



HAL
open science

Phénomènes de Transport et Transitions d Phase en Micropesanteur

Roger Prud'Homme, Bernard Zappoli

► **To cite this version:**

Roger Prud'Homme, Bernard Zappoli. Phénomènes de Transport et Transitions d Phase en Micropesanteur. [Rapport de recherche] Université Pierre et Marie Curie (UPMC). 2003. hal-03657961

HAL Id: hal-03657961

<https://hal.science/hal-03657961>

Submitted on 3 May 2022

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 Groupement de Recherche 2258 CNES

**Phénomènes de Transport et
Transitions de Phase en
Micropesanteur
(P2TPM)**

BILAN A QUATRE ANS 2000-2003



Directeurs :

Roger Prud'homme et Bernard Zappoli

Adresse :

Université Pierre et Marie Curie
Case 162
4 Place Jussieu
75252 Paris cedex 05

Téléphone: 01 44 27 49 28 - 01 44 27 37 90 (Secrétariat)
Télécopie: 01 44 27 52 59
e-mail: prudhom@ccr.jussieu.fr

Septembre 2003

Autre adresse du GDR 2258 :

Centre National d'Etudes Spatiales CNES - 18, avenue Edouard Betin - 31055
Toulouse Cedex. Tél!: 0561 2744 68-0561 28 1454-Fax: 0561 27 30 91
e-mail : Bernard.zappoli@cnes.fr.

Ce rapport a été réalisé avec le concours de Maria BALBIS et Catherine DROUET

SOMMAIRE

Introduction	5
Données budgétaires	9
Composition du Comité Scientifique et du Comité Directeur	11
Formations de recherche du groupement	13
Rapports des équipes	15

THEME Phénomènes Critiques

Supercritique pour l'Environnement, les Matériaux et l'Espace (ESEME) (Yves Garrabos, Daniel Beysens)	17
Instabilités et Phénomènes non linéaires (Stephan Fauve)	21
Groupe des transitions de comportement de milieux supercritiques (Jacques Bert)	23
Modélisation numérique (Patrick Bontoux)	27
Phénomènes critiques et fluides complexes (Henri Gouin)	31
Convection thermique, thermosolutale et thermovibrationnelle en micropesanteur (Abdelkader Mojtabi)	33
Microgravité : effets des vibrations sur les fluides hétérogènes hyper compressibles en apesanteur (Pierre Evesque)	37
Equipe Mécanique et Transfert - Thème Modélisation numérique des instabilités convectives dans les fluides supercritiques (Sakir Amiroudine)	41
Séparation de phases viscoélastiques (Patrick Guenoun)	43

THEME Interfaces et Milieux Diphasiques

Interfaces, Ecoulements Diphasiques en Micropesanteur (Catherine Colin, Jean Fabre)	47
Interfaces (Michèle Adler)	51
Mousses et films de savon (Dominique Langevin)	55
Illustrations, exemples d'acquis	59
Fluides Miscibles (Philippe Petitjeans)	63
Stabilité des Emulsions Denses. Evaporation de gouttes à plusieurs constituants. Mesure et Modélisation. (Annie Steinchen)	67
Couplage réaction chimique hydrodynamique au cours de la propagation de front d'onde chimique (Dominique Salin)	71
Calcul Haute Performance en Mécanique! Convection vibrationnelle (Bernard Roux)	75
Séparation hydrodynamique (Mauricio Hoyos)	79
Propriétés radiatives des gaz, thermo physique (Estelle lacona)	83

THEME : Combustion

Combustion et Turbulence (Iskender Gökalp, Christian Chauveau)	85
Flamme de Diffusion et Brûleurs (Pierre Joulain)	89
Combustion de brouillards, changements de phase (Pierre Haldenwang)	93
Détonations, Déflagrations et Explosions (Bernard Veyssière)	97
Changements de phase, combustion, forts gradients (Roger Prud'homme)	101

THEME : Solidification et croissance

Solidification d'alliages (Bernard Billia)	105
Equipe Fronts de Solidification (Gabriel Faivre)	111
Illustrations, exemples d'acquis	115
Croissance et Elasticité (Alain Pocheau)	119
Influence des champs externes sur la ségrégation et la structuration en solidification (Thierry Duffar, René Moreau)	121
Liste générale des publications	123
Perspectives	175

Introduction

- **Le Groupement de Recherche** CNES/CNRS «Phénomènes de Transfert et Transitions de Phase en Micropesanteur» (GDR 2258 - P2TPM. Directeurs; Roger Prud'homme et Bernard Zappoli Web ; <http://www.ccr.jussieu.fr/P2TPM> a été créé en janvier 2000 pour une durée de quatre ans. Son Département principal de rattachement est celui des Sciences pour l'ingénieur, mais il est aussi constitué d'équipes des secteurs SCH (commissions 15 et 19) et SPM (commission 5). Il y a présentement 28 équipes dans ce GDR. Trois équipes du CEA lui sont de fait adjointes, mais deux d'entre-elles ont cessé leur activité pg à mi-parcours. Enfin, l'admission de deux nouvelles équipes est en examen au département SPI et une troisième envisage sa candidature. Le GDR comprend donc 33 équipes au sens large, mais seuls les rapports des 28 équipes officiellement admises figurent dans ce rapport d'activité. Plusieurs équipes sont entrées dans le Groupement postérieurement à sa création, ce qui est signe de vitalité.

Il fait suite à deux autres GDR du CNES et du CNRS

- le GDR n°1028 « Mécanique des fluides et Phénomènes de transfert en microgravité », qui a existé entre janvier 1992 et décembre 1995 pour rassembler une communauté scientifique d'utilisation du grand instrument que représente la microgravité à propos de milieux sensibles au champ de la pesanteur comprenant au moins une phase fluide,
- le PRC-GDR n° 1185 « Phénomènes critiques, réactions chimiques et milieux hétérogènes en micropesanteur », de janvier 1996 à décembre 1999, dont l'objectif était 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 scientifique suffisamment différenciée pour permettre l'émergence de nouvelles idées.

L'objectif de l'actuel GDR n° 2258 est de favoriser la réflexion de base sur le rôle de la pesanteur sur les systèmes comportant au moins une phase fluide, sur les phénomènes critiques, la chimie (combustion, corrosion, ...) et la dynamique des fluides supercritiques. Il comprend ainsi des laboratoires des Départements Sciences pour l'ingénieur et Sciences Chimiques du CNRS et a de nombreux liens avec le CEA. Mais sa mission est aussi d'accompagner et de structurer l'évolution en cours, caractérisée par la participation française au développement et à l'exploitation de la Station Spatiale Internationale et par le développement de l'instrument DECLIC, d'assurer la circulation de l'information scientifique, de susciter des coopérations nouvelles entre des domaines où la mécanique des fluides est intimement mêlée à la chimie et à la physique de la matière condensée, d'associer étroitement à la réflexion scientifique des équipes explorant des domaines ayant entre eux des composantes communes fortes de part le regroupement en son sein de laboratoires travaillant sur la solidification de milieux transparents, qui appartiennent au Département Sciences Physiques et Mathématiques du CNRS.

- **Le financement du Groupement** est assuré par le CNES (aides contractuelles, gérées, en ce qui concerne les équipes CNRS, par la délégation Paris B), le CNRS et les Universités (les salaires des personnels). Le département Sciences pour l'Ingénieur du CNRS accorde une dotation annuelle d'environ 80 KF par an. Un état budgétaire est présenté plus loin.

- **La structuration des équipes** en fonction des programmes de recherche est donnée ci-dessous, par thème et par nom du ou des responsables.

➤ *Phénomènes critiques :*

- Yves GARRABOS & Daniel BEYSENS (Supercritique pour l'Environnement, les Matériaux et l'Espace, ESEME, CNRS/SCH-CEA Talence),
- Stéphan FAUVE (Instabilités et Phénomènes non linéaires, LPS/ ENS, Paris),
- Jacques BERT & Jean COLOMBANI (Groupe des transitions de comportement de milieux supercritiques, CNRS/SPM - Université Lyon I, Villeurbanne),
- Patrick BONTOUX (Modélisation numérique, L3M-CNRS/SPI, Château Gombert),
- Henri GOUIN (Phénomènes critiques et fluides complexes, LMMT, Marseille),
- Abdelkader MOJTABI (Convection thermique, thermosolutale et thermovibrationnelle en micropesanteur, UFR MIG, Toulouse),
- Pierre EVESQUE (Microgravité : effets des vibrations sur les fluides hétérogènes hyper compressibles en apesanteur, MssMat, CNRS — ECP, Chatenay Malabry),
- Sakir AMIROUDINE (Equipe Mécanique et Transfert - Thème Modélisation numérique des instabilités convectives dans les fluides supercritiques, Angers),

➤ *Interfaces et milieux diphasiques :*

- Catherine COLIN & Jean FABRE (Interfaces, Ecoulements Diphasiques en Micropesanteur, IMFT, CNRS/SPI, Toulouse),
- Michèle VIGNES-ADLER (Interfaces, LPMDI, CNRS/SPI, Marne La Vallée)
- Dominique LANGEVIN (Mousses et films de savon, LPS, Orsay),
- Fric ARQUIS (Ecoulements à Interfaces Réactives, ENSCPB, Talence)
- Philippe PETITJEANS (Fluides Miscibles, ESPCI/LMMH, Paris),
- Annie STEINCHEN (Stabilité des Emulsions Denses. Evaporation de gouttes à plusieurs constituants. Mesure et Modélisation., CNRS/SCH— Marseille),
- Dominique SALIN (Couplage réaction chimique-hydrodynamique au cours de la propagation de front d'onde chimique, FAST CNRS/SPI, Orsay),
- Bernard ROUX (Calcul Haute Performance en Mécanique! Convection vibrationnelle, L3M-CNRS/SPI Château Gombert),
- Mauricio HOYOS (Séparation hydrodynamique, ESPCI/LMMH, Paris),
- Estelle IACONA (Propriétés radiatives des gaz, thermophysique, EMC2, ECP, CNRSI'SPI, Chatenay Malabry),

➤ *Combustion* :

- Iskender GOKALP & Christian CHAUVEAU (Combustion et Turbulence, LCSR, CNRS/SPI, Orléans),
- Pierre JOULAIN (Flamme de Diffusion et Brûleurs, LCD/ENSMA, CNRS/SPI, Futuroscope),
- Pierre HALIJENWANG (Modélisation numérique, L3M-CNRS/SPI, Château Gombert)
- Bernard VEYSSIERE (Détonations, Déflagrations et Explosions, LCD/ENSMA, CNRS/SPI, Futuroscope)
- Roger PRUD'HOMME (Changements de phase, combustion, forts gradients, CNRS/SPI, Univ. P. & M. Curie, Paris),

➤ *Solidification et croissance* :

- Bernard BILLIA (Solidification d'alliages, LMMP, CNRS I SPM — Univ. d'Aix Marseille III, Marseille), Gabriel FAIVRE (Equipe Fronts de Solidification, LPS, CNRS/SPM, Univ. Paris 6 & 7),
- Daniel HENRY & Hamda BEN HADID (Instabilités, Croissance Cristalline et Microgravité, LMFA, CNRS/SPI - Ecole Centrale de Lyon - Université Lyon 1, Ecully),
- Peter LEHMANN & René MOREAU (Mesure des coefficients de diffusion chimique dans les liquides métalliques, EPMIENSHMG, CNRS/SPI, St Martin d'ères),
- Alain POCHEAU (Croissance et Elasticité, IRPHE, Château Gombert),
- Thierry DUFFAR (Influence des champs externes sur la ségrégation et la structuration en solidification, EPMIENSHMG, CNRS/SPI, St Martin d'Hères).

Il convient d'ajouter à cette liste, sous réserve d'acceptation par le Département SPI, les deux équipes suivantes, qui ont demandé leur rattachement :

- Alain MAILFERT (Compensation de la pesanteur par des forces magnétiques, ENSEM — INPL, Vandoeuvre les Nancy),
- Laurent DAVID (Labo. d'Etudes Aérodynamiques, CNRS Futuroscope).

• ***Initiatives du Groupement*** :

- Une réunion de présentation de ce GDR s'est tenue les 19 et 20 juin 2000 au CEA de Grenoble (50 participants).
- Un colloque « Sciences de la Matière et Microgravité » a été organisé en collaboration avec le Groupe Sciences de la Matière du CNJES les 14 et 15 mai 2001 (120 participants). Les travaux de ce colloque ont fait l'objet d'un numéro spécial (Volume 11, Pr6, octobre 2001) du Journal de Physique IV.
- Les équipes du GDR ont participé aux réunions de préparation du séminaire de prospective 2002 du CNES, dans le cadre du groupe Sciences de la Matière.
- Le GDR a participé à la préparation de la journée thématique « Fluides sous vibration » à l'ESPCI, Paris, le 20 mars 2002.
- Deux journées du GDR se sont tenues à l'ESPCI les 27 et 28 mai 2002. La première fut une journée thématique sur les « Méthodes de champ de phases » et la seconde une « Réunion générale ».

- Le GDR a participé à la journée thématique « Workshop Combustion sous gravité réduite », LCD/ENSMA, Futuroscope, 16 octobre 2002.
- Le GDR a participé à la journée thématique « Influence des champs externes sur la ségrégation et la structuration en solidification: expériences et simulations », EPM - UPR9033 CNRS, Saint Martin d'hères, 21 mars 2003.
- Un séminaire du GDR a lieu du 25 au 28 mai 2003 au CPL d'Aussois (50 participants).

Un projet d'accord de coopération avec le GDR existant avait été proposé pour une durée de trois ans, par le National Center on Microgravity Research on Fluids and Combustion (MCNR) du NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH. Cette proposition n'a pas été honorée par les autorités de tutelle du GDR.

Enfin, sans que cela soit placé sous l'égide du GDR :

- un colloque « Microgravité et transferts » (organisateur: Mohammed El Ganaoui & Roger Prud'homme) a lieu dans le cadre du 16^{ème} Congrès Français de Mécanique qui se tient à Nice du 1^{er} au 5 septembre 2003). Les travaux de ce Colloque seront publiés pour part dans un numéro spécial des Comptes rendus à l'Académie des Sciences et dans un numéro spécial de la revue Mécanique et Industries.
- un mini-symposium (organisateur Jacques Magnaudet & Bernard Zappoli) a lieu dans le cadre d'un colloque Euromech à Toulouse du 25 au 29 août 2003.

Etat budgétaire du GDR 2258 (en euros)

œ œ

Crédits :

	2000	
Dotation SPI		9 146,94
Transfert 1999		14 353,37
2001		
Dotation SPI		12 195,92
Dotation SPI pour Colloque Matière et Microgravité		762,25
Frais d'inscription du Colloque Matière et Microgravité		2 421,94
2002		
Moyens annuels		12 200,00
Frais d'inscription Colloque Matière et Microgravité		286,81
2003		
Moyens annuels		7 440,00
Total des crédits : 58.807,23 €		

œ œ

Dépenses :

Comité scientifique du 9 septembre 1999 à Paris		432,19
Rencontres des membres du GDR :		
Journées du 18-20 juin 2000 à Grenoble		6 641,22
Colloque Science de la Matière du 14-15 mai 2001 à Paris		10 222,34
Journées du 19-29 mars 2002 à l'ESPCI (Paris)		179,34
Journées du 27-28 mai 2002 à Paris		6 755,90
Journées du 21mars 2003 à Grenoble		927,41
Séminaire du GDR du 25-28 mai 2003 à Aussois*		4 478,64

Total Rencontres du GDR : 29.204,85 €

Actes du Colloque Science de la Matière		9 682,96
---	--	----------

Missions diverses :	
2000	2 154,74
2001	3 606,41
2002	868,74
2003*	2 456,18

Total Missions diverses : 9.086,07 €

Dépenses diverses :	
Participation à la Bibliothèque du LMM	207,10
Informatique :	
imprimante	340,30
réparation disque dur	720,32
Office 2000 + antivirus	98,22
Livre	37,46
Fournitures : tampons du GDR	44,20

Total Dépenses diverses : 1.447,60 €

Total des dépenses : 49.853,67 €

☪ ☪

* Les chiffres concernant l'année 2003 sont appelés à être modifiés : ils correspondent à des engagements de commandes.

Compositions du Comité Scientifique et du Comité Directeur

COMITE SCIENTIFIQUE

Membres de droit :

- Le directeur scientifique du Département SPI ou son représentant :
Victor.Sanchez@cnrs-dir.fr , alix.gicquel@cnrs-dir.fr
- Le délégué régional du CNRS-ParisB ou son représentant:
doucelance@dr2.cnrs.fr
- Les directeurs du groupement: prudhom@ccr.jussieu.fr ,
Bernard.Zappoli@cnes.fr

Membres nommés :

- Mme Martine BENAMAR, Professeur de l'ENS - 24, rue Lhomond - 75231 PARIS CEDEX 05 Tél! 01 44 32 34 77 Fax: 01 44 32 34 33 benamar@pop.lps.ens.fr
- M. Daniel BONN, Professeur Université d'Amsterdam, Chargé de Recherche CNRS - Laboratoire de Physique Statistique de l'ENS - 24, rue Lhomond - 75231 PARIS CEDEX 05 Tél!: 01 44323802 Fax: 01 44 32 34 33
daniel.bonn@lps.ens.fr
- M. Roland BORGHI, Professeur - ESM2, IMT, Technopole de Château-Gombert - 13451 MARSEILLE CEDEX 20- Tél! 0491164247 borghi@esm2.imt-mrs.fr
- Mme Renée GATIGNOL, Professeur - Laboratoire de Modélisation en Mécanique UMR 7607 CNRS/ Université P. et M. Curie T66-Case -4 place Jussieu - 75252 PARIS CEDEX 05 Tél. 01 44 2754 69 Fax 01 44275259
gatignol@cicrp.jussieu.fr
- M. Emil HOPFINGER, Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels — LEGI — UMR 5519 — INP GRENOBLE — BP 53— 1025 Rue de la piscine — 38041 GRENOBLE Cedex 9 - Tél. 04 76 82 50 28 Fax 04 76 52 71
legi@hmq.inpg.fr
- M. Olivier SIMONIN, Professeur - ENSEEIHT-INP, IMFT, 1 Allée du Professeur Camille Soula -31400 TOULOUSE - Tél 05 61 285901 Télécopie : 0561 2858 99
olivier.simonin@imft.fr

Membres représentant le comité national

- Un représentant de la section 10 (Président Yvan SEGUI, Laboratoire de Génie Electrique, Université Paul Sabatier, UMR-5003, 118. route de Narbonne, 31062 TOULOUSE CEDEX,

COMITE DIRECTEUR (2 CNES et 2 CNRS)

- M. Richard BONJNEVILLE, CNES Richard.Bonneville@cnes.fr
- Mme Alix GICQUEL, CNRS elix.gicquel@cns-dir.fr
- M. Bernard ZAPPOLI, CNES Bernard.Zappoli@cnes.fr
- M. Alain FONTAINE, CNRS alain.fontaine@cns-dir.fr

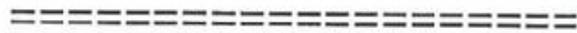
Formations de recherche du groupement

Le Groupement est constitué à partir des formations de recherche suivantes :

- ICMCB, BORDEAUX, UPR 9048, Equipe Fluides Critiques (M. Y. GARRABOS)
- Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors d'équilibre, MARSEILLE, UMR 138, dépendant des Universités d'Aix-Marseille I et II, Equipe Croissance et Elasticité (M. A. POCH EAU)
- Laboratoire de Modélisation et Simulation Numérique en Mécanique (MSNM), FRE 2405, CNRS, Equipes de Modélisation Numérique, (MM. P. BONTOUX, B. ROUX et P. HALDENWANG)
- Institut de Mécanique des Fluides de TOULOUSE, UMR CNRS/INP-UPS 5502, Groupe de Recherche Interfaces, INPT, (M. J. FABRE, Mme C. COLIN)
- Centre de Recherches sur la Chimie de la Combustion et des Hautes Températures, ORLEANS, UPR 4211, Equipe Combustion et Turbulence (M. I. GÔKALP et C. CHAUVEAU).
- Laboratoire de Physique des Matériaux Divisés et des Interfaces (LPMDI), UMR 8108 du CNRS, Université de Marne-la-Vallée, Equipe Phénomènes de Transport dans les Mélanges (Mme M. ADLER)
- Laboratoire de Combustion et de Détonique, POITIERS, UPR 9028, dépendant de l'Université de POITIERS, Equipe Flamme de Diffusion et Brûleurs, (M. P. JOULAIN) et Equipe Propagation des Déflagrations dans les Mélanges Gazeux et Biphasiques - Explosions (M. B.VEYSSIERE)
- Laboratoire de Modélisation Avancée des Systèmes Thermiques et des Ecoulements Réels, dépendant de l'ENSCP, Université de BORDEAUX (M. E. ARQUIS)
- Laboratoire de Mécanique et Thermodynamique, MARSEILLE, EA 2596, dépendant de l'Université d'Aix Marseille III, (M. H. GOUIN)
- Laboratoire de physique statistique de l'Ecole Normale Supérieure, Paris, (M. S. FAUVE)
- Laboratoire de Modélisation en Mécanique des Fluides, TOULOUSE, UFR MIG, Equipe Instabilités Hydrodynamiques et Modélisation, dépendant de l'Université Paul Sabatier (M. A. MOJTABI)
- Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, LYON, URA 263, Equipe Instabilités, Croissance Cristalline et Microgravité, dépendant de l'Ecole Centrale de Lyon et de l'Université Claude Bernard (MM. H. BENHADID et D. HENRY)
- Laboratoire de Modélisation en Mécanique, PARIS, UMR 7607, Equipe Changements de phase, combustion, forts gradients, dépendant de 'Université Paris VI

