion. Les régimes étudiés au LCSR concernent la vaporisation et la combustion de gouttes en régime sub- et supercritique. Ces études sont menées en gravité normale et en microgravité. Les liquides utilisés sont des hydrocarbures (n-alcanes ou alcools) et l'oxygène liquide. Les milieux gazeux sont constitués de l'air, de l'azote ou de l'hélium. La pression dans la chambre de gazéification peut être augmentée jusqu'à 120 bars, alors que la température varie de l'ambiante à approximativement 1000 K. Les techniques expérimentales utilisées sont basées sur la visualisation de la surface projetée de la goutte et de la flamme et la détermination de leur dynamique temporelle, grâce à la vidéographie rapide et à l'analyse d'images numériques. Les régimes de gazéification étudiés sont les suivants [2, 5] :

- * Vaporisation de goutte subcritique à haute pression ($P_r > 1$; $T_r < 1$)
- * Vaporisation de gouttes supercritique ($P_r > 1$; $T_r > 1$)
- * Combustion de gouttes subcritique ($P_r < 1$ et $T_r > 1$) et supercritique ($P_r > 1$ et $T_r > 1$)

C'est dans le cas des études sur les régimes de combustion de goutte que les expériences en microgravité sont menées en utilisant des vols paraboliques. Les temps de microgravité disponibles ne permettent pas en effet d'étudier les régimes de vaporisation qui nécessitent des temps d'observation plus longs, dans les régimes de vaporisation à température modérée. Le recours à la microgravité devient indispensable dans les études de gazéification à haute pression afin de réduire l'influence des forces de convection naturelle qui varient comme p^2 [1]. Ces études permettent d'identifier les effets couplés de la pression et de la température sur les régimes de gazéification de gouttes et notamment sur leur temps caractéristique de gazéification. Parmi les résultats marquants on peut citer la mise en évidence de l'augmentation importante du temps de vaporisation avec l'augmentation de la pression dans le régime subcritique à haute pression ($P_r > 1$; $T_r < 1$) ; l'inversion de ce comportement dans le régime de vaporisation subcritique à haute température ($P_r < 1$; $T_r > 1$) ; la diminution de l'influence de la pression sur les temps de gazéification dans les régimes de vaporisation et de combustion supercritiques. Dans le cas de la vaporisation des gouttes, ces comportements ont été retrouvés par la modélisation numérique détaillée avec l'hypothèse de la symétrie sphérique, et en incluant tous les phénomènes de transport moléculaires et les divers effets dus aux hautes pressions, notamment ceux de gaz réels. Il est utile de rappeler ici que lorsque les conditions supercritiques de pression et température par rapport aux propriétés du liquide pur sont atteintes dans la phase gazeuse qui entoure la goutte, cela ne veut pas automatiquement dire que la phase liquide ait effectivement atteint le régime supercritique. Les phénomènes de dissolution du gaz ambiant dans le liquide, par exemple, modifient les conditions de criticalité du liquide ; par ailleurs, dans certains cas seules les couches surfaciques peuvent atteindre la température critique.

Les recherches présentes et futures du LCSR dans le domaine de la vaporisation et combustion de gouttes à haute pression se proposent de mieux analyser le régime supercritique. Pour ce faire, les études suivantes sont en cours ou prévues :

* Etude de la vaporisation de gouttes dans le régime supercritique en microgravité poussée lors des expériences en fusée sonde prévues pour novembre 1999, avec l'ESA.

* Etude de la combustion de gouttes dans le régime supercritique en microgravité poussée en utilisant la tour de chute libre Jamic à Kamisunagawa, dans le cadre de la collaboration franco-japonaise sur la combustion en microgravité [5].

2. - Effet de la convection naturelle sur la stabilité des flammes de diffusion et de prémélange

Flammes laminaires de prémélange

Le problème de l'oscillation induite par la convection naturelle des flammes laminaires prémélangées a été étudié par la technique de la diffusion de la lumière par effet Rayleigh induit par laser. Une flamme laminaire de méthane/air est stabilisée dans la configuration de bec Bunsen (flamme conique). Les fluctuations spatio-temporelles du front de flamme ont été explorées par la technique Rayleigh en fonction de la richesse de la flamme et de la vitesse des gaz frais. Pour la première fois, il a été démontré, par des mesures locales, que la dynamique d'oscillation du front de flamme est parfaitement corrélée avec celle de l'interface instable entre les gaz brûlés chauds et l'air ambiant. La suppression de l'instabilité de cette deuxième interface entraîne la stabilisation totale du front de flamme laminaire. La controverse sur l'origine de l'oscillation du front de flamme laminaire en présence de la convection naturelle est ainsi résolue [6]

Flammes de diffusion

Dans le cadre de la collaboration franco-japonaise une nouvelle étude a été initiée, Il s'agit de déterminer l'influence de la convection naturelle sur les régimes de stabilité et d'efficacité de mélange et de combustion des flammes de diffusion du type jet, en régime laminaire et turbulent. Les premières

expériences, conduites en parallèle lors des vols paraboliques et dans la tour de chute libre de Jamic concerne les flammes de méthane/air en régime laminaire. Des diagnostics optiques basés sur l'émission spontanée des espèces radicalaires (comme le OH et le CH) qui marquent la zone de flamme sont utilisées. Il est également prévu d'implanter la technique de la vélocimétrie par images de particules pour accéder aux champs de vitesse. Une activité de modélisation numérique liée à l'identification de l'influence de la convection naturelle sur le mélange dans les jets turbulents à masse volumique fortement variable et sur la combustion dans les flammes turbulentes de diffusion est également menée.

3. - Etude de la combustion des particules métalliques

Le LCSR est actif depuis plusieurs années dans le domaine de la combustion des gouttes et plus récemment dans celui de la combustion des particules métalliques. Les deux thèmes intéressent grandement l'énergétique et la propulsion, puisque la plupart des moteurs (diesel ou de fusées, comme le moteur Vulcain à oxygène et hydrogène liquides d'Ariane V) sont alimentées soit par des combustibles liquides, soit leurs combustibles incorporent des particules métalliques (comme dans les moteurs à propergols solides d'Ariane V).

Le LCSR participe activement aux programmes du CNES sur le moteur Vulcain et sur les boosters d'Ariane V. Dans le premier cas, il est chargé d'étudier les caractéristiques de vaporisation et de combustion de gouttes liquides (dont l'oxygène liquide) dans des conditions du moteur Vulcain, donc à très haute pression. Dans le second cas, le LCSR est chargé d'étudier la combustion des particules d'aluminium qui sont incorporées dans le propergol solide des boosters d'Ariane V [7-11].

L'évolution naturelle des travaux du LCSR s'oriente maintenant vers l'étude non plus d'une goutte ou d'une particule isolée, mais du phénomène de combustion de brouillard (ou de nuage) d'un ensemble gouttes ou de particules, comme cela se passe réellement dans les chambres de combustion des systèmes énergétiques citées ci-dessus. Les questions scientifiques qui attendent des réponses dans ces domaines sont les limites d'allumage et de stabilité et les vitesses de propagation des flammes initiées dans les mélanges multiphasiques constitués de la phase dispersés (gouttes liquides ou particules métalliques) et la phase gazeuse qui constitue l'oxydant.

Les deux types d'expériences nécessitent le développement des dispositifs spécifiques à haute pression (100 bars approximativement) avec les techniques de mesure appropriées. De même, les deux domaines nécessitent aussi le développement de modèles numériques pour rendre compte des phénomènes observés et pour les inclure dans les codes de calculs numériques de prédiction développés par les industriels, tels que la SEP, la SNPE et l'Aérospatiale qui sont les partenaires du LCSR dans ces deux programmes.

Publications :

- [1] CHAUEAU, C., CHESNEAU, X., VIEILLE, B., ODEIDE, A., and GÖKALP, I., *High pressure vaporization and burning of methanol droplets in reduced gravity*. in *Materials and fluids under low gravity*, Lecture Notes in Physics (edited by L. Ratke et al.), Springer Verlag, Berlin, pp. 415-425 (1996)
- [2] VIEILLE B., CHAUEAU, C., CHESNEAU, X., ODEIDE, A. and GÖKALP, I., *High pressure droplet burning experiments in microgravity*. 26th Int. Symposium on Combustion, pp. 1259-1265 (1996)
- [3] ODEIDE, A., Simulation numérique de l'évaporation d'une goutte de combustible liquide. Influence de la pression. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, décembre 1996.

- [4] GÖKALP, I., CHAUVEAU, C., VIEILLE, B., KADOTA, T., and SEGAWA, D., *High pressure burning of methanol droplets: a comparison between parabolic flight and drop tower experiments*. Proceedings of the 4th International Microgravity Combustion Workshop, NASA Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, May 19-21, 1997, pp. 503- 508
- [5] CHAUVEAU, C., VIEILLE, B., GÖKALP, I., SEGAWA, D., KADOTA, T., and NAKAINKYO, A., *Effects of gravitational acceleration on high pressure combustion of methanol droplets*. J. Chem. Phys, **96**: 103 1-1037 (1999)
- [6] GHENAI, C. and GÖKALP I., *Correlation coefficients of the fluctuating density in turbulent premixed flames*. Experiments in fluids, **24**: 347-353 (1998)
- [7] MARION, M., CHAUVEAU, C., and GÖKALP I. *Studies on the Ignition and Burning of Levitated Aluminium Particles*. Combust. Sci. and Tech. **115**, 4-6, P. 369., 1996.
- [8] MARION M. *Etudes sur la combustion des particules d'aluminium sous pression*. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, 1996.
- [9] MARION, M., LEGRAND, C., CHAUVEAU, C., and GÖKALP, I., *Studies on the burning of levitated aluminium particles: effects of pressure and CO concentration*. AL4A paper 97-2704 presented at the 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, July 6-9, 1997, Seattle, WA
- [10] LEGRAND, B. SHAFIROVICH, E., MARION, M., CHAUVEAU, C., and GÖKALP, I., *Studies on the burning of levitated magnesium particles in CO₂*, AJAA 98-1026, presented at the 36 Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, January 12-15, 1998, Reno, NV
- [11] LEGRAND, B. SHAFIROVICH, E., MARION, M., CHAUVEAU, C., and GÖKALP, I., *Ignition and combustion of levitated magnesium particles in carbon dioxide*. 27th International Symposium on combustion, pp. 2413-2419 (1998)
- [12] GÖKALP, I., CHAUVEAU, C., DUROX, D., LACAS, F., LEGRAND, B., SHAFIROVICH, E., *Preliminary analysis of a spray and c combustion module for the ISS*. Proceedings of the 2 European Symposium on the Utilisation of the International Space Station, ESA SP **433**, pp. 261- 268 (1999)

ETUDE DE LA STRUCTURE DES FLAMMES DE DIFFUSION REPRESENTATIVES DE SITUATION D'INCENDIE DANS UN ENVIRONNEMENT DE MICROGRAVITE

Pierre Joulain

Laboratoire de Combustion et de Détonique UPR 9028 au CNRS
ENSMA Téléport 2
BP 109
86960 Futuroscope Cedex

INTRODUCTION

Les recherches entreprises depuis plusieurs années visent, à partir d'études de base à l'échelle du laboratoire, à une meilleure compréhension de l'influence des forces de gravité sur les flammes de diffusion représentatives d'incendies. Le premier objectif de ces approches est d'une part de mettre en évidence l'influence de paramètres jusqu'alors négligés et d'autre part d'explicitier le rôle de ceux mal pris en compte jusqu'alors.

L'étude des flammes de diffusion représentatives d'incendie, du fait qu'elles se développent sur des surfaces combustibles, requiert la prise en compte simultanée des phénomènes mis en jeu dans la phase gazeuse et dans la phase condensée. Au niveau de la phase gazeuse c'est la structure de l'écoulement, la géométrie de la flamme, les réactions chimiques et les mécanismes de transport de masse et de chaleur qui retiennent l'attention. Cependant, c'est pourtant la phase condensée qui a tendance à contrôler le processus global. En effet la vitesse de transformation de la phase condensée est déterminée par le flux de chaleur vers la surface et par la cinétique de pyrolyse.

C'est une étude en deux étapes qui a été lancée au sein du laboratoire afin de mieux appréhender l'influence des forces de flottabilité sur la vitesse de combustion et de vérifier certaines hypothèses antérieures dont celles correspondant à l'établissement du modèle d'Emmons. En premier, les efforts ont été concentrés sur l'analyse des phénomènes mis en jeu dans la phase gazeuse. Les expériences ont été réalisées à l'aide de brûleurs poreux en métal fritté sensés simuler la combustion d'un combustible solide ou liquide. L'approche expérimentale a été centrée sur l'influence du champ gravitationnel sur la géométrie de la flamme, les limites d'extinction et le transfert de chaleur de la flamme vers la surface du brûleur. En utilisant de tels brûleurs poreux l'alimentation en combustible n'est plus couplée au phénomène de pyrolyse ce qui permet donc une étude indépendante des phénomènes en phase gazeuse. Par contre au cours de la deuxième étape, qui a débuté fin 1997, on s'est intéressé au flux de chaleur en retour vers la surface ainsi qu'aux processus successifs qui mènent à la pyrolyse puis à la gazéification du combustible.

Après avoir réussi à se doter d'une installation expérimentale fiable et adaptée à l'utilisation en tour de chute libre comme au cours de vols paraboliques, nous avons pu entreprendre une étude paramétrique de la combustion des solides à la gravité normale et dans des conditions de micro-gravité. Des plaques de PMMA de différentes longueurs, truffées de thermocouples, ont été brûlées à différentes vitesses d'écoulement oxydant et pour différentes fractions massiques d'oxygène. Les expériences réalisées au cours de vols paraboliques, d'essais en tour de chute libre ou lors du lancement de la fusée sonde Mini-Texus 6 ont connu un réel succès. Des résultats inédits ont été obtenus et vont faire l'objet, pour partie, du mémoire de

thèse de T. Vietoris (soutenance le 30 juin 1999), puis leur analyse sera complétée en vue de permettre leur publication en fin d'année.

PRINCIPAUX RESULTATS

Le travail de pionnier d'Emmons a suggéré de nombreux travaux plus particulièrement axés sur les modifications de l'écoulement apportées par la flamme. Bien entendu ce type de perturbation s'avère capital dans la mesure où il affecte le flux de chaleur en retour vers la surface combustible venant de la flamme et par conséquent la géométrie, les dimensions et la stabilité de cette dernière. Autant de paramètres qui sont d'importance au niveau de la notion de sécurité incendie en matière d'application spatiale.

Les premiers à mettre en évidence les survitesses au niveau de la zone de réaction ont été Hirano et al. [1, 2]. Les champs de pression calculés à partir des profils de vitesse présentent des distorsions près du bord d'attaque. Les auteurs attribuent alors ces survitesses à l'expansion thermique. Ramachandra et Raghunandan [3] en étudiant l'influence de la vitesse d'injection et de celle du courant libre sur la stabilité de flammes heptane-air ont abouti aux mêmes conclusions. D'autres travaux [4, 5, 6, 7] ont permis de confirmer que les déformations du champ de vitesse sont principalement dues à l'expansion thermique, à la convection naturelle, à l'influence du bord d'attaque, aux propriétés de l'écoulement, etc.... sans toutefois le montrer de façon indiscutable. En effet du fait de l'existence au sol des forces de flottabilité qui induisent une survitesse de l'ordre de 0.25m/s les autres phénomènes de moindre importance sont masqués.

Installation et domaine d'étude

Nous avons entrepris, comme cela a été précisé dans les objectifs, des études visant à analyser les phénomènes masqués et à les expliciter. Les principaux résultats obtenus sont résumés succinctement ci-dessous après un bref rappel sur l'appareillage et les conditions expérimentales.

Appareillage mis au point

Notre objectif est principalement de vérifier la validité des approches théoriques dues à Emmons [8] et d'appréhender et caractériser les phénomènes contrôlant la géométrie d'une flamme de diffusion laminaire qui s'établit sur une surface combustible. L'appareillage expérimental et les techniques de mesure y afférant seront utilisés à la fois à la gravité terrestre et sous des environnements sous gravité réduite.

Cet appareillage permet pour l'essentiel d'étudier la structure d'une flamme de diffusion laminaire établie au-dessus d'une plaque plane combustible en présence d'un écoulement oxydant parallèle à ladite surface. La chambre de combustion utilisée lors de l'expérience MiniTexus 6 est en tout point similaire et les équipements sont complétés par une caméra IR.

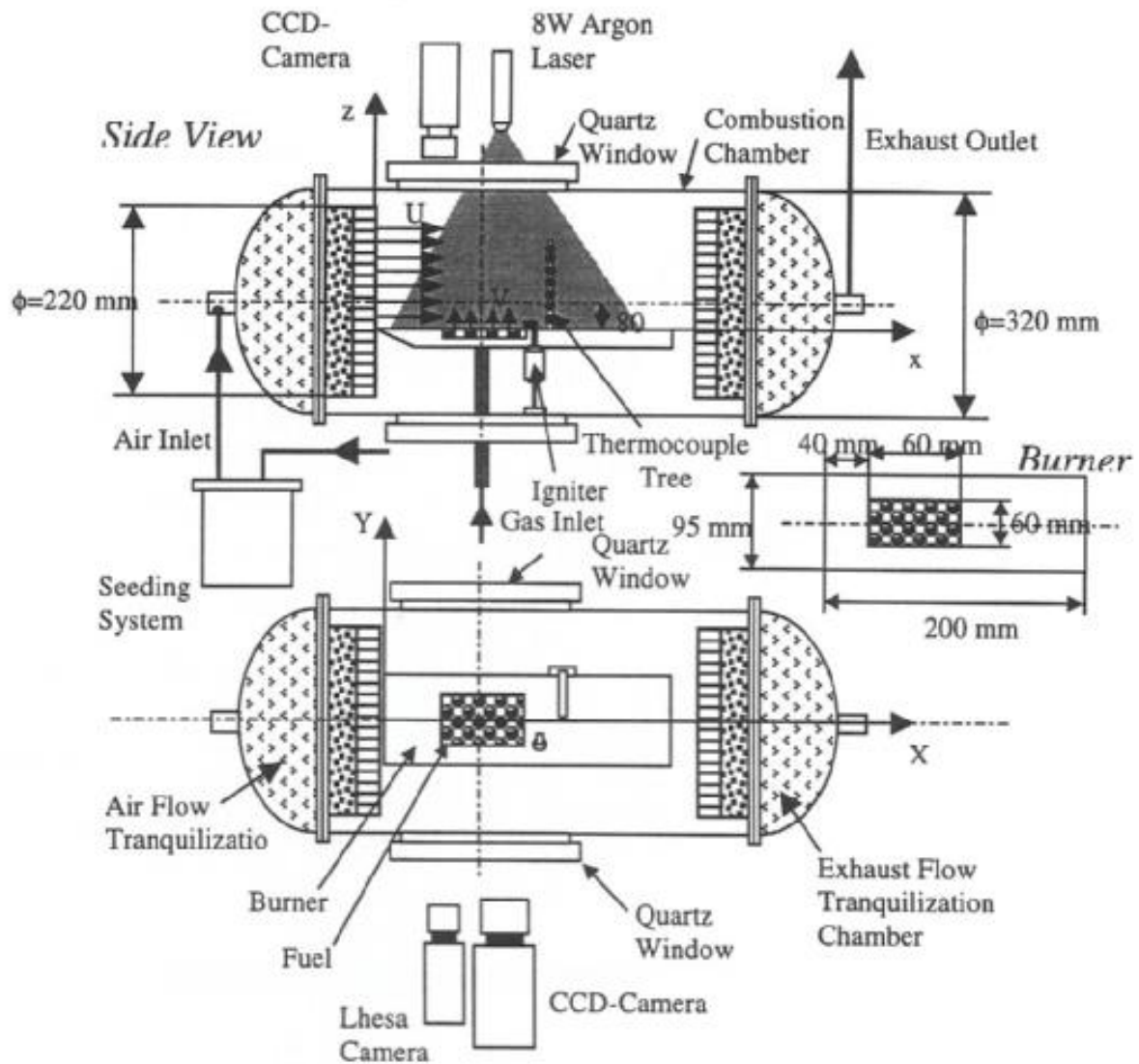


Figure 1 Schéma de l'appareillage avec ses équipements de mesure

Conditions expérimentales

Les paramètres que nous pouvons essentiellement faire varier sont la vitesse du courant libre oxydant (U_∞) et la concentration en oxygène ($Y_{O_2, \infty}$) sur les domaines représentés sur la figure 2 ci-après.

Les valeurs portées sur le graphique correspondent par conséquent à celles caractéristiques des tests déjà réalisés. On peut aisément remarquer que la détermination des limites de stabilité, tout comme celle de la séparation entre flammes bleues et jaunes nécessite des études complémentaires. L'expérience MiniTexus 6 quant à elle correspond à un point par domaine : flamme jaune / bleue, flamme bleue et voisinage de l'extinction. Il va de soi que même d'importance, l'approche expérimentale ne visera pas essentiellement à compléter ce diagramme.