- Elaboration par Procédés Magnétiques, UPR 9033, dépendant de l'institut National Polytechnique de GRENOBLE, (MM. P. LEHMANN et R. MOREAU)
- Laboratoire Fluides, Automatique, Systèmes Thermiques, ORSAY, UMR 7608, dépendant de l'Université PARIS 11 (D. SALIN)
- Laboratoire des Systèmes Chimiques Complexe, MARSEILLE, UMR 6171, Unité de Thermodynamique des Phénomènes hors d'Equilibre, dépendant de l'Université d'Aix-Marseille III (Mme A. STEINCHEN)
- Laboratoire Matériaux et Microélectronique de Provence - L2MP, UMR 6137, MARSEILLE, dépendant de l'Université d'Aix-Marseille III, Equipe Croissance et Structures (MM. B. BILLIA ET H. JAMGOTCHIAN) et Equipe Simulation Numérique des Instabilités et du Désordre (M. J. M. DEBIERRE)
- Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, PARIS, UMR 7636, dépendant de l'Ecole Supérieure de Physique et de Chimie, Equipe Fluides Miscibles, (M. P. PETITJEANS) et Equipe Séparation Hydrodynamique (M. M. HOYOS)
- Laboratoire de Physique des Solides, ORSAY, UMR 8502, dépendant de l'Université PARIS 11 (Mme D. LANGEVIN)
- Laboratoire Groupe de Physique des Solides, PARIS, UMR 7588, Equipe Fronts de Solidification dépendant des Universités Paris et Paris 6 (M. G. FAIVRE)
- Laboratoire de Mécanique, sols, structures, matériaux, CHATENAY-MALABRY, UMR 8579, Equipe Microgravité : effets des vibrations sur les fluides hétérogènes hyper compressibles en apesanteur dépendant de l'Ecole centrale de Paris (M. P. EVESQUE)
- Laboratoire Département de Physique des Matériaux, LYON, UMR 5586 dépendant de l'Université Lyon I (M. J. SERT)
- EMT/LPMI, ENSAM, ANGERS (M. S. AMIROUDINE)
- Laboratoire EM2C - CHATENAY-MALABRY, UPR 288, Ecole Centrale Paris (Mme E. IACONA)
- Service de Physique de l'Etat Condensé, CEA Orme des Merisiers Centre d'études de Saclay, GIF SUR YVETTE, équipe du CEA collaborant au GDR (P. GUENOUN)

RAPPORTS DES EQUIPES



EQUIPE DU SUPERCRITIQUE POUR L'ENVIRONNEMENT, LES MATERIAUX ET L'ESPACE

Yves Garrabos, Daniel Beysens
ESEME-CEA-CNRS
ICMCB-CNRS UPR 9048
Université Bordeaux I
87 Avenue du Docteur Schweitzer
33608 PESSAC CEDEX

Personnel permanent au 1^{er} Janvier 2003 :

CEA
Directeur CEA : Daniel Beysens (CS) — ICMCB
Vadim Nikolayev (Ingénieur-chercheur) — ICMCB
Denis Chatain (Ingénieur-chercheur) — CEA-Grenoble
Gilles Rey-Giraud (Technicien) — CEA-Grenoble

CNRS - Université de Bordeaux 1
Directeur CNRS : Yves Garrabos (DR)
Carole Lecoutre (IR)
François Cansell (DR)
Jean-François Silvain (CR)
Roger Salmon (PR)
Anne Sérani (Prag) 2001
Bernard Berdeu (Pr)

Personnel non permanent

Personnel sous contrat (période 01/01/2000 - 31/12/2002)

CNRS
Anne Dejoan (post-doc) 1999-2001
Fabien Palencia (technicien) 1999-en cours

1. CONTEXTE

L'Equipe Commune CEA-CNRS «ESEME» a été créée en décembre 1999. Six mois plus tard, une partie des effectifs CEA d'ESEME déménageait à l'ICMCB. Un premier bilan a été effectué au niveau CEA après une période de deux ans (audit en date du 15 Novembre 2001). Au niveau CNRS, une évaluation a été effectuée au cours de l'audit international de l'ICMCB en date du 20-21 juin 2002. Les conclusions des deux audits ont confirmé la pertinence des objectifs initialement fixés et la qualité des activités développées au sein de l'équipe comme des orientations scientifiques envisagées pour le futur. Nous rappelons pour mémoire que, dans la convention de création d' ESEME », les objectifs fixés se résumaient au programme suivant :

- « Procéder à de nouvelles investigations théoriques, expérimentales et numériques concernant - l'étude des propriétés fondamentales en physique et chimie des fluides supercritiques, - l'application des recherches fondamentales à l'environnement, aux matériaux et au spatial.
- **Maintenir des liens étroits avec l'ensemble de la communauté scientifique française et internationale.**
- **Tenir compte des projets expérimentaux susceptibles de se réaliser dans la Station Spatiale Internationale. »**

C'est évidemment sur le seul aspect « activité spatiale » de ces trois dernières années que nous concentrons notre rapport, en soulignant que cette période correspond à un changement très important du contexte recherche en « microgravité », marqué par la destruction de la station spatiale russe MIR en 2000, et la mise en perspective des projets à bord de la future Station Spatiale internationale (155). Mais, avant, nous voudrions revenir sur ce qui fait la spécificité de la région « supercritique » des fluides qui correspond à des températures et pressions supérieures au point critique du fluide considéré. Le voisinage du point critique est le siège d'anomalies importantes des paramètres thermodynamiques (hyper compressibilité) et des propriétés de transport (ralentissement ou accélération critique de la relaxation thermique). Des mécanismes nouveaux (effet « Piston ») deviennent très importants pour la thermique. D'autre part, les phénomènes de point critique relèvent de l'universalité des transitions du deuxième ordre et tout phénomène peut se décrire par des lois d'échelles universelles, y compris les phénomènes de mouillage d'une troisième phase solide ou fluide. Plus loin du point critique, la densité du fluide devient celle d'un liquide, tout en conservant des propriétés de transport des gaz, ce qui procure aux fluides « supercritiques » des propriétés spécifiques concernant les phénomènes de solvation sélective, de solubilité ou de réactivité.

Les phénomènes de point critique trouvent leurs applications dans l'énergétique, dans la recherche de rendements thermiques plus élevés. Une température de chaudière plus élevée met la vapeur au-dessus de son point critique et, dans le cas des chaudières de réacteurs nucléaires, permet l'utilisation de neutrons rapides.

L'industrie spatiale est confrontée à la fois avec la proximité du point critique (moteurs cryogéniques) et l'absence plus ou moins prolongée de pesanteur. Notre contribution dans ce domaine vient de l'étude des mécanismes de base (thermique, séparation de phase germination - croissance) observés avec des fluides sous- et supercritiques en microgravité.

Nos études des phénomènes de nucléation - croissance sont aussi en amont d'avancées significatives tant au niveau des phénomènes biologiques que dans l'élaboration de matériaux. Dans le cas où la germination se fait à une paroi, les études relèvent du mouillage — avec des applications dans des domaines variés, comme la production d'eau par rosée artificielle ou l'évaluation de la contamination radio-active de parois humides.

Concernant la réactivité chimique, l'un des intérêts majeurs d'un fluide supercritique est de pouvoir faire varier continûment la masse volumique du milieu, passant de valeurs typiques du liquide à celles du gaz et de contrôler ainsi ses propriétés physico-chimiques sur une grande échelle. La maîtrise des propriétés du milieu, par ajustement des paramètres pression et température, permet alors de contrôler la réaction chimique. La réactivité chimique dans les milieux supercritiques, ou la caractérisation des processus élémentaires au cours des transformations chimiques, sont généralement gérés au travers d'une expérimentation directe. Cette approche expérimentale, justifiée souvent par la détermination des conditions opératoires optimum du procédé, traduit aussi une absence sérieuse de connaissances fondamentales sur les bases moléculaires du mécanisme de solvation hors équilibre dans les conditions supercritiques. Dans ce domaine, les perspectives de notre action se situent au niveau de la compréhension du rôle local de l'hydrodynamique compressible sur les processus chimiques dans les milieux fluides supercritiques.

2. BILAN 1999-2001 DES ACTIVITES SPATIALES

La motivation actuelle des études spatiales vient de ce que l'absence de pesanteur modifie de façon dramatique le comportement des fluides dans leur région critique. L'approche du point critique se traduit en effet par de violentes anomalies de la compressibilité isotherme, qui diverge, de la chaleur spécifique, etc. et d'anomalies du transport de la chaleur, dont la diffusivité thermique s'annule. Ces anomalies rendent extrêmement instables ces fluides, qui se mettent en convection sur terre pour d'infimes gradients de température. Supprimer la pesanteur permet de mettre en évidence d'autres mécanismes et d'autres forces qui peuvent avoir été ignorés jusqu'ici.

Notons cependant que l'espace n'a pas le seul apanage de l'apesanteur. Au SBT (CEA/Grenoble), une expérience de compensation magnétique des forces de gravité au niveau atomique est opérationnelle. Elle a été sélectionnée par l'ESA comme équipement pour préparer les expérimentations spatiales. Le fluide utilisé est (p-) H qui, grâce à son (relativement) grand moment diamagnétique, peut être évité sur l'extrémité d'une bobine supraconductrice de IOT. Les inhomogénéités du champ magnétique limite la taille de la cellule à un cylindre de 2mm de diamètre et 2 mm de longueur. Cet équipement a été doté d'un dispositif de vibration couvrant la gamme de 0 à

60 Hz avec une amplitude de +1- 0.5 mm. Une cellule réalisée entièrement en saphir permet de s'affranchir des courants de Foucault et des forces de Lorentz a été mise au point. L'effort actuel porte sur l'obtention d'une meilleure régulation de température sous vibration.

2.1.1. Transport de chaleur en apesanteur et ébullition « critique »

L'hyper compressibilité des fluides dans la région critique permet un transport adiabatique extrêmement rapide de la chaleur, que nous avons découvert en apesanteur et baptisé « effet Piston » : la couche limite thermique près de la paroi chauffante se dilate et comprime et chauffe adiabatiquement le reste du fluide à la vitesse du son. Les dernières expérimentations dans l'équipement ALICE2 dans la station MIR ont montré que ce mécanisme de transport de la chaleur peut conduire à des résultats paradoxaux, violant apparemment le deuxième principe de la thermodynamique quand les deux phases gaz et liquide d'un fluide (SF6) sont chauffées en apesanteur, le gaz peut en effet devenir plus chaud que la paroi chauffante. Cette surchauffe est maximum à 5 du point critique où elle est supérieure à 120%. Ce paradoxe peut être levé si l'on considère qu'il y a transfert thermique et transfert mécanique: c'est la couche de liquide qui est dilatée par la chauffe du corps de la cellule, et cette dilatation comprime plus la vapeur que le liquide. La nature thermo-compressible de l'effet Piston permet donc d'expliquer cette apparente violation. Cette anomalie n'est visible que si la bulle de gaz n'est pas en contact étroit avec la paroi de la cellule.

Si ce n'est pas le cas, d'autres phénomènes sont observés, en relation avec la crise d'ébullition bien connue des thermiciens, quand le flux de chaleur est si fort que le liquide s'évapore et forme un film de vapeur à la paroi, ce qui empêche le transfert de chaleur. Nous avons interprété ce phénomène par un phénomène de la ligne triple solide-liquide-vapeur, où la poussée de l'évaporation produit une force — la force de recul — qui tire la ligne de contact vers la phase liquide et étale la vapeur sur la paroi (Fig. 1). Dans une cellule où maintenant la bulle de gaz est comprimée par les parois on observe un étalement de gaz à la paroi. C'est une véritable crise d'ébullition, visible ici à faible flux thermique parce que l'absence de gravité et la proximité du point critique rendent négligeable les forces de pesanteur et les forces capillaires. Cette transition par tirage de ligne de contact est la démonstration des idées développées dans nos études théoriques et numériques, où nous avons proposé ce mécanisme pour rendre compte de la crise d'ébullition.

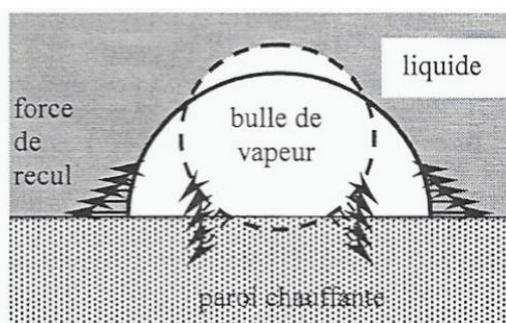


Fig. 1. Etalement de la bulle de vapeur sur une paroi chauffante sous l'action de la force de recul de la vapeur.

2.1.2.1. « Caloduc » à effet Piston

L'effet Piston permet de transmettre de la chaleur d'une extrémité ((chaude)) à une extrémité « froide » de façon instantanée. Le flux de chaleur est limité par les gradients thermiques des couches limites chaudes et froides, le reste du fluide jouant le rôle de court-circuit thermique.

Des simulations numériques ont permis de préciser les conditions d'utilisation d'un tel procédé. Une cellule d'expérimentation a été construite et testée pour H dans le montage de compensation magnétique. Les résultats ont permis de conforter les hypothèses retenues pour la modélisation des phénomènes.

2.1.3. Cinétique et morphologie des transitions de phase

Les résultats obtenus ces dernières années sur les caractéristiques des transitions de phase en apesanteur ont fait l'objet de revues et ont été appliquées avec succès à des phénomènes biologiques de morphogenèse embryonnaire. A la fois la morphologie et la cinétique du développement des tissus peut-être expliqué par l'existence d'une tension interfaciale entre tissus (le « moteur » de la croissance) et d'une viscosité (le « frein »).

2.1.4. Effet de vibrations contrôlées

L'objectif ici est de comprendre le comportement de système inhomogènes- (fluides, milieux granulaires) vibrés pour pouvoir les contrôler en apesanteur. De façon générale, les inhomogénéités ont tendance à se déformer et à s'orienter perpendiculairement à la direction de la vibration par l'effet de la pression (non linéaires) de Bernoulli. Celle-ci est proportionnelle au carré de la vitesse du fluide, sa valeur moyenne est donc non nulle. La vibration réalise ainsi des effets qui s'apparentent à ceux d'une « pesanteur » artificielle, mais ceux-ci peuvent quelquefois se montrer paradoxaux.

L'effet des vibrations (amplitude a , fréquence f) sur un fluide se manifeste au niveau des inhomogénéités de densité. Celles-ci peuvent être induites par un gradient thermique ou par le fait que le fluide est diphasique (gaz-liquide). La Fig. 2 montre quelques exemples de comportements sous vibration en présence ou non de gravité terrestre

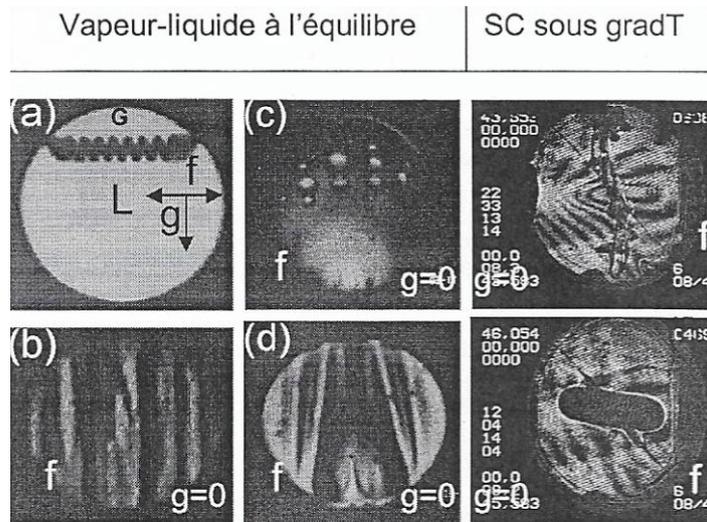


Fig. 2. Quelques nouveaux comportements sous vibration d'un fluide inhomogène. (a) sous gravité terrestre (g), vibration perpendiculaire à la gravité. Des vagues immobiles sont créées, (b) : en apesanteur, les vagues atteignent le bord de la cellule, structurant le fluide en couches alternées liquide - vapeur. (c)-(d): sous compensation magnétique avec H_2 . En (c), loin du point critique, des bulles de vapeur s'ordonnent en rangées, en (d), la configuration (b) est reproduite. (e)-(f) : fluide initialement homogène au-dessus du point critique. Une impulsion de chaleur est produite au centre de la cellule. (e) vibration basse fréquence (0.3 Hz). La zone chaude est convectée parallèlement à la vibration. (f) : vibration haute fréquence (1.6 Hz). La zone chaude est convectée perpendiculairement à la vibration.

2.1.5. Cas des milieux granulaires sous vibration

Dans un milieu granulaire, la vibration injecte de l'énergie, qui est redistribuée par collisions, et ((chauffe>) donc le milieu. L'analyse de l'expérience MiniTEXUS de 1998, où des milieux granulaires de différente densité volumique a permis de mettre en évidence un résultat majeur : une transition ((gaz» - «solide ». A basse densité, le milieu granulaire vibré se comporte comme un gaz de particules. A plus haute densité, un cluster immobile au milieu de la cellule se forme, stabilisé par un gaz de particule. Cette transition pourrait expliquer la formation des agrégats planétaires (anneaux de Saturne). Des expériences complémentaires ont été réalisées dans l'Airbus Zéro-g pour, à la fois mesurer la « pression » du milieu granulaire et préparer de nouvelles expérimentations, notamment l'expérience en fusée-sonde MAXUS-5 qui a eu lieu le 01 Avril 2003. Les résultats sont en cours de dépouillement.

3. PERSPECTIVES

L'essentiel de notre activité est maintenant axée sur la préparation des expériences qui seront effectuées dans l'instrument DECLIC à bord de l'ISS. Après avoir développé et fourni les cellules de test pour les modèles de qualification des inserts ALI et HTI et de l'instrument (EM), nous sommes entré dans la phase de réalisation des cellules de vol pour le modèle de vol (FM).

Les perspectives de développements à très court terme sont axées sur les études du mouillage et des phénomènes d'évaporation-condensation au voisinage du point critique, Il s'agit des transferts thermiques, en relation avec l'énergie (chaudières et réacteurs supercritiques) et l'espace (gestion des fluides dans l'espace, caloducs à effet Piston). Concernant la réactivité chimique, des progrès dans la compréhension microscopique et macroscopique des milieux fluides supercritiques sont attendus, grâce notamment à l'équipement DECLIC qui pourra effectuer des oxydations en F-1 supercritique en apesanteur.

Soulignons pour conclure que nos activités « spatiales » sont inscrites au sein de deux Topical Teams dont nous assurons la coordination.

- « Topical Team » de l'ESA sur « Chemical Physics in near-critical and supercritical fluids» (animateur:

Daniel Beysens). L'objectif est de concerter les actions fluides critiques et supercritiques en Europe ayant un rapport avec la microgravité (matériaux, énergie, chimie...)

- « Topical Team » de l'ESA sur «Vibrational Phenomena» (co-animateurs: Daniel Beysens et Pierre Evesque).

L'objectif est de concerter les actions ((matière inhomogène» (fluides, milieux granulaires) en Europe ayant un rapport avec la microgravité.