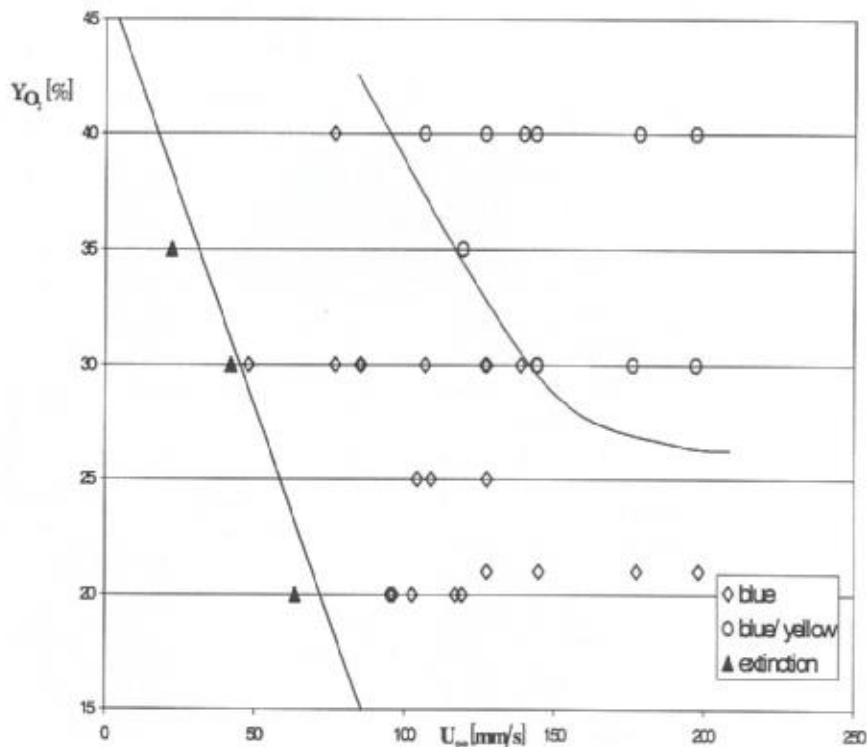


Figure 2 Conditions expérimentales déjà étudiées

Résultats obtenus avec les systèmes gaz- gaz

Dans une première étape la décomposition du combustible condensé a été simulée par injection de combustible gazeux à travers une paroi poreuse. Cette configuration, bien qu'interdisant le recours à l'utilisation d'une solution auto-similaire et supprimant le couplage pyrolyse-flux de chaleur vers la surface, a permis de réaliser des expériences pendant des temps courts tels que ceux correspondant aux tours de chute libre en contrôlant les débits des réactifs. Il nous a été possible [9 à 15] de mettre en évidence et d'expliciter l'influence de l'injection du combustible et de la flamme sur la structure de l'écoulement. Les points essentiels peuvent toutefois se résumer brièvement ainsi :

La visualisation de l'écoulement a montré l'existence d'un écoulement de caractère 3D généré par l'injection et qui provoque la séparation de l'écoulement oxydant et la création d'une zone de mélange détachée de la paroi poreuse. La zone de mélange se rapproche de la paroi lorsque le nombre de Reynolds augmente et lorsque la vitesse d'injection diminue. Les caractéristiques de l'écoulement correspondent à celles d'un régime de transition mais qui peut correctement s'expliquer à l'aide d'une solution asymptotique correspondant à un phénomène piloté par la convection.

Trois régimes caractéristiques ont été identifiés. Pour $C_Q = V_F/U_\infty < 0.15$, la structure de l'écoulement au bord d'attaque du brûleur influence de façon significative la zone de mélange. Pour $C_Q > 0.15$ et $V_F < 4 \text{ mm/s}$ l'écoulement dans le plan de symétrie est bidimensionnel et pas du tout affecté par les effets de bord du brûleur. Pour $C_Q > 0.15$ et $V_F > 4 \text{ mm/s}$ les entraînements latéraux ont tendance à soulever la limite de la zone correspondant à l'oxydant seul et par conséquent les effets de bord dus au brûleur sont significatifs.

Les expériences effectuées en microgravité ont montré qu'il fallait une vitesse d'injection minimale pour que la flamme demeure stable.

Aux faibles vitesses d'écoulement (V_F et U_∞) l'expansion thermique joue un rôle prépondérant sur la géométrie de la flamme et le champ de vitesse. Lorsque l'on augmente les deux vitesses ou l'une ou l'autre, l'influence de l'expansion thermique se limite alors au voisinage du bord d'attaque. En aval de ce bord d'attaque c'est la convection qui transporte l'oxydant et le combustible vers la zone de mélange, au sein de laquelle c'est la diffusion des espèces qui prévaut.

On constate donc que l'injection du combustible conduit au décollement de l'écoulement libre près du bord d'attaque, observation qui laisse plusieurs questions sans réponse notamment au niveau de savoir comment les réactifs sont transportés vers la zone de réaction, phénomène que l'on rencontre d'une manière générale dans toutes les flammes non prémélangées à quantité de mouvement faible.

Résultats obtenus avec un combustible solide

Nous avons, dans une seconde étape, essayé de reproduire les expériences présentées ci-dessus avec un solide le PMMA. Le temps caractéristique de pyrolyse qui est de l'ordre de 60s, tend à limiter l'utilisation des installations terrestres à l'étude des étapes transitoires des phénomènes. Cependant il a été possible de faire des observations significatives concernant la géométrie, la longueur et le domaine de stabilité des flammes. Nous allons dégager ci-après les points marquants tout en précisant que les articles [15 à 21] et la thèse [22] en font une présentation plus exhaustive.

Les flammes de diffusion laminares ont été trouvées instables en dessous d'une vitesse d'écoulement minimale de l'écoulement oxydant. Les limites absolues de stabilité qui semblent être fonction de la concentration en oxygène n'ont toutefois pas pu être déterminée avec précision à cause du temps d'expérimentation dans un environnement de microgravité trop court.

La limite de stabilité à faible vitesse semble liée à une libération minimale de vapeur combustible, en dessous de cette limite l'extinction apparaît brutalement. Comme la vitesse de pyrolyse du combustible dépend du flux en retour de la flamme vers la surface, elle est étroitement dépendante des caractéristiques et de la géométrie de la flamme, et par conséquent, de l'importance de l'écoulement oxydant.

Deux régimes de flamme stable ont pu être identifiés, correspondant soit aux flammes bleues soit aux flammes jaunes. L'apport en combustible est contrôlé par la diffusion dans le cas des flammes bleues, par conséquent la distance flamme - paroi et la longueur de flamme sont correctement explicitées à l'aide de la théorie classique. Le transport de combustible par convection vers la flamme et le transfert thermique par rayonnement sont l'apanage des flammes jaunes ce qui se traduit par un réel désaccord entre les précédentes approches théoriques et les résultats expérimentaux.

Résultats préliminaires tirés de l'expérience en fusée sonde Mini-Texus 6

Au cours de la campagne Mini-Texus 6 qui s'est déroulée fin novembre début décembre 1998 [22] trois vitesses d'écoulement (0.15m/s, 0.10m/s et 0.06m/s) et une concentration en oxygène (40%) ont été testées. L'instrumentation comportait une caméra IR, un système de PIV, 3

caméras CCD, des débitmètres et de nombreux thermocouples placés à la fois dans le solide et dans le gaz. L'examen préliminaire des résultats confirme les observations antérieures présentées ci-dessus. On observe à nouveau deux régimes de stabilité pour les flammes. Le premier contrôlé par la diffusion et perturbé par l'expansion thermique et pour lequel la flamme est bleue. Le second piloté par les transports convectifs de matière et perturbé par les échanges radiatifs, et pour lequel la flamme demeure jaune. Le premier est également caractérisé par des flammes plus courtes que le combustible et proches de l'extinction, le dernier par des flammes plus intenses, plus longues que le combustible qui se pyrolyse. Il a aussi été possible de montrer que l'extinction intervient lorsque l'expansion thermique devient prépondérante.

Les résultats obtenus au cours de ces trois minutes de microgravité ont permis de confirmer l'existence des différents régimes et d'établir un lien entre les désaccords observés entre les différentes expériences réalisées en microgravité. Un de nos souhaits pour l'avenir serait, pour lever les ambiguïtés qui persistent, de pouvoir effectuer deux tirs de fusée sonde à deux concentrations en oxygène inférieures afin de bien préciser les conditions réelles d'extinction et donc d'établir un diagramme fiable des domaines de stabilité de ces flammes de combustion gaz -solide en microgravité.

References

1. HIRANO T., IWAI K. and KANNO, "Measurement of the Velocity Distribution in the Boundary Layer over a Flat Plate with a Diffusion Flame," *Y., Astronautica Acta*, 17:811- **818** (1972).
2. HIRANO T. and KANNO Y., "Aerodynamic and Thermal Structures of the Laminar Boundary Layer over a Flat Plate with a Diffusion Flame," Fourteenth Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1973, pp.39 1-398.
3. RAMACHANDRA A. and RAGHUNAJ'DAN B.N., "Investigations on the Stability and Extinction of a Laminar Diffusion Flame Over a Porous Flat Plate," *Combustion Science and Techno* **36**:109-121 (1984).
4. ANDREUSSI P. and PETRACA L., "Film Combustion of Ethyl Alcohol in a Parallel Air Stream," Eighteenth Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1981, pp. 861-1869.
5. ANDREUSSI P., "Modelling of Laminar Diffusion Flames over a Horizontal Plate," *Combustion and Flame*, **45**, 1-6 (1982).
6. ANDREOTI S., ANDREUSSI P. and PETRACA L., "Boundary Layer Burning of Fuel Surfaces: Thermal and Aerodynamic Structure of the Flame," *Combustion Science and Technology*, **40**, 279-291 (1984).
7. HA J.S., SHIM S.H. and SHIIN H.D., "Boundary layer Diffusion Flame over a Flat plate in the Presence and Absence of Flow Separation," *Combustion Science and Techno* **75**, 241-260, 1991.

8. EMMONS H., "The Film Combustion of Liquid Fuel," Z. Angew. Math. Mech., **36**: 60-71 (1956).
9. TORERO J.L., BONNEAU L., MOST J.M., JOULAIN P., "The Effect of Gravity on a Laminar Diffusion Flame Established over a Horizontal Flat Plate," 25th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1701-1709, 1994.
10. TORERO LU, BONNEAU L., MOST J.M., JOULAIN P., "On the Geometry of Laminar Diffusion Flames Established over a Flat Plate Burner," Advances in Space Research, Elsevier Science Ltd, **16**, N°7, 149-152, 1995.
11. TORERO J.L., WANG H-Y., JOULAIN, P. and MOST J-M., "Flat Plate Diffusion Flames: Numerical Simulation and Experimental Validation for Different Gravity Levels," Lecture Notes in Physics, **464**, 401-413, 1995.
12. BRAHMI L., VIETORIS T., TORERO J.L., JOULAIN P., « Détermination par caméra infrarouge des distributions de température sur l'enveloppe d'une flamme de diffusion établie sur un brûleur poreux plan en microgravité » Entropie, **215**, 69- 73, (1998).
13. BRAHMI L., VIETORIS T., JOULAIN P., DAVID L, TORERO J.U, « The effect of parietal fuel injection on the geometry of a low velocity laminar diffusion flame » AIAA Paper n° 99-0581, 37 Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, USA, January 11-14 (1999).
14. BRAHMI L., (1998) « De la structure d'une flamme de diffusion soumise à un écoulement forcé laminaire » Thèse de l'Université de Poitiers, 24 Mars.
15. BRAHMI L., VIETORIS T., JOULAIN P., DAVID L., TORERO J., «The effect of fuel injection on a laminar diffusion flame established on perpendicular fuel and oxidizer streams» submitted to Combustion and Flame (1999).
16. VIETORIS T., JOULAIN P., TORERO J.L., «Experimental characterization of a laminar diffusion flame in microgravity » Journal de Chimie Physique (1999).
17. BRAHMI L., VIETORIS T., JOULAIN P., TORERO J., «Estimation of boundary layer diffusion flame temperatures by means of an infrared camera under microgravity conditions» (submitted) (1999).
18. VIETORIS T., JOULAIN P., TORERO J.L., "Experimental observations on the geometry and stability of a laminar diffusion flame in microgravity", Sixth IAFSS, Paper A13, Poitiers July 5-9, 1999, (accepted for publication in the Proceedings).
19. VIETORIS T., JOULAIN P., TORERO J.L., "Laminar diffusion flames in microgravity. Experimental results leading to MiniTEXUS 6", Fifth International Microgravity Combustion Workshop, NASA Cleveland, Ohio, May 18-20, NASA/CP—1999-208917, pp. 101-104.

20. VIETORIS T., JOULAIN P., TORERO J.L., “*Flow considerations on the stability of a laminar diffusion flame in microgravity*”, Joint Section of The Combustion Institute Meeting, Washington, D.C., March 12-14, 1999.
21. TORERO J.L., VIETORIS T., JOULAIN P., “*Material flammability studies for microgravity environments*”, 14th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Seminaris See Hotel, Potsdam, Germany, May 31 June3, 1999.
22. VIETORIS T., (1999) « *Etude de la combustion quasi -stationnaire d’un combustible solide soumis à un écoulement parallèle à sa surface* », Thèse de l’Université de Poitiers, 30 Juin.

ÉCOULEMENTS INSTATIONNAIRES INDUISANT DES DÉFAUTS DE STRIATION EN SOLIDIFICATION DIRIGÉE

Pierre Haldenwang

Université de Provence
IRPFIE / UMR-CNRS 6594 ; IMT I La jetée
38, Avenue Joliot-Curie
13451 Marseille cedex 20

Lors de la solidification dirigée d'alliages binaires, l'absorption ou le rejet de soluté par le front de solidification induit des mouvements convectifs en amont de l'interface, si le profil de densité s'avère instable. Ces mouvements de convection ont fait l'objet de nombreuses études car ils modifient notablement les transferts au voisinage de l'interface de solidification. Il a été établi [1-3] que cette situation de convection solutale admettait un seuil d'apparition associé à une transition relativement complexe où entrent en compétition des branches sous-critiques et transcritiques. Récemment, nous avons prolongé l'étude de ces branches vers les hautes valeurs du nombre de Rayleigh, jusqu'à l'apparition des branches de solutions instationnaires. Nous observons que cette instationnarité (due à un régime convectif dit de plumes) à son tour présente une grande richesse allant du régime mono-périodique jusqu'au chaos en suivant une cascade sous-harmonique, ou encore subissant une relaminarisation par accrochage sur une branche stationnaire. Une question importante, quant à la qualité du cristal, consiste à estimer l'ordre de grandeur des fluctuations de composition de la phase solide, lors de sa croissance à partir d'un bain fondu dont la composition fluctue au cours du temps.

Pour quantifier ces variations nous proposons le paramètre s_t qui représente la valeur maximale des inhomogénéités longitudinales (ou de croissance). On a ainsi :

$$s_t = \text{Max}_x [\tilde{X}] \quad \text{avec} \quad \tilde{X}(x) = \frac{\text{Max}_t X(x,t) - \text{Min}_t X(x,t)}{\langle X(x) \rangle_t}$$

où $\text{Max}_t X$, $\text{Min}_t X$ et $\langle X \rangle_t$ sont respectivement le maximum, le minimum et la valeur moyenne de la fraction massique de soluté le long d'une ligne verticale (i.e. de croissance) dans le barreau. L'évaluation de s_t est effectuée à partir de résultats de simulation numérique pour laquelle une méthode pseudo-spectrale Tchebycheff a été développée [4].

L'adimensionnement du problème utilise les unités suivantes : V_0 , la vitesse de tirage, $l_s = D/V_0$, la longueur solutale, D étant le coefficient de diffusivité des espèces. La phase liquide est assimilée à une cavité, remplie de l'alliage fondu Pb-30%Tl, de largeur réduite β (rapport de forme) et de hauteur réduite E_z . Le nombre de Rayleigh solutal est défini comme suit :

$$Ra_s = \frac{\alpha_c g C_\infty (1-k)}{k \eta D} l_s^3$$

avec α_c le coefficient de dilatation solutale, g , l'accélération de la pesanteur, η la viscosité cinématique et k , le coefficient de partage défini comme le rapport de composition de coexistence liquide-solide ($k C_l = C_s = C_\infty = 30\%$). La concentration est adimensionnée par la

différence ΔC entre la concentration du solide et celle du liquide pour le cas diffusif. On a, en fait, $\Delta C = C_\infty(k-1)/k$, où C_∞ est la fraction massique en Thallium dans la phase liquide loin de l'interface.

INSTATIONNARITES DE CONVECTION SOLUTALE

Dans un travail récent [6] à propos de la croissance de l'alliage Pb-30% Tl, nous avons décrit, pour différentes valeurs du confinement, le diagramme de la bifurcation associée à l'apparition de la convection. Ce diagramme comporte différentes branches stables de solutions stationnaires, connectées entre elles par des cycles d'hystérésis. Lorsque nous nous intéressons à la limite supérieure de ces branches, nous observons des bifurcations secondaires de type subcritique ou surcritique qui donnent lieu à des fluctuations de composition interfaciale dues à des plumes de solvant (plomb) émises par la couche limite solutale.

Considérons le cas typique suivant qui correspond au confinement $\beta=20$ et $E_z=16$, habituellement rencontré dans les expériences. La branche concernée a une structure spatiale correspondant à une cellule convective. Cette branche connaît une transition à l'instationnarité pour environ $Ra_s = 21.5$; celle-ci se comporte comme une bifurcation de Hopf surcritique. Si l'on suit cette nouvelle branche de solutions instationnaires on observe une route vers le chaos par doublement de période. Les figures 1.(a-d) fournissent quatre exemples de signaux temporels qui illustrent la cascade : la valeur du maximum de la fonction courant y est représentée en fonction du temps.

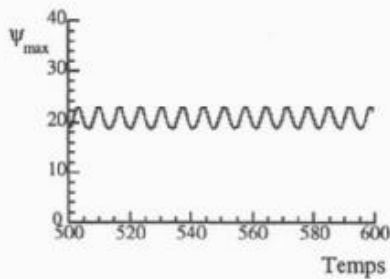


Figure 1.a : Fluctuation temporelle du maximum de la fonction courant pour $\beta=20$ et $Ra_s=21.75$

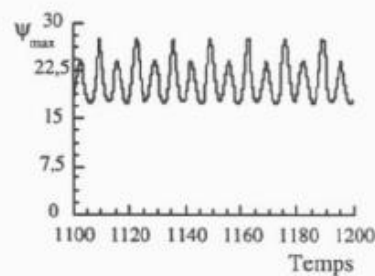


Figure 1.b: Fluctuation temporelle du maximum de la fonction courant pour $\beta=20$ et $Ra_s=22.5$

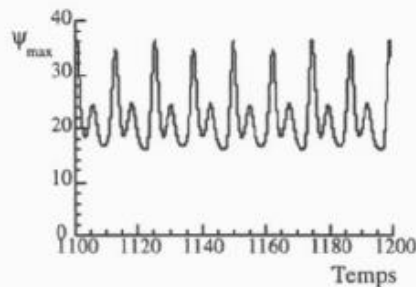


Figure 1.c : Fluctuation temporelle du maximum de la fonction courant pour $\beta = 20$ et $Ra_s = 25.25$

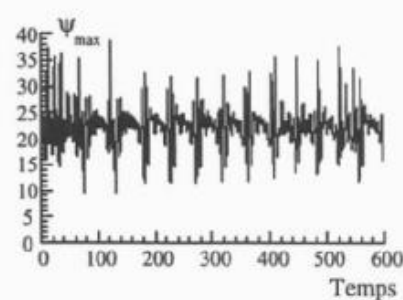
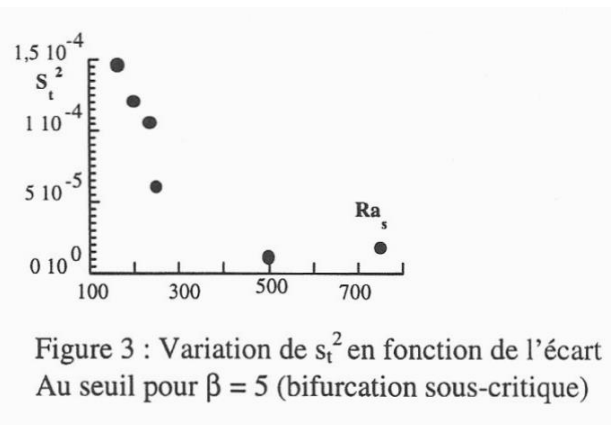
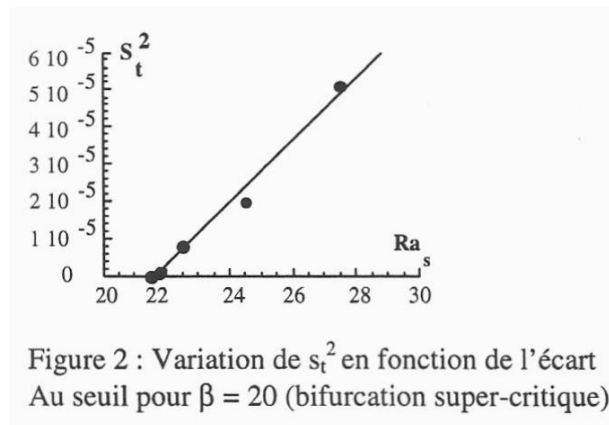


Figure 1.d: Fluctuation temporelle du maximum de la fonction courant pour $\beta = 20$ et $Ra_s = 26$

Intéressons-nous à la valeur de la fluctuation de composition à l'interface. Comme la bifurcation de Hopf est surcritique, la fluctuation de composition est infinitésimale au seuil et son carré croît proportionnellement à l'écart au seuil. La figure 2 confirme ce point : s_t^2 qui représente le carré de l'amplitude de striation admet une dépendance linéaire. Quant à la période spatiale de la striation, nous dérivons son expression à partir de $f_1=0.16$, la fréquence temporelle de la fluctuation, comme : $\pi_s = l_s / f_1$. Avec l'estimation suivante de la longueur solutale $l_s \sim 100$ mm, on obtient $\pi_s \sim 0.6$ mm.