ACOUSTIQUE DE MILIEUX NON-LINEAIRES ET/OU DESORDONNES

Stéphan Fauve, Nicolas Mujica, Régis Wunenburger

Laboratoire de physique statistique de l'Ecole normale supérieure
24, rue Lhomond 75005 Paris

1. Propagation du son dans les mousses

La diffusion du son par les bulles de gaz d'une mousse a été étudiée dans le cadre de la thèse de N. Mujica. L'intérêt de l'étude de la propagation acoustique dans un milieu diphasique est double d'une part, c'est un bon système expérimental pour l'étude de la propagation en milieu désordonné ; d'autre part, l'acoustique peut être utilisée pour caractériser les propriétés du milieu. La vitesse de propagation et l'absorption de trains d'onde dans une mousse ont été mesurées en fonction de la fréquence centrale du train d'onde. La gamme de fréquence étudiée correspond à des longueurs d'onde comprises entre le dixième de millimètre et quelques millimètres.

La vitesse du son est de quelques dizaines de mètres par seconde. Cet ordre de grandeur est donné par la théorie du milieu effectif, mais plus précisément, les vitesses mesurées sont supérieures de quelques dizaines de pourcents à la prédiction du milieu effectif liquide-gaz. Nous avons montré que cela résulte de l'élasticité du squelette liquide de la mousse que nous avons pris en compte à l'aide de la théorie de Biot.

L'absorption du son varie beaucoup plus que la vitesse sur la gamme de fréquence considérée, ce qui rend la propagation inobservable à plus haute fréquence lorsque la longueur d'onde se rapproche de la taille caractéristique des bulles de gaz. Les mécanismes d'absorption de l'onde cohérente sont, les effets visqueux, les transferts thermiques aux interfaces et la diffusion multiple. Nous avons mis en évidence que les transferts thermiques sont le mécanisme dominant pour le type de mousse étudiée.

Enfin, ces techniques de mesure acoustique permettent l'étude du vieillissement de la mousse. En particulier, nous avons mis en évidence une loi d'échelle pour l'évolution au cours du temps de l'absorption par longueur d'onde.

2. Effet Doppler et non-linéarités acoustiques

Lorsque deux ondes de fréquence f (respectivement F) interagissent non linéairement, des ondes de fréquence $f \pm F$ ainsi que les combinaisons linéaires d'ordres plus élevés de f et F sont engendrées. L'étude de cet effet permet de mesurer les propriétés non linéaires du milieu dans lequel se propagent les ondes, Cependant, lorsque cette étude est effectuée en géométrie confinée, les parois sont également mises en vibration aux fréquences f et F et la réflexion d'une onde sur une paroi vibrante engendre par effet Doppler les combinaisons linéaires des fréquences impliquées. Cet effet de surface est donc en compétition avec les non-linéarités de volume et il doit être pris en compte si l'on veut pouvoir étudier les non-linéarités du milieu. L'étude théorique de ce phénomène avait donné lieu à une longue série de controverses dans la littérature. Nous avons donc effectué son étude expérimentale afin de quantifier les régimes dans lesquels l'effet Doppler (respectivement les non-linéarités acoustiques de volume) apportent la contribution dominante. Les résultats suivants ont été obtenus :

- l'effet Doppler comme les non-linéarités de volume engendrent une modulation de phase du signal haute fréquence f ; l'amplitude du signal engendré à fréquence $f \pm nF$ est donc donnée par la fonction de Bessel J_n ,
- les deux effets sont intrinsèquement non-linéaires et ne peuvent donc être discriminés en modifiant l'amplitude des ondes,

- le régime où l'effet Doppler est dominant est caractérisé par le fait que l'amplitude du signal engendré à fréquence $f \pm F$ ne dépend que de l'amplitude de vibration à fréquence F et non de F ,
- le régime où les non-linéarités dominant est caractérisé par le fait que l'amplitude du signal engendré à fréquence $f \pm F$ dépend de la pression associée à la basse fréquence F (donc à la fois à l'amplitude et à F),
- dans un régime d'onde quasi-plane en géométrie semi-infinie, l'effet Doppler est dominant tant que le récepteur est situé à une distance du plan vibrant qui est inférieure ou de l'ordre de la longueur d'onde associée à la vibration de basse fréquence F . Ceci provient du fait que les non-linéarités de volume ont un effet cumulatif alors que l'effet Doppler ne se produit que sur la surface en vibration. Le critère précédent peut cependant être modifié en géométrie confinée où l'effet des non-linéarités de volume dépend des résonances acoustiques.

3. Non-linéarités acoustiques au voisinage du point critique liquide-vapeur

De nombreuses études expérimentales et théoriques ont été consacrées à l'acoustique linéaire au voisinage du point critique. La mesure de la vitesse du son permet de sonder des propriétés thermodynamiques du fluide alors que celle de l'absorption caractérise des phénomènes de transport. Par contre, il n'existe pratiquement aucune mesure des non-linéarités acoustiques au voisinage du point critique.

Nous avons réalisé une telle étude en mesurant l'onde de fréquence $f - F$ engendrée par interaction non-linéaire entre deux ondes de fréquence f (respectivement F) incidentes sous un angle de 30° . Cela a nécessité la réalisation d'une cellule de taille importante (3 litres environ) pouvant contenir du dioxyde de carbone sous haute pression (jusque 100 atmosphères). En effet, il est nécessaire que le champ d'interaction entre les ondes soit hors du champ proche des émetteurs. Nous avons ainsi mis en évidence l'augmentation importante du coefficient de non-linéarité acoustique au voisinage du point critique (une augmentation d'un ordre de grandeur est déjà observé à seulement 0.1 K du point critique).

Un type de mesure différent a été réalisé en étudiant la résonance acoustique d'une cavité (cellule conçue par Yves Garrabos). A faible amplitude d'excitation, la valeur de la fréquence de résonance est principalement déterminée par la vitesse du son et la largeur de résonance par l'absorption. A amplitude d'excitation plus élevée, nous avons observé une asymétrie très marquée de la courbe de résonance, caractéristique des effets non-linéaires. Nous avons montré qu'à amplitude d'excitation fixée, cette asymétrie est maximale au voisinage du point critique, confirmant ainsi la mesure précédente.

Signalons enfin, que le dispositif expérimental de taille importante que nous avons été conduits à réaliser pour la première étude mentionnée ci-dessus, a été conçu de manière à permettre l'étude de divers problèmes hydrodynamiques au voisinage du point critique qui pourraient impliquer d'autres équipes du GDR :

- mesure de flux de chaleur en convection turbulente avec changement de phase,
- étude de l'effet d'un écoulement turbulent sur la nucléation et la dynamique de gouttes liquides en phase vapeur,
- mesure de la vitesse du son dans un fluide en ébullition près du point critique, effet des changements de phase sur la vitesse et l'absorption du son.

PHENOMENES DE TRANSPORT DANS LES FLUIDES EN MICROPESANTEUR

Jean Colombani, maître de conférences IUT — UCBL
Jean-François Jal, maître de conférences UCBL
Jacques Bert, professeur IUT- UCBL

Laboratoire physique de la matière condensée et nanostructures
Université Claude Bernard Lyon 1 — CNRS (UMR 5586)
6, rue Ampère - bât. Brillouin
F -69622 Villeurbanne cedex

Notre groupe s'intéresse aux propriétés dynamiques, en particulier au transport de masse, dans les mélanges liquides simples et complexes. Ceci l'a conduit à essayer de mieux comprendre des phénomènes où la diffusion de matière joue un rôle primordial

- quelle influence peuvent avoir les stimulations qu'on impose à une solution de protéines sur ses propriétés d'interdiffusion?

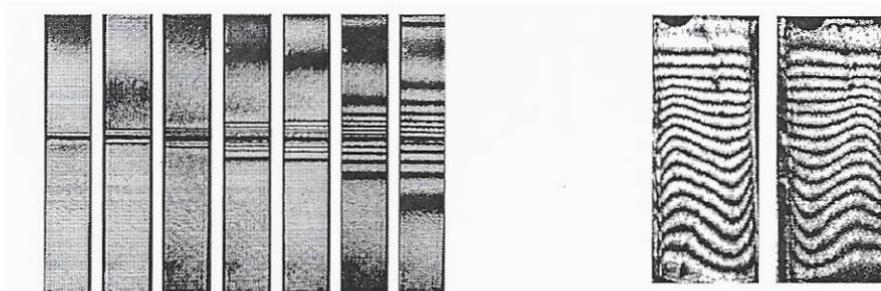
- comment mesurer de façon fiable la thermodiffusion, quelle est l'origine microscopique de ce phénomène mal compris et quelle influence peut avoir sur lui un milieu poreux?

- lors de la démixtion par germination-croissance dans un mélange liquide, de quelle façon la cinétique de mûrissement est-elle influencée par le mécanisme de diffusion (diffusion libre, évaporation-condensation, diffusion brownienne)?

Pour ces différentes études, l'approche expérimentale est toujours privilégiée, en particulier par l'utilisation de techniques optiques (holointerférométrie, absorption optique), mais des simulations numériques sont également utilisées pour certains problèmes difficilement abordables expérimentalement. De plus, les processus étudiés étant souvent susceptibles d'être influencés ou perturbés par le champ de gravité (convection, sédimentation), nous sommes attentifs au mécanisme d'influence de la pesanteur et aux limites de validité de nos expériences sur Terre.

Interférométrie holographique

Une des techniques dont notre équipe a la maîtrise est l'interférométrie holographique. Celle-ci est une technique interférométrique permettant d'observer des évolutions dans le temps du champ de température ou de concentration dans un milieu transparent. Ainsi, l'évolution des iso dans un liquide permet par exemple d'observer des processus de diffusion ou de repérer l'apparition d'instabilités convectives (voir figures ci-dessous).



Gauche: Evolution de la concentration par diffusion à travers le ménisque dans un mélange eaulacide isobutyrique lors d'une montée de température dans sa lacune de miscibilité.

Droite: Convection thermosolutale oscillatoire dans un électrolyte aqueux présentant des gradients de température et de concentration verticaux.

Interdiffusion dans des solutions de protéines sous contraintes physique, chimique et mécanique

A partir de mesures de diffusion par interférométrie holographique, nous avons mis en évidence l'impact de différentes contraintes thermique (chauffage), chimique (sel) ou mécanique (cisaillement) sur le coefficient d'interdiffusion d'une protéine en solution aqueuse, la sérualbumine bovine (BSA).

Grâce à des mesures de spectroscopie de corrélation de photon (permettant d'accéder à la taille moyenne de la protéine) et d'absorption UV (sensible à la présence d'acides aminés), nous avons relié l'évolution du coefficient d'interdiffusion au changement de conformation de la protéine. Pour les stress thermique et chimique, le dépliement de la protéine initialement globulaire augmente sa taille et fait chuter sa vitesse de diffusion. Pour le stress mécanique, l'augmentation du coefficient de diffusion reste inexpliquée.

Thermodiffusion

La thermodiffusion, ou effet Soret, est la réponse solutale à une sollicitation thermique. Ainsi, lorsqu'un mélange liquide binaire est soumis à un gradient de température, il est le siège d'un flux de masse qui provoquent une démixtion partielle des deux constituants.

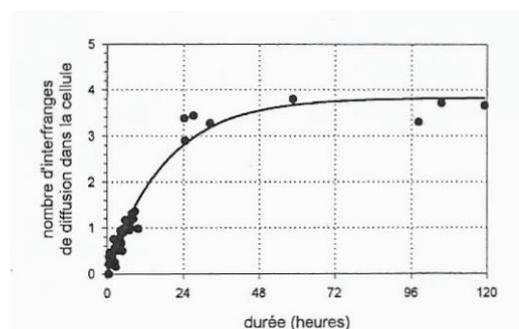
Le coefficient de Soret, caractéristique du phénomène, est une grandeur délicate à mesurer sur Terre, du fait de l'existence de gradients de température ou de concentration pendant les expériences, qui peuvent provoquer l'apparition de mouvements convectifs masquant les processus diffusifs.

Pour éviter cela, nous avons eu recours à deux précautions :

- nous déterminons le diagramme de stabilité hydrodynamique du système dans les conditions exactes de l'expérience afin de délimiter précisément le domaine diffusif.
- l'interférométrie holographique nous permet de vérifier, pendant toute la durée des expériences, qu'aucune perturbation convective locale ne vient masquer la diffusion.

Thermodiffusion d'une solution de protéine

La compréhension microscopique de l'effet Soret a progressé récemment mais aucune prédiction n'est encore possible et des valeurs expérimentales de référence sont toujours nécessaires, Il semblerait pour autant que la thermodiffusion dans des fluides complexes telles que les solutions colloïdales, du fait de leurs propriétés (grosses particules, milieu dilué), soit interprétable en termes de flux de matière provoqué par un gradient de tension interfaciale particules/solvant.



Evolution du nombre d'interfranges lors d'une expérience de thermodiffusion dans une solution aqueuse de BSA. Le nombre d'interfrange à l'état stationnaire est directement proportionnel au gradient de concentration dans le liquide.

Afin d'utiliser cette possibilité pour comprendre le rôle éventuel de la thermodiffusion dans les liquides biologiques, nous avons réalisé des mesures préliminaires de thermodiffusion

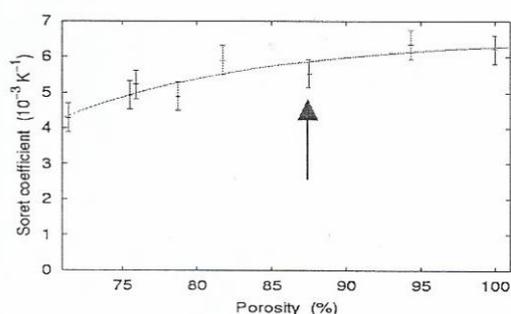
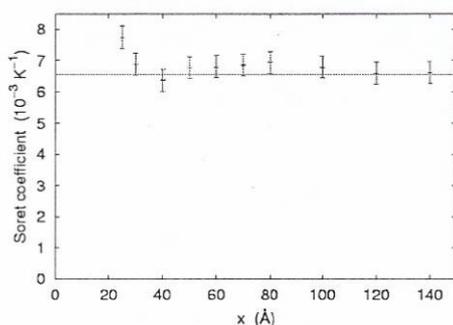
par interférométrie holographique dans une solution aqueuse de BSA. Ces premiers résultats ont montré la faisabilité sur terre de ces expériences du fait d'un coefficient de Soret positif (voir figure ci-dessous). Nous allons donc étudier l'influence du solvant et de la concentration en protéine sur le coefficient de Soret et tenter d'en comprendre l'origine.

Thermodiffusion en milieu poreux dans un mélange d'alcanes

Afin d'acquérir des connaissances et des compétences nouvelles, en particulier en simulation numérique, Jean Colombani est parti en stage post-doctoral en 1999-2000 au Laboratoire de physico-chimie moléculaire de l'Université Bordeaux 1, cofinancé par Elf exploration-production et le CNRS. Il s'agissait d'évaluer, par simulation de la dynamique moléculaire, l'influence d'un milieu poreux de silicate à l'échelle microscopique sur la thermodiffusion d'un mélange binaire d'alcanes, représenté par des sphères de Lennard Jones. Afin de se rapprocher de la réalité expérimentale (influence thermique du milieu poreux, sites d'adsorption, ...), le choix a été fait de représenter la roche poreuse de façon explicite à l'aide d'un solide harmonique pour deux géométries : un pore lamellaire et une distribution aléatoire de petites cristallites.

Il a été constaté que la roche joue un rôle de court-circuit thermique sur le liquide mais que celui-ci est sans incidence sur la thermodiffusion, et que l'influence du milieu poreux sur la distribution des deux alcanes se limite à la première couche d'adsorption. Dans le cas du milieu poreux, ceci provoque une très légère augmentation du coefficient de Soret. Dans le cas de la distribution de cristallites, celui-ci chute au maximum de 30% (voir figure ci-dessous). Dans les deux situations, le coefficient de Soret du liquide libre (sans milieu poreux) peut être retrouvé en supprimant du calcul les molécules des premières couches d'adsorption.

Cette étude, menée par Elf, prend sa place dans un projet de mesure du coefficient de Soret dans des mélanges d'alcanes en microgravité.



Gauche: Evolution du coefficient de Soret en fonction de la taille du pore lamellaire.

Droite: Evolution du coefficient de Soret en fonction de la porosité pour un milieu poreux constitué de 16 cristallites.

Démixtion

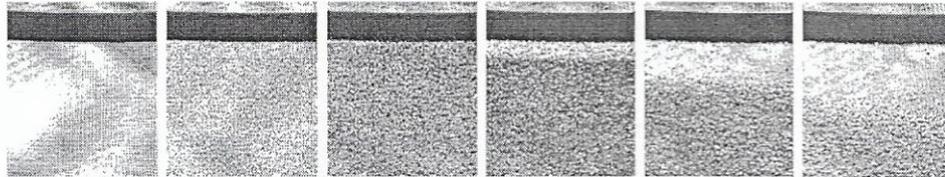
Parallèlement, nous nous intéressons au rôle de la diffusion sur la cinétique de transition de phase liquide-liquide. En effet, lorsqu'un mélange binaire liquide est plongé brutalement dans sa lacune de miscibilité, une démixtion se produit amenant à l'apparition progressive de deux phases macroscopiquement séparées (voir photographies ci-dessous). Dans le cas où la fraction volumique des deux phases est très différente (trempe asymétrique), le mécanisme de séparation de phase est la germination-croissance.

En utilisant une technique d'absorption optique, nous avons étudié un certain nombre de problèmes ouverts concernant ce processus. Pour cela, nous avons mesuré le nombre de Péclet des gouttelettes dans le front de sédimentation, ce qui nous a permis d'accéder à la taille de celles-ci au tout début de la sédimentation. Nous avons pu tirer de ces résultats les conclusions suivantes :

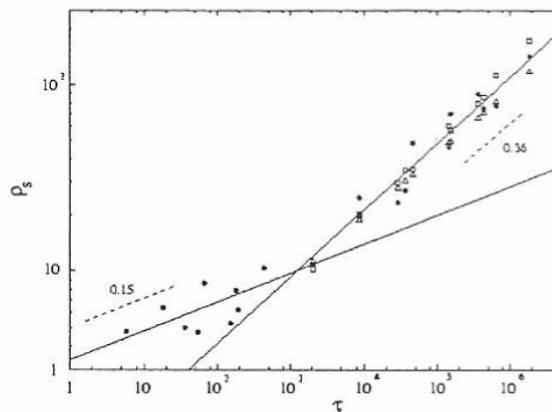
- au début de la croissance, après l'étape de germination, le mûrissement des gouttelettes se fait par simple diffusion du soluté du liquide vers les germes. Quand les sphères de déplétion de soluté autour des gouttelettes commencent à se recouvrir, d'autres mécanismes de croissance entrent en jeu (mûrissement d'Ostwald, coalescence par collisions browniennes) diminuant l'interface entre les deux phases et provoquant un changement de cinétique de croissance. Nous avons mesuré le temps universel de transition entre le premier régime (diffusion libre) et le second (croissance par réduction d'interface) et montré qu'il était compatible avec la valeur prédite théoriquement par Tokuyama & Enomoto [Rev. Lett. 69, 312 (1992)] (voir figure ci-dessous).

- pendant la sédimentation la croissance des gouttelettes continue et nous avons montré que le processus de cette croissance était la coalescence par collisions gravitationnelles plutôt que par collisions browniennes.

- enfin, nous avons pu sonder la cinétique de croissance des gouttelettes situées au sommet du front de sédimentation. A cet endroit, la densité des gouttelettes est très faible et on peut considérer que les interactions diffusionnelles sont négligeables. La loi de croissance se trouve être différente de la loi de diffusion libre du fait de l'advection de soluté provoquée par la sédimentation. Cette loi est d'ailleurs très proche de [situation de croissance par diffusion-advection que nous avons trouvée dans la littérature [Buil and Ducasse, Phys. Rev. Lett., 78, 2156 (1997)].



Germination, croissance puis sédimentation dans un mélange eau/acide isobutyrique plongé de 0, 13°C dans sa lacune de miscibilité.



Evolution (en unités réduites) de la taille des gouttelettes avec le temps. On observe une rupture de pente lors du changement de mécanisme de croissance.

ETUDE DES INSTABILITES THERMOCONVECTIVES ET DE LA TRANSITION DANS LES FLUIDES A PROXIMITE DU POINT CRITIQUE PAR SIMULATION NUMERIQUE DIRECTE MODELISATION D'UNE ACCELERATION CRITIQUE DU TRANSFERT DE MASSE A UNE INTERFACE SOLIDE — FLUIDE SUPERCRITIQUE.