Un autre cas typique de transition à l'instationnarité correspond à un confinement plus sévère ($\beta=5$ et $E_z=16$). La branche concernée a une structure spatiale comportant deux cellules convectives (contrarotatives) superposées. Cette branche connaît une transition à l'instationnarité à $Ra_s = 165$; celle-ci se comporte comme une bifurcation de Hopf sous-critique. En suivant cette nouvelle branche, intéressons-nous à la valeur de la fluctuation de composition à l'interface. La figure 3 représente à nouveau s_t^2 , le carré de l'amplitude de striation. Contrairement au cas surcritique, cette grandeur admet une dépendance décroissante en fonction de l'écart au seuil. Quant à la période spatiale de la striation, nous l'estimons à environ $\pi_s = 450\mu\text{m}$.



Ces deux cas typiques sont caractéristiques des situations que l'on rencontre lorsque les branches stables de convection stationnaire sont suivies jusqu'à l'apparition d'une bifurcation secondaire instationnaire [3]

CES STRIATIONS SONT-ELLES OBSERVABLES ?

Le point à considérer maintenant concerne les conditions d'observabilité de ces striations dans les expériences menées habituellement en laboratoire. Une première condition nécessaire d'observation est que le domaine des paramètres corresponde à un régime instationnaire, mais non chaotique. Pour le premier exemple évoqué plus haut, il s'agit d'une gamme relativement réduite : $21.5 < Ra_s < 25.5$. Lorsque cette gamme est plus large (deuxième cas présenté plus haut), il se passe un autre phénomène qui limite les conditions d'observation ; l'intensité de l'écoulement convectif croissant, les variations de composition tendent à s'homogénéiser à l'interface (voir figure 3). Quant à la résolution spatiale nécessaire, il s'agit d'observer une striation dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques longueurs solutales. En conclusion, les conditions les plus favorables se situent pour un domaine de paramètres correspondant au voisinage d'une bifurcation de Hopf sous-critique.

REFERENCES

- [1] MCFADDEN G.B., CORIELL S.R. (1988), Proceedings of the First National Fluid Dynamics Congress, Cincinnati (AIAA, Washington, DC) 1572.
- [2] IMPEY M.D., RILEY D.S., WHEELER A.A., WINTERS K.H. (1991), *Phys. Fluids A3*, **4**, 535-55 1
- [3] LE MAREC C., GUERIN R., HALDENWANG p. (1997), *Phys. Fluids* **9**, 11, 3149-3161
- [4] LE MAREC C., GUERIN R., HALDENWANG p. (1996), *J. Crystal Growth*, **169**, 147-160
- [5] LE MAREC C., GUERIN R., HALDENWANG P. (1996), *Int. J. Numer. Methods Fluids*, **22**, 393-409
- [6] GUERIN R., LE MAREC C., HALDENWANG P. (1998), *J. Crystal Growth*, **194**, 247-262

CONVECTION VIBRATIONNELLE DANS LES MILIEUX HETEROGENES

Bernard Roux

IRPHE-JMT

Technopole de Château-Gombert
13451 Marseille cedex 20

Les travaux de recherche menés ces dernières années grâce au concours de nos collègues D. Lyubimov et T. Lyubimova (Université d'Etat de Perm) dans le cadre des contrats CNES et du réseau formation-recherche du MENRT ont concerné l'influence des vibrations sur le comportement de systèmes fluides hétérogènes. Les études sont menées en concertation étroite avec D. Beysens, Y. Garrabos et P. Evesque, responsables d'expériences spatiales (en particulier, vol Mini-Texus du 11 Février 1998) concernant l'influence de vibrations sur un système diphasique (inclusion de vapeur dans un liquide au voisinage du point critique) et sur un milieu granulaire.

1. - Support théorique aux expériences spatiales

Plusieurs résultats théoriques et numériques substantiels ont été acquis, en vue de la préparation, puis de l'interprétation, des expériences spatiales. Ils sont résumés ci-dessous et représentent l'état de l'art actuellement, dans ce domaine :

1.1. Inclusion (gazeuse ou liquide) dans un fluide sous l'influence de vibrations

(a) La forme de quasi-équilibre (vitesse moyenne nulle) d'une inclusion gazeuse sous l'influence de vibrations du container (haute fréquence ; polarisation linéaire) a été étudiée au moyen de la minimisation d'une fonctionnelle de l'énergie. Une représentation multi paramétrique de la forme de l'interface a été utilisée. Deux cas ont été considérés :

- l'inclusion est entourée d'un liquide d'extension infinie, et
- la taille de l'inclusion est comparable à la taille du container (effet de confinement).

Dans ce dernier cas la solution du problème de la déformation de la forme moyenne de l'inclusion dans un container sphérique a été obtenue :

- analytiquement, par la théorie des perturbations, pour une vibration de faible intensité ;
- numériquement, grâce à une approche variationnelle avec une représentation multi paramétrique de la forme de l'interface, pour une vibration d'intensité finie.

(b) L'influence de vibrations de haute fréquence, de polarisation circulaire, sur la forme moyenne d'une inclusion gazeuse (ou liquide) a été également considérée. A l'aide d'une méthode basée sur la théorie des perturbations, nous avons montré qu'à la différence du cas des vibrations de polarisation linéaire, on peut obtenir l'étirement ou, au contraire, la compression des inclusions, suivant la valeur du rapport des densités (de l'inclusion et du fluide environnant).

(e) La force moyenne d'interaction entre la paroi oscillante et l'inclusion a été déterminée par la méthode des images pour les deux cas extrêmes où les parois oscillent suivant leur normale, ou tangentiellement.

(d) La stabilité de l'état d'équilibre d'une inclusion placée entre deux parois rigides, et soumise à des oscillations de haute fréquence, a été étudiée. Nous avons montré que l'équilibre est instable, mais le temps de vie de l'inclusion (avant son contact avec la paroi) est long si la taille de l'inclusion est petite devant la distance entre parois. Ce temps de vie dépend des valeurs des paramètres vibrationnels, du rapport des densités et des paramètres géométriques.

(e) La stabilité de l'interface entre l'inclusion (gazeuse ou liquide) et le milieu environnant, sous l'influence de vibrations de polarisation linéaire avec une fréquence comparable à la fréquence propre a été étudiée en utilisant une approche non-visqueuse. Les conditions critiques pour l'excitation de l'instabilité paramétrique ont été définies.

(f) L'étude a ensuite été étendue pour tenir compte des effets visqueux. On a observé qu'une dissipation visqueuse, même faible, influence le seuil de stabilité et les limites des zones de résonance paramétrique.

1.2. Influence des vibrations sur la nucléation près du point critique

(a) Nous avons étudié la stabilité de l'équilibre du nucléus d'une nouvelle phase pour différentes conditions externes :

- dans le cas d'une pression externe constante le nucléus est instable ; les deux modes d'instabilités, monotone et oscillatoire, peuvent se développer.
- dans le cas d'un volume total constant, le nucléus est stable.

(b) Le problème de faibles oscillations forcées d'une nouvelle phase nucléée a été considéré dans le cas où la pression externe varie périodiquement autour de l'état d'équilibre pour une taille donnée du nucléus, à une température fixée. L'amplitude et la phase des oscillations du nucléus ont été déterminées dans le cas d'une approximation linéaire tenant compte de l'influence de l'écart à l'équilibre sur le taux de transition de phase.

1.3. Ecoulement et transfert de chaleur moyens près du point critique ($T > T_c$).

(a) La théorie de la génération d'un écoulement moyen par des ondes acoustiques dans un fluide compressible chauffé non uniformément a été développée en tenant compte

- du transport pulsatoire,
- du vent acoustique et
- de la vorticité générée près des parois.

On a étudié la stabilité de l'écoulement thermo-acoustique dans un cylindre vertical soumis à un gradient de température vertical.

(b) Le problème du comportement d'un gaz compressible remplissant une cavité fermée a été considéré dans le cas où le champ de gravité est appliqué de façon soudaine (   $t = t_0$) La simulation numérique dans le cas unidimensionnel a été effectuée à l'aide d'une méthode aux différences finies. On a montré que le taux d'amortissement des oscillations

d'une colonne de gaz compressible, après l'introduction soudaine de la force de gravité, est déterminée principalement par la dissipation dans les limites thermiques. On a montré, de plus, que ce taux augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique des bords.

1.4 Dynamique des matériaux granulaires soumis à des vibrations

(a) Les équations décrivant le comportement de suspensions de particules lourdes sous l'influence de vibrations de haute fréquence ont été obtenues en tenant compte de l'inertie des particules et du décalage de phase des oscillations dû au frottement entre phases.

(b) La stabilité d'une interface plane, entre la suspension (saturée par un liquide) et le liquide pur, soumise à des vibrations tangentielles, a été étudiée dans le cadre de la description "moyennée". On a montré que le développement d'un relief ondulé quasi-stationnaire sur l'interface s'accompagne de l'apparition d'un mouvement moyen de la suspension.

2. - Convection vibrationnelle dans les milieux hétérogènes (synthèse)

D'une façon plus générale, la situation actuelle du thème de recherche concernant l'influence de vibrations sur le comportement de systèmes hydrodynamiques hétérogènes a été résumée récemment dans un article intitulé « vibration effects on heterogeneous systems » par Lyubimov et al., à l'occasion du Workshop ESA-ESTEC (sept.10-11, 1998). Cette revue est limitée au cas de vibrations de fréquences non-acoustiques pour lesquelles les fluides peuvent être considérés comme incompressibles. De nombreux travaux ont été réalisés sur le rôle des vibrations sur le comportement de systèmes hétérogènes, depuis les travaux de pionnier de Faraday (1831) concernant des ondes excitées paramétriquement sur une surface liquide par des vibrations verticales. Durant la dernière décade, les effets vibrationnels sur de nombreux autres systèmes hétérogènes ont été étudiés pour différents types de vibration (vibrations translationnelles de polarisation linéaire ; polarisation circulaire ou elliptique ; vibrations de composante angulaire non-nulle ; etc. ...). La plupart de ces travaux sont liés à la recherche en microgravité. Ils ont plusieurs objectifs distincts

- (1) comprendre les mécanismes vibrationnels de base, et leur influence (contrôle) sur les processus physico-chemico-hydrodynamiques, en vue d'applications au sol ; il est intéressant pour ces études de base de pouvoir s'affranchir de la gravitation,
- (2) comprendre le rôle néfaste des g-jitters sur les expériences à bord des stations spatiales orbitales (en particulier, 155).

Caractéristiques des vibrations

On a considéré trois types de vibrations (Tableau 1) et quatre domaines de fréquences (Tableau 2) suivant les valeurs relatives de : (i) la taille de la cavité, L , (ii) la longueur d'onde acoustique correspondant à la fréquence de vibration λ_a , (iii) l'épaisseur des couches limites formées près des parois rigides et près des interfaces, δ_r et δ_i , (iv) la fréquence de vibration, ω , et (v) la fréquence de résonance du mode le plus petit des oscillations propres, ω_r .

1	Vibrations translationnelle de polarisation linéaire Vibrations translationnelle de polarisation non-linéaire
2	Vibrations circulaires, elliptiques ou complètement non-corrélées; représentant la superposition de vibrations de polarisation linéaire dans des directions orthogonales
3	Vibrations non-translationnelles, i.e. avec composante angulaire non-nulle.

Table 1. Différents types de vibration

	Domaine de fréquences	Caractéristiques du problème
(a)	Haute fréquence; $\omega \gg \omega_r$	$(\delta r, \delta i) \ll L \ll \lambda_a$
(b)	$\omega \bullet \omega_r$	$(\delta r, \delta i) \ll L \ll \lambda_a$
(c)	Basse fréquence	$(\delta r, \delta i) \bullet L \ll \lambda_a$

Table 2. Différentes classes de fréquences non-acoustiques ($L \ll \lambda_a$)

Mécanismes vibrationnels de base

La présente analyse est limitée au cas de vibrations non-acoustiques ($L \ll \lambda_a$) pour lesquelles les effets de compressibilité ne sont pas importants. Les résultats des études précédentes sont résumés ci-après :

- Vibrations of type (a) :
 - l'évolution temporelle de la distribution de densité (en particulier, la forme des interfaces, si elles existent) conduit à des états de quasi-équilibre avec énergie effective minimale et orientation préférentielle des surfaces isodenses perpendiculairement à la direction de vibration (Lyubimov et al. 1987, Lyubimov et al. 1990, Lyubimov et al. 1997) ;
 - la viscosité n'a pas d'influence marquée sur l'écoulement pulsatoire (qui est potentiel). L'influence de la viscosité entraîne la formation de couches limites dynamiques près des parois rigides et près des interfaces. A l'intérieur de ces couches, l'écoulement est rotationnel ; une vorticité moyenne y est générée et diffuse dans le bulk, générant un écoulement moyen (Schlichting, 1951 ; Longuet-Higgins, 1953)
 - dans le cas d'un fluide hétérogène, l'interaction d'un champ pulsatoire non-uniforme avec des inhomogénéités de densité conduit à l'apparition d'une force vibrationnelle moyenne dirigée vers les zones de densité plus faible (Lyubimov et al., 1987 ; Lyubimov, 1995). Pour un fluide non-isotherme, cet effet est répertorié sous le vocable de convection thermo-vibrationnelle (Lyubimov, 1995 ; Gershuni et al., 1986 ; Gershuni et al., 1998). Cet effet vibrationnel est essentiellement différent pour le cas de vibrations uniformes réalisées lorsque toutes les limites du domaine bougent suivant la même loi (par ex., dans le cas de vibrations trans d'une cavité avec parois rigides, complètement remplie par un fluide), et pour le cas de vibrations

non-uniformes pour lesquelles le mouvement des différentes limites du domaine obéissent à différentes lois (comme, par ex., les vibrations d'un fluide avec surface libre déformable ou d'un fluide avec interface, pour un fluide avec des solides immergés oscillants, pour des vibrations non-translationnelles d'un container avec parois rigides complètement rempli par un fluide).

— les effets de résonance ne sont pas importants puisque pour ces fréquences seuls les modes résonants les plus élevés sont excités et que ces modes sont fortement amortis par la viscosité.

- Vibrations de type (b) :

— Les effets de résonance deviennent importants, ce qui conduit à un accroissement rapide de l'amplitude de l'écoulement pulsatoire et, par suite, une augmentation de l'intensité de l'écoulement moyen. Lorsque les paramètres prennent des valeurs voisines de la résonance, l'amplitude de l'écoulement pulsatoire peut devenir si grande que l'influence des effets nonlinéaires sur le champ pulsatoire peut être significatif même quand les amplitudes des vibrations sont petites.

- Vibrations de type (c) :

— les changements de forme, la génération de vorticité moyenne dans les couches limites et la génération volumétrique d'écoulements moyens liés à l'apparition de force vibrationnelles moyennes sont faibles ;

— les effets de résonance sont amortis par la viscosité ;

— la viscosité joue un rôle dominant sur l'écoulement pulsatoire et sur l'écoulement moyen dans le volume.

3. - Perspectives (futurs contrats CNES)

Le programme de recherche qui est mené en concertation étroite avec D. Beysens, Y. Garrabos et P. Evesque, responsables d'expériences spatiales, concerne l'étude systématique, sous gravité réduite, de nouveaux phénomènes induits dans les fluides (plus ou moins proches de leur point critique) et de milieux granulaires auxquels on impose des accélérations périodiques. Les effets qui ont été observés au cours de la mission Mini Texus (février 1998) sont nombreux, spectaculaires, et encore inexpliqués. Parmi les différents volets de recherche que nos collègues expérimentateurs souhaitent développer, nous retiendrons les deux domaines suivants :

- (1) Stabilité d'inclusions liquide/gaz ou liquide/liquide, ou d'émulsions gaz-liquide ou liquide-liquide, sous forçage périodique. On sait que l'instabilité de Faraday n'existe pas dans le cas limite où $g=0$. Par contre, on peut observer des instabilités de Kelvin Helmholtz. Il s'agirait de montrer que les structurations observées, gaz et liquides en couches périodiques, relèvent bien du mécanisme des instabilité de type Kelvin Helmholtz, et de préciser les conditions d'apparition de ces instabilités.
- (2) Milieux granulaires. Ces matériaux peuvent être considérés comme un exemple unique de fluides dissipatifs. Jusqu'ici, très peu d'expériences (  l'exception de l'expérience

Mini-Texus de février 1998) ont été consacrées au comportement de ce système complexe sous vibration. Des résultats très prometteurs ont été observés, avec des comportements de type gaz ou de type solide.

S'agissant des effets vibrationnels contrôlés, les informations communiquées par Garrabos, Beysens et Wunenburger concernant l'expérience Mini-Texus sur le CO₂ critique (diphase) montrant le développement de strates (effet collectif des vibrations sur un ensemble de bulles), sont à rapprocher du comportement observé auparavant par Evesque au cours d'une expérience au sol portant sur la mise en vibration d'un système de grains de sable saturé par un liquide. Il apparaissait alors une organisation de poussière de sable, avec un alignement, perpendiculairement à la direction de vibration.

La théorie qui a atteint une maturité suffisante pour guider l'optimisation du choix des valeurs des paramètres dans le cas d'une expérience mettant en jeu une bulle unique, devra être étendue au cas d'interaction de deux (ou de plusieurs) bulles. Dans le cas d'un système de deux bulles à l'intérieur d'un fluide soumis à des vibrations, les études préliminaires montrent que les bulles se déplacent de telle sorte que l'alignement de leurs centres soit perpendiculaire à la direction de vibration.

En ce qui concerne les expériences avec bulle unique, il apparaît nécessaire d'organiser le système diphase (par changement de la température de la cellule) après que les conditions de microgravité sont atteintes, et non avant (comme dans Mini-Texus). En fait, compte tenu du temps (non négligeable) de thermalisation de la cellule, seule la réalisation d'une expérience en station orbitale laisserait le temps nécessaire pour la formation du système diphase avec bulle unique, en apesanteur. Il est donc judicieux que le programme expérimental commencé dans Mini-Texus puisse se poursuivre au cours de missions de longues durées dans ISS.

L'état des connaissances théoriques et numériques obtenues dans ce domaine dans le cadre des recherches soutenues par le CNIES, permet d'apporter un guide précieux pour les expérimentateurs, pour leur permettre d'optimiser le choix des cas à traiter. La taille des bulles doit être suffisamment grande pour une bonne observation. Cependant, les études préliminaires (réalisées dans le cas d'une bulle entourée d'un liquide compris entre deux parois planes vibrantes) ont montré que la vibration crée une force d'attraction de la bulle par la paroi vibrante ; cette force est d'autant plus importante que la taille de la bulle est plus grande.

Lyubimov a montré également, de façon théorique, dans le cas d'une bulle sphérique dans un container sphérique, que la surface de la bulle peut être le siège de résonance paramétrique. Les expérimentateurs souhaiteraient "voir" le développement de cette instabilité, on cherchera donc à déterminer le plus précisément possible les conditions d'existence (valeurs critiques de l'amplitude et de la fréquence des vibrations) pour observer le développement de cette instabilité paramétrique.