Patrick BONTOUX, Isabelle RASPO, Gilbert ACCARY, Sofiane MERADJI, Bernard GILLY

Laboratoire de Modélisation et Simulation Numérique en Mécanique (MSNM), F.R.E. 2405 du C.N.R.S., I.M.T. —La Jetée, Technopôle de Château Gombert, 38 rue Frédéric Joliot Curie, 13451 Marseille Cedex 20

1. Introduction

La découverte des effets thermoacoustiques (effet Piston) comme responsables en micropesanteur de l'homogénéisation rapide de la température dans les fluides proches de leur point critique a provoqué un intérêt croissant pour l'hydrodynamique des fluides supercritiques (FSC). Le mécanisme de cet effet Piston est maintenant bien connu et les nouvelles recherches s'orientent depuis quelques années vers le transport de la chaleur dans les FSC en présence de gravité terrestre, ou, de façon plus générale, l'interaction entre l'effet Piston et la convection naturelle. La recherche que l'on effectue, en collaboration avec Bernard Zappoli (CNES Toulouse), s'insère dans ce contexte. L'objectif général est d'étudier l'influence de l'effet Piston sur les transferts thermique et de masse dans un fluide pur supercritique ou dans un mélange fortement dilué, le solvant étant en phase supercritique. La recherche est menée numériquement en résolvant les équations de Navier-Stokes instationnaires et compressibles, couplées à l'équation d'énergie, au moyen d'une méthode de type volumes finis.

2. Instabilité convective en configuration de Rayleigh-Bénard

On considère une cavité 2D carrée contenant du CO_2 initialement au repos, à une densité moyenne égale à la densité critique P et à l'équilibre thermodynamique à une température constante T très légèrement supérieure à la température critique T_c . Puis la température de la paroi inférieure est progressivement augmentée de quelques mK jusqu'à $T_{\text{hot}}=T_i+\delta T$ tandis que la paroi supérieure demeure à T_i et que les parois latérales sont adiabatiques. Les objectifs sont de déterminer les seuils d'apparition de la convection en fonction de la distance au point critique et de δT , d'identifier les mécanismes responsables de l'homogénéisation de la température et de la densité dans cette configuration, et d'étudier le développement de l'instabilité convective sur des échelles de temps très longues. La modélisation se fait en considérant l'équation de Van der Waals comme équation d'état et une loi en $((T-T_c)/T_c)^{-1/2}$ pour représenter la divergence de la conductivité thermique au voisinage du point critique. Les équations de Navier-Stokes instationnaires, couplées à l'équation d'énergie, sont résolues avec une méthode de type volumes finis associée à une approximation à faible nombre de Mach.

Du fait du caractère hyper-dilatable des FSC, le chauffage de la paroi inférieure de la cavité provoque l'apparition d'une fine couche limite thermique, associée à un fort gradient de densité, au voisinage de la paroi. Cette couche limite se dilate fortement et agit comme un piston sur le coeur du fluide dont la température est augmentée très rapidement de façon adiabatique par effets thermoacoustiques. L'augmentation de la température du coeur du fluide induit l'apparition d'une seconde couche limite thermique au voisinage de la paroi supérieure. Ainsi, le fluide se trouve divisé en trois zones : deux couches limites thermiques et le coeur de la cavité. Lorsque le nombre de Rayleigh local, basé sur l'épaisseur de la couche limite, dépasse une valeur critique, une instabilité convective se développe dans une ou dans les deux couches limites. Cette instabilité se manifeste sous forme de "plumes" qui, par la suite, interagissent dans le coeur de la cavité. Pour la couche limite chaude, limitée en bas par la paroi et en haut par la limite inférieure du coeur, les seuils critiques ont été comparés aux études théoriques de stabilité de Gitterman et Steinberg (High Temp., 1971), revues et corrigées récemment par Cariés et Ugurtas (Physica D, 1999). Ces études ont montré que la stabilité convective du FSC est gouvernée par le critère de Rayleigh classique (i.e. $Ra \geq Ra_c$ (Ra_c calculé pour un fluide de Boussinesq)) à condition que le nombre de

Rayleigh prenne en compte une correction provenant du critère du gradient adiabatique. Nos résultats sont cohérents par rapport à l'analyse théorique.

En micropesanteur, lorsqu'un FSC est chauffé localement, l'effet Piston provoque un chauffage uniforme du coeur de la cellule. Ainsi, l'homogénéisation de la température du coeur se fait très rapidement, à l'échelle de temps de l'effet Piston. En présence de gravité, le phénomène est différent. L'effet Piston génère un gradient de température positif dans le coeur de la cavité et c'est la convection qui réalise ensuite l'homogénéisation de la température du coeur. Ce phénomène de gradient thermique se produit dans un régime transitoire dont la durée dépend de l'intensité du chauffage. Des phénomènes similaires dans des FSC ont déjà été rapportés dans la littérature dans d'autres configurations (Zhong et Meyer, Phys. Rev. E, 1995; Boukari et al., Phys. Rev. E, 1995). Le gradient de température positif dans le coeur est d'autant plus important que le chauffage de la paroi inférieure est faible. De plus, pour les δT faibles, il s'accompagne de zones de surchauffe au voisinage de la paroi froide et de zones de refroidissement au voisinage de la paroi chaude. Des simulations vont être effectuées à l'échelle de temps acoustique afin de quantifier l'importance de l'amplitude de l'onde thermoacoustique en fonction du chauffage.

Dans la majorité des cas traités, dès que le temps total de simulation est suffisamment long, une brisure de la symétrie horizontale du champ de température (par rapport au milieu de la cavité) a été mise en évidence, suite à l'interaction dans le coeur de la cavité des plumes issues des couches limites chaude et froide. Cette brisure de symétrie n'est pas due au confinement latéral puisqu'elle a été observée également dans une cavité 3 fois plus large. Les résultats ont révélé que le temps d'apparition de cette brisure de symétrie augmente exponentiellement pour les faibles δT . De plus, pour les chauffages forts' ($\delta T \geq 2.5 \text{ mK}$), des changements successifs du sens de rotation de l'écoulement ont été observés. Un phénomène identique a été mis en évidence par Furukawa et Onuki (Phys. Rev. E, 2002) pour un FSC chauffé par le bas par un flux thermique constant. Le signal temporel de la température sur la ligne centrale de la cavité ($x=0.5$) présente des oscillations dans cette phase où le champ de température est asymétrique et chaotique, aussi bien au voisinage des deux couches limites qu'au centre de la cavité. Ces oscillations sont d'origine thermoacoustique, comme celles observées par Amiroudine et Zappoli (Phys. Rev. Letters, 2003), c'est-à-dire qu'elles sont dues à la compétition entre les effets Piston chaud et froid déclenchés respectivement par les plumes issues des couches limites froide et chaude venant taper sur la paroi opposée.

Enfin, on s'est intéressé à l'influence de l'état initial du fluide sur le développement de l'instabilité convective. En particulier, un état initial de conduction pure a été considéré (i.e. le fluide est supposé à une température moyenne égale à T_i et soumis à un gradient de température inverse). Les résultats actuels semblent indiquer que l'état initial n'influence pas le seuil d'apparition de l'instabilité mais modifie de façon plus ou moins importante les champs de température et les structures d'écoulement se développant par la suite.

Perspectives :

Les perspectives concernent tout d'abord l'évolution du système suite à la diminution ou à l'arrêt du chauffage de la paroi inférieure. On envisage également d'utiliser une équation d'état plus précise au voisinage du point critique. En effet, l'équation de van der Waals est connue pour ne pas être très précise dans ce voisinage mais elle donne une description qualitative correcte des phénomènes, ce qui était notre objectif dans un premier temps. Enfin, les effets 3D vont être pris en compte. Un code volumes finis 3D est en cours de développement par Gilbert Accary qui a débuté sa thèse sur le sujet en octobre 2002.

3. Etude du transfert de masse à une interface solide — fluide supercritique

La solubilité des solides dans les FSC varie très fortement en augmentant ou en diminuant très peu la pression ou la température, permettant ainsi un contrôle précis des procédés. En fait, la solubilité dans un FSC présente un comportement critique au LCEP (Lower Critical EndPoint, point d'intersection entre la ligne critique du mélange issue du point critique du corps pur et la ligne d'équilibre solide — liquide — gaz) de manière similaire au comportement critique de la densité d'un corps pur au voisinage du point critique liquide-gaz.

Cet intérêt croissant pour les FSC comme solvant a induit depuis une quinzaine d'années une augmentation importante des études expérimentales et théoriques sur la solubilité des solides dans les FSC. Cependant, la grande majorité de ces études se limitent à des mesures de la solubilité et des propriétés physiques, pour les travaux expérimentaux, et au développement de modèles thermodynamiques permettant de corréliser au mieux les mesures de solubilité, en ce qui concerne les travaux théoriques (par exemple: Garnier *et al.*, *Fluid Phase Equilibria*, 1999; Higashi *et al.*, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 56, 2001; Escobedo-Alvarado *et al.*, *Journal of Supercritical Fluids*, vol. 21, 2001). A notre connaissance, il n'existe pas ou peu de travaux prenant en compte l'hydrodynamique des FSC dans l'étude de leur pouvoir solvant. En particulier, aucune étude sérieuse n'a été encore menée sur l'influence de l'effet Piston sur le pouvoir solvant des FSC, excepté une étude préliminaire théorique utilisant un modèle très simpliste effectuée par Carlès (thèse de doctorat de l'institut National Polytechnique de Toulouse, juin 1995). L'objectif de notre recherche est justement de combler ce manque et d'améliorer la compréhension des phénomènes influant sur le pouvoir solvant des FSC et, en particulier, de montrer par simulation numérique que les effets thermoacoustiques sont aussi responsables d'une accélération critique du transfert de masse à une interface solide - FSC (effet Piston massique). Ce projet requiert des compétences dans des domaines variés allant de la mécanique des fluides à la modélisation des mélanges supercritiques en passant par la thermodynamique et la modélisation numérique. De ce fait, plusieurs équipes collaborent à ce projet, amenant chacune leurs propres compétences : l'équipe *Instabilités Hydrodynamiques et Turbulence* du *Laboratoire MSNM* (I. Raspo, S. Meradji) et B. Zappoli du CNES Toulouse pour la partie Mécanique des fluides et modélisation numérique; Roger Prud'homme et Stéphane Préau du *Laboratoire de Modélisation en Mécanique* (UMR 7607) pour la partie Thermodynamique, et Evelyne Neau du *Laboratoire de Procédés Propres et Environnement* (EA 884, Université Aix-Marseille III) pour la partie Modélisation des mélanges supercritiques.

Le mélange considéré est constitué de Naphtalène (espèce minoritaire) dans du CO₂ supercritique. La méthodologie utilisée consiste à résoudre numériquement les équations de Navier - Stokes compressibles et instationnaires, couplées à l'équation d'énergie et à l'équation de transport des espèces, en l'absence de gravité. Ces équations sont écrites pour un mélange dilué, confiné entre deux plans infinis constitués par des surfaces actives et thermostatées. La méthode numérique utilisée est basée sur une approximation de type volumes finis. L'espèce minoritaire peut être incorporée ou émise aux parois actives.

L'interface est supposée en équilibre avec la phase fluide à chaque instant. La solubilité ou fraction molaire d'équilibre du Naphtalène est déterminée à partir des conditions d'équilibre à l'interface solide — FSC et sert de condition aux limites pour l'équation de transport des espèces. La partie la plus délicate du projet concerne la modélisation thermodynamique du mélange supercritique. Nous avons choisi d'utiliser le modèle à un fluide avec l'équation de Peng—Robinson pour décrire l'état du mélange. La prise en compte du mélange dans l'équation d'état se fait au travers des lois de mélange de van der Waals quadratiques pour le coefficient d'énergie et le covolume. Ces lois font intervenir deux paramètres d'interaction binaires qui ont été déterminés afin de permettre de corréliser au mieux les mesures expérimentales de la solubilité du Naphtalène dans le CO₂ supercritique. On envisage de mettre en évidence les phénomènes d'abord dans le cas d'un modèle monodimensionnel. Le code volumes finis 1 D est actuellement en cours de développement. Puis, lorsque les phénomènes seront bien compris, les effets bidimensionnels seront pris en compte. On envisage également d'étudier ensuite l'interaction entre cet effet Piston massique et la convection, i.e. l'influence de cet effet Piston massique en présence de la gravité terrestre.

PHENOMENES DE TRANSPORT EN PRESENCE DE CHANGEMENT DE PHASE SOLIDE/LIQUIDE

M. El Ganaoui (MCF)
SPCTS UMR 6638, Université de Limoges

Cet axe concerne principalement le développement de modèles numériques pour des problèmes en présence de transition de phase. Une avancée significative concerne la transition solide/liquide et des travaux d'extension à la transition liquide/vapeur sont en cours. La qualité des produits issus de la solidification dépend fortement de l'interaction de la convection d'origine thermique ou solutale qui peut être utilisée comme moyen de contrôle

du processus. Les méthodes développées ont été appliquées avec succès à différentes configurations de croissance rencontrées sur terre ou en microgravité (Technique de Bridgman Verticale et Horizontale, Zone flottante). La complexité réside dans la présence de phénomènes mettant en jeu des échelles caractéristiques variant de plusieurs ordres de grandeurs et un fort couplage entre les équations du modèle généralement non linéaires. Le contrôle nécessite en particulier une prise en compte des conditions aux limites dynamiques et thermiques proches de l'expérience (surface libre, effet Marangoni, irrégularités du chauffage,...).

Pour la technique de Bridgman Verticale, plusieurs scénarios de transition convective (théorie des instabilités et bifurcations) ont été révélés et ont permis un contrôle plus fiable des comportements (encapsulation, rotation, champ magnétique ...), et aussi, dans la prédiction de l'interface de solidification représentant de façon très réaliste l'interaction avec un bain fondu oscillatoire. L'étude a été étendue à la convection solutale.

Pour la technique de Bridgman Horizontale, les premières comparaisons avec les expériences menées dans le cadre du programme MEPHISTO sont très satisfaisantes. Pour les extensions aux faibles nombres de Prandtl, les premières investigations déterminent le seuil de transition avec un excellent accord avec des résultats de référence. La prise en compte de la convection thermocapillaire dans le bain fondu en situation ouverte a également montré une interaction importante avec le front de solidification. Une prise en compte de l'effet croisé comme la thermodiffusion (Soret) et de l'anisotropie thermique sont également en cours (collaborations avec l'Université de Cergy Pontoise et l'UNSW).

Pour la technique de zone flottante en microgravité, les premiers résultats ont permis d'identifier un paramètre local plus pertinent pour l'étude des instabilités remplaçant le nombre de Marangoni classique. Un couplage global avec la phase solide a montré une dépendance du régime convectif et de la fraction fondue vis à vis du flux imposé au pont liquide.

Une configuration de type 'Liquid Phase Epitaxy' pour un mélange ternaire est également en cours d'étude (collaboration avec le Keldysh Institute de l'Académie des Science de Russie).

Cette thématique a donné lieu à plusieurs publications (Int J Computers and fluids, Num. Heat Transfer. A et B, Journal de Physique IV, Com fluid dynamics, J. Crystal Growth, J. Space Resch., Int. J. Thermal Sciences, Int. J. Heat Mass Transfer, Num. Heat Transfer B) ainsi qu'à plusieurs contributions dans des ouvrages (Springer Verlag, Vieweg Verlag, Elsevier, ..) et actes de conférences internationales (ASME, TSM, 1 CHT, IHTC, CIMASI, MECOM, ICHMT..) et nationales (SFT, AUM, Journées GDR...) et à l'organisation de trois minisymposiums (en 2000 lors de l'ECMI à Palerme, en 2002 lors de l'ISTP13 à Victoria BC et en 2003 au CFM à Nice).

PHENOMENES CRITIQUES ET FLUIDES COMPLEXES LMMT EA 2596

Gavrilyuk Sergey, professeur
Gouin Henri, professeur

Laboratoire de modélisation en Mécanique et Thermodynamique EA 2596
Université Aix-Marseille III, Faculté des Sciences et Techniques, case 322
Avenue Escadrille Normandie-Niemen 13397 Marseille Cedex 20

Les grands thèmes traités ont été :

Les phénomènes critiques dans les fluides et les mélanges de fluides :
Les comportements des fluides et mélanges de fluides au voisinage des points critiques permettent l'utilisation de modèles à gradients et de fonctions représentant les énergies libres et internes sous des formes universelles. Une étude des ondes isothermes et adiabatiques a été effectuée. Elle permet une meilleure connaissance du comportement des fluides sous ou sur-critiques.

Le mouillage des fluides sur paroi solide :

Le contact des fluides sur une paroi solide fait apparaître une ligne de contact. Les impossibilités mathématiques et physiques dans le cadre du modèle de Navier Stokes ont été étudiées et le problème de l'hystérésis de l'angle W Young a été revisité.

Les fluides et mélanges de fluides dans les problèmes de changement de phases :
Les liquides à bulles sont analysés. Les conditions aux limites, les conditions de choc ont été analysées par des méthodes de type variationnel.

La symétrisation des équations des fluides et des mélanges de fluides :
Une nouvelle présentation des mélanges par méthodes variationnelles permet de mieux analyser la symétrisation des équations des mouvements de chaque constituant dans un mélange de fluide. Divers modèles ont été étudiés en accord avec le second principe de la thermodynamique.

Ces diverses recherches ont conduit à de nouveaux problèmes à fortes implications industrielles tels les liquides à bulles et les aspects du mouillage des liquides et des mélanges sur les parois solides. Des collaborations significatives avec des organismes de recherche et des industries à caractère public ou privé sont en fort développement.

Le Laboratoire développe un programme de relations internationales qui se traduit par:
L'échange des idées entre chercheurs. L'information scientifique et technique.

Un des développements forts de la période à venir sera la recherche de cotutelles de thèses tout particulièrement avec le Portugal et la Russie.

La Suisse et l'Italie pourraient aussi être une source de doctorants.

Les collaborations suivantes ont été effectuées :

Relations suivies entre universités

ITALIE: Accord bilatéral avec l'Université de Bologne (Prof T. Ruggeri, Directeur du CIRAM).

POLOGNE : Accord bilatéral avec l'Académie des Sciences (IPPT). Programme Polonium (Prof. W. Kosinski, Prof. K. Piechor). Thème: les conditions aux limites dans les milieux complexes.

RUSSIE : Accord avec l'Académie des Sciences (branche Sibérienne) / Université de Novossibirsk (Prof. V. Teshukov, Dr. Yu. Perepechko, Prof. V. Lyapidevsky, Prof S. Godunov). Thème: hyperbolicité dans les mélanges de fluides. Liquides à bulles.

SUISSE : Laboratoire de Machines Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - IMHEF, Lausanne. Prof F. Avel Dr M. Farhat. Thème: cavitation et états de surface.

PORTUGAL : Département de mathématiques, Université de Lisbonne (Prof. N. Chemetov), Echanges OTAN. Cotutelles de thèses en développement. Thème: Hyperbolicité des équations de la mécanique.

USA : Mechanical Engineering, University of Minneapolis (Prof. L. Truskinovsky). Actuellement, L. Truskinovsky est Directeur de recherche à l'Ecole Polytechnique (Palaiseau).

Visites au Laboratoire de professeurs invités pour une durée d'au moins un mois.

Prof. F. dell'Isola, Université La sapienza, Rome, Italie, visite d'un mois en avril 2000. Thème : les milieux du second gradient.

Prof. T. Ruggeri, Académie de Lincei, Université de Bologne. Visite d'un mois en juin 2000. Thème : thermodynamique des mélanges de fluides.

Prof. V.M. Teshukov, Académie des Sciences de Russie, Institut Lavrentiev et Université de Novossibirsk, visite d'un mois en janvier 2000, d'un mois en décembre 2001 et de trois mois en mai-juillet 2002. Thèmes liquides complexes, liquides à bulles.

Prof. N. Chemetov, Département de mathématiques, Université de Lisbonne. Deux fois une semaine. Janvier 2001 et mars 2002.

Séjours comme professeur invité dans des universités étrangères septembre 2000-octobre 2000 :

Henri Guoin : Professeur invité à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne Laboratoire de Machines Hydrauliques, EPFL-IMHEF Av. de Cour 33 CH 1004 Lausanne, Suisse.