Il faut signaler que les résultats fondamentaux obtenus jusqu'ici pourraient également permettre la fertilisation croisée dans d'autres domaines de recherche à caractère appliqué, comme la détermination des propriétés physiques de matériaux (viscosité, et tension de surface), conduite par le CENG. Cette technique est basée sur la mesure de l'amortissement des ondes surfaces générées à la périphérie d'une goutte du matériau à étudier, après excitation. La difficulté d'interprétation des résultats vient du fait que la plupart des théories sur le développement d'instabilités de surface sont limitées au cas d'une forme parfaitement sphérique. Ce qui n'est pas très précis dans le cas d'une expérience au sol (lévitation). Il

existe une autre limitation théorique signalée par Egry, qui pourrait avoir aussi une influence (y compris sur les expériences en microgravité): c'est la prise en compte d'un film de surface qui pourrait être le siège d'ondes « dilatationnelles » et à l'intérieur duquel pourrait s'effectuer un couplage entre les ondes de surface de ce type et les oscillations capillaires. Ce couplage pourrait conduire à un mécanisme additionnel d'amortissement des oscillations pouvant induire des erreurs dans l'évaluation de la relation entre l'amortissement des oscillations et la valeur des propriétés physiques à mesurer. Par ailleurs, il n'est pas exclu qu'une excitation contrôlée de la goutte, et l'analyse du comportement de l'interface excitée (résonance par ex.) pourraient fournir d'autres indications utiles pour la détermination de ces propriétés physiques.

Les principales directions d'études sont listées ci-dessous. Les priorités dans l'ordre de réalisation de ces différentes études seront établies en fonction des besoins des expérimentateurs.

• SYSTEMES DIPHASIQUES PRES DU POINT CRITIQUE

- stabilité d'une interface plane entre un liquide et sa vapeur saturée en statique et sous l'influence de champs gravitationnels modulés tenant compte du changement de phase évaporation-condensation et de la compressibilité : de manière à obtenir une relation de dispersion pour les oscillations libres de l'interface ; détermination du seuil d'excitation paramétrique des ondes de surface et de la longueur d'onde critique ;
- stabilité d'une inclusion sphérique d'une nouvelle phase, dans une cavité fermée, par rapport aux perturbations à symétrie sphérique ; étude tenant compte de la variation de la tension superficielle avec la température ;
- stabilité d'une inclusion sphérique d'une nouvelle phase, dans une cavité fermée, par rapport à des perturbations trans ou de forme imposée ;
- influence des vibrations haute fréquence sur la taille d'une inclusion stable d'une nouvelle phase (en état de quasi-équilibre) et sur la taille du nucléus critique.

• FLUIDES SUPERCRITIQUES

- états de quasi-équilibre de fluides supercritiques dans une couche plane avec des parois rigides maintenues à des températures différentes
- stabilité des états de quasi-équilibre par rapport à des perturbations hydrodynamiques ou thermiques : en microgravité et dans les conditions de gravité normale ;
- régimes non-linéaires, périodiques spatialement, de convection thermo-vibrationnelle près du seuil de l'instabilité ;
- étude numérique des régimes de convection thermo-vibrationnelle à amplitude finie.

• MATERIAUX GRANULAIRES

- stabilité de l'interface (suspension-liquide pur) sous l'influence de vibrations translationnelles de haute fréquence et de polarisation circulaire dans un plan horizontal ;
- stabilité de l'interface (suspension-liquide pur) dans le cas d'une superposition de vibrations dans le plan horizontal et dans le plan vertical.

Quelques références

- ALABUZFIEV A., KONOVALOV V., LYUBIMOV DV. (1998). *Deformation anti non-linear resonance of a drop in a vibration field. Vibrational Effects in Hydrodynamics*. Perm, PSU, 7-16
- BEYSENS B., GARRABOS Y., WUNBNBURGER R. (private communication).
- BEZDENEZHNYKH N.A., BRISKMAN VA., LYUBIMOV D.V., CHEREPANOV A.A., SHAROV M.T. (1984). *Control of fluid interface stability by vibration, electric and magnetic fields. III Ail-Union Seminar on hydromechanics and heat/mass transfer in microgravity*. Chernogolovka, 18

- CHELOMEI V.N. (1983). *Paradoxes in mechanics due to vibrations*, Dokl. AN SSSR, 270, p. 62
- ELLER A.I., CRUM L.A. (1970). *Instability of the motion of a pulsating bubble in a sound field*. J. Acoust. Soc. Am., **47**, p.762-767
- EVESQUE P., WANOVA A., KOZLOV V., LYUBIMOV D., LYUBIMOVA T., ROUX B. (1997). *Standing relief generation anti propagation in cavity filled with liquid and sand anti submitted to horizontal vibrations*. Proc. of the Joint Xth Europ. and VIth Russian Symp. Physical Sciences in Microgravity. St.Peterburg, Russia, p. 153-156 (1997)
- FARADAY M. (1831). *On a peculiar class acoustical figures anti on certain forms assumed by a group of particles upon vibrating elastic surface*. Phyl. Trans. Soc., London, **121**, p. 209.
- FARRIS S., BUGO J., REZKALLAH K. (1998). *An experimental study of bubble motion in an oscillating fluid under microgravity conditions*. Third Int. Cont On Multiphase Flow, ICMF-98, Lyon, Book of Abstracts, 1.2-3
- GERSHUNI G.Z., ZHUKI-IOVITSKY E.M. (1986). *Vibration-Induced Thermal Convection in Weightlessness*. Fluid Mech. - Soviet Res., 15, p.
- GERSI-JUNI G.Z., LYUBIMOV D.V. (1998). *Thermal Vibrational Convection*, Wiley & Sons
- KAPITSA P.L. (1951). *Dynamical stability of pendulum at oscillating point of suspension*. J. Experimental and Theoretical Physics, **21**, p. 588
- IVANOVA A., KOZLOV V., EVESQUE P. (1996). *Patterning of liquified sand surface in a cylinder filled with liquid and subjected to horizontal vibrations*. Europhys. Lett., **35**, p. 159-164
- IVANOVA, A.A., KOZLOV V.G., LYUBIMOV D.V., LYUBIMOVA T.P. (1998). *Mean flows in a cavity subject to torsional oscillations* (submitted to Physics of Fluids).
- KHENNER M., LYUBIMOV D., BELOZEROVA T., ROUX B. (1999). *Stability of plane-parallel vibrational flow in a two-layer system* (submitted to Europ. J. Meeh.).
- KOZLOV V.G. (1992). *Experimental investigation of vibrational convection in pseudoliquid layer*. Rev. Proc. of the 1st Int. Symp. on Hydromech. and Heat/Mass Transfer in Microgravity. Perm-Moscow, Russia, July 1991.Gordon & Breach science publishers, 57-61
- KOZLOV V.G. (1998). *On a vibrational thermal convection in a cavity subject to high frequency rotational swings*. Izv. AN SSSR, Mekh. Zhid. Gaza, **3**, p.13
- LONGUET-HIGGINS M.S. (1953). *Mass transport in water waves*. Phil. Trans. A, **245**, p. 535
- LYUBIMOV DV., CHEREPANOV A.A. (1986). *On the development of stationary relief on fluid interface in the vibrational field*. Izv. AN SSSR, Mekh. Zhid. Gaza, **6**, p. 8 (in Russian)
- LYUTBIIMOV D.V., SAVVINA M.V., CHEREPANOV A.A. (1987). *On quasi-equilibrium shape of a free surface in modulated gravity field*. The problems of hydromechanics and heat/mass transfer with free boundaries; Novosibirsk.
- LYUBIMOV D.V., CHEREPANOV A.A. (1989). *Flows of non-uniform fluid in a high-frequency vibrational field*. Convective Flows, Perm, p. 52-59 (in Russian)
- LYUBIMOV DV., LYUBIMOVA T.P. (1990). *One method for numerical modelling in the problems with deformable fluids interfaces*. Modelling in Mechanics, **4**, 136
- LYUBIMOV D.V. (1995). *Convective flows under the influence of high frequency vibrations*, Eur. J. Mech., B/Fluids, **14**, p. 439
- LYUBIMOV DV., CHEREPANOV A., LYUBIMOVA T.P., ROUX B. (1996). *Deformation of gas or drop inclusion in high frequency vibrational field* Microgravity Quarterly, **6**, p. 69-73
- LYUBIMOV D.V., CHEREPANOV A., LYUBIMOVA T.P., BEYSENS D., ROUX B., MERADJI S. (1997a). *Equilibrium and stability of drop in a vibrational field*. Proc. of the Joint Xth Europ. and VIth Russian Symp. on Physical Sciences in Microgravity. St. Petersburg, Russia, p. 66-73
- LYUBIMOV D.V., CHEREPANOV A.A., LYUBIMOVA T.P., ROUX B. (1997b). *Orienting effect of vibrations on interfaces*. C. R. Acad. Sci. Paris, t.**320**, Serie lib, p. 225-230
- LYUBIMOV D.V., KHENNER M.V., SHOTS M.M. (1998). *On stability of the liquid-liquid interface under tangential vibrations*. Izv. RAN, Mekh. Zhid. Gaza, **3**, p. 25-31 (in Russian); also reprinted in English in Fluid Dynamics.
- SCHLICHTING G. (1951). *Grenzschicht-Theory*. Braun, Karlsruhe
- WOLF G.H. (1961). *The dynamic stabilization of the Rayleigh-Taylor instability and the corresponding dynamic equilibrium*. Z. Physic, B.**227**, p. 291

Publications récentes

- D.V. LYUBIMOV, A.A. CHEREPANOV, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX. *Deformation of gas or drop inclusion in high frequency vibrational field*. Microgravity Quarterly, 6, 1996, pp. 69-73.
- EVESQUE P., IVANOVA A., KOZLOV V., LYUBIMOV D., ROUX B. *Vibrational Dynamics of a granular material saturated by fluid*. in: *Fluids in Space*, Proc. Scd Europ. Symp., edited by A. Viviani, Naples: Jean Gilder Congressi srl, (1996) 409-412.
- D.V. LYUBIMOV, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX, A.A. CHEREPANOV. *Flows induced by a heated oscillating sphere*. Izv. RAN, Mekh. Zhidk.i gaza, NI, 1996, pp.31-39. and Fluid dynamics, Vol.31, No.1, 1996, pp. 25-32.
- IVANOVA A., KOZLOV V., LYUBIMOV D., LYUBIMOVA T., MERADJI S., ROUX B. *Influence of Oscillating Solid Body Shape on the Time-average Flows Structure*. in: *Fluids in Space*, Proc. Second Europ. Symp., edited by A. Viviani, Naples: Jean Gilder Congressi srl, (1996) 159-166.
- O. BESSONOV, B. ROUX. *Optimization techniques and performance analysis for different serial anti parallel RISC-based computers*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1277, 168-174, 1997.
- D.V. LYUBIMOV, MV. KHENNER, B. ROUX, SV. SHKLYAEV. *The application of parallel computation techniques in the solution of certain hydrodynamic stability*. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1277, 40-44, 1997.
- D.V. LYUBIMOV, T.F. LYUBIMOVA, B. ROUX. *Mechanisms of vibrational control of heat transfer in a liquid bridge*. Int. J. Heat Mass Transfer, 40,4031-4042, 1997.
- D.V. LYUBIMOV, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX, D.N. VOLFSON. *Vibrational flows in the gap between two infinite cylinders*. Eur. J. Mechanics B/Fluids, 16,705-724,1997.
- EVESQUE F., IVANOVA A., KOZLOV V., LYUBIMOV D., LYUBIMOVA T., ROUX B., *Sand behaviour in cavity filled with liquid and submitted to horizontal vibrations*, in: *Fowder \& Grains 97*, Proc. 3d. Jnt. Conf. Powder \& grains; Durham NC (USA), edited by R.P. Behringer and J.T. Jenkins; A.A. Balkema/ Rotterdam (1997) 401-404.
- D.V. LYUBIMOV, A.A. CHEREPANOV, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX. *Orientating effect of vibrations on the interphase*. C.R.A.S., t. 325, Série fib, 391-396, 1997.
- A. IVANOVA, V. KOZLOV, D. LYUBIMOV, T. LYUBIMOVA, S. MERADJI, B. ROUX. *Structure of mean flows induced by vibrating bodies with edges of large curvature*. Jzvestiia RAN, Mekhanika zhidkosti i gaza, N5, 30-38, 1998.
- D.V. LYUBIMOV, D.A. BRATSUN, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX. *Influence of Gravitational Precipitation of solid particles on thermal buoyancy convection*. Adv. Space Res. 22,8, 1276-1270, 1998.
- D.V. LYUBIMOV, A.A. CHEREFANOV, T.F. LYUBIMOVA, D. BEYSENS, B. ROUX, S. MERADJI. *Behaviour of isolated bubble (or drop) in oscillating liquid*. Proc. ICMF-98: PDF/PDF600IPDF674 (juin 1998)
- D.V. LYUBIMOV, D.A. BRATSUN, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX, V.S. TEFLOV. *Non-isothermal flows of dusty media*. Proc. ICMF-98: FDFIPDF600/PDF676 (juin 1998)
- D.V. LYUBIMOV, T.F. LYUBIMOVA, A. CROELL, P. DOLD, K.W. BENZ, B. ROUX, *Vibration-induced convective flows*. Microgravity Science and Engineering, 11,2/3); April 1999.
- D.V. LYUBIMOV, T.P. LYUBIMOVA, A.A. CHEREFANOV, B. ROUX, *Vibration effects on heterogeneous systems*. Microgravity Science and Engineering, H, 2/3) ; April 1999.

Présentations dans les Congrès internationaux

- D.V. LYUBIMOV, T.P. LYUBIMOVA & B. ROUX, *Influence of gravitational precipitation of solid particles on thermal buoyancy convection*. 31th COSPAR, Birmingham, 1996, Abstracts, p393.
- DV. LYUBIMOV, A. CHEREFANOV, T. LYUBIMOVA, B. ROUX, *Deformation of gas or drop inclusion in high frequency vibrational field*. Proc. 3rd China-Japan Workshop Microgravity Science, Oct. 96, Xian (Chine), 136-141.
- DV. LYUBIMOV, T.F. LYUBIMOVA, S. MERADJI, B. ROUX, *Vibrational control of crystal growth from liquid phase*. 2nd Int. Workshop Modelling Crystal Growth, Oct. 96, Durbuy (Belgium).

- P. EVESQUE, A. IVANOVA, V. KOZLOV, D. LYUBLMOV, B. ROUX. *Sand behavior in cavity filled with liquid and submitted to horizontal vibrations*. 3rd Int. Conf. Micromechanics Granular Media, Mai 97, Durham, NC (USA).
- D. BEYSENS, YU. BRATUKHIN, D. LYUBIMOV, B. ROUX. *Gravity effects and instabilities in phase separating critical fluids*. Joint Xth European and VIth Russian Symp. Phys. Sci. in Microgravity, St. Petersburg, June 1997.
- D. LYUBIMOV, A. CHEREFANOV, T. LYUBIMOVA, S. MERADJI & B. ROUX. *Equilibrium and Stabilities of a drop in vibrational field*. Joint Xth European and VIth Russian Symp. Phys. Sci. Microg., St. Petersburg, June 1997.
- P. EVESQUE, A. IVANOVA, V. KOZLOV, D. LYUBIMOV, T. LYUBIMOVA & B. ROUX. *Standing relief generation and propagation in cavity filled with liquid and sand and submitted to horizontal vibrations*. Joint Xth European and VIth Russian Symp. Phys. Sci. in Microgravity, St. Petersburg, June 1997.
- D. LYUBIMOV, T. LYUBIMOVA, B. ROUX & D. VOLFSOHN. *Stability of like Couette-Taylor flow generated by the Schlichting mechanism*. 10th Couette-Taylor conferences, Paris, juillet 1997.
- D. LYUBIMOV, D. BRATSIJN, M. KHENNER, S. SHKLYAEV, D. VOLFSOHN, T. LYUBIMOVA AND I. WERTGEIM, V. MALYSFIKIN AND M. KRAEVA, B. ROUX, D. FOIJERE, O. BESSONOV. *Synthesis of the ITDC-203-82165 (PC2M2-NET) Parallel computing for continuous media mechanics; Russian-EU network'; ITDC final workshop - Euro-Par'97 - Passau (Germany), 26-29 August 97.*
- T.P. LYUBIMOVA, LI. WERTGEIM, B. ROUX. *Implementation of parallel algorithms to solve some boundary value problems of fluid dynamics by finite difference methods on distributed-memory multiprocessors*. ITDC final workshop - Euro-Par'97 - Passau (Germany), 26-29 August 97.
- D.V. LYUBIMOV, A.A. CHEREPANOV, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX. *Orientating effect of vibrations on the interfaces*. Congrès National Chinois sur la Microgravité, Août 1997.
- D.V. LYUBIMOV, M.V. KHENNER, B. ROUX, S.V. SHKLYAEV. *The application of parallel computation techniques to the solution of certain hydrodynamic stability*. PaCT'97, Yaroslav (Russie), 8-12 sept. 1997.
- D.V. LYUBIMOV, T.P. LYUBIMOVA A.A. CHEREPANOV, B. ROUX, D. BEYSENS. *Resonance oscillations and equilibrium shape of a liquid drop in a vibrational field*. Euromech, 3d Europ. Fluid Mech. Conf., Gottingen, 15-17 sept. 97.
- D.V. LYUBIMOV, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX. *Vibrational control of multiphase systems with liquid/liquid or liquid/gas interfaces*. First ESAFORM Conf. on Material Forming. Sophia-Antipolis, mars 1998.
- D.V. LYUBIMOV, A.A. CHEREPANOV, T.P. LYUBIMOVA, D. BEYSENS, B. ROUX, S. MERADJI. *Behaviour of isolated bubble (or drop) in oscillating liquid*. Third Int. Conf. on Multiphase Flow: ICMF'98, Lyon, 8-12 June 1998.
- D.V. LYUBIMOV, D.A. BRATSUN, T.P. LYUBIMOVA, B. ROUX, VS. TEPOV. *Non-isothermal flows of dusty media*. Third Int. Conf. on Multiphase Flow: ICMF'98, Lyon, 8-12 June 1998.

MODELISATION NUMERIQUE DE SYSTEMES COMPLEXES EN CONVECTION : FLUIDES SUPERCRITIQUES ET INTERFACES LIQUIDES

Patrick Bontoux

Groupe de Modélisation Numérique
Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre
(U.M.R. 6594 du C.N.R.S.)

1. - Ecoulements de fluides supercritiques

Cette recherche est menée depuis plusieurs années dans le cadre de conventions avec le CNES impliquant le Centre Spatial de Toulouse (B. Zappoli) et plusieurs chercheurs associés à l'IRPFIE (S. Amiroudine (Univ. Antilles-Guyane), LMM, LEGI). Elle concerne la compréhension des phénomènes de compétition entre les transferts de chaleur d'origine convective et ceux d'origine thermoacoustique (effet piston) dans des fluides supercritiques (en l'occurrence du CO₂). Cette étude est reliée aux expériences spatiales de D. Beysens et Y. Garrabos. Depuis quelques mois, on s'intéresse également à la modélisation des transferts de masse à une interface solide-fluide supercritique en vue d'étudier l'accélération de ces transferts par effet thermoacoustique ('effet piston massique'). Ce travail constitue une étude préparatoire à une expérience de transferts de masse dans un système source puits qui sera préparée à l'ICMCB mais son objectif est de façon plus générale la compréhension des phénomènes, en particulier les phénomènes de corrosion critique dont la vigueur n'est pas encore complètement élucidée.

1- Modélisation et méthode numérique

Une méthode de type volumes finis a été développée (S. Amiroudine, thèse de doctorat, 1995) pour résoudre les équations de Navier-Stokes 2D instationnaires, compressibles, couplées à l'équation d'énergie et à l'équation d'état de Van der Waals qui donne encore une bonne description phénoménologique du comportement du fluide aux distances du point critique (PC) auxquelles on travaille (de 1K à 0,5K de la température critique T_c). La viscosité et la capacité calorifique à volume constant sont supposées constantes et égales à leur valeur loin du PC tandis que la divergence au voisinage du PC de la conductivité thermique est représentée par une loi en $((T-T_c) / T_c)^{-1/2}$. La discrétisation temporelle des équations est réalisée au moyen d'un schéma de type Euler du 1^{er} ordre et la discrétisation spatiale utilise une méthode de volumes finis avec un schéma de loi de puissance. Le maillage est un maillage décalé et fortement resserré au voisinage des frontières afin de correctement décrire les zones de forts gradients qui s'y développent. La méthode numérique repose sur l'algorithme SIMPLER, couplé à une approximation à faible nombre de Mach.

2- Résultats

Parmi les résultats obtenus, nous relèverons deux problèmes de convection thermique.

- Cavité soumise à un chauffage latéral :

Dans le cas d'un chauffage latéral (les trois autres parois de la cellule étant adiabatiques), l'équilibre thermique s'établissant très rapidement par effet piston, un écoulement de couche limite intense se développe verticalement le long de la paroi chauffée. Des simulations fines, effectuées avec une résolution importante allant jusqu'à 120x120, ont mis en évidence l'existence d'un point de stagnation chaud lorsque l'écoulement heurte la paroi supérieure adiabatique ([1], [2]). Ce phénomène conduit à une structure convective composée de deux cellules contra-rotatives près de la paroi verticale. Cependant, ce phénomène de "surchauffe" n'apparaît pas lorsque la paroi supérieure est thermostatée. En présence d'une seconde paroi verticale froide isotherme, les solutions montrent l'existence d'instabilités dans la couche limite verticale le long de la paroi chauffée.