Janvier 2002-février 2002 :

Henri Guoin : Professeur invité à l'Université de Bologne (par le "Gruppo Nazionale per la Fisica Matematica") Centro Interdipartimentale di Ricerca per le Applicazioni della Matematica Via Saragozzo, 8,40123 Bologna, Italia.

Université de Lisbonne, Département de mathématiques. Janvier 2001 et janvier 2002.

Sergey Gavriluk pour deux fois une semaine.

Henri Guoin pour une semaine.

INFLUENCE DES VIBRATIONS SUR LES TRANSFERTS CONVECTIFS DANS LES FLUIDES INCOMPRESSIBLES, COMPRESSIBLES ET SUPERCRITIQUES

AZAIEZ Mejdj (MCF jusqu'en 2002), BARDAN Gérald (MCF), BERGEON Alain (MCF), CHARRIER -MOJTABI Marie Catherine (Pr.), JOUNET Arnaud (Post. Doc), CISSE Issa (Thésard), MALIWAN Kutinan (Thésard), PEDRAMRAZI Yazdan (Thésard), VOROBIEV Anatoli (Thésard), Responsable du Projet: Pr. A. MOJTABI

INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES DE TOULOUSE, UMR-CNRS-INP-UPS 5502
UNIVERSITE PAUL SABATIER 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex
Téléphone 05 61 55 67 93 Télécopie : 05 61 55 83 26, Mail moitabi@cict.fr

I –PROBLEMATIQUE

On assiste depuis les dix dernières années à un important développement des études numériques et théoriques portant sur le rôle des vibrations sur les écoulements convectifs de fluides incompressibles, compressibles et pour des fluides supercritiques comme en témoigne les nombreuses publications récentes relatives à cette thématique. Par contre, les expériences relatives à ce problème sont pratiquement inexistantes, en raison des difficultés de mise en oeuvre de procédure expérimentale permettant d'étudier l'influence des vibrations au sol. En effet, l'impact des vibrations sur les écoulements de convection d'origine thermique ou solutale est directement lié au rapport R du nombre de Rayleigh vibrationnel sur le nombre de Rayleigh thermique ou solutal. Ainsi pour la plupart des fluides, les régimes d'écoulement au sol sont de type convection naturelle et donc régis par la gravité ($R \ll 1$). Pour R de l'ordre de un, on est en présence de convection thermo-vibrationnelle. Il est extrêmement difficile d'obtenir au sol un rapport R élevé pour étudier la convection d'origine vibrationnelle omniprésente dans toute expérimentation spatiale. L'intérêt porté à ce problème est dû aux nombreuses applications industrielles mettant en jeu des phénomènes de transport dans l'élaboration de matériaux ou de séparation de phases en micro gravité.

De nombreuses équipes européennes sont fortement intéressées par la mise en place d'une expérience spatiale permettant l'étude des effets des vibrations sur des milieux hétérogènes en apesanteur. Dans ces différentes études, on rencontre soit des fluides présentant des gradients de densité (liés à des gradients thermiques ou à des gradients de concentration), soit des fluides avec différentes phases séparées par des interfaces, soit des fluides près du point critique soit des milieux granulaires.

2- RESULTATS MARQUANTS OBTENUS

2-1 Résultats marquants obtenus en Fluides incompressibles.

(H. Khallouf, G. Bardan, O. Sovran, M. Karimi Fard, M.C. Charrier-Mojtabi, M. Azaiez, A. Bergeon, A. Mojtabi)

L'action des vibrations sur les structures d'écoulements d'origine thermique et massique pour des fluides incompressibles, compressibles et critiques, est mal connue. La présence

d'un terme source de la forme $b\omega^2\sin(\omega t)\mathbf{n}$ où \mathbf{n} désigne la direction de la vibration et ω sa pulsation, dans les équations de Navier-Stokes rend fastidieux l'expérimentation numérique directe des équations de l'hydrodynamique dans un référentiel lié à la cellule expérimentale. Aussi le recours au modèle des équations moyennées, valable dans le cas des hautes fréquences et des faibles amplitudes, permet d'accéder directement à la connaissance des champs moyens en résolvant un système d'équations plus simple où les inconnues sont des champs moyens et où ne figure plus de terme de forçage instationnaire.

2-1-1- Notre équipe de recherche, à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, a développé des codes de calcul en volumes finis ou par méthodes spectrales 2D et 3D dans le but de simuler des écoulements de convection thermo-vibrationnelle avec prise en compte possible de la double-diffusion.

2-1-2- Nous avons vérifié les limites de validité du formalisme des équations moyennées en précisant les valeurs limites de la fréquence. Pour cela, nous avons résolu directement les équations de Navier Stokes instationnaires et les équations moyennées dans le cas d'une cellule différentiellement chauffée. Il ressort de ces premières études que le formalisme des équations moyennées peut-être utilisé à partir de fréquences de l'ordre du Hertz. L'ensemble des travaux théoriques et numériques effectués dans ce domaine a porté essentiellement sur les écoulements incompressibles.

Il y a trois sources d'instabilité dans un problème de convection thermo-solutale vibrationnelle qui sont: les forces de volume d'origine thermique et solutale et les forces dues aux vibrations et trois sources de dissipation (thermique, solutale et visqueuse) qui peuvent interagir de multiples façons. Ce problème dépend de nombreux paramètres adimensionnels. Aussi il devient extrêmement difficile, voir quasiment impossible, d'accéder à une bonne compréhension de la physique de ce problème ou de prévoir quel type d'écoulement est susceptible d'apparaître à la naissance de la convection pour des valeurs fixées des différents paramètres adimensionnels à partir de la seule expérimentation numérique. La simulation numérique, quelle que soit sa souplesse et son efficacité, devient inopérante pour comprendre et suivre les différentes branches de solutions ou pour rendre compte du type d'écoulement que l'on obtient pour des valeurs fixées des différents paramètres. Une étude théorique approfondie est nécessaire pour délimiter les différents domaines correspondant aux différents types d'écoulement.

2-1-3- Nous avons pour cela eu recours au calcul symbolique pour élaborer une procédure permettant la détermination des équations d'amplitude au voisinage des points de bifurcation. Les coefficients de ces équations d'amplitude sont obtenus analytiquement en fonction de l'ensemble des paramètres adimensionnels du problème. Cette approche permet d'analyser globalement, sans recourir chaque fois à de nouveaux calculs, la structure des écoulements après la première bifurcation. Il ressort de ces études que le rôle des symétries physiques pour nos problèmes est d'une grande importance pour la compréhension des différents types de bifurcation.

2-1-4- Nous avons analysé l'influence des phénomènes de vibration, tant en direction qu'en fréquence, sur la naissance de la convection thermique et thermo-solutale en milieu fluide et poreux en vue de permettre un meilleur contrôle actif des écoulements et des transferts thermiques. Nous avons mis en évidence qu'il était possible pour certaines configurations soit de retarder soit d'avancer la naissance de la convection.

Nous avons montré également qu'il était possible, en agissant sur la fréquence de vibration de modifier la structure de l'écoulement naissant (nombres de rouleaux convectifs). Nous pensons ainsi avoir contribué à une meilleure compréhension et maîtrise de l'impact des vibrations sur la convection thermique et thermo-solutale, ceci dans le but de mettre en oeuvre des expériences relatives au problème de croissance cristalline ou de séparation de composés chimiques difficilement extractibles par d'autres procédés.

2-2 Résultats marquants obtenus en Fluides Supercritiques.

(A. Jounet, B. Zappoli et A. Mojtabi)

Notre groupe de travail a entrepris depuis déjà plus de six ans des études numériques et analytiques sur les phénomènes de convection thermovibrationnelle en fluides incompressibles et plus récemment en fluides compressibles et pour des fluides supercritiques [2, 4, 8] Ces premières études ont montré l'importance des vibrations harmoniques sur le développement des écoulements convectifs en présence ou non de la gravité.

2-2-1- Effet Piston et Accélération Critique dans une cavité de conductivité thermique finie

Cette étude (numérique) a porté sur la prise en compte de l'épaisseur finie et de la conductivité thermique des frontières d'une cellule contenant un fluide supercritique en apesanteur sur la réponse du fluide en température. Lorsque le chauffage est local, on montre tout d'abord que toute frontière non-chauffée tend à se comporter comme un thermostat, ceci invalidant l'éventualité de frontières adiabatiques pour une gamme importante de matériaux, et donc aussi certaines déductions concernant l'Accélération Critique à l'époque de la découverte de l'Effet Piston (cf. article de Boukari et al., *Phys. Rev. Lett.*, 1990). L'étude de l'interaction fluide-solide au niveau de la frontière chauffée et de ses conséquences en terme d'échauffement global par Effet Piston, a ensuite montré que lorsqu'on se rapproche du point critique, le flux de chaleur perçu par le fluide au niveau de la frontière chauffée est plus important pour une même sollicitation thermique extérieure, en raison notamment de la divergence de la conductivité thermique à l'approche de T Dans le cas d'un chauffage local, ce phénomène peut avoir des conséquences dramatiques sur l'étude de l'Accélération Critique puisque, si l'on s'en tient à des mesures qualitatives au coeur du fluide, on peut alors trouver que l'échauffement par Effet Piston obéit à une évolution opposée à celle prédite par la théorie. Finalement, cette étude a montré que le comportement critique des propriétés thermophysiques du fluide conditionne le terme source de l'évolution, à savoir, la valeur des flux thermiques aux frontières, et non pas seulement indirectement la réponse du fluide en son coeur.

2-2-2-Réponse d'un fluide critique à un chauffage local et à une vibration de basse fréquence en apesanteur.

Il s'agit de la continuité des travaux de thèse de A. Jounet sur la simulation numérique de l'Effet Piston dans les fluides supercritiques en présence de perturbations thermiques ou mécaniques et sur la thermalisation par effet piston en présence d'un panache thermique.

Début 1999, des expériences menées à bord de la station MIR ont mis en évidence différents régimes de transport des inhomogénéités de densité apparaissant en réponse à un chauffage par thermistance et à une sollicitation vibratoire de basse fréquence. Pour des fréquences suffisamment faibles, les observations ont montré le développement quasi-symétrique de deux panaches dans la direction de la vibration, alors que pour des fréquences plus élevées, les inhomogénéités de densité restaient concentrées autour de la thermistance. A l'aide d'un code de calcul bidimensionnel, notre étude a consisté à expliquer les mécanismes responsables de ces comportements antagonistes grâce à l'accès aux champs d'écoulement. On a montré notamment que lorsque la fréquence de vibration est suffisamment faible et son amplitude suffisamment importante, les tourbillons qui se forment autour de la thermistance sous l'action combinée de gradients de densité et d'une force d'entraînement, ont le temps et l'énergie pour être convectés chaque demi-période suffisamment loin de la thermistance, formant ainsi des doubles panache. Dans le cas contraire, ces tourbillons s'anéantissent par paires chaque demi-période et les gradients de densité qu'ils transportent restent concentrés autour de la thermistance. Sur des temps longs, nos calculs montrent également une perte de symétrie des champs (observée expérimentalement) en raison d'instabilités hydrodynamiques

2 Résultats récents (2002-2003)

2-3-1 Milieu poreux

Le dernier article en cours de révision à JFM porte sur une autre approche permettant de délimiter les domaines de validité du formalisme des équations moyennées dans le cadre du modèle de Darcy. L'analyse de la stabilité de l'équivalent du problème de Rayleigh-Bénard en milieux poreux en présence de vibrations harmoniques à partir des équations directes et du formalisme des équations moyennées montre l'intérêt du recours à cette dernière formulation et ses limites d'utilisation.

2-3-2 Fluides critiques

Dans le cadre de la thèse en cotutelle de A. Vorobiev, il a été possible d'étendre le formalisme des équations moyennées aux fluides supercritiques soumis à des vibrations harmoniques de hautes fréquences, On retrouve numériquement à partir de dernier formalisme les résultats obtenus à partir des équations directes par A. Jounet.

EFFETS DES VIBRATIONS SUR LES FLUIDES HETEROGENES, GRANULAIRES OU HYPER COMPRESSIBLES EN APESANTEUR

Pierre Evesque, V. Kozlov, A. Ivanova

Lab MSSMAT, UMR 8579 CNRS, Ecole centrale Paris, 92295 CHATENAY-MALABRY

Ces études font l'objet d'une collaboration avec d'autres membres du GDR: D. Beysens, S. Fauve, Y. Garrabos, D. Lyubimov, T. Lyubimova et B. Roux. Elles utilisent pour partie plusieurs moyens spatiaux (fusée sonde mini-Texus 5, Airbus A300_Og du CNES, fusée Maxus 5) dont un plan de charge scientifique est géré par le laboratoire MSSMat, d'autres par l'ESEME. L'ESA a créé un "topical Team" sur ce sujet coordonné par D. Beysens et par moi (P. Evesque).

Bien que notre recherche porte aussi sur beaucoup de problèmes de mécanique des milieux granulaires, ce rapport se focalise sur les effets des sollicitations périodiques rapides, où les effets inertiels sont très importants et les effets rhéologiques sont faibles, car c'est ce domaine qui intéresse surtout la technologie spatiale. Nous verrons par exemple que dans ces conditions, un milieu granulaire peut obéir aux mêmes lois qu'un fluide parfait (*i.e.* non visqueux) moyennant quelques conditions. Une partie de ce thème de recherche concerne les biphasiques liquide-gaz, liquide-liquide, fluide/milieu-granulaire, une autre partie concerne les milieux granulaires seuls. Nous ne nous intéressons pas seulement aux effets des vibrations de translations, mais aussi à ceux des vibrations rotatoires ces dernières vibrations engendrent automatiquement des mouvements inertiels, même lorsque le milieu est homogène ; leurs effets peuvent être étudiés sur Terre sans difficulté mais ils ont des conséquences dans les expériences spatiales, car les engins spatiaux sont des systèmes « isolés » qui peuvent tourner « spontanément » soit à cause des vibrations internes, soit à cause de l'attraction des corps célestes.

Milieux granulaires et/ou fluides soumis à des mouvements vibratoires horizontaux rapides en présence de liquide

Considérons tout d'abord le cas de 2 liquides de densité différente contenus dans une cellule fermée soumise à une vibration horizontale intense. Dans ces conditions le liquide et le milieu granulaire se comporte comme des liquides parfaits non visqueux ; un mouvement vibratoire appliqué à l'ensemble, et de direction parallèle à l'interface, induit donc un mouvement oscillant des deux phases l'une par rapport à l'autre. Ceci permet d'engendrer une instabilité de type Kelvin-Helmholtz; son mécanisme est équivalent à celui de la houle à la surface de la mer ; cependant, cette « houle » ne se propage pas, mais reste sur place, car le mouvement d'entraînement est périodique, la forçant à aller dans un sens puis dans l'autre. L'instabilité de Kelvin-Helmholtz combat les forces de pesanteur, imposant une interface sinusoïdale permanente immobile, dont la période spatiale et l'amplitude dépendent de la vitesse de vibration et du rapport de densité des deux phases, cf. Fig. 1.

Nous avons étudié ce phénomène pour deux liquides de densités différentes et étudié la croissance du relief au dessus du seuil d'apparition de l'instabilité et avons montré que cette dernière est de type supercritique et que la viscosité peut jouer un rôle important aussi (cf. Fig. 1 photos de gauche). L'effet de la viscosité a aussi été déterminé.

Nous avons encore observé le même phénomène sur des équilibres liquide-gaz près de leur point critique T_c (CO_2 H_2), vibrés juste en dessous du point critique T_c (cf. Fig. 1 photo centrale, avec du CO_2). L'expérience sur le CO_2 était menée en collaboration avec D. Beysens, Y. Garrabos lors d'expériences préparatoires à l'expérience MiniTexus 5 (1998); grâce à sa collaboration avec V. Kozlov, nous avons donc été à même de comprendre ce phénomène peu connu pour des fluides de densité très différentes. Il est remarquable que cette instabilité fonctionne aussi dans le cas de fluides très compressibles (hypercompressibles) et de faible différence de densité. Il faut dire que la tension superficielle décroît aussi près de T_c et que les vibrations utilisées sont très rapides.

Les mélanges liquide/milieu-granulaire-saturé sont incompressibles et ils présentent une interface nette sur Terre à cause de la gravité. Un mouvement oscillant rapide engendre des

forces inertielles grandes susceptibles de liquéfier la couche de sable superficielle ; il provoque donc le même genre de structure que celle de la Fig. 1. Une condition est cependant nécessaire : la fréquence de vibration doit être suffisamment rapide pour que les forces visqueuses soient négligeables à l'interface « liquide-sable », mais suffisamment grande pour que le mouvement des grains soit rendu cohérent par la viscosité du milieu interstitiel. Nous avons continué à étudier ce phénomène.

Striation de biphasique en apesanteur : La photo de droite de la Fig. 1 montre des striations obtenues lors de l'expérience Mini 5 dans une cellule de GO vibrée, juste en dessous du point critique de la transition liquide-gaz. Cette striation reflète probablement la structuration spontanée du milieu en zones parallèles de densités différentes (liquide/gaz) perpendiculairement à la direction de vibration. Elle révèle donc très probablement le fait que les vibrations engendrent des forces de volume dans les milieux hétérogènes. La périodicité de cette striation semble dépendre des paramètres de la vibration. Nous nous attendions un peu à ce résultat grâce aux expériences relatives à l'instabilité de Kelvin Helmholtz (cf. paragraphes précédents). De plus nous avons mis en évidence ce type de striation lors de la vibration d'un sablier fonctionnant dans un liquide et soumis à des vibrations verticales. Nous avons interprété cette striation comme liée à l'instabilité de Kelvin-Helmholtz.

Cette expérience a été répétée sur de l'hydrogène critique pour lequel la pesanteur a été supprimé par lévitation magnétique. Elle vient d'être répétée avec la fusée Maxus 5 avec du 002 (1/4/2003) ; Ces expériences sont en cours de dépouillement.

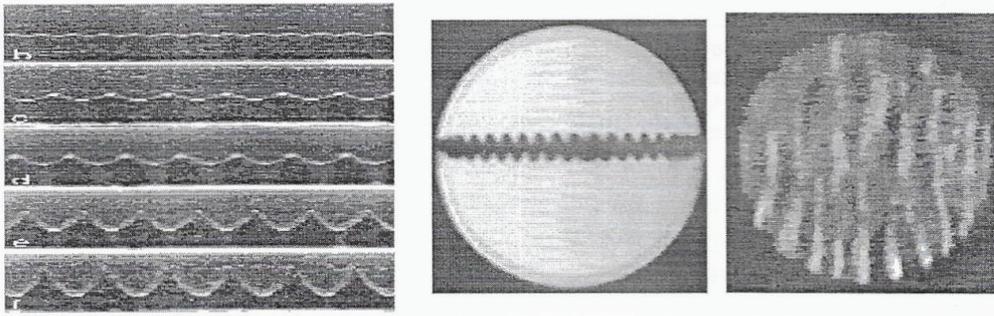


Fig.1 INSTABILITE DE TYPE KELVTN-HELMHOLTZ DYNAMIQUE A L'INTERFACE DE DEUX FLUIDES, obtenue sur terre par des vibrations horizontales :

Figures de gauche : Influence du paramètre $(b\omega)^2/(gh)$ de la vibration sur l'amplitude et la longueur du relief stationnaire apparaissant à l'interface d'un biphasique liquide-liquide.

Nous avons aussi observé un phénomène analogue

Figure du milieu : pour un biphasique eau-milieu granulaire sur terre,

Figure droite : pour un biphasique hypercompressible CO₂ gaz-CO₂ liquide près du point critique T_C sur terre (Figure du milieu).

On pense que les striations obtenues sur du CO₂ hypercompressible (Figure de droite) en apesanteur sous vibration près de T_C sont de même nature la vibration permet d'orienter les fluides de densités différentes en apesanteur.

Nucléation généralisée en apesanteur : À l'heure actuelle, des expériences de nucléation généralisée sont entreprises près du point critique sur Terre, en présence de vibration grâce à la lévitation magnétique. La présence de vibration oblige à ne pas utiliser de métal (courant de Foucault) mais des fenêtres en saphir. Ces expériences sont réalisées au CEA Grenoble avec D. Chatain et D. Beysens, (cf. rapport de cette équipe).

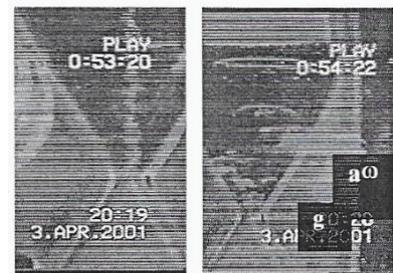


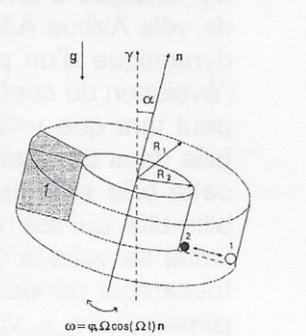
FIG. 2 SEDIMENTATION sous VIBRATION VERTICALE. A gauche sans vibration ; à droite la vibration force la stratification.

Sédimentation sous vibration verticale : Ces vibrations provoquent la stratification en couche de la sédimentation, par un effet Bernoulli (cf. Fig. 2) ; l'effet d'étirement latéral est semblable à celui obtenu sur des bulles ou des gouttelettes sous vibration.

• **Vibration Rotatoire** : Ce sous-thème se partage en 2 :

i) *L'étude de la lévitation de corps immergés dans un fluide et soumis à des mouvements vibratoires pendulaires rapides* : Nous avons pu obtenir la lévitation d'un objet lourd immergé

dans un fluide en soumettant la cellule qui le contient à un mouvement périodique rapide de rotation, et a pu être modélisé le phénomène à partir des lois hydrodynamiques simples (forces de Coriolis et centripète) (V. Kozlov). Ce résultat est important car il montre que des vibrations non rectilignes sont susceptibles d'engendrer des forces de volume. Elles peuvent donc avoir un rôle dans un certain nombre d'expériences spatiales soit en introduisant des phénomènes parasites, soit au contraire, en permettant de manipuler des fluides ou des objets dans l'espace. Cette étude s'est poursuivie en gravité réduite, en inclinant le plan de rotation par rapport à la verticale.



ii) *Ecoulements permanents moyens induits par des vibrations rotatoires* Les vibrations de rotation forcent le liquide à s'écouler périodiquement ; mais l'interaction entre cet écoulement

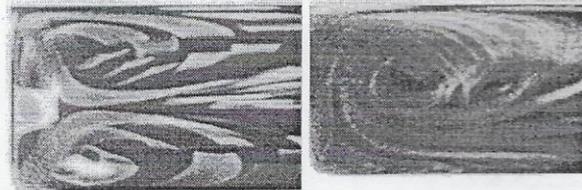


Figure 4: Ecoulements permanents dans un fluide visqueux générés par des vibrations de rotation dans les coins du conteneur. L'écoulement change de forme au dessus d'une transition.

périodique et les conditions aux limites (coin carré par exemple) se fait avec un déphasage qui dépend de la position ; ceci engendre un écoulement permanent (Mécanisme de Schlichting) dont nous cherchons à déterminer la forme et la vitesse en fonction des paramètres de vibrations. Cette étude est probablement de première importance dans les expériences spatiales, car ce mécanisme de génération de courant permanent peut biaiser

toutes les expériences de mesure de coefficient de diffusion, ou modifier les propriétés de transport thermique du fluide. Il intervient donc souvent dans les expériences de cristallisation, de diffusion,... Cela fera l'objet de la thèse de N. Selin (cotutelle Perm -ECP).

Gaz granulaire sous gravité et en apesanteur:

En collaboration avec D. Beysens, S. Fauve, E. Falcon et Y. Garrabos et avec l'aide du CNES et de l'ESA, le laboratoire a pu mener à bien en 1998 des expériences de vibration en fusée sonde (Mini 5 (1998), Maxus 5, 1/4/2003) et en vol parabolique Airbus A300 (plusieurs campagne 2000-2002) ayant pour but de préciser les conditions d'obtention d'un gaz granulaire et sa loi rhéologique.

Transition gaz-cluster : Cette expérience a permis de montrer que, lorsqu'il est suffisamment dense, le milieu granulaire se condensait de façon très hétérogène pour n'occuper qu'une petite partie du conteneur; il diminue ainsi fortement son couplage avec le monde extérieur (parois de la cellule) (Fig. 5).

Lorsque le milieu est suffisamment peu dense, il se comporte approximativement comme un gaz de particules; cependant nous avons mesuré une dépendance anormale de la "pression" granulaire avec les paramètres de vibration. Les expériences Maxus 5 devraient permettre d'infirmer ou de confirmer ces premiers résultats, qui sont, somme toute, très prometteurs. La limite entre les deux régimes gaz et cluster a lieu pour un libre parcours

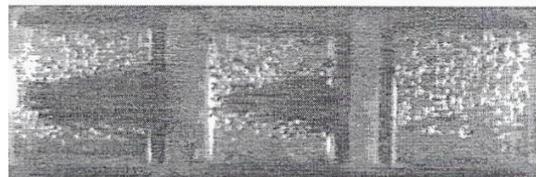


Fig. 5: **Gaz de billes vibré en apesanteur.** cellules de gauche et du centre: régime dense avec formation d'un amas presque immobile. Cellule de droite régime gazeux.
Direction de vibration : vertical

moyen de l'ordre de la taille de la cellule. Ceci est important à noter, car cette limite correspond au volume minimal pour pouvoir appliquer une approche du type mécanique des milieux continus. On remarque aussi sur la Fig. 5 que le gaz est décollé des parois hautes et basses, ce qui prouve que ces parois sont animées d'une vitesse plus grande que celle des grains, c'est-à-dire que l'excitation est de type supersonique.

Les expériences Maxus 5 ont été répétées ces résultats et d'étudier l'effet de la forme du container. Elles sont en cours de dépouillement.

Dynamique d'une bille: La préparation de cette nouvelle expérience a nécessité une série de vols Airbus A300-0g du CNES. Lors de cette préparation nous avons étudié en détail la dynamique d'un petit nombre de grains, puis celle d'une seule bille nous avons mesuré l'évolution du coefficient de restitution en fonction de la vitesse de la bille et montré qu'il varie peut tant que $v < 3\text{m/s}$ pour les billes d'acier ou de bronze de qualité. La dynamique d'une bille dans une boîte vibrée est d'ailleurs fort intéressante, car elle montre que la vitesse de cette bille est toujours plus grande que celle du container et que c'est donc la dissipation bille-bille qui est responsable de l'excitation supersonique de la Fig. 5. Elle montre aussi la limite de validité du principe ergodique : en effet, on trouve que le trajet de la bille devient totalement périodique ce qui prouve la réduction spontanée de l'espace des phases de **11-dim** $= (x, y, z, v_x, v_y, v_z, \theta, \varphi, v_\theta, v_\varphi, t)$ à **1-dim**, juste par l'effet de la dissipation lors des collisions.

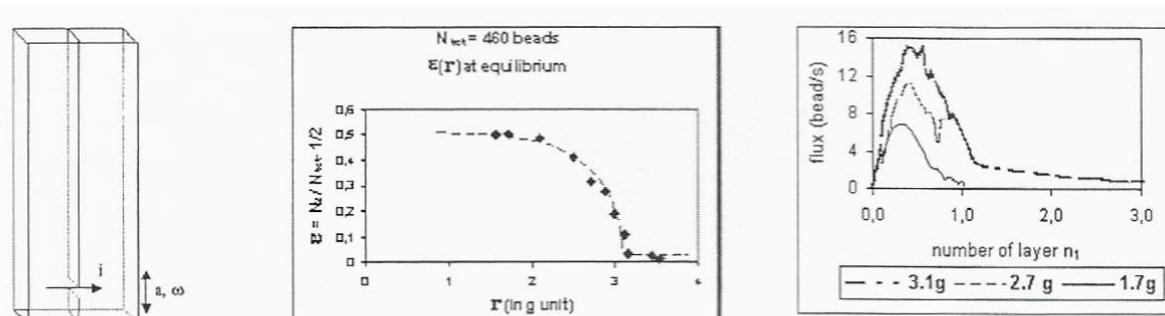


Fig. 6: « Effet Démon de Maxwell » : Différence de population entre deux demi-boîtes vibrées (Fig. du milieu), débit à travers la fente en fonction du nombre de couches de billes (Figure de droite).

Expérience de Démon de Maxwell : Ces expériences ont été aussi corroborées par des expériences de «(démon de Maxwell » granulaire, où l'on étudie l'équilibre de population de grains entre deux demi-boîtes vibrées, connectées par une fente et partiellement remplies de grains lorsque les grains sont en nombre suffisant l'une des boîtes se remplit tandis que l'autre se vide spontanément. L'étude du débit à travers la fente (fig. 6 droite) permet de caractériser le phénomène. Cette expérience est pédagogique elle permet de familiariser l'étudiant avec la notion de transition de phase et avec les problèmes de fluctuations (le nombre de grains qui traversent la fente par unité de temps est en général petit, générant des fluctuations statistiques importantes) ; cette expérience montre aussi que certains modèles publiés dans Phys. Rev. Lett. récemment sont inadéquates.

Enfin nous avons discuté l'intérêt et le danger de transposer les notions de températures aux milieux granulaires vibrés.

INSTABILITES THERMOCONVECTIVES DANS LES FLUIDES SUPERCRITIQUES

Sakir AMIROUDINE

EMT/LPMI, ENSAM, 2Bd du Ronceray BP3525 49035 Angers

I- Instabilités de Rayleigh-Bénard dans un fluide supercritique pur [1-4]

Le problème de la convection de Rayleigh-Bénard est un problème hydrodynamique classique qui est fort bien documenté et dont les solutions linéaires et faiblement non-linéaires sont bien connues. Ce phénomène convectif se produit dans une couche de fluide uniformément chauffée par-dessous et isolée thermiquement de chaque côté. Lorsque le chauffage est suffisant, la stratification thermique de la couche de fluide la rend instable. Un écoulement convectif apparaît et est entretenu. La convection de Rayleigh-Bénard est donc une instabilité de seuil.

Pour des couches de fluide compressible de grandes dimensions, le critère basé sur le gradient de température adiabatique (ou Schwarzschild) remplace le critère de Rayleigh usuel pour l'apparition de la convection. Les effets associés à Schwarzschild, bien connus en physique atmosphérique, ne peuvent pas être étudiés dans des expériences de laboratoire. Comme la compressibilité diverge au point critique, ces deux critères peuvent être caractérisés dans des cavités de dimensions très petites (de l'ordre du millimètre pour certaines proximités du point critique) [remplies de fluide proche de son point critique.

Nous avons entrepris depuis quelques années une collaboration étroite avec l'équipe du Pr. Meyer de l'Université de Duke (NC, USA) où des expériences ont été menées dans une cellule cylindrique (rapport de forme de 57) remplie d'Hélium (^3He sur l'isochore critique dans la configuration similaire à celle de Rayleigh-Bénard. Un flux de chaleur constant est appliqué à la paroi inférieure, celle du haut étant isotherme à la température initiale.

Grâce à notre connaissance dans ce domaine et à l'existence d'un code numérique en Navier-Stokes au sein de notre équipe [1], nous avons considéré cette étude dans une cavité rectangulaire avec des conditions périodiques sur les faces latérales afin d'éliminer l'effet du rapport d'aspect dans l'expérience. Les propriétés thermophysiques ne variant pas trop pour les chauffages en flux considérés, nous avons pu utiliser une équation d'état linéarisée [2].

Une grande quantité de travail a été consacrée à la rédaction de l'article [4]. Nous avons montré à l'aide de nos simulations numériques des équations de Navier-Stokes que l'effet piston froid déclenché par les panaches thermiques de Rayleigh-Bénard est responsable des oscillations de température observées. Une investigation un peu plus poussée est actuellement menée afin de déterminer de façon exacte le temps d'apparition du premier pic après le déclenchement de la convection dans la courbe de la température en fonction du temps. Ceci pourrait être dû aux fluctuations du contrôle de la température de la plaque supérieure. L'idée serait d'introduire dans notre code numérique un bruit blanc connaissant l'ordre de grandeur des amplitudes et la gamme des fréquences apparaissant dans ces fluctuations (d'ordre expérimentale) et voir si le temps d'apparition de ce premier pic ne diminuerait pas. Les premiers résultats laissent penser que tel est le cas.

II - Instabilités gravitationnelles de type Rayleigh-Taylor dans un fluide supercritique pur [5-6]

La couche de diffusion de la paroi supérieure qui est plus lourde que le fluide situé au dessous d'elle donne naissance à des gouttes par une instabilité gravitationnelle évocatrice d'un mécanisme de Rayleigh-Taylor et, la tension de surface étant a priori nulle (fluide pur monophasique), nous nous sommes orientés vers une instabilité de front de diffusion, semblable à celle que l'on connaît dans les fluides miscibles [Nous avons donc considéré une situation plus simple dans laquelle la moitié supérieure d'une cavité isobare d'extension

infinie contenant un fluide supercritique au repos est initialement à une température inférieure à la température de la moitié inférieure. Les parois supérieure et inférieure sont à la température initiale du fluide et des conditions périodiques sont imposées aux parois latérales. Notre objectif est d'étudier numériquement la stabilité de l'interface de diffusion thermique présent entre les deux moitiés de la cavité par l'analyse de la dynamique de croissance des fluctuations qui sont simulées par l'introduction d'une perturbation initiale, sinusoïdale et de faible amplitude, de la vitesse à l'interface.

L'analyse des taux de croissance pour différents nombres d'onde montre l'existence d'un nombre d'onde de coupure au-delà duquel les petites longueurs d'onde sont stabilisées [5-6]. L'accord entre nos valeurs numériques [5] et les récentes théories sur la stabilité d'un front de diffusion dans les fluides miscibles, confirme que les fluides supercritiques, thermiquement inhomogènes et isobares, sous l'effet d'un gradient thermique, peuvent conduire au développement d'une instabilité gravitationnelle pour laquelle le gradient de masse spécifique (dans les instabilités de Rayleigh-Taylor) n'est plus déterminé par la diffusion des espèces, mais par la diffusion thermique et la grande compressibilité.

Nous avons poursuivi cette étude dans une récente communication [5] (dans le cas de l'Hélium supercritique) pour établir des abaques de stabilité de 2 couches superposées d'un fluide supercritique pur en fonction de la proximité du point critique. Les résultats sont en bon accord avec la théorie.

Une des perspectives principales de cette étude est de faire tendre la hauteur de la couche du bas vers zéro ce qui nous permettra d'établir les différentes courbes du taux de croissance des instabilités en fonction du nombre d'onde. On se placera dans le cas des proximités du point critique telles qu'on soit stable dans la configuration Rayleigh-Bénard (couche du bas tendant vers zéro). On déterminera ainsi l'évolution de la longueur de coupure en fonction du rapport d'épaisseur des deux couches afin de rechercher une continuité entre les configurations de Rayleigh-Taylor et Rayleigh-Bénard.

SEPARATION DE PHASES VISCOÉLASTIQUES

Patrick Guenoun

Service de Physique de l'Etat Condensé — Orme des Merisiers - CEA Saclay 91191 Gif sur Yvette

Les objectifs des travaux menés dans notre groupe depuis environ deux ans concernent l'étude de l'universalité de certains comportements observés en séparation de phases dans les liquides. La séparation de phases est un processus dynamique, d'importance à la fois fondamentale et appliquée, qui consiste à faire transiter brutalement (trempe thermique) un échantillon d'une région monophasique du diagramme de phases à une région diphasique. Si les lois de cette séparation sont maintenant bien connues pour certains fluides (fluides de faible poids moléculaire, polymères fondus), en partie grâce aux travaux de notre équipe, la situation est à peine défrichée lorsque la séparation produit deux phases de caractère rhéologique très différent.

Plus précisément, certaines lois concernant la séparation des fluides de faible poids moléculaire ont été déduites en termes de lois de croissance, de morphologie des phases et de lois d'échelle décrivant les structures en cours de séparation. Ainsi, lorsque la morphologie des phases est faite de deux phases interconnectées, la croissance est linéaire en temps car alimentée par des écoulements. On montre alors que la structure des phases est auto-similaire dans une grande gamme temporelle. Par contre, la morphologie interconnectée est très sensible à la composition initiale de la phase de départ. Lorsqu' on s'éloigne trop d'une composition symétrique par rapport aux volumes des phases finales la morphologie devient disconnectée. La croissance devient alors beaucoup plus lente.

Notre objectif est de réexaminer les points ci-dessus lorsque une phase se sépare en une phase viscoélastique et une phase dont la viscosité ne dépend pas des caractéristiques de l'écoulement (viscosité newtonienne). Un premier effet attendu est la dissymétrie des comportements suivant que la phase majoritaire en volume soit viscoélastique ou non. Si la phase minoritaire, a priori composée de gouttes sphériques, est viscoélastique, on prévoit que le temps de collision entre gouttes puisse être trop petit devant le temps typique de relaxation pour permettre la coalescence et donc la croissance des gouttes. On pourrait donc observer, suivant la densité de gouttes et leur taille (et donc la région du diagramme de phases et le temps) une croissance plus ou moins gelée. Lorsque par contre la phase de gouttes est Newtonienne, enserrée dans une matrice continue viscoélastique, un même effet de gel -ou de fort ralentissement- pourrait aussi être observé à cause de la faible diffusion des gouttes dans la matrice. Enfin, lors de l'établissement d'une phase bicontinue, il est prévu théoriquement qu'une structure interconnectée dissymétrique se forme puisque la phase continue viscoélastique serait à même de rester étirée avant que des effets de tension de surface ne viennent contrebalancer cet étirement.

A ces morphologies sont associées des lois de croissance complexes et qui peuvent dépendre également de la profondeur de trempe. Enfin la gravité peut jouer un grand rôle dans la modification de ces loi de croissance soit en créant une sédimentation des espèces soit en déformant un réseau polymère qui se serait formé.

Pour bien préciser les lois de croissance nous avons tout d'abord entrepris de mesurer le diagramme de phases avec précision. Nous avons montré que ce diagramme de phase (inversé) présente des températures de démixtion faiblement décroissantes avec la concentration à cause de la présence de monomères associés au polymère. En éliminant ce

monomère par dialyse, nous trouvons un diagramme de phases qui étend les rares données trouvés dans la littérature.

Pour assurer notre détermination optique de la séparation de phases, nous avons également montré qu'une mesure rhéologique à l'approche de la séparation de phases permettait de localiser avec précision cette dernière. Ainsi le déphasage entre les composantes en phase et hors phase de la réponse mécanique du système subit une discontinuité très significative à la séparation de phases. Cette discontinuité confirme bien les mesures optiques et confère une précision accrue à la détermination du diagramme (Fig.1). Par ailleurs, de manière concomitante, les modules élastiques et visqueux augmentent à la transition. Ce résultat peu commun est peut-être lié à l'état vitreux du polymère.

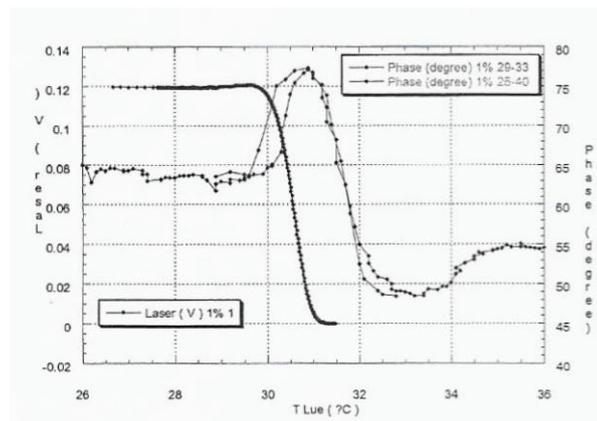


Figure 1: Séparation de phases mesurée conjointement par turbidité et rhéologie (déphasage entre les composantes élastiques et visqueuses de la réponse).

Nous avons également démarré l'étude de la dynamique de séparation de phases proprement dite au moyen de mesures de diffusion de lumière aux très petits angles. De manière générale, pour des concentrations entre 0.1 et 1wt%, nous observons un pic d'intensité diffusée peu marqué et évoluant très lentement (dynamique quasi-figée). La profondeur de trempage a peu d'influence sur ces résultats. Seule l'intensité diffusée croît notablement avec le temps (cf. Figure 2) mais de manière étonnamment logarithmique

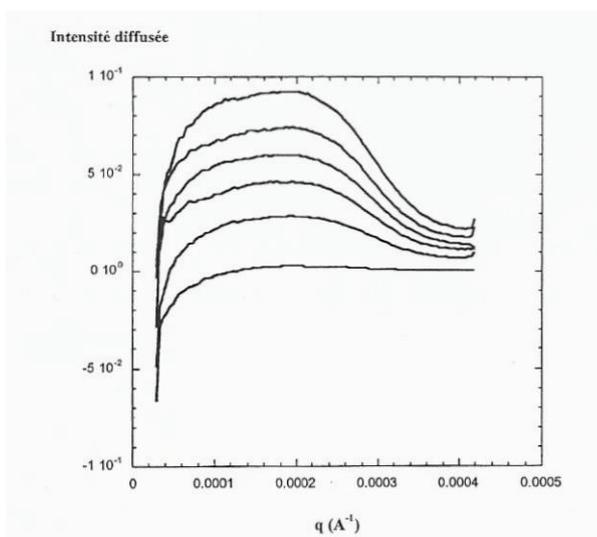


Figure 2 Intensité diffusée lors d'une trempage d'un échantillon de concentration 0.5wt%. Le temps (de l'ordre de plusieurs minutes) croît du bas vers le haut des courbes présentées.