- Configuration de Rayleigh-Bénard :

En configuration de Rayleigh-Bénard, le chauffage de la paroi inférieure provoque, du fait des propriétés caractéristiques des fluides à proximité du point critique, l'apparition de deux fines couches limites thermique et de densité au voisinage des parois inférieure chaude et supérieure froide, séparées par le coeur de la cellule qui demeure quasi-isotherme. Suivant la proximité au point critique, lorsque le nombre de Rayleigh local dépasse une valeur critique, des instabilités convectives se développent dans une ou dans les deux couches limites. Ces instabilités se manifestent sous forme de "plumes" qui, par la suite, peuvent interagir dans le coeur de la cavité ou exciter les modes sous critiques de la seconde couche stable (Figure 1). Il est à noter cependant que nos simulations semblent indiquer que la couche limite froide est légèrement plus stable que la couche limite chaude.

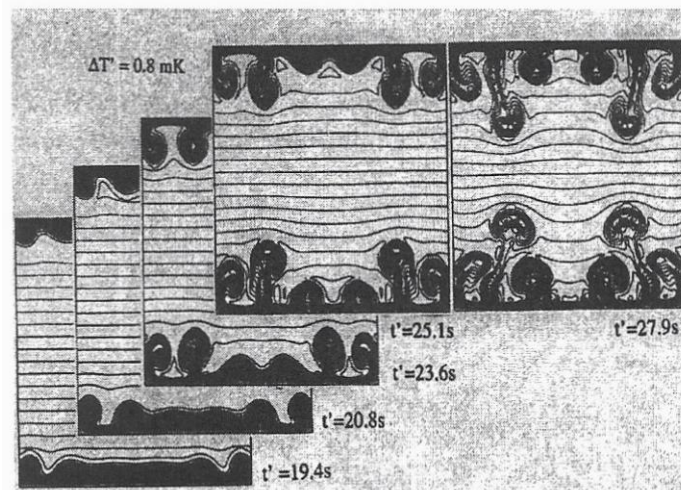


Figure 1 : Champ thermique à différents instants t' pour une distance au point critique de 1K et une différence de température de 0.8 mK.

Pour la couche limite chaude, les seuils critiques ont été comparés aux résultats d'analyse de stabilité de Gitterman et Schteinberg établis pour une couche de fluide limitée par deux plans horizontaux infinis. Un nombre de Rayleigh local, combinant le critère de Rayleigh classique (valable loin du PC) et le critère de Schwarzschild (valable au voisinage du PC), a été défini (cf. pour les fluides compressibles et permet de faire la jonction entre les deux zones de

prédominance de chaque critère. La valeur critique Ra de ce nombre a été calculée, pour les différents cas traités numériquement, à partir des solutions numériques avant l'apparition des instabilités. Dans la majorité des cas traités, la comparaison entre le Rayleigh local et le Rayleigh critique confirme la solution numérique obtenue ([5] – [8]).

Aucune étude de stabilité n'a été reportée dans la littérature pour la couche limite froide. Notre étude a montré cependant que, suivant la proximité au point critique et la différence de température appliquée entre les parois, cette couche limite devient instable indépendamment de la couche limite chaude. Ce phénomène a été observé également expérimentalement (Garrabos et al., 1998). En fait, la couche diffusive froide, qui est plus lourde que le fluide du coeur quasi- isotherme situé au dessous, donne naissance à des structures en forme de plumes dues à une instabilité gravitationnelle, ce qui est caractéristique d'un phénomène de type de Rayleigh-Taylor, bien que l'on ne puisse pas parler réellement d'instabilité de Ray puisqu'il n'y a pas de tension de surface, le fluide étant monophasique.

3- Références

Publications, Ouvrages :

- [1] ZAPPOLI B., AMIROUDINE S., CARLES P., OUZZANI J., (1996) «*Buoyancy-driven and acoustic thermal convection in a square cavity containing supercritical CO₂* » J. Fluid Mech., **316**, 53-72.
- [2] ZAPPOLI B., AMIROUDINE S., CARLES P., OUZZANI J., (1996) «*Numerical Solutions of Thermoacoustic and Buoyancy-Driven Transport in a Near-Critical Fluid* », L.N. Physics, n° **464**, Materials and Fluid under Low Gravity, Springer Verlag, 27-40.
- [3] AMIROUDINE S., LARROUDE P., BONToux P., ZAPPOLI B. (1996) «*Numerical Simulation of heat and mass transport of a near critical fluid* », Proceedings Second European Symposium Fluids in Space, A. Viviani ed. , Jean Gilder Edition, 37-42, Naples, Italy.
- [4] AMIROUDINE S., OUZZANI J, CARLES P., ZAPPOLI B. (1997) «*Numerical solution of 1-D unsteady near-critical fluid flows using finite volume methods* », Eur. J. Mech., B/Fluids, **16**, n° 5, 655-680.
- [5] LARROUDE P., AMIROUDINE S, ZAPPOLI B., BONToux P. (1997), «*Instabilités de Rayleigh-Bénard dans un gaz à proximité du point critique* », Proceedings Huitièmes Journées Internationales de Thermique, **2**, 69-78.
- [6] GILLY B., LARROUDE P., CHENNAFI A, RASPO I., EL GANAOUI M., BONToux P., (1998), «*Simulation numérique d'instabilités dans une configuration de Rayleigh Bénard pour un fluide supercritique*», Proceedings congrès Société Française des Thermiciens.
- [7] RASPO I., GILLY B., AMIROUDINE S., BONToux P., ZAPPOLI B., «*Simulation of convective instabilities inside a supercritical fluid layer under Rayleigh-Bénard configuration* », Journal de Chimie Physique, à paraître.
- [8] AMIROUDINE S., BONToux P., LARROUDE P., GILLY B., ZAPPOLI B., «*Direct numerical simulation of unsteady instabilities inside a near critical fluid layer under Rayleigh-Bénard configuration* », soumis à J. Fluid Mech.

Thèse :

AMIROUDINE S., «*Modélisation numérique des phénomènes de transport de chaleur et de masse dans les fluides supercritiques* », Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille II, 10 octobre 1995.

Colloques :

- LARROUDE P., AM S., BONToux P., ZAPPOLI B. (1996) '*Mechanisms of the onset of Ray instabilities for a near critical fluid*', 31st COSPAR Scientific Assembly, Birmingham, UK.
- LARROUDE P., GILLY B., AMIROUDINE S., ZAPPOLI B., OUAZZANI J., BONToux P. (1997) « *Simulation de phénomènes de convection et d'instabilité dans une couche de fluide supercritique différentiellement chauffée* », Journées d'Aussois du PRC-GDR PR2M CNRS.
- RASPO L., GILLY B., AMIROUDINE S., LARROUDE P., EL GANAOUI M., ZAPPOLI B., BONToux P. (1998) « *Simulation de structures convectives dans une couche fluide supercritique en configuration de type Rayleigh-Bénard* », Journées du PRC-GDR 1185 (PR2M) CNRS, Saint-Pierre d'Oléron.
- GILLY B., AMIROUDINE S., LARROUDE P., EL GANAOUI M., RASPO I., BONToux P., ZAPPOLI B. (1999), « *Instabilités convectives dans une cavité de CO₂ supercritique effet de distance au point critique par simulation numérique directe* », Journées SFT99, Arcachon, mai 1999.
- GILLY B., EL GANAOUI M., RASPO I., AMIROUDINE S., LARROUDE P., BONToux P., ZAPPOLI B. (1999), « *Etude numérique des instabilités convectives dans une couche fluide supercritique avec effet de distance au point critique* », 14ème Congrès Français de Mécanique, Toulouse, 30 août -3 septembre 1999.

2. - Interactions d'un bain fondu instationnaire avec une interface de solidification déformable

Cette recherche est menée dans le contexte d'un Programme de Recherche Franco-Allemand avec deux laboratoires de l'Université d'Erlangen-Nürnberg (F. Dürst, G. Millier ...) et un laboratoire de l'Université de Darmstadt (M. Schäfer) dans le cadre du Réseau CNRS de Laboratoires MFN-Europe avec le MENESR et la DFG (High Performance Computer Codes and Their Applications to Optimize Crystal Growth Processes). Plusieurs communications et publications, communes ont été présentées lors du sixième colloque Franco-Allemand CNRS DFG organisé à Marseille en novembre 1997 (Notes on Numerical Fluid Mechanics, Vieweg Verlag, vol.66, 1998), de la Conférence GAMM de Brême en avril 1998 (ZAMM) et du Colloque ECCOMAS d'Athènes en septembre 1998 (J. Wiley edition). Plusieurs échanges ont eu lieu durant l'année 1998 visite de l'Université d'Erlangen en février 1998 et de Darmstadt en juillet 1998, séjours de 4-5 mois de 2 chercheurs allemands à Marseille (janvier-sept. 1998).

Il s'agit de la modélisation numérique de la convection, de la conduction, des interfaces dans divers procédés d'élaboration de matériaux techniques de Czochralski, Bridgman, ... à partir d'un bain fondu, technique CVD ... dans le cas d'une phase vapeur. L'objectif est le contrôle passif puis actif (à terme) des phénomènes de croissance. Il s'agit en particulier dans le cas du Programme DFG-CNRS de conjuguer les compétences des divers laboratoires afin de constituer un outil commun reposant sur la complémentarité des formulations des équations (à plusieurs domaines, homogénéisation à un domaine ...), des méthodes numériques (spectrales, volumes finis...) et des modélisations (instabilités, instationnarité, turbulence dans le fluide, interfaces déformables, conduction, rayonnement ...).

1- Méthode d'enthalpie

La prise en compte des déformations d'**interfaces** et de leurs **interactions avec le bain fondu instationnaire** est actuellement assurée au moyen d'une méthode d'homogénéisation

(formulation enthalpique) et elle est utilisée pour la technique de Bridgman pour déterminer l'avancement et la déformation du front de solidification [3, 4, 5, 9]. Les régimes d'écoulement sont aussi déterminés par cette approche et l'interaction des régimes instationnaires avec le front de solidification déformable est interprétée [4]

Une prise en compte des aspects solutaux en croissance cristalline est en cours [2] traitant du phénomène de répartition de dopant dans le cristal et sur la forme de l'interface de solidification. Ces travaux devraient conduire à une prise en compte globale de la convection thermique et solutale et ses effets sur l'interface de solidification en lien avec des expériences (B. Billia MATOP-CNRS, Pr. Mi Université d'Erlangen, ...)

La méthode enthalpique permet de traiter des problèmes stationnaires et instationnaires de déformation d'interface d'une façon globale en considérant une modélisation continue entre la phase solide et la phase liquide, basée sur un modèle de type Brinkman-Darcy (milieu poreux). Le saut d'énergie dû à la chaleur latente de changement de phase est pris en compte dans l'équation de l'énergie sans avoir à écrire une condition de raccordement de type Stefan au niveau du front de solidification [3, 4, 9].

Elle repose sur une approximation de type volumes finis [8] des aspects numériques concernant la performance des schémas sont abordés en collaboration avec l'équipe de mathématiques appliquées du Centre de Mathématiques et d'informatique à Marseille (R. Herbin, T. Gallouet, ...). Plusieurs schémas de discrétisation en espace peuvent être utilisés (Centrés, Upwind, QUICK, ...). La méthode peut utiliser plusieurs techniques de résolution pour le couplage vitesse pression (PISO, SIMPLE, SIMPLER, ...). L'intégration en temps est réalisée avec un schéma implicite d'Euler du 2nd ordre. Elle est utilisée pour des simulations bidimensionnelles et axisymétriques. La méthode utilise des résolutions de systèmes tri-diagonaux (TDMA), des méthodes de type "gradient conjugué" (CGS avec matrice non-symétrique, BI-CGSTAB ...), des "solveurs" ILU (décomposition incomplète LU) ... Des maillages de 10 000 noeuds sont utilisés avec de l'ordre de 10 000 pas de temps (pour simuler un processus de translation du gradient thermique aux parois de l'ampoule) avec un processus itératif interne de l'ordre de 5 à 20 itérations (thèse El Ganaoui).

2- Résultats

La technique de Bridgman est le système le plus généralement étudié d'un point de vue fondamental, par l'expérience et par le calcul. Il s'agit d'une configuration (relativement) simple de croissance où le matériau et le bain fondu sont contenus dans une enceinte cylindrique et soumis à un champ thermique bien déterminé produit par un four. Le système bain fondu- cristal et le four sont en déplacement relatif.

L'uniformité de constitution du cristal et la régularité de l'interface sont les propriétés recherchées par le cristallographe. Le contrôle de la convection et des transferts en cours de solidification est considéré à l'aide de moyens artificiels comme l'effet d'un champ magnétique et l'utilisation d'expériences spatiales.

L'utilisation d'une technique spectrale multi domaine afin de mieux résoudre la singularité de contrainte thermique (isotherme-adiabatique) a permis de confirmer le phénomène en précisant les seuils 2D (Raspo, 1995). La prise en compte de la conduction dans les parois, avec cette méthode, a permis de mettre en évidence la persistance de cette transition et de montrer l'effet de la taille des parois et de la nature des parois (conductivité thermique). La prise en compte d'un champ magnétique d'axe vertical a permis de montrer la réduction obtenue de la convection lorsque l'on fait varier le nombre de Hartmann, depuis un régime instationnaire jusqu'à un régime dominé par la diffusion.

Dans le cadre de l'application de l'approche enthalpique à une configuration de type Bridgman, la méthode a été validée par rapport aux résultats de référence de R. Brown (MIT) dans le cas d'une configuration axisymétrique. Dans cette même configuration, l'étude a permis de relever l'effet du paramètre de translation de l'ampoule de croissance (nombre de Peclet) sur l'intensité de l'écoulement, révélée par le maximum de la fonction du courant. La prise en considération d'un champ magnétique vertical opposé à la direction du champ de gravité montre qu'on peut réduire l'intensité de convection en augmentant l'intensité du champ magnétique (nombre de Hartmann) [6] & (thèse El Ganaoui 1997).

Le problème de l'amplification d'une instabilité oscillatoire dans un bain fondu en interaction avec une interface de solidification est étudié dans le cas d'une technique de Bridgman en configuration verticale inverse. Deux modèles différents sont étudiés pour mettre en évidence des modes axisymétriques et asymétriques dans le bain fondu, Il a été montré dans le cas axisymétrique pour $Ra=10$ que les structures voisines du front de solidification interagissent avec ce dernier. Différentes concavités du front ont été notées lors des simulations (interfaces convexes, concaves et mixtes) [4] Le modèle bidimensionnel en phase fluide montre l'existence successive de modes symétriques stationnaires puis instationnaires tant avec la méthode spectrale de collocation Chebyshev (Larroudé, 1996) qu'en volumes finis (El Ganaoui, 1997). Ces comportements persistent à des seuils différents en présence de l'interface déformable (El Ganaoui, 1997). Un cycle d'hystérésis est observé autour du seuil instationnaire et correspond à la coexistence des deux modes symétrique et asymétrique. Outre la mise en évidence des modes asymétriques, le modèle bidimensionnel en présence d'interface a été utilisé pour prendre en compte les effets de chaleur latente (nombre de Stefan). On a dénoté un effet stabilisant du nombre de Stefan qui tend à maintenir les modes axisymétriques et stationnaires à des niveaux de Ra pour lesquels existent des comportements oscillatoires à grande chaleur latente (El Ganaoui, 1997).

L'aspect interaction d'une instabilité instationnaire avec le front de solidification a été étendu récemment au cas de conductivités thermiques différentes entre les phases liquide et solide, permettant ainsi de tenir compte de deux facteurs de déformation de l'interface de solidification, un directement lié aux matériaux (conductivité thermique) et l'autre lié à la dynamique du bain fondu. Le point sur ces résultats est fait dans un rapport de stage de DEA (Vaziri, 1998).

Les développements, prenant en compte la concentration du bain, mentionnés dans le rapport IDRIS 1997 sont avancés, en particulier la description des effets de la convection solutale sur une configuration de Bridgman Normale [1, 2]. En particulier la réalisation d'une simulation pour la croissance de l'alliage succinonitrile, en vue d'une comparaison avec des expériences menées au sein du groupe de B. Billia du laboratoire MATOP du CNRS. Les résultats mettent en évidence un fort couplage entre thermique et concentration de dopant pour ce type de matériaux transparents caractérisés par un nombre de Lewis important ($Le=114$). La compétition thermique et solutale est décrite. Le point sera fait dans la thèse d'A. Lamazouade dont la soutenance est prévue pour la fin de l'année 1999.

3- Références

Publications, Ouvrages :

[1] EL GANAOUI M., MAZEOROVA O. AND BONToux P., *Computer simulation of pure and alloys Melt Growth.*, J. Microgravity Quarterly, 7 (4), 1998 (in print).

- [2] LAMAZOUADE A., EL GANAOUI M., BONToux P., MORVAN D., « *Simulation numérique de la convection thermosolutale dans une ampoule de croissance cristalline* », Intl. J. Thermal Sciences (Revue Générale de Thermique), vol. 38, n°8, 1999.
- [3] MORVAN D., EL GANAOUI M., BONToux P., “*Numerical simulation of a two-dimensional crystal growth problem in a vertical Bridgman-Stockbarger furnace latent heat effects and crystal-melt interface*”, Int. J. Heat Mass Transfer, 42, 573-579, 1999.
- [4] EL GANAOUI M., P. BONToux, D. MORVAN, “*Localisation d’un front de solidification en interaction avec un bain fondu instationnaire*”, C. R. Acad. Sci., Paris, IIb, t.327,41-48, 1999.
- [5] EL GANAOUI M., D. MORVAN, P. LARROUDE, P. BONToux, “*Numerical simulation of gravitational effect during directional solidification*”, Adv. Space Res., 22 (8), Pergamon, 1175-1178, 1998.
- [6] M. EL GANAOUI, P. BONToux, D. MORVAN, “*Numerical solutions of moving boundary problem with thermal convection in the melt and magnetic field during directional solidification*” in Transfer Phenomena in Magnetohydrodynamic & Electroconducting Flows, eds. A. Alemany, Ph. Marty, J.P. Thibault, Fluid Mech. and Applications Series, Kluwer Acad. Press, 295-309, 1999.
- [7] MORVAN D., EL GANAOUI M., OUZZANI J., BONToux P., “*Numerical simulation of a 2D crystal growth problem in a vertical Bridgman-Stockbarger furnace, latent heat effects and crystal-melt interface morphology*”. Advanced Computational Methods in Heat Transfer, éd. L.C. Wrobel, G. Comini, C.A. Brebbia, A.J. Nowak, J. Wiley, 601-610, 1996.
- [8] EL GANAOUI M., LARROUDE P., ELENA L., MORVAN D., SCHIESTEL R., BONToux P., *Stiff problems in thermofluid dynamic using finite volume methods*. Finite Volumes For Complex Applications, ed. F. Benkhaldoun, R. Vilsmeier, Hermès, 717-725, 1996.
- [9] MORVAN D., EL GANAOUI M., MAZHOROVA O., OUZZANI J., LARROUDE P., BONToux P., *Numerical simulation of a crystal growth problem in a vertical Bridgman-Stockbarger furnace*. Proceedings Second European Symposium Fluids in Space, A. Viviani ed., Jean Gilder Edition, Naples, Italy, 1996, 238-244.

Colloques :

- EL GANAOUI M., LAMAZOUADE A., BONToux P. ET MORVAN D., *Modélisation numérique de la convection thermosolutale durant la solidification des métaux et des alliages*. Journées du PRC-GDR 1185 (PR2M) CNRS, Saint-Pierre d’Oléron, mai 1998.
- EL GANAOUI M., BONToux P. ET MORVAN D., *Modélisation numérique de phénomènes thermoconvectifs durant la solidification* Proceedings congrès Société Française des Thermiciens, 517-522, 1998.
- TIMCHENKO V., EL GANAOUI M., MORVAN D., LAMAZOUADE A., LEONARDI E., BONToux P., DE VAHL DAVIS G., *Numerical study of heat and mass transfer during directional solidification*, Proceedings first international Symposium Advances in Computational Heat Transfer, ed G. De Vahi Davis and E. Leonardi. Begel Publ, 508-515.
- EL GANAOUI M., MORVAN D., BONToux P., *Numerical simulation of solidification problems in material processing techniques*, Proceedings Third International Conference Phenomena in Magnetohydrodynamic Electroconducting Flows, Aussois, France, 343-349, 1997.
- EL GANAOUI M., EL GANAOUI O., LAMAZOUADE A., MORVAN D., BONToux P., *Modélisation et simulation numérique de phénomènes de solidification à partir d’un bain fondu en régime oscillatoire*. Journées d’Aussois du PRC-GDR PR2M CNRS, avril 1997.
- EL GANAOUI M., OUZZANI J., BRISSON O., LAUNAY J.C., *Numerical and experimental analysis of the Bridgman-Stockbarger solidification for the growth of AgGaS₂*

crystals in ampoule with conical shape. 2nd international works hop on Modelling in Crystal Growth, Durbuy, Belgium, 13-16 October 1996.

- MORVAN D., EL GANAOU M., BONToux P., *Application of a homogenisation method for the modeling of crystal growth problems using a Bridgman-Stockbarger technique*, 2nd international workshop on Modelling in Crystal Growth, Durbuy, Belgium, 13-16 October 1996.

- EL GANAOU M., MORVAN D., LARROUDE P., BONToux P., *Numerical simulation of gravitational effects during directional solidification*. 31st COSPAR Scientific Assembly, Birmingham, UK, 14-21 July 1996.

Thèses :

- EL GANAOU M., Modélisation numérique de la convection thermique instationnaire en présence d'un front de solidification déformable. Application à la croissance cristalline. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix H, 23 Octobre 1997

- MORVAN D., Modélisation numérique des systèmes complexe en biomécaniques, en science de matériaux et en combustion. Habilitation à diriger des recherches, soutenance le 23 Octobre 1998

- NAAMOONE M., Modélisation et optimisation numérique des réacteurs CVD, Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille 11,7 juillet 1997

Rapports :

- VAZIRJ S., Modélisation numérique de la solidification à partir du problème de Stefan diphasique. Application à la croissance cristalline. Rapport de stage du DEA de Mathématiques appliquées, CMI-IRPHE. Septembre 1998.

- GILLY B., RA I., LARROUDE PH., AMIROUDINE S. EL GANAOU M. ET BONToux. Etude des seuils d'instabilités et des régimes critiques par simulation numérique pour des fluides à proximité de leur point critique en configuration de Rayleigh-Bénard. Rapport de contrat CNES 1996-1997. N° 96/CNES/0301, 1998.

- BONToux P. et al. High Performance Computer Codes and their Applications to Optimize Crystal Growth Process Rapport DFG/CNRS 1996-1997. Octobre 1997.

- LARROUDE PH., AMIROUDINE S., EL GANAOU M., RASPO I., OUAZZANI., J. BOWROUX P. ET MORVAN D. Modélisation numérique du transport dans les fluides supercritiques en 1g et micro-g. Modélisation des transferts de chaleur et de masse pour la solidification dirigée en microgravité. Rapport du contrat CNES 1995-1996. N° 95/CNES/0293, 1997.

INSTABILITES, CROISSANCE CRISTALLINE ET MICROGRAVITE

Daniel Henry, Hamda Benhadid

Laboratoire de Mécanique des fluides et d'Acoustique
UMR CNRS 5509
Ecole Centrale de Lyon
Université Claude Bernard (Lyon I)
B.P. 163
69131 Ecully cedex

Introduction

Nous présentons dans ce rapport le travail réalisé par notre équipe durant les quatre années du GDR PR2M. Ce travail porte sur l'étude de la convection en phase liquide dans le cadre de la cristallogénèse en situation de gravité normale ou de microgravité. Les domaines abordés concernent la convection stationnaire ou oscillatoire en configuration de Bridgman et son contrôle par application d'un champ magnétique, la solidification des alliages en configuration de Bridgman, et les instabilités thermosolutales.

Ces études sont menées dans notre équipe par voie théorique et par simulation numérique. Elles se sont développées en relation avec des équipes d'expérimentateurs, équipes du Professeur R. Moreau du Madylam de Grenoble, du Docteur J.P. Garandet du CEN Grenoble et du Professeur J. Bert de l'Université Lyon 1 dans le cadre de programmes de recherche soutenus par le CNES, équipes étrangères de T. Mullin de l'Université de Manchester et de J.C. Legros de l'Université Libre de Bruxelles dans le cadre de réseaux européens.

1 - Etude de la convection en configuration de Bridgman contrôlée par champ magnétique

1.1 - Convection oscillatoire en cavité horizontale

Pour ces cavités chauffées longitudinalement, lorsque le nombre de Grashof (dépendant de la différence de température appliquée et de la nature du fluide) est augmenté, l'écoulement stationnaire présente un caractère tridimensionnel plus marqué, et au-delà de certaines valeurs critiques cet écoulement devient oscillatoire voire chaotique. Des études en géométrie parallélépipédique ont montré que la transition correspond à une oscillation du rouleau convectif 10. Pour la géométrie cylindrique, différents types d'écoulements oscillatoires sont obtenus suivant la longueur de la cavité et la valeur du nombre de Prandtl. Ces écoulements ont été caractérisés par le type de symétries de l'écoulement stationnaire qui sont brisées au seuil oscillatoire. Une compréhension approfondie a pu être obtenue par une étude énergétique basée sur des bilans d'énergie fluctuante autour de l'état stationnaire proche du seuil critique. Ces différentes instabilités sont en général liées au cisaillement de l'écoulement moyen (instabilités de type Helmholtz). Elles apparaissent en des points de bifurcation de Hopf qui dans certains cas peuvent être sous-critiques donnant lieu à un phénomène d'hystérésis [5].

La détermination des seuils de transition et la caractérisation des types de comportement oscillatoire obtenus en fonction du rapport de forme de la cavité et du nombre de Prandtl va donner lieu à la rédaction prochaine d'une publication de synthèse.

1.2 - Contrôle de la convection stationnaire par champ magnétique

L'action d'un champ magnétique sur les mouvements convectifs d'un liquide métallique électriquement conducteur a été étudiée pour des cavités allongées chauffées longitudinalement. Dans cette configuration de type "Bridgman horizontal", les résultats montrent que l'action du champ magnétique diffère suivant la nature de la géométrie de la cavité (cavités parallélépipédiques ou cavités cylindriques) et des forces motrices génératrices du mouvement (forces volumiques, forces surfaciques). La direction d'application du champ magnétique (verticale, longitudinale ou transverse) de même que le type de condition électrique aux parois (parois électriquement isolantes ou conductrices) jouent aussi un rôle important. Ces résultats sont présentés dans des articles publiés dans "J. Crystal Growth" [2] et "J. Fluid Mechanics" [3, 4 et 13].

1.3 - Contrôle de la convection stationnaire : champ magnétique non-uniforme

Dans les expériences de cristallogenèse, le parallélisme du champ magnétique n'est jamais atteint uniformément sur tout le dispositif expérimental. L'effet de cette non-uniformité, étudié pour une configuration cylindrique horizontale, est de fortement diminuer l'amortissement dû au champ magnétique. Cette influence s'exerce aussi au niveau de la structure du courant électrique induit ce qui entraîne des modifications importantes de la structure de l'écoulement. Une publication sur ce thème a été réalisée à l'occasion du COSPAR [8].

1.4 - Stabilité des écoulements parallèles sous champ magnétique

L'étude de stabilité linéaire des écoulements parallèles soumis à un champ magnétique vertical a mis en évidence, dans le cas d'une cavité rigide, deux types d'instabilité, une instabilité bidimensionnelle de type stationnaire qui apparaît pour les faibles valeurs du nombre de Prandtl, et une instabilité tridimensionnelle de type oscillatoire qui apparaît sur le domaine des nombres de Prandtl plus élevés. Ces différents seuils d'instabilité croissent lorsque le nombre de Hartmann est augmenté en raison de l'effet de stabilisation du au champ magnétique. De plus, le nombre de Prandtl de transition entre les seuils bidimensionnels et tridimensionnels évolue vers les faibles valeurs du nombre de Prandtl. Des résultats concernant le cas de la cavité avec surface libre, ainsi que le cas où on introduit une force supplémentaire due à la tension de surface ont confirmé l'effet stabilisant du champ magnétique [12].

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence d'un confinement transverse. Les champs de base bidimensionnels, vitesses, température et potentiel électrique, sont déterminés analytiquement pour différentes conditions aux limites thermiques, dynamiques et électriques. Les cas d'une cavité entièrement confinée et d'une cavité avec une surface supérieure libre indéformable avec ou sans tension de surface sont ainsi traités. De bonnes comparaisons entre ces champs de base analytiques et ceux déduits de simulations 3D dans le cas de cavités allongées ont été obtenues. La stabilité de ces champs de base a d'abord été étudiée de façon analytique approchée et nous avons vu que le confinement transversal sélectionne le nombre d'onde de l'instabilité [19]. Une étude de stabilité numérique est en cours et devrait permettre de préciser les comportements en fonction du rapport de forme transverse.

1.5 - Instabilités convectives en cavité cylindrique chauffée par le bas : stabilisation par champ magnétique

Dans ces cavités cylindriques et en absence de champ magnétique, le premier seuil d'instabilité qui détermine le mode critique donnant naissance à l'écoulement correspond à un mode axisymétrique

($m=0$, avec une variation azimutale en $\exp(im\theta)$) pour les petits rapports de forme ($A < 0.55$) et à un mode asymétrique à un rouleau ($m=1$) pour les rapports de forme plus grands. Un autre mode (non critique) correspond au mode asymétrique $m=2$. Pour $A=0.5$, lorsque le nombre de Rayleigh Ra est augmenté, le mode convectif observé au seuil, $m=0$, perd sa stabilité avec brisure de la symétrie de rotation vis à vis de perturbations de type $m=2$. En ce point de bifurcation secondaire (de type fourche circulaire), une infinité de solutions équivalentes à une rotation près (de type $m=02$) sont obtenues. La variation de ce point de bifurcation secondaire en fonction du nombre de Prandtl et en particulier sa limite pour $Pr=0$ donnent des informations intéressantes [15].

L'application d'un champ magnétique vertical ne modifie pas les symétries des écoulements et les mêmes modes sont obtenus. Ces modes ne sont toutefois pas identiquement stabilisés si bien que lorsque l'intensité du champ est augmentée le mode $m=2$ devient le mode critique sur une plage de valeurs de forme autour de $A=0.55$. L'application d'un champ horizontal est plus subtile car certaines symétries des écoulements sont brisées, en particulier l'invariance par rotation. Les modes de convection deviennent des modes orientés pour lesquels il y a levée de la dégénérescence liée à la rotation. Le mode axisymétrique disparaît devenant un mode $m=02$, tandis que les autres modes ($m=2$ et 1) qui étaient définis à une rotation azimutale près ont maintenant seulement deux orientations possibles, parallèle ou perpendiculaire à la direction de B . Les trois modes originaux ($m=0, 1, 2$) en donnent maintenant cinq deux modes $m=1$, deux modes $m=02$ et le mode $m=2$. Ces modes sont différemment stabilisés, faiblement si l'axe des rouleaux est parallèle à B , fortement si cet axe est perpendiculaire. Pour $A=0.5$, la convection prend donc naissance sous la forme d'un mode $m=02$ (axe des rouleaux parallèle au champ appliqué), et le point de bifurcation secondaire disparaît. En fait, la bifurcation fourche circulaire devient imparfaite, ce qui entraîne l'existence d'une branche instable déconnectée et la persistance d'une seule solution stable, le mode initial $m=02$. Un modèle simple nous a permis de bien comprendre l'influence de l'imperfection due au champ magnétique sur la bifurcation fourche circulaire [6, 7, 16, 18].

2 - Solidification des alliages en configuration de Bridgman : sollicitations instationnaires.

Durant la solidification dirigée des alliages, le phénomène de rejet de soluté au niveau du front de croissance combiné avec l'action de la convection dans la phase liquide sont responsables d'inhomogénéités de répartition du soluté appelées macroségrégation. Nos études les plus récentes concernent dans la configuration de Bridgman horizontale la caractérisation de la réponse en ségrégation à des sollicitations instationnaires, ces sollicitations pouvant venir d'imperfections du système mécanique de tirage utilisé ou de l'instationnarité de la convection dans la phase liquide.

2.1 - Configuration de Bridgman verticale

Dans le cas vertical, la solidification en cavité cylindrique a été abordée en supposant l'axisymétrie des écoulements. Le solide qui cristallise est situé en bas de la cavité ce qui rend la situation thermiquement stable. Le mouvement de convection est généré par les gradients radiaux de température et de concentration conséquences de la forme courbe de l'interface mobile. Cette forme est supposée fixée pour chaque simulation de solidification. Une étude complète de la ségrégation radiale a été réalisée dans le cas des alliages dilués pour un grand éventail de régimes convectifs (du régime diffusif au régime fortement convectif), et a permis la détermination de lois de variation caractéristiques. Une publication sur ces résultats est parue dans "J. Crystal Growth" [1].

2.2 - Sollicitations instationnaires en configuration de Bridgman horizontale

En configuration de Bridgman horizontale et dans le cas d'alliages dilués, nous avons cherché à voir comment variait la macroségrégation en réponse à des sollicitations instationnaires. Deux types de sollicitations ont été étudiées : vitesse de tirage oscillatoire ou champ convectif oscillatoire, et nous avons analysé les réponses aussi bien au niveau de la ségrégation longitudinale que de la ségrégation radiale. D'une façon générale, les résultats montrent que la réponse aux variations d'amplitude est linéaire, tandis que la réponse en fonction de la fréquence montre un filtrage pour les hautes

fréquences. Ces réponses peuvent donc se caractériser par des comportements en filtres linéaires. Pour la ségrégation longitudinale, les comparaisons avec les modèles analytiques donnant des variations en filtre d'ordre 1/2 pour la vitesse de tirage fluctuante et en filtre d'ordre 1 pour la vitesse convective fluctuante sont très bonnes, particulièrement pour le cas de la vitesse de tirage fluctuante. En ce qui concerne la ségrégation radiale pour laquelle n'existe pas de modèle analytique, les résultats sont proches de comportements en filtres mais les caractéristiques de ces filtres n'ont pu être encore justifiées de façon claire [17].

3 - Instabilités de Marangoni-Bénard et Rayleigh-Bénard avec effet Soret

Nous avons étudié la convection avec effet Soret, soit dans une couche liquide confinée chauffée par un flux de chaleur constant au niveau de la surface libre supposée indéformable (situation de Marangoni-Bénard), soit dans une cavité cylindrique fermée à section carrée (situation de Rayleigh-Bénard).

3.1 - Instabilités de Marangoni-Bénard

Nous avons utilisé pour cette étude une méthode de continuation qui permet de suivre les branches de solutions stationnaires stables et instables (solutions du problème mathématique) et de localiser avec précision les points de bifurcation. Pour des cavités bidimensionnelles, cette méthode de continuation nous a permis de déterminer l'évolution précise des structures d'écoulement au delà des seuils de stabilité avec l'enchaînement des différentes branches de solutions. Dans les cas avec effet Soret, les diagrammes de bifurcation nous montrent que lorsque l'effet Soret est important la première branche de solutions est bien comme attendu par les analyses de stabilité (nombre d'onde nul) une branche de situations convectives à un rouleau, mais qu'une branche de solutions à deux rouleaux apparaît assez rapidement. Des résultats particulièrement intéressants ont été obtenus pour les instabilités oscillatoires qui apparaissent comme première instabilité pour des coefficients de Soret négatifs. Une disparition du cycle limite par un cycle hétéroclinique en un point de bifurcation global a en particulier été mise en évidence. Un article de synthèse sur les résultats bidimensionnels est paru dans "J. Fluid Mechanics" [11] L'étude des situations tridimensionnelles a révélé que la structure (multi rouleaux) de l'écoulement dans les cavités confinées transversalement est globalement similaire à celle obtenue dans le cas bidimensionnel. Les diagrammes de bifurcation restent qualitativement de même forme, avec toutefois une augmentation des valeurs des seuils de bifurcation due à l'effet de confinement [9]. Dans les cavités à section horizontale canée, l'effet des symétries est particulièrement intéressant et conditionne beaucoup l'évolution et l'enchaînement des solutions. Les résultats sur ces dernières situations sont encore à préciser.

3.2 - Instabilités de Rayleigh-Bénard

Des études expérimentales sur la mesure de l'effet Soret et sur la convection avec effet Soret ont été réalisées par une méthode d'interférométrie holographique au Département de Physique des Matériaux de l'Université Lyon 1 dans l'équipe de J. Bert. Notre équipe a participé à la définition, au suivi et à l'interprétation de l'étude de convection. Des résultats expérimentaux originaux ont été trouvés sur la convection oscillatoire avec effet Soret [14] Des calculs sont actuellement réalisés dans notre équipe afin de pouvoir mieux analyser et interpréter ces résultats expérimentaux.

Conclusion

Ces études sur la convection dans le cadre de la cristallogénèse ont permis de contribuer à une meilleure compréhension du rôle de la convection, ses caractéristiques, les structures d'écoulement générées, les perturbations créées au niveau des répartitions d'impuretés, les instabilités pouvant apparaître. Elles ont aussi permis de contribuer au développement des moyens de contrôle de cette convection par une caractérisation fine et précise des modifications pouvant être amenées par l'application d'un champ magnétique. Ces études ont été réalisées dans une démarche collective associant expérimentateurs, théoriciens et numériciens, et autour de projets d'expériences spatiales. Elles ont aussi pu donner lieu à des publications dans des journaux scientifiques.

Remerciements

Nous voulons remercier Dr D. Camel et Dr J.P. Garandet du CEN Grenoble, Pr R. Moreau du Madylam de Grenoble, Dr T. Alboussière de l de Cambridge, Pr T. Mullin de l de Manchester, Dr B. Roux de l'IMF Marseille, Pr R.L. Sani de l du Colorado, Dr L. Tuckerman du LIMSI Orsay et Pr J.C. Legros du Microgravity Research Center de Bruxelles pour leur soutien, leurs suggestions et les discussions de travail fructueuses. Nous remercions le Centre National des Etudes Spatiales pour le soutien financier de ces études ainsi que la Communauté Européenne et PESA pour l'aide apportée à travers les réseaux de recherche européens. Nous sommes redevables au conseil scientifique de l'IDRIS pour l'attribution d'heures de calcul sur les ordinateurs Cray YMP C98 et SP2 qui nous ont permis de réaliser nos travaux de simulation.

Publications

- [1] KADDECHE, S., GARANDET, J.P., BARÂT, C., BENFJADID, H. and HENRY, D. (1996) *Interfacial curvature and convection related macrosegregation in the vertical Bridgman configuration*, J. Crystal Growth **158**, 144-152.
- [2] BENHADID, H. and HENRY, D. (1996) *Numerical simulation of convective three-dimensional flows in a horizontal cylinder under the action of a constant magnetic field*, J. Crystal Growth **166**, 436-445.
- [3] BENHADID, H., HENRY, D. and KADDECHE, S. (1997) *Numerical study of convection in the horizontal Bridgman configuration under the action of a constant magnetic field. Part 1: Two-dimensional flow*, J. Fluid Mech. **333**, 23-56.
- [4] BENHADID, H. and HENRY, D. (1997) *Numerical study of convection in the horizontal Bridgman configuration under the action of a constant magnetic field Part 2: Three-dimensional flow*, J. Fluid Mech. **333**, 57-83.
- [5] BENHADID, H., FIENRY, D. and TOUIHRI, R. (1997) *Unsteady three-dimensional buoyancy-driven convection in a circular cylindrical cavity and its damping by magnetic field*, J. Crystal Growth **180**, 433-441.
- [6] TOUIHRI, R., BENHADID, H. and HENRY, D. (1997) *Onset of convective instabilities in a cylinder heated from below: stabilization by a vertical or horizontal magnetic field*, Proceedings of the third international conference on "Transfer phenomena in magneto hydrodynamic and electro-conducting flows", **Vol. 2**, pp. 363-369, MHD Pamir publications.
- [7] TOUIHRI, R., BENHADID, H. and HENRY, D. (1998) *Effect of a constant and uniform magnetic field on Rayleigh-Bénard instabilities in cylindrical cavities*, Advances in Fluid Mechanics II, Computational Mechanics Publications, **Vol. 21**, pp. 161-170.
- [8] BENHADID, H., TOUIHRI, R. and HENRY, D. (1998) *MHD damped convection under non uniform magnetic fields*, COSPAR, in Adv. Space Res., **Vol. 22**, No 8, pp. 1213- 1216.
- [9] BERGEON, A., HENRY, D. and BENHADID, H. (1998) *2D and 3D Marangoni pattern selection in shallow cavities*, COSPAR, in Adv. Space Res., **Vol. 22**, No 8, pp.1223-1226.
- [10] HENRY, D. and BUFFAT, M. (1998) *Two- and three-dimensional numerical simulations of the transition to oscillatory convection in low-Prandtl-number fluids*, J. Fluid Mech. **374**, 145-171.
- [11] BERGEON, A., HENRY, D., BENHADJD, H. and TUCKERMAN, L.S. (1998) *Marangoni convection in binary mixtures with Soret effect*, J. Fluid Mech. **375**, 143-177.