Le travail évolue dorénavant dans le cadre de la thèse de Caroline BALU (Université de Versailles) et nous envisageons de :

- comprendre et utiliser les comportements rhéologiques originaux présents à la transition
- préciser encore plus le diagramme de phases et notamment le point critique grâce à des calculs prenant en compte la polydispersité
- comparer nos résultats avec un échantillon monodisperse obtenu par synthèse ou fractionnement
- relier la dynamique de séparation obtenue par diffusion de rayonnement (lumière ou neutrons) à des observations microscopiques de morphologies et évaluer l'influence de la gravité sur la déformation de la morphologie ainsi constituée.

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

C. COLIN (PR à l'INPT), J. FABRE (PR à l'INPT), F. RISSO (CR), D. LEGENDRE (MdC à l'INPT), J. MAGNAUDET (DR), Y. JUANEDA (Doctorant), R. POUJOL (AI), C. TRUPIN (Technicien).

INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES DE TOULOUSE
UMR CNRS/INP-UPS 5502
Allée du professeur Camille Soula, 31 400 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 obtenus mais leur analyse physique pose plus de problèmes qu'elle n'en résout. 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. La répartition des bulles dans les écoulements en tubes est encore mal prédite.

Les études menées dans le cadre du GdR ont porté d'une part sur la *dynamique des écoulements turbulents à bulles* (coalescence, distribution des phases) et d'autre part sur la *dynamique des bulles dans un champ de vitesse moyen* et plus particulièrement sur les mécanismes physiques qui contrôlent la taille des bulles (injection, coalescence, rupture). Ces études réalisées grâce au soutien du CNES et du CNRS ont fait l'objet d'une collaboration avec John McQuillen, ingénieur de la NASA au Glenn Research Center (Cleveland OHIO) et s'inscrivent dans les thématiques de recherche identifiées par la Topical Team «Two-phase Flow: dynamics and transfer» que nous dirigeons au sein de l'Agence spatiale Européenne.

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,
- l'injection, la migration, la rupture et la coalescence de bulles dans un champ de vitesse moyenne

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 se fait de manière très progressive. Elle 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). La transition est observée pour un taux de vide critique α_c qui vaut 0,2 lorsque la coalescence est importante et 0,45 lorsque la coalescence est inhibée. Un critère empirique (Colin et al., Chem. Eng Comm, 1996) basé sur le nombre d'Ohnesorge permet de déterminer la valeur de α_c :

$$\text{Pour } Oh < 7,6 \cdot 10^{-4}, \alpha_c \approx 0,2 \text{ et pour } Oh > 8,2 \cdot 10^{-4}, \alpha_c \approx 0,45 \text{ avec } Oh = v_L \sqrt{\frac{\rho_L}{\sigma D}}$$

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 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 des diamètres de bulles suivant une loi log-normale à 2 paramètres, 2 équations de transports pour deux moments de cette fonction densité de probabilité peuvent être résolues. On peut écrire une loi d'évolution du diamètre moyen des bulles et une pour l'évolution de la densité d'aire interfaciale. Les 2 paramètres de la loi log-normale peuvent être calculés en fonction du diamètre moyen et de l'aire interfaciale. Ces équations de transport comprennent un terme d'advection par la vitesse moyenne du gaz et un terme source dû au changement de diamètre moyen ou d'aire interfaciale 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 et le gradient de vitesse moyen de l'écoulement sont seuls responsables 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 c'est la turbulence qui est seule responsable de la coalescence des bulles et les résultats du modèle sont en bon accord avec les histogrammes de tailles mesurés en tube de 40 mm (Kamp et al. 2000). Lorsque les bulles ont une taille comparable à celle du tube c'est le gradient de vitesse moyenne de l'écoulement qui est responsable de leur coalescence. Le modèle précédent a été récemment étendu aux collisions dues au gradient de vitesse moyenne (Riou, 2002 ; Colin et Riou 2003). Ce modèle mécanistique permet maintenant de prédire la transition entre écoulements à bulles et à poches simplement à partir d'une évolution progressive de la taille des bulles, ce qui constitue un progrès important par rapport aux critères empiriques de la littérature.

b) Distribution de taux de vide

Dans le cadre de la thèse d'Arjan Kamp (1996), 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 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).

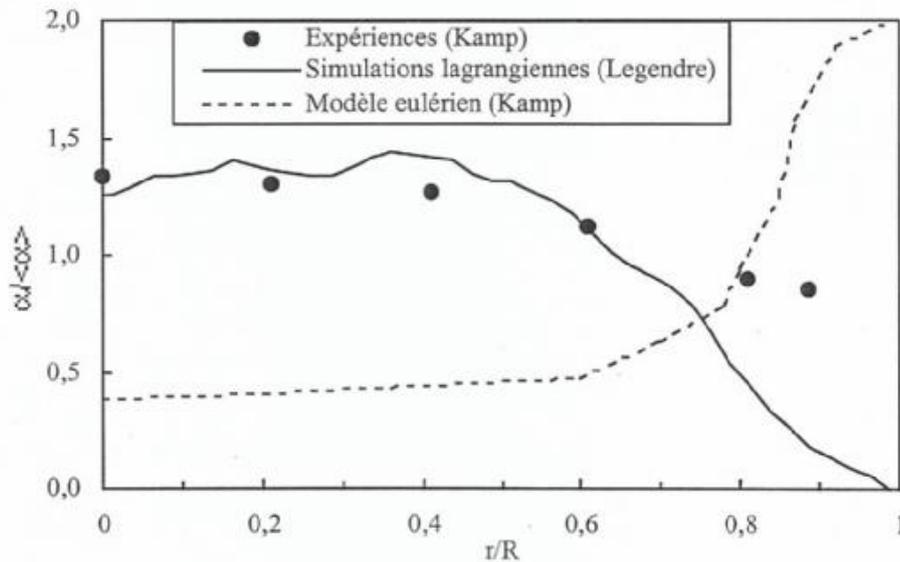


Figure 1: Distributions radiales du taux de vide adimensionnel à 2 m de l'injecteur: Comparaison entre les expériences, les simulations numériques réalisées avec un modèle eulérien classique et les simulations numériques de suivi lagrangien de bulles isolées.

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 cadre du programme post-doctoral de D. Legendre 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 et en micropesanteur (Marino, 2000). Les simulations numériques correspondantes (Legendre et al. 1999) 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 et vers le centre de la conduite en écoulement vertical descendant. En micropesanteur, 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 (1996) 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.

2. Déformation et dynamique de bulles isolées dans un gradient de vitesse

L'objet de la thèse d'Yann Juaneda cofinancée par le CNES et le CNRS est de se focaliser sur quelques uns des phénomènes physiques qui contrôlent la taille des bulles dans les écoulements diphasiques. Certains de ces phénomènes à l'échelle intermédiaire des bulles sont encore mal connus, comme:

- la dynamique de la croissance et du détachement des bulles formées en paroi,
- leur migration
- leur coalescence
- leur déformation et rupture.

Les conditions de micropesanteur sont particulièrement intéressantes pour mettre en évidence le rôle des forces de pression, viscosité et tension superficielle agissant à l'interface de la bulle.

Un dispositif expérimental a été spécialement construit à cette occasion et permet de créer un écoulement cisailé de type Couette (cisaillement constant dans tout l'écoulement). Il se compose de deux cylindres rotatifs et concentriques. L'espace annulaire entre les deux cylindres est rempli d'un liquide visqueux et les bulles sont injectées dans cet intervalle. La rotation d'un ou des deux cylindres crée un gradient radial de vitesse permettant de favoriser la déformation, le détachement, et la collision des bulles.

L'écoulement de la phase liquide est qualifié à partir de mesures par anémométrie laser par effet Doppler (ADL). Une caméra rapide sera ensuite utilisée pour effectuer les visualisations du détachement, de la déformation et de la migration des bulles injectées, ainsi que des phénomènes physiques d'interaction entre elles de type coalescence et rupture. Les premières expériences auront lieu en condition de pesanteur normale avec des gouttes d'un mélange eau-éthanol injectées dans de l'huile silicone. Ces gouttes auront la propriété remarquable d'être non miscibles dans l'huile et de masse volumique très proche de celle de l'huile afin de s'affranchir de la prépondérance des forces d'Archimède.

Des simulations numériques visant à prédire les trajectoires des bulles dans l'écoulement ont été entreprises (Juaneda & Colin, 2003). Se basant sur les récents développements analytiques portant sur l'effet des proches parois sur la dynamique de bulles dans des régimes faiblement inertiels, plusieurs forces ont été recensées comme importantes dans cette dynamique la force de traînée incluant une correction de Faxén, la force de migration due aux effets inertiels et la force de migration due à la déformation de la bulle. Ces forces sont représentatives des effets de la viscosité, du cisaillement, du glissement, de la déformation des bulles et de la courbure du profil de vitesse observés dans la littérature. L'établissement de leur expression dans le cas qui nous intéresse permet de calculer les vitesses de glissement des bulles par rapport au fluide et ainsi d'en déduire leurs trajectoires.

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.

Dans l'avenir, les recherches de l'IMFT se poursuivront sur :

- *les écoulements turbulents à bulles avec et sans pesanteur* : le rôle de la coalescence et de la rupture sur la calibration des bulles, la distribution spatio-temporelle des phases, les transferts pariétaux,

- *le comportement de bulles dans un cisaillement simple* : détachement de bulles d'une paroi, migration, déformation et rupture, coalescence, autant de mécanismes physiques contrôlant la taille des bulles et qu'il est indispensable de mieux connaître pour améliorer leur modélisation

PHYSIQUE DE LA MOUSSE

M. Vignes-Adler (DR2), B. Prunet-Foch (CR1), O. Pitois (MC), F. Rouyer (MC), C. Fritz
(thésarde, depuis janvier 2003)

Laboratoire de Physique des Matériaux Divisés et des Interfaces (LPMDI)
UMR 8108 du CNRS, Université de Marne-la-Vallée.

Généralités

1. L'objectif principal de nos études dans le cadre du GDR est la physique de la mousse.

Il y a de bonnes raisons d'étudier les mousses en microgravité.

Dans le contexte spatial, les mousses sont présentes dans les extincteurs des stations habitées et il est important de pouvoir connaître le comportement des mousses en apesanteur; par ailleurs, il existe un risque non négligeable de nucléation de bulles dans les réservoirs capillaires de propergol des fusées correctrices de trajectoire des satellites avec comme conséquence la formation de mousse bloquant l'alimentation en propergol et la fin prématurée du satellite.

2. Dans le contexte scientifique, le drainage gravitaire est une cause omniprésente de la déstabilisation des mousses. S'il est possible de s'en affranchir, sous gravité terrestre, en étudiant les mousses très sèches à très faible fraction de liquide Φ_1 (~1%), ou en augmentant considérablement la viscosité dynamique des solutions dès que Φ_1 augmente, les effets de drainage gravitaire deviennent prépondérants et très perturbateurs, et des instabilités de densité s'établissent. Au fur et à mesure que Φ_1 approche la valeur de la transition mousse sèche/mousse humide, de nombreuses études deviennent impossibles masquant l'influence des effets de surface.

3. Dans le contexte du développement durable, les mousses sont utilisées pour la flottaison : c'est un procédé industriel qui consiste à séparer des particules de différentes natures (issues du broyage de minerais) au moyen d'une mousse aqueuse circulant verticalement dans une colonne. De manière schématique, certaines de ces particules, hydrophobes, s'attachent aux bulles de gaz, ce qui permet leur récupération en haut de la colonne. Les particules hydrophiles, que l'on ne souhaite pas récupérer, sont transportées dans le réseau de bords de Plateau. Il faut également remarquer que les particules initialement capturées aux interfaces liquide/gaz peuvent se détacher (lors de coalescences de bulles par exemple) et entrent alors dans le réseau de bords de Plateau. Le transport de ces particules au sein de ce réseau est un élément important dans la modélisation du procédé. Il s'agit toutefois d'un phénomène complexe mettant en jeu la topologie du réseau lui-même fortement dépendant de tD et les propriétés des interfaces constituant ce réseau. L'optimisation du procédé nécessite de bien connaître les interactions mousses-particules au sein de la mousse, et de les découpler des effets liés à la gravité.

Dès que la fraction de liquide dans la mousse est supérieure à 5% ou lorsque les films ne peuvent résister au drainage gravitaire rapide à cause de leur rhéologie de surface, les études en microgravité sont pertinentes. En microgravité, on supprime le drainage gravitaire et on peut contrôler la succion capillaire en variant l'épaisseur des films.

Récentes études sur la physique de la mousse faites au laboratoire.

Il est maintenant bien connu qu'il existe plusieurs échelles d'étude des mousses représentées (Fig. 1). Toutes les expériences présentées dans ce rapport sont faites à l'échelle locale, lorsque l'on peut clairement discerner les films et les bulles à l'oeil nu.

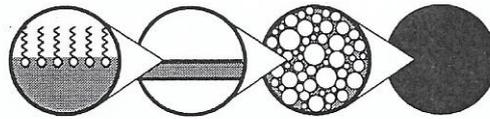


Fig. 1 : Les 4 échelles d'étude des mousses : de gauche à droite, moléculaire, interfaciale, locale, et globale.

Dans toutes nos études, nous avons privilégié l'influence de la rhéologie de surface en utilisant des solutions qui donnent soit des interfaces mobiles (SDS pur) soit rigides (SDS+dodécanol) (Fig.2).

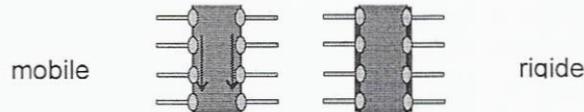


Fig. 2 : Le dodécanol insoluble dans l'eau soit se ségrège aux interfaces soit se solubilise dans les micelles de SDS.

Transport de liquide et de particules dans les bords de Plateau [B6]

Lorsqu'une mousse est drainée jusqu'à ce que sa fraction de liquide soit inférieure à quelques % puis réhumidifiée par un débit constant de liquide, plusieurs équipes ont montré que la loi de réhumidification, (\sim vitesse de pénétration, v_f , du liquide dans la mousse) dépend de la nature de la solution, plus exactement de sa rhéologie de surface.

$$V_f \sim Q^{1/2} \text{ (interface mobile) et } V_f \sim Q^{1/3} \text{ (interface rigide)}$$

Des modélisations existent basées sur l'analyse de la dissipation visqueuse dans la mousse. En fait, la physique est beaucoup plus complexe. Pour pouvoir isoler le rôle de la rhéologie de surface, des expériences sont prévues sur l'ISS sur les mousses sèches et humides (groupe de D. Langevin à Orsay). Dans ce contexte, nous développons au laboratoire des expériences sur le transport de liquide dans le réseau des bords de Plateau (Fig. 3).

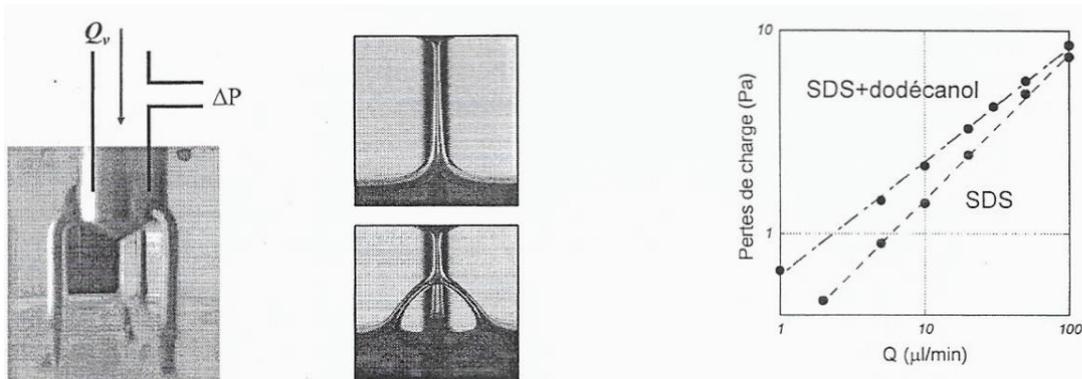


Fig. 3 : Mesure de la perte de charge d'un écoulement dans un bord de Plateau et un nœud pour une solution de SDS, une solution mixte de SDS et de dodécanol.

Nous avons mesuré la perte de charge que subit l'écoulement dans un bord de Plateau unique, un nœud et un assemblage de bulles en fonction du débit de liquide et pour des solutions de différente nature. Le graphique de la figure 3 montre que, à même débit, la perte de charge est supérieure lorsque du dodécanol est dilué dans la solution ce qui rigidifie les interfaces, alors que ces dernières sont mobiles avec du seul SDS. L'écoulement est de type

Poiseuille dans le premier cas et de type bouchon dans le second ; en fait, la physique est probablement encore plus complexe, et il est nécessaire de mesurer d'autres quantités physiques pour bien comprendre le phénomène telles que le rayon de courbure des bords de Plateau et l'épaisseur des films. Nous allons maintenant étendre cette étude au transport de particules dans la mousse, et cet ensemble constituera le travail de thèse de Christelle Fritz commencée en janvier 2003 avec le soutien financier du CNES.

Dynamique du seuil d'écoulement d'une mousse sèche [A5, B7]

Le comportement rhéologique des mousses est très dépendant de la contrainte extérieure imposée : il est (visco-élastique aux faibles déformations, et devient viscoplastique au fur et à mesure que la contrainte imposée augmente. Lorsque la mousse est sèche (bulles polyédriques), l'écoulement se produit grâce à une succession de transformations topologiques, échange de faces entre deux bulles adjacentes (Fig. 4). Nous avons étudié la façon dont une mousse cisailée se déforme et se transforme, en visualisant une tranche de mousse à l'intérieur d'une mousse tridimensionnelle (une dizaine de bulles en profondeur). Nous avons mesuré le profil de vitesse dans l'entrefer et la déformation seuil correspondant au premier réarrangement induit lors de la mise en écoulement d'une mousse sèche. Nous avons montré que le cisaillement est uniforme (profil de vitesse linéaire) et que les réarrangements sont localisés (quelques tailles de bulles) jusqu'à des déformations importantes. La déformation seuil mesurée dépend de la dynamique du cisaillement. Nous avons identifié un régime quasi-statique au delà duquel cette déformation croît linéairement avec la vitesse de déformation : les effets visqueux retardent l'apparition du premier réarrangement. Ces données sont importantes pour établir les lois de comportement des mousses et servir de validation aux simulations numériques.

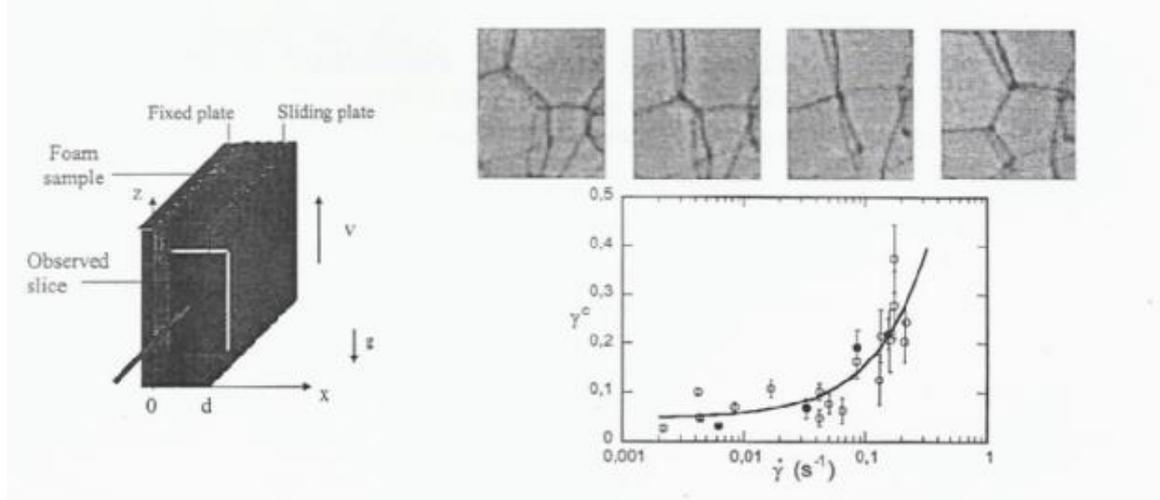


Fig. 4 : Haut : Détail d'un échange de faces observées au cœur d'une mousse en cisaillement simple. Bas : Seuil d'écoulement en fonction du taux de cisaillement de la mousse. Solution : SDS+dodecanol+glycérol

Dans le contexte de microgravité, ces études constituent le comportement limite lorsque $\Phi_1 \rightarrow 0$.