- [12] BENHADID, H., KADDECHE, S. and HENRY, D. (1998) *Oscillatory convection in a cylindrical cavity and stability of MHD Hadley flows*, Proceedings of the eight Beer Sheva international seminar on MHD flows and turbulence. AIAA publications, **Vol. 182**, Progress in Fluid Flow Research: Turbulence and Applied MIHD, pp. 801-816.
- [13] JUEL, A., MULLIN, T., BENHADID, H. and HENRY, D. (1999) *Magnetohydrodynamic convection in molten gallium*, J. Fluid Mech. **378**, 97-118.
- [14] COLOMBANI, J., LEBON, M.J., DEZ, H., BERT, J., DUPUY-PBILON, J. and HENRY, D. (1999) *Etude par interférométrie holographique de la convection dans un mélange binaire confiné présentant un effet Soret*, Entropie **214**, p. 37.
- [15] TOUHRI, R., BENHADID, H. and HENRY, D. (1999) *On the onset of convective instabilities in cylindrical cavities heated from below. I Pure thermal case*, Phys. Fluids **11**, No 7.
- [16] TOUHRI, R., BENHADID, H. and HENRY, D. (1999) *On the onset of convective instabilities in cylindrical cavities heated from below. II Effect of a magnetic field*, Phys. Fluids **11**, No 7.
- [17] HADDAD, F., GARANIDET, J.P., HENRY, D. and BENHADID, H. (1999) *Analysis of the unsteady segregation in crystal growth from the melt: Part 1. Fluctuating interface velocity*, Accepted in J. Crystal Growth.
- [18] TOUHRI, R., BENHADID, H. and HENRY, D. (1999) *Stabilisation by magnetic field of the convection in a cylindrical cavity heated from below*, Accepted in J. Chimie Physique.
- [19] PUTELAT, T., KADDECHE, S., BENHADID, H. and HENRY, D. (1999) *Hadley circulation in rectangular enclosure with vertical magnetic field*, Accepted in J. Chimie Physique.

MECANIQUE DES FLUIDES ET MATERIAUX

Eric Arquis

Laboratoire Modélisation Avancée des Systèmes Thermiques et Ecoulements Réels
(MASTER)
Ecole Nationale Supérieure de Chimie et de Physique de Bordeaux (ENSCP)
B.P. 108
33402 Talence cedex

1. – Introduction

De nombreux travaux ont concerné et concernent toujours les interactions entre la convection de différentes origines (thermique, solutale, Marangoni, magnétique) et la cristallogénèse. Des résultats marquants ont été obtenus, notamment par des équipes membres de ce GDR (IRPHE, ECL, EPM-MADYLAM), sur la structuration des écoulements. Plus récents et donc plus rares sont les travaux où l'impact des écoulements sur les interfaces de croissance est analysé en différentes configurations géométriques : 2D cartésien, 2D axisymétrique, 3D cartésien et cylindrique. On retrouve sur ce thème les équipes IRPHE, IS1TEM (non présente dans ce GDR) et nous-même. La forme des interfaces est en effet connue pour favoriser un certain type de facettage de cristaux et le développement de défauts notamment mécaniques.

Si donc le couplage écoulement — forme constitue un capital maintenant bien acquis par la communauté scientifique française, le couplage entre d'une **part la composition chimique du cristal**, son **état mécanique** et d'autre part les **transferts thermiques** et les **écoulements** est quant à lui beaucoup plus rarement étudié et quantifié. C'est pourquoi nous avons orienté notre recherche sur ces aspects, en envisageant des couplages partiels puis des couplages plus globaux pour se rapprocher des configurations réelles et des préoccupations complètes

2. - Résultats

- Couplage Thermique-Ecoulement

Un premier type de question auquel nous avons voulu répondre est l'effet de la forme de l'interface de croissance sur la structuration des écoulements, Il n'était en effet pas très net de déterminer si un écoulement par exemple tridimensionnel en présence d'une interface droite le restait si sous l'effet de la convection, la même interface devenait concave ou convexe. Une telle investigation a été conduite en se plaçant dans l'hypothèse d'une cinétique de croissance très faible qui permet de négliger en première approximation les effets de chaleur latente inhérents au changement de phase. Nous avons pu montrer [1] qu'en effet, il existe une courbure limite telle que l'écoulement passe d'un écoulement axisymétrique (généralement admis, car plus facile à simuler : 2D !) à un écoulement tridimensionnel (voir figure 4 dans référence [1]).

Nous avons mentionné ci-dessus que nous avons pris l'hypothèse d'un dégagement de chaleur négligeable lors du changement de phase : cette hypothèse peut être mise en défaut

dans certains cas, et il est donc apparu nécessaire d'améliorer la simulation numérique par la prise en compte de ce phénomène. Ceci a été fait par l'implémentation d'une méthode de la littérature (méthode volumique de nature enthalpique proposée par VOLLER), que nous avons adapté pour le traitement de problèmes non homogènes tels que la solidification en milieu hétérogène [2]. Nous avons participé au « benchmark » organisé au sein du réseau « AmETh » par D. Gobin et P. Le Quéré qui avait pour but de comparer les résultats obtenus par différentes méthodes... et différentes équipes sur un problème a priori simple : la fusion d'un domaine rectangulaire en présence de convection. Nos résultats [3] se placent bien par rapport aux autres équipes, notamment celles qui utilisent des méthodes a priori plus précises, mais plus lourdes et coûteuses (voir figure 6 dans référence [3]).

Couplage Thermique — Solutal en régime diffusionnel (« Double-Diffusion »)

Il est très important en cristallogénèse de connaître avec grande précision la distribution des « impuretés » dans le cristal : ceci conditionne le volume utile du cristal obtenu et aide à l'amélioration du procédé (intérêt à la réduction ou à l'augmentation de la convection ?). Or, lors de la solidification d'un liquide composé pour l'obtention de cristaux, d'alliages, il se produit un phénomène de rejet ou d'incorporation de soluté : en d'autres termes, le solide formé n'a pas la composition du fluide en avant du front. Ce problème est a priori difficile à traiter, car il fait intervenir un couplage température — concentration via le diagramme de phase du mélange. Nous avons mis au point une méthode originale permettant de traiter de manière assez légère ce phénomène, qui s'inspire de la méthode de traitement du problème thermique de VOLLER : cette méthode a été présentée et validée sur des problèmes de la littérature [4] et [5] en régime de diffusion pure. (Voir Figure 2 dans référence [4]. La comparaison avec des méthodes précises a également été faite (Figure 1 ci-dessous)

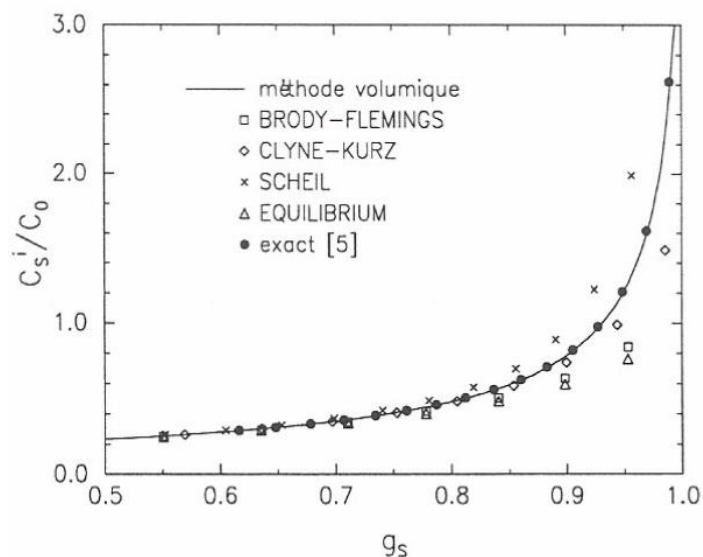


figure 1 : comparaison entre les différents modèles et la méthode volumique

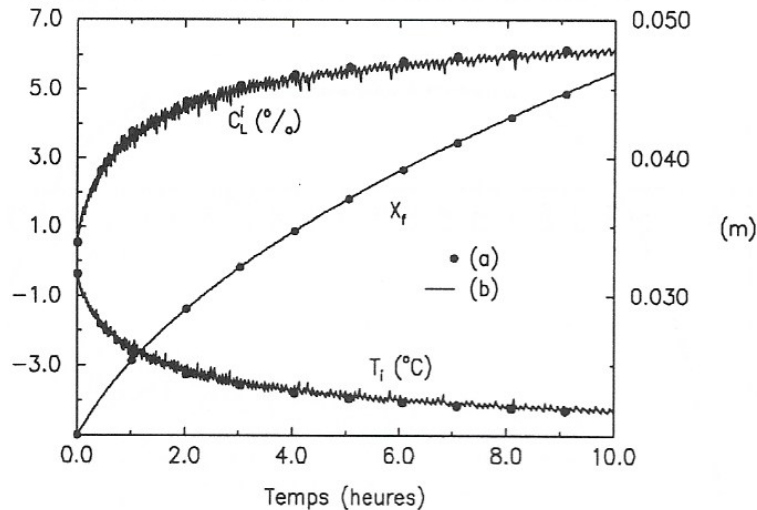


figure 2 : concentration liquide et température
à l'interface de solidification, position de cette interface ;
(a) méthode utilisant les transformées de Landau,
(b) méthode volumique

- Couplage Thermique - Solutal - Ecoulement

La méthodologie étant validée, nous avons ensuite entrepris la simulation de configurations où la convection d'origine à la fois thermique et solutale se superpose aux phénomènes de double-diffusion. L'effet des mouvements convectifs se manifeste par une éventuelle disparité de la concentration le long du front (ségrégation radiale) qui se combine avec une évolution de la concentration sur le front au cours du temps (ségrégation axiale). Pour l'instant, les résultats en configuration de cristallogenèse n'ont pas encore fait l'objet dans une publication parue, mais sont consignés dans la thèse d'Olivier BERTRAND.

- Couplage Thermomécanique – Solidification

Comme nous l'avons souligné en introduction, un autre souci en cristallogenèse est de garantir un niveau de contraintes mécaniques bas : il n'est malheureusement pas rare qu'un cristal dont l'élaboration s'est passée nominale par rapport aux exigences de composition, n'éclate lors de son refroidissement du fait du piégeage de contraintes. Nous avons bénéficié de travaux connexes (thèse H. MASSE, en collaboration avec l'ISITEM Nantes) menés au laboratoire sur la simulation en Mécanique du Solide par une technique de Volumes Finis pour l'incorporer dans notre outil de prédiction. On peut par exemple produire après solidification d'une lame de matériau par un refroidissement (non uniforme ici entre face gauche et droite), le profil des contraintes résiduelles lorsque la pièce retrouve une température uniforme (cf. Figure 3 ci-dessous).

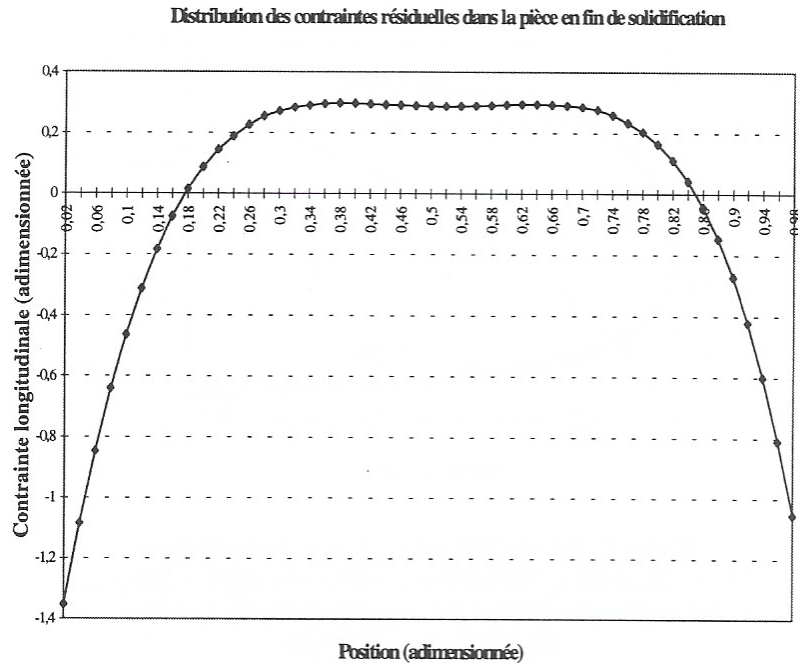


Figure 3

3. - Conclusions – Remarques

La « pertinence spatiale » de travaux de modélisation est parfois difficile à justifier : nous nous débarrassons plus facilement de la Gravité que nos collègues expérimentateurs. Il n'en reste pas moins vrai que les outils mis au point par les autres équipes de simulation ou la nôtre permettent de vérifier certaines intuitions avant d'engager des expérimentations que l'on sait coûteuses... et rares. Longtemps limitée à des configurations géométriques idéalisées (boîtes rectangulaires ou cylindriques axisymétriques) et à des hypothèses violentes (découplage thermique - solutal, etc.), la modélisation est maintenant capable de traiter des problèmes complets et complexes : les différentes avancées consignées dans ce rapport sont incorporées dans un outil de simulation modulaire interactif AQUILON^R du MASTER-ENSCPB servant à la fois la Recherche et la Pédagogie.

Remarque : Le laboratoire MASTER apparaissait dans ce GDR au travers d'une seconde thématique « Fluides Critiques en milieu poreux », portée notamment par une collègue, Madame N. BONNETON. Cette collègue n'ayant pu, pour des raisons personnelles, continuer à travailler sur ce thème, il a été décidé de l'abandonner, momentanément nous l'espérons. Les résultats n'ayant pas évolué depuis la présentation du mi-parcours à Aussois, nous préférons ne pas les faire figurer.

Nota :

Ces travaux sont menés dans le cadre du Consortium «3AR », Action Aquitaine pour la Recherche en Apesanteur, et ont bénéficié d'un soutien de la société AEROSPATIALE au travers de son établissement d'Aquitaine.

Publications dans des revues internationales avec comité de lecture :

- [1] HOLUIGUE J., BERTRAND O., ARQUIS E., (1997), *Solutal convection in crystal growth: effect of interface curvature on flow structuration in a three-dimensional cylindrical configuration*, J. of Crystal Growth, **180**, pp. 597-603.
- [2] ARQUIS E., CALTAGIRONIE J.P., (1998), *Solidification in Heterogeneous Media: A Numerical study at a Small Scale*, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VIII, Thomas B.G., Beckermann C. and Oknada, I. Eds., Transactions on Minerals, Metals and Materials Science, Warrendale, PA, pp. 235-242.
- [3] BERTRAND O., et coll., (1999), *Melting driven by natural convection - A comparison exercise: first results*, Int. J. Therm. Sci., **38**, pp. 5-26.
- [4] BERTRAND O., ARQUIS E., (1997), *A Fixed Grid Method for Modelling Heat and Mass Transfer During Binary Solid-Liquid Phase Change*, Num. Methods in Thermal Problems, **X**, Pineridge Press, pp. 265-275.
- [5] BERTRAND O., ARQUIS E., (1998), *Numerical Approach of Segregation occurring in Alloys Solidification*, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VIII, Thomas B.G. , Beckermann C. and Oknada, I. Eds., Transactions on Minerals, Metals and Materials Science, Warrendale, PA, pp. 581-588.
- [6] ARQUIS E., BERTRAND O., (1999), *Prediction of diffuse solute redistribution in solidification of binary mixtures*, Int. J of Heat and Mass Trans., (accepté en français en cours de traduction).

Convection sous champ magnétique : Application à la mesure de diffusivités chimiques dans les métaux liquides

René Moreau

Laboratoire EPM-Madylam
UPR A 9033 CNRS
BP 95
38402 Saint Martin d'Hères

1. - Le passé récent

Au cours des années antérieures (1991/1996), dans le cadre d'une coopération entre notre équipe et celles du CEA/CEREM/DEM (J.J. Favier, D. Camel et J.P. Garandet) et de l'ECL/LMFA (H. Ben Hadid et D. Henry) soutenue par le CNES, un effort important a été mené sur le contrôle de la convection naturelle à l'aide d'un champ magnétique dans le bain liquide au cours de la solidification dirigée et sur l'influence de ce freinage électromagnétique sur la ségrégation. Différentes configurations ont été étudiées : l'axe de solidification a été horizontal ou vertical, sous un champ magnétique axial ou transversal. Deux expériences ont été réalisées : MASCOT au laboratoire MADYLAM (simulant le bain liquide à l'aide d'une cellule de cylindrique de mercure) et BRAHMS au CEREMIDEM (utilisant un alliage Bi-Sn). Une théorie asymptotique (parce qu'elle suppose la force électromagnétique beaucoup plus grande que le frottement visqueux) a été développée et bien validée par comparaison avec ces expériences, alors que la simulation numérique était réalisée à l'ECIJLMFA. Un accent plus fort a été mis sur la configuration horizontale avec champ magnétique vertical. L'ensemble de ces études a fait l'objet de plusieurs thèses (T. Alboussière, A.C. Neubrand, L. Davoust, S. Kaddeche) et d'un grand nombre de publications (certaines sont encore à paraître ou en fin de rédaction).

Cet effort collectif est difficile à résumer en quelques lignes. On peut néanmoins dire que les propriétés du champ de vitesse sont maintenant bien comprises et suivent des lois d'échelles bien établies. Si le champ magnétique vertical est uniforme et assez grand pour que le régime asymptotique soit établi, et si la section droite est symétrique par rapport au plan horizontal, la vitesse suit une loi d'échelle en Gr/Ha^2 et la contribution convective au champ de température varie comme $Pr Gr/Ha^2$. Dans ces mêmes conditions, la contribution convective au transport de soluté varie comme $(Gr Sc)^2/Ha^4$. Par contre, si le champ magnétique comporte un défaut d'uniformité (ε), ou si la symétrie de forme est perturbée d'une quantité ε , dans ces lois d'échelles, le facteur $1/Ha^2$ doit être remplacé par ε/Ha (autrement dit un défaut d'importance ε sur l'uniformité où la symétrie des paramètres peut induire un défaut d'importance εHa sur les champs de vitesse et de température et $\varepsilon^2 Ha^2$ sur le champ de concentration solutale). Lorsque le champ magnétique est plus modéré, les expériences et la simulation numérique ont bien montré quand et comment il stabilise l'écoulement (un diagramme de stabilité situant les deux premières bifurcations a été établi), puis, au fur et à mesure qu'il grandit, comment il réorganise l'écoulement. On notera que l'approche expérimentale est nécessaire à l'ensemble puisque c'est elle qui a permis de déterminer le gradient de température uniforme dans la région où l'écoulement est parallèle à l'axe, lequel sert de donnée de base à la théorie asymptotique.

Une conclusion schématique de ces études peut être formulée comme suit. Il est facile, avec un champ magnétique uniforme, de stabiliser l'écoulement ($Ha/Gr > 10^{-5}$). Il est facile d'atteindre le régime hydrodynamique asymptotique ($Ha^2/Gr > 10^{-2}$), ou un régime thermique purement diffusif ($Ha^2/PrGr > 1$). Mais il est beaucoup plus difficile d'atteindre sous gravité normale un régime de transport solutal diffusif ($Ha^2/GrSc > 1$).

2. - Le programme en cours mesures de diffusivités

Une application possible de ce programme antérieur est la mesure de coefficients de diffusion des espèces chimiques dans les métaux liquides. Ces données thermophysiques sont aujourd'hui encore très mal connues. Pour mesurer ce coefficient, on met deux métaux liquides en contact à un instant donné et de l'analyse du profil de concentration obtenu au bout d'un certain temps, on déduit cette valeur. Or, du fait de sa faible valeur ($10^{-9} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$), la moindre perturbation convective va augmenter le transport effectif et ainsi la mesure du coefficient mesuré. L'origine de cette convection est due à la présence de gradients de température résiduels (même très faibles) et la différence de densité entre les deux composants. La seule méthode pour réduire ces effets consiste actuellement à effectuer des expériences en microgravité où ces effets sont suffisamment réduits. L'utilisation d'un champ magnétique uniforme pour freiner cette convection pourrait donc constituer une alternative intéressante.

Sur la base de la théorie asymptotique précédente nous avons pu montrer qu'en présence d'un gradient de température dans le métal liquide (avec ou sans champ magnétique), la courbe de concentration moyenne dans une section droite qui est la grandeur effectivement mesurée, continue à suivre une loi de transport de type diffusif ([1], [2]) Le coefficient mesuré est par contre augmenté :

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} = D_{\text{mesuré}} \frac{\partial^2 \langle C \rangle}{\partial z^2}$$

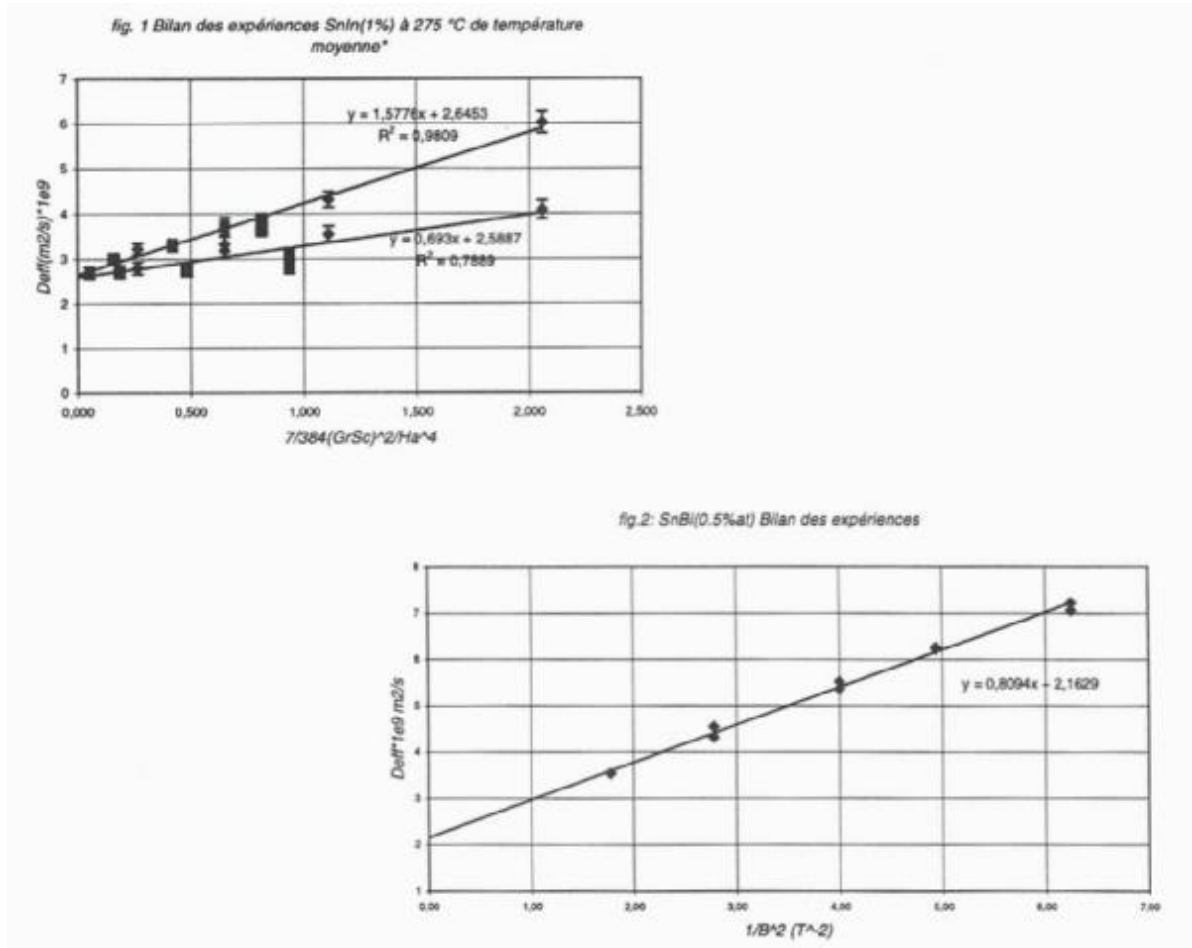
$$D_{\text{mesuré}} = D_{\text{réel}} \left(1 + \frac{7(GrSc)^2}{384 Ha^4} \right)$$

Si l'on considère la convection due aux différences de composition, l'équation de transport moyenne est plus complexe. Néanmoins, la représentation graphique de la fonction obtenue ressemble de très près à la fonction d'erreur, solution en régime diffusif. Le coefficient mesuré est freiné cette fois selon une loi en Ha^{-2} . Il est ainsi impossible à partir des profils obtenus de déterminer si la mesure a été polluée par une contribution convective.

Une cellule à cisaillement a été conçue pour effectuer des mesures sous champ magnétique. Ses principales caractéristiques sont [3].

- sa compacité pour pouvoir entrer dans l'entrefer de l'aimant.
- le contrôle rigoureux de la carte thermique (trois éléments chauffants régulés indépendamment, soudure froide des thermocouples soignée, mesures possibles par 6 thermocouples distincts)
- un dispositif de test d'alignement des galettes de cisaillement
- un support isolé des vibrations.

Les deux situations convectives précédentes ont été testées sur deux couples différents. Le couple Sn-SnIn 1 %at présente des différences de densité très faibles ($\beta_c = 10^{-3}$) un gradient de température de 173 K/m a donc été appliqué le long de l'axe du capillaire. Une décroissance en Ha^{-4} est observée si l'on reporte le coefficient mesuré en fonction du champ magnétique appliqué (figure 1) [4]. Le couple Sn-SnBi0.5%at présente une convection solutale plus marquée ($\beta_c = 0.3$). Les mesures ont donc été effectuée en configuration isotherme : la décroissance en Ha^{-2} est mise en évidence (figure 2).



Dans le cas du couple Sn-SnIn 1 %at, le champ magnétique est suffisant pour freiner la convection et une valeur égale à celle mesurée en microgravité a été retrouvée. Dans le cas du couple Sn-SnBi0.5%at, le champ magnétique était insuffisant. Des mesures complémentaires sont prévues.

Références :

- [1] ALBOUSIERE T., GARANDET J.-P., LEHMANN P., MOREAU R., (1997), *Measurement of solute diffusivity in electrically conducting liquids*, Transfer Phenomena in Magnetohydrodynamic and Electroconducting Flows, Ed. A. Alemany, Ph Marty, J.P. Thibault, Kluwer Academic Publishers, pp359-372.

- [2] ALBOUSSIÈRE T., (ARANDET J.-P., LEHMANN P., MOREAU R., (1998), *Convective effects in the measurement of diffusivities and thermotransport coefficients. Liquid metal alloys and the use of a magnetic field.* Entropy (à paraître).
- [3] LEHMANN P., ALBOUSSIÈRE T., MOREAU R., USPENSKI V., (1998). *MHD control of convection applied to chemical diffusivities measurements.* Journal de Chimie Physique (à paraître).
- [4] BOTTON V., LEHMANN P., BOLCATO R., MOREAU R., (1999), *MHD control of convection applied to the measurement of chemical diffusivities in liquid metal.* EPM International Conference, Japon, avril 2000.

CHANGEMENTS DE PHASE, MILIEUX REACTIFS, FORTS GRADIENTS (1998-1999)

Roger Prud'homme

Laboratoire de Modélisation en Mécanique
UMR CNRS 7607
Université Pierre et Marie Curie — Case 162
4 place Jussieu
75252 PARIS CEDEX 05

Cette équipe, proposée comme membre du GDR PR2M en 1998, a mené des travaux sur différents thèmes intéressant la microgravité : 1. Instabilités des flammes de prémélange sous champ d'accélération, 2. Modélisation des interfaces et milieux diphasiques, 3. Thermodynamique au voisinage du point critique, 4. Hydrodynamique des fluides supercritiques.

1. - Instabilités des flammes de prémélange sous champ d'accélération (M.K. Samba, R. Prud'homme, L. Gottesdiener)

Le code « flamme » a été mis en œuvre pour étudier les instabilités de cisaillement air extérieur/gaz brûlés issus d'une flamme de prémélange air-méthane. Dans ces calculs, la flamme est donnée en position et en forme et il est tenu compte du taux d'étirement par l'intermédiaire de deux modèles :

- flamme conique avec étirement dans la zone du sommet,
- flamme en paraboloïde étirée.

Chaque configuration a été étudiée par deux méthodes de résolution : implicite et partiellement implicite. Une attention particulière a été portée à la morphologie du jet et à la loi donnant la fréquence d'oscillation en fonction de l'intensité du champ d'accélération. Les résultats ont été comparés avec ceux d'expériences réalisées au sol, en microgravité (vol parabolique) et en centrifugeuse pour des accélérations comprises entre zéro g et dix g [1] Des résultats obtenus, on peut conclure à la validité de la modélisation qui s'avère meilleure avec un sommet de flamme en paraboloïde et une méthode semi-implicite. Cette étude a conduit à la soutenance de thèse de M. Moussa Samba [2].

Une autre démarche, pouvant donner lieu à une thèse est entreprise actuellement par L. Gottesdiener et R. Prud'homme avec le thème : « Simulation numérique d'une flamme de prémélange issue d'un bec Bunsen à l'aide du code Fluent ». Pour développer les résultats de la thèse de M. Samba, on se propose de capturer le front de flamme en étendant le domaine de calcul à l'écoulement amont dans les gaz frais. Ceux-ci sont constitués d'un mélange méthane-air à la température ambiante. La combustion est introduite dans l'écoulement en initialisant à 2000K la température de certaines cellules situées à l'orifice du bec Bunsen, dans une zone où doit, en principe, se trouver la flamme.

2. - **Modélisation des interfaces et milieux diphasiques** (N. Jamet, R. Prud'homme, L. Gottesdiener)

Une théorie linéarisée a été mise au point pour un milieu diphasique simplifié. Elle conduit à une production d'entropie du second degré en flux et force généralisées et à des lois phénoménologiques linéaires.

Appliquée à la zone de relaxation d'une onde de choc stationnaire, cette théorie conduit à des coefficients phénoménologiques qui divergent lorsque le Mach du gaz tend vers un, c'est-à-dire en très proche équilibre.

Il a été démontré que ce comportement divergent provenait de la singularité transsonique. La question se résout en considérant des écarts au nombre de Mach unité, de l'ordre de grandeur de la fraction massique de particules supposée faible. La force généralisée à considérer n'est plus le saut de vitesse de l'interface de relaxation mais une fonction plus complexe des vitesses caractéristiques de l'onde.

La naissance d'une onde de choc en écoulement diphasique a également été étudiée.

Enfin le cas d'un choc stationnaire avec évaporation-condensation a été abordé. Ces travaux ont donné lieu à la soutenance de thèse de N. Jamet [3] et une publication est en cours [4]

Les lois de comportements d'interfaces en milieu diphasique font l'objet d'une attention particulière car de nombreuses inconnues subsistent en ce domaine [5] où la microgravité est un milieu très intéressant pour l'expérimentateur. La modélisation générale des interfaces fait par ailleurs l'objet d'un ouvrage en cours de publication [6].

3. - **Thermodynamique au voisinage du point critique** (R. Prud'homme, L. Gottesdiener)

Des travaux ont été entrepris en collaboration avec B. Zappoli au sujet de la stabilité d'une bulle de vapeur au voisinage du point critique (début de rédaction d'un article). Le système thermodynamique envisagé est de dimension zéro et comprend un cylindre limité par un piston contenant un liquide légèrement subcritique dans lequel se trouve une bulle de vapeur. La surface de la bulle constitue un sous-système. La loi d'état utilisée pour décrire les fluides à une certaine distance du point critique est celle de Van der Waals, mais il faut tenir compte des comportements limites lorsque l'on s'approche du point critique. En particulier la tension superficielle tend vers zéro. D'autre part, l'intervention de la théorie du second gradient peut se révéler nécessaire notamment pour les très petites bulles (contacts pris avec H. Gouin à ce sujet).

Suivant une idée suggérée par A. Sanfeld, un calcul numérique prospectif du déplacement de la compressibilité au point critique dû au champ électrique a été effectué par L. Gottesdiener, dans le but d'en obtenir l'ordre de grandeur. Malgré les fortes variations près du point critique, le déplacement reste insuffisant pour le rendre accessible à l'expérimentation.

4. - **Hydrodynamique des fluides supercritiques** (P. Carlès, B. Ugurtas, stagiaire de DEA)

En dehors des états solide, liquide et gazeux, un corps pur ou un mélange est susceptible d'adopter un quatrième état dit « supercritique ». Dans cet état, il est possible de passer continûment (c'est-à-dire sans transition de phase brusque) de l'état liquide à l'état gazeux. Un fluide supercritique est donc un fluide intermédiaire entre un liquide et un gaz, ce qui lui confère des caractéristiques hydrodynamiques très particulières, dont une grande densité et une forte compressibilité. Dans un proche voisinage (sommet de la courbe de coexistence liquide-gaz), les capacités calorifiques et les coefficients thermoélastiques du fluide divergent.

L'hydrodynamique des fluides critiques est donc très spécifique, et ne peut être décrite par une mécanique des fluides « traditionnelle ».

Les travaux ont eu pour objectif d'approfondir la connaissance théorique de ce champ d'étude, à l'aide de méthodes asymptotiques de perturbations singulières et d'études de stabilité.

4.1. - L'Effet Piston et ses facteurs limitants

A la suite des premiers travaux d'Onuki (NIST Workshop, 1989), plusieurs équipes indépendantes (Onuki et al, Boukari et al, Zappoli et al, Phys. Rev. A, 41, 1990) ont montré qu'il existe au voisinage du point critique un quatrième mode de transport de la chaleur, nommé Effet Piston. Ce mécanisme (déjà décrit par ailleurs) repose sur une dilatation forte des couches limites chaudes entraînant une compression et un échauffement rapide de tout fluide supercritique confiné chauffé par une paroi. La compressibilité divergeant au point critique, l'effet Piston est de plus en plus efficace (phénomène de l'accélération critique). Cette prédiction théorique a été rapidement suivie de plusieurs confirmations expérimentales en micropesanteur (Guenoun et al., Phys. Rev. E, 47, 1993 ; Straub et al. Phys. Rev. E, 51, 1995, [7]).

Le premier travail a été d'affiner les modèles théoriques existants de l'Effet Piston, afin en particulier de pouvoir effectuer des comparaisons quantitatives avec les expériences (ce qui était impossible avec les modèles précédemment développés). Ce travail a été basé sur l'analyse asymptotique des équations de Navier-Stokes écrites pour un fluide supercritique réel. Les modèles ainsi développés ont été comparés avec succès aux résultats des expériences de l'équipe de Beysens et Garrabos, avec laquelle une coopération s'est développée [9].

L'analyse plus poussée des modèles précédemment cités a permis d'examiner le devenir de l'Effet Piston très près du point critique, où les divergences des propriétés du fluide sont telles que des phénomènes nouveaux apparaissent. La prise en compte de la divergence critique de la viscosité de volume a permis de montrer que très près du point critique, les contraintes visqueuses s'opposent à la dilatation de la couche limite et combattent ainsi l'Effet Piston : un Ralentissement Critique est observé, là où une forte accélération critique est attendue [8]

En parallèle, d'autres phénomènes limitant l'Effet Piston ont été examinés, comme par exemple l'influence des non-linéarités ou l'effet de la conduction de la chaleur dans les parois entourant le fluide (travail en préparation).

4.2. - L'interaction Effet-Piston/Convection Naturelle

La divergence critique de la compressibilité isotherme rend les fluides supercritiques très sensibles à la gravité. D'une part, elle entraîne une stratification en densité importante de tout fluide au repos. D'autre part, une forte compressibilité entraîne l'apparition de grands nombres de Rayleigh dès qu'une cellule de fluide supercritique est chauffée sur terre. Enfin, l'existence de l'Effet Piston est susceptible de modifier la morphologie des écoulements, lorsque ce mode de transport de la chaleur interagit avec la convection naturelle. Ainsi il a semblé nécessaire de s'interroger sur le devenir de l'Effet Piston lorsque la convection et la stratification sont aussi présentes.

Aussi on s'est attaché à caractériser la stabilité convective des fluides supercritiques (problème de Rayleigh-Bénard). A l'aide de développements asymptotiques raccordés et d'autres méthodes de perturbations singulières, il a été possible de montrer formellement que le seuil de convection d'un fluide supercritique soumis à un gradient adverse de température est le même que celui d'un fluide de Boussinesq, à condition de corriger le gradient de température initial du gradient adiabatique. Ce travail simplifie des études plus anciennes de Gitterman et Steinberg (PMM, 34, n° 2, 1970) [9]. Le résultat cité vient d'être très récemment

confirmé par les études expérimentales des équipes de B. Castaing (X. Chavannes, thèse de doctorat, 1998) et de H. Meyer.

Enfin, cette dernière étude, réalisée dans le cadre d'une conduction adverse stationnaire, a été récemment prolongée pour tenir compte des phénomènes instationnaires liés au chauffage par le bas d'une cellule de fluide supercritique. Parmi ces phénomènes, on a pris en compte le gradient de vitesse qui se développe comme conséquence de l'Effet Piston, et la variation dans le temps de l'épaisseur de couche limite. Ces premiers résultats ont montré que l'Effet Piston, malgré son importance dans le transfert de chaleur, n'intervient en rien dans le déclenchement de la convection. On retrouve donc les mêmes seuils qu'en conduction pure [10].

Références

- [1] M.K. SAMBA, R. PRUD'HOMME, L. GOYFESDIENER, *Modélisation numérique de l'instabilité d'un jet de gaz brûlés issu d'une flamme de prémélange en présence d'un champ d'accélération*, Entropie, n° 215, 1998, p. 59-63.
- [2] M.K. SAMBA, *Modèle d'instabilité dans un écoulement de gaz brûlés issu d'une flamme de prémélange en présence d'un champ d'accélération*, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, soutenue le 3 février 1999.
- [3] N. JAMET, *Modélisation de discontinuités dans les écoulements diphasiques compressibles*, Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, soutenue le 8 juillet 1998.
- [4] N. JAMET, R. PRUD'HOMME et L. GOYFESDIENER, *Modelling of discontinuities in diphasic compressible flow*, en préparation pour Int. J. of Multiphase Flow.
- [5] E. DANHO, R. GATIGNOL, L. GOYFESDIENER, N. JAMET et R. PRUD'HOMME, *Modélisation mécanique et thermodynamique des interfaces*, Poster à la Journée « Interfaces et forts gradients » du GDR pR2M-ESPCI, 21 juin 1999.
- [6] R. GATIGNOL et R. PRUD'HOMME, *Mechanic and thermodynamic modeling of fluid interfaces*, World Scientific, to be published.
- [7] GARRABOS Y., BONETTI M., BEYSENS D., PERROT F., FROHLICH T., CARLES P., ZAPPOLI B., *Relaxation of a supercritical fluid after a heat pulse in the absence of gravity effects: Theory and experiments*, Physical Review E, **57**, 5665-5681 (1998).
- [8] CARLES P., *The effect of bulk viscosity on temperature relaxation near the critical point*, Physics of Fluids, **10**, 9, 2164-2176 (1998).
- [9] CARLES P., UGURTAS B., *The onset of free convection near the liquid-vapour critical point. Part I: Stationary initial state*, Physica D, **126**, 69-82 (1999).
- [10] CARLES P., *The onset of free convection near the liquid critical point. Part II: Unsteady heating*, (en préparation).
- [11] CARLES P., *Thermodynamique et thermophysique des milieux fluides supercritiques, dans Fluides Critiques et Matériaux*, éd. AIPFS (à paraître).

Perspectives



Le CNES a pour mission de faire utiliser par les laboratoires français, l'ambiance de micropesanteur pour conduire des recherches qui ne peuvent se faire au sol à cause des éléments perturbateurs apportés par la gravité. La suppression de la pression hydrostatique, de la convection et de la sédimentation agit essentiellement sur les systèmes présentant au moins une phase fluide. La micropesanteur intéresse donc de nombreux problèmes de physique de la matière condensée parmi lesquels les transitions de phase, qu'il s'agisse de phases métastables dans les matériaux réfractaires, de transition de phase au voisinage du point critique ou encore de solidification de matériaux opaques ou transparents.

L'intérêt porté par les laboratoires pour les recherches en micropesanteur et l'augmentation du nombre d'équipes concernées ont conduit le CNRS et le CNES à créer un Groupement de Recherche avec le département SPI puis, compte tenu de l'extension de la thématique « fluides critiques », avec le secteur Chimie qui s'est associé avec SPI.

La décision de développer la Station Spatiale Internationale renforce le besoin d'assurer un développement de ces recherches en préparant au sol de nouveaux projets qui seront prêts à être embarqués dans les années qui viennent. Leur coordination est une nécessité ; le succès du GDR PR2M nous avait conduit à envisager de réaliser avec le secteur SPM une opération analogue et nous avons en 1997 reçu un avis informel favorable de sa Directrice, Mme Bréchignac.

Arrivé maintenant au terme du GDR « Phénomènes Critiques Réactions Chimiques et Milieux Hétérogènes en Micropesanteur », il nous semble bon de proposer une association au sein d'un même GdR, des trois départements, SPI, SCH et SPM, et du CNES, autour d'une thématique fédératrice qui pourrait être « **Phénomènes de transport et transitions de phases en micropesanteur** ».

Aux équipes du GDR PR2M s'ajouteraient dans le nouveau groupement celles de :

- Jacques BERT (*Département de Physique des Matériaux* - UMR 5586, Université Claude Bernard Lyon 1),
- Bernard BILLIA (*Matériaux organisation et propriétés* - MATOP - ESA 6088, Université D'Aix-Marseille 3),
- Gabriel FAIVRE (Groupe de Physique des Solides - UMR 7588, Universités Paris 6 et Paris 7),
- Dominique LANGEVIN (Laboratoire de Physique des Solides - URA 2 - Phase 4, Université Paris 11),
- Philippe PETITJEANS (Equipe Fluides Miscibles - Laboratoire de physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes - LMMH - UMR 7636, ESPCI Paris),
- Alain POCHEAU (Equipe Croissance et Elasticité - Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors d'Equilibre - IRPHE - UMR 6594),
- Dominique SALIN (Fluides, Automatique, Systèmes Thermiques - FAST, Université Paris 11),
- Bernard VEYSSIERE (Laboratoire de Combustion et de Détonique - UPR 9028, ENSMA, Poitiers).