Etudes embarquées

Au cours de ces années, nous avons réalisé des expériences embarquées sur l'Airbus ou sur fusée-sonde afin de préparer le module « Foam » qui sera installé dans l'ISS.

il s'agit de faire des expériences pour étudier le mode de production de mousse pendant la phase de microgravité, sa stabilité, le mode de destruction in situ afin de pouvoir la renouveler et d'étudier le temps de relaxation des contraintes au coeur de la mousse après remplissage de la cellule.

Nous avons réalisé un système d'injection simultanée sous pression de solution moussante et de gaz pour réaliser un petit volume de mousse; en abaissant ensuite la pression nous pouvons assécher la mousse. Nous avons utilisé 4 solutions :

- (i) une solution aqueuse de SDS à 2g/l (0.9 x cmc)
- (ii) une solution aqueuse de SDS à 1g/l + 30mg/l de dodécanol
- (iii) une solution organique de éthylène glycol + CTAB + decanol
- (iv) même composition mais en concentration plus faible

Le système d'injection a convenablement fonctionné mais la mousse a été très rapidement déstabilisée à partir du centre de la mousse, surtout avec la solution (ii), ce qui était très inattendu car cette mousse est la plus stable sur terre. Une expérience de référence post flight n'a pas pu avoir lieu car la fusée s'est écrasée au sol.

Ces expériences ont montré la faisabilité du projet et que la mousse est fragile au centre, probablement à cause des effets de mouillage de la paroi solide qui en aspirant le liquide vers la paroi, amincit les films de façon excessive et les rend fragiles.

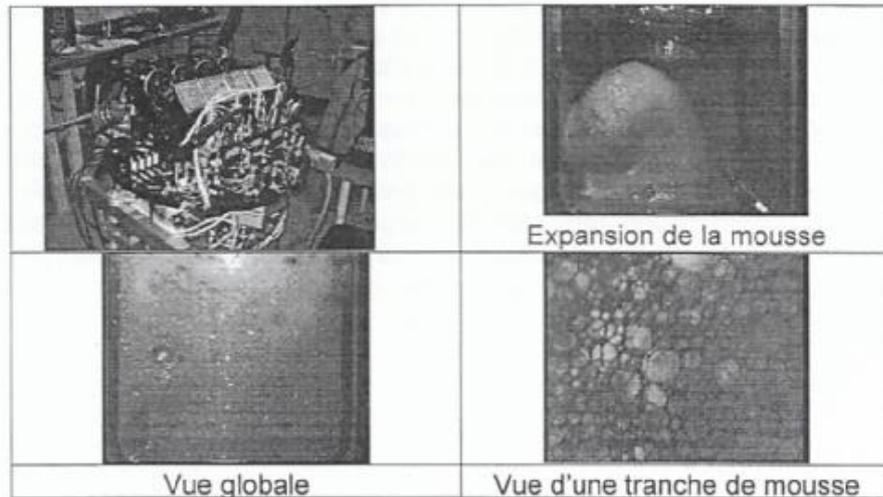


Fig. 5 : Module embarqué sur la fusée-sonde Maxus 4

Références (liste complète en fin de rapport)

1. F. Rouyer, S. Cohen-Addad, M. Vignes-Adler, R. Höhler "Dynamics of yielding observed in three-dimensional dry aqueous foams", *Phys. Rev E*, 67, 02 2003.
2. M. Andersson, B. Kronberg, C. Lockowandt, B. Prunet-Foch, M. Vignes-Adler "Transient mechanisms in transient foams under microgravity conditions", in Sciences de la Matière et microgravité, (Eds R. Prud'homme, D. Langevin, G. Faivre) *J. Physique IV*, 11, Pr6 -227-P r6-230, 2001.
3. M. Vignes-Adler, B. Prunet-Foch, B. Kronberg, M. Andersson, M. Johansson, B. Svensson, C. Lockowandt, H. Schneider, O. Jansson, P. Holm, M. Lundin, "The foam experiment module and its flight on Maxus 4", *Proceedings of the 15th ESA Symposium on European Rocket and Ballon Programmes and Related Research, Biarritz*, pp 415-418 ESA SP-471, Aug 2001.

MOUSSES ET FILMS DE SAVON

Marc Durand (thèse, soutenue en 2002), Dominique Langevin(DR), Arnaud Saint-Jalmes(CR), Mahassine Safouane (thèse)

Laboratoire de Physique des Solides, Bâtiment 510, Université Paris Sud, 91405 Orsay

Notre activité de recherche sur les mousses est couplée à des études sur les films de savon qui séparent les bulles dans la mousse, et sur les monocouches de tensioactifs qui recouvrent les films. Le but de l'étude est de mieux comprendre les propriétés de la mousse : création, drainage, destruction (essentiellement par rupture des films). Il est connu depuis longtemps que les propriétés de la mousse dépendent fortement du type de tensioactif utilisé ainsi que d'éventuels autres additifs. Mais l'origine des différences est encore peu claire, surtout en ce qui concerne la rupture des films.

Seules des solutions de tensioactifs bien choisies forment sur terre des mousses stables. Le drainage est rapide, et très souvent les films se cassent lorsque leur épaisseur est de l'ordre du micron. Il est donc très difficile d'étudier sur terre des mousses contenant plus que quelques pour cent d'eau ou encore des mousses instables. On s'attend à ce que l'étude des mousses en microgravité révèle toute une panoplie de phénomènes nouveaux. Ceci intéresse par exemple les industriels qui élaborent des mousses métalliques, qui ne disposent pas de moyens d'étude sur terre et qui peuvent donc difficilement optimiser les méthodes de fabrication. Nous participons à deux projets MAP sur les mousses financés par l'ESA, un dont le coordonnateur est John Banhart, spécialiste de mousses métalliques à Berlin, le second dont D. Langevin est coordinatrice. Elle est également responsable européen pour l'ESA du module destiné à l'étude des mousses dans le FSL de la Station Spatiale Internationale

L'activité que nous menons pour le CNES et l'ESA a deux volets

1. Etudes de films de savon

Dans ce volet, nous avons cherché à définir et à caractériser un certain nombre de systèmes dont l'étude en microgravité sera intéressante. En particulier, nous travaillons sur des solutions mixtes de tensioactifs et de polymères qui conduisent à des mousses peu stables, alors que les films faits avec ces solutions ont une stabilité très variable suivant leur orientation : temps de vie très court pour les films verticaux, et très long pour les films horizontaux. Dans ces systèmes, les cinétiques d'adsorption aux interfaces sont lentes; sur terre, le drainage est rapide, les films n'ont pas le temps d'être recouverts de monocouches, la mousse est donc instable. Il est à attendre que la mousse sera beaucoup plus stable en microgravité. D'autres types de mousses avec des cinétiques d'adsorption lente que nous étudions sont les mousses de brut lourds (avec l'IFP qui cofinance notre contribution MAP) et les mousses de solutions de protéines.

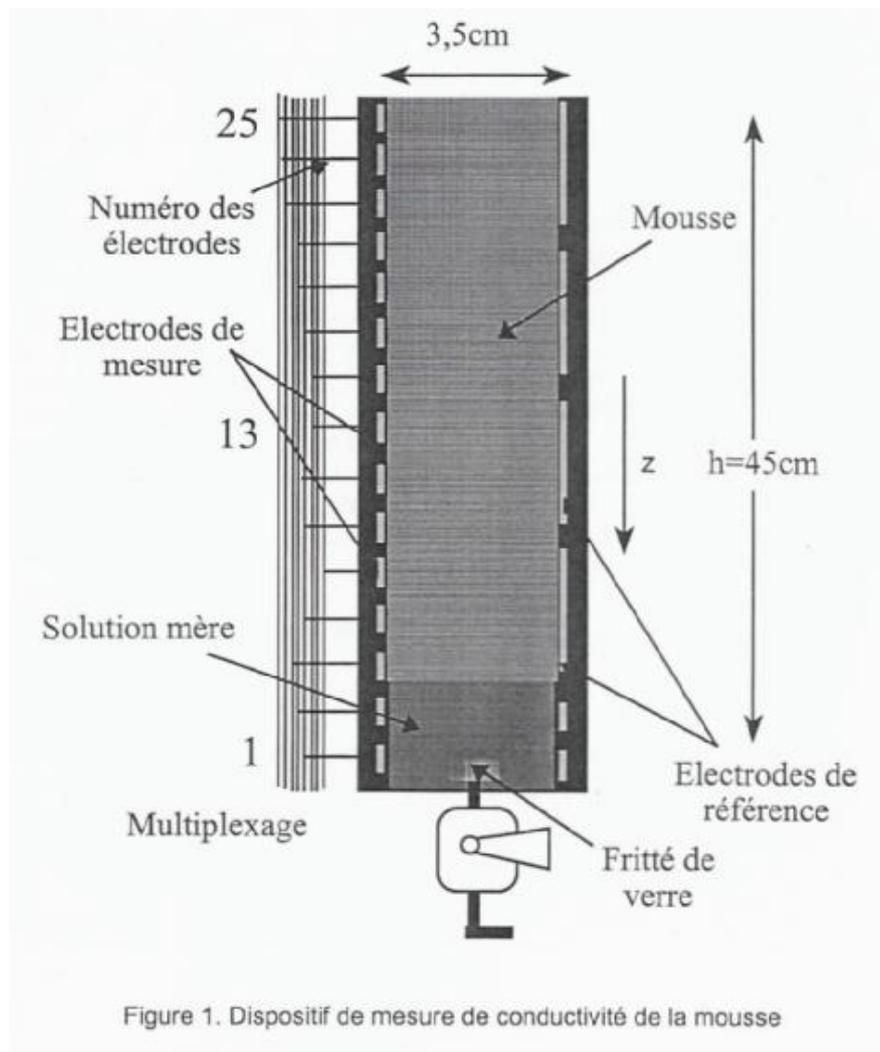
Les caractérisations effectuées sur ces solutions comportent :

- l'étude du drainage des films de savon, des forces entre leur surface et de leur rupture. Pour ce faire, nous utilisons la méthode de la "balance à film" (réflectivité optique et videomicroscopie de films formés sur un support en verre fritté placé dans une enceinte de pression contrôlée)
- l'étude des couches monomoléculaires à la surface des solutions par tension superficielle statique et dynamique (cinétique d'adsorption), rhéologie de surface (ondes de surface

excitées, oscillations de bulles), ellipsométrie, microscopie à angle de Brewster, réflectivité de rayons X.

2. Etudes de mousses

Nous disposons de deux dispositifs : le premier comporte une colonne de plexiglas dans laquelle sont incrustées une trentaine de paires d'électrodes destinées à la mesure de la conductivité électrique à différentes hauteurs. Le bas de la colonne est fermé par un disque de verre fritté par lequel on peut injecter du gaz pour créer une colonne de mousse, le haut de la colonne peut recevoir des débits contrôlés de solution et ainsi réaliser des expériences de drainage forcé.



Le dispositif permet de suivre l'avancée du front séparant la mousse mouillée de la mousse sèche, puisque la conductance augmente lorsque la fraction liquide augmente. L'évolution typique que l'on observe est représentée figure 2. La courbe de conductance présente elle aussi un front; derrière le front, la conductance mesurée reste constante, ce qui indique que la mousse est uniformément mouillée. De plus, on voit bien sur ces courbes que le profil du front ne se déforme pas avec le temps, ce qui est caractéristique d'une onde soliton.

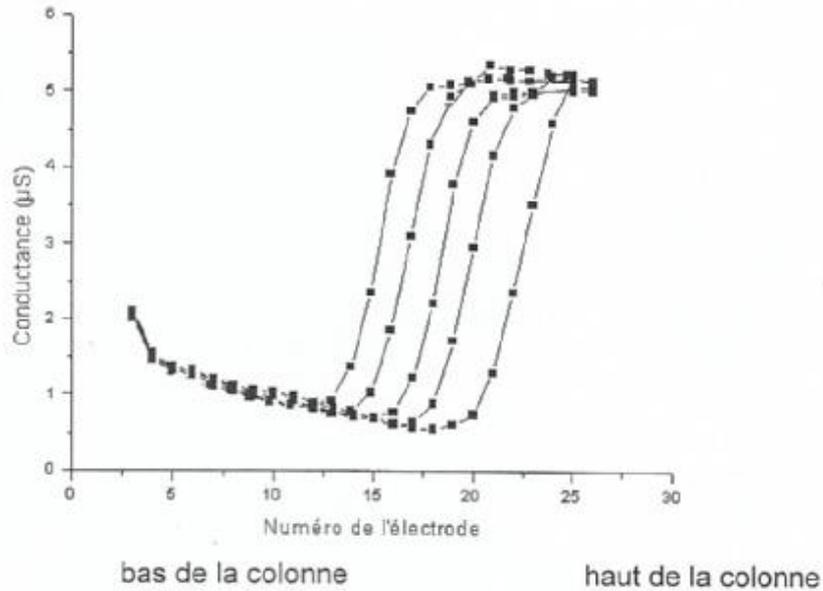


Figure 2. Exemple de résultat expérimental; les différentes courbes ont été obtenues à des instants différents, la courbe se déplaçant vers la gauche avec le temps

Dans le second dispositif, le drainage est étudié par diffusion multiple de la lumière ; une caméra fait l'image de la mousse, qui est analysée de manière à reconstruire le profil vertical de concentration de liquide. On a ainsi beaucoup plus de précision sur la largeur du front, inaccessible par la technique électrique. Ces dispositifs vont être adaptés aux conditions de microgravité avec l'aide de l'ESA et de la NASA. Nous réaliserons des mesures électriques et optiques sur des échantillons de mousses placés dans une cellule constituée de deux plaques de verres circulaires parallèles (figure 3).

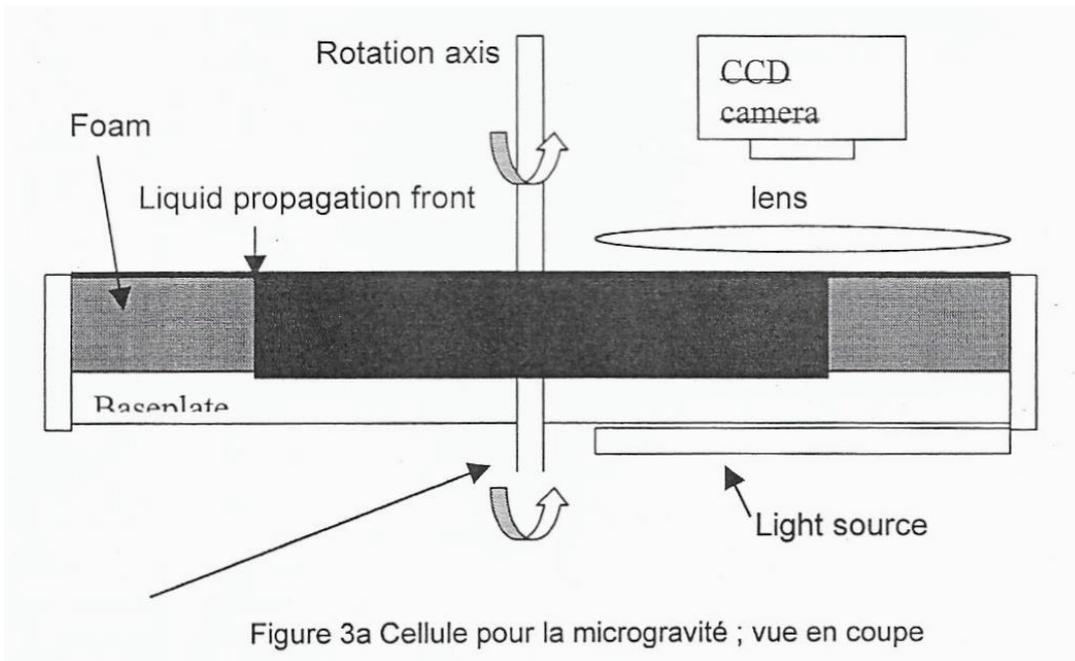


Figure 3a Cellule pour la microgravité ; vue en coupe

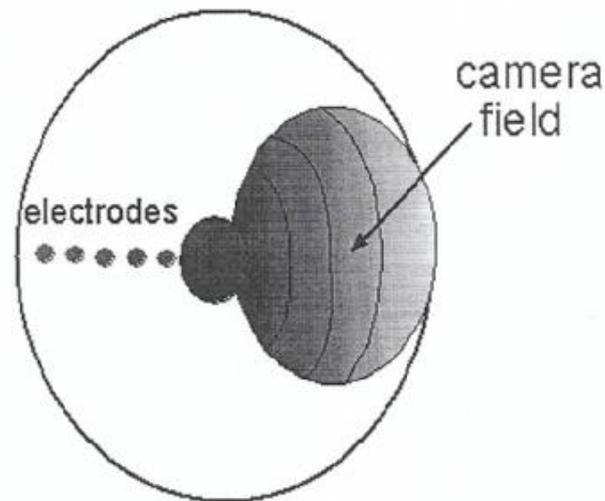
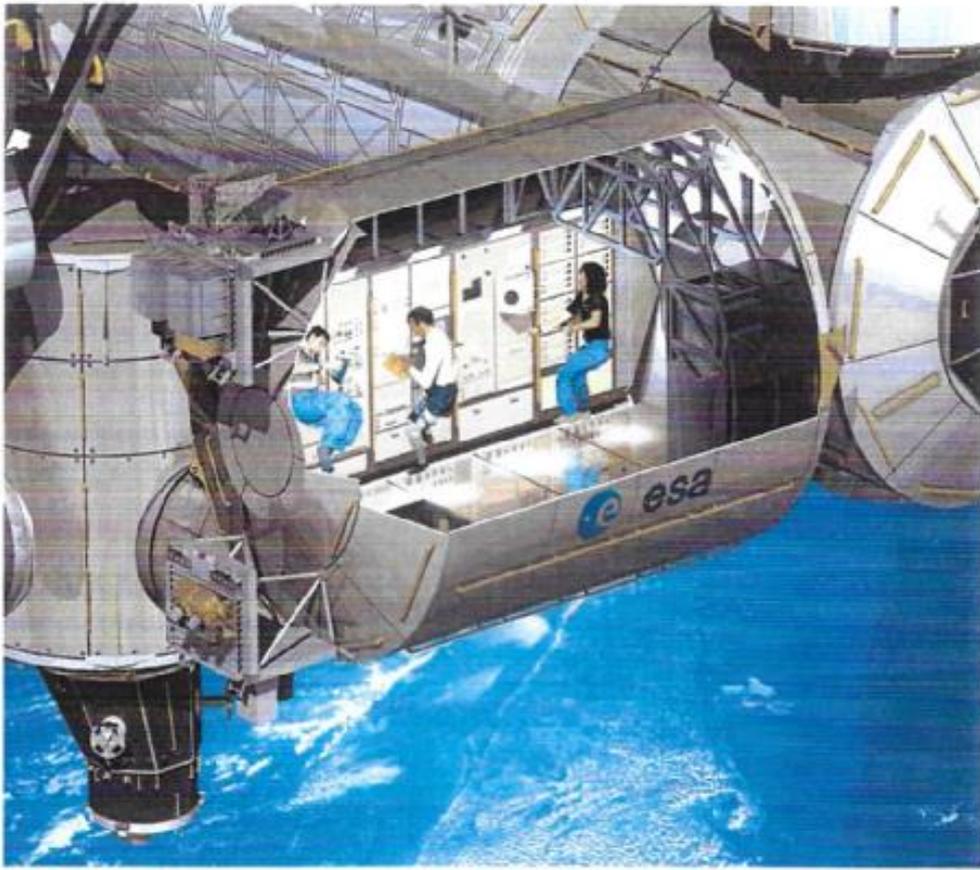


Figure 3b. Cellule pour la microgravité. Vue de dessus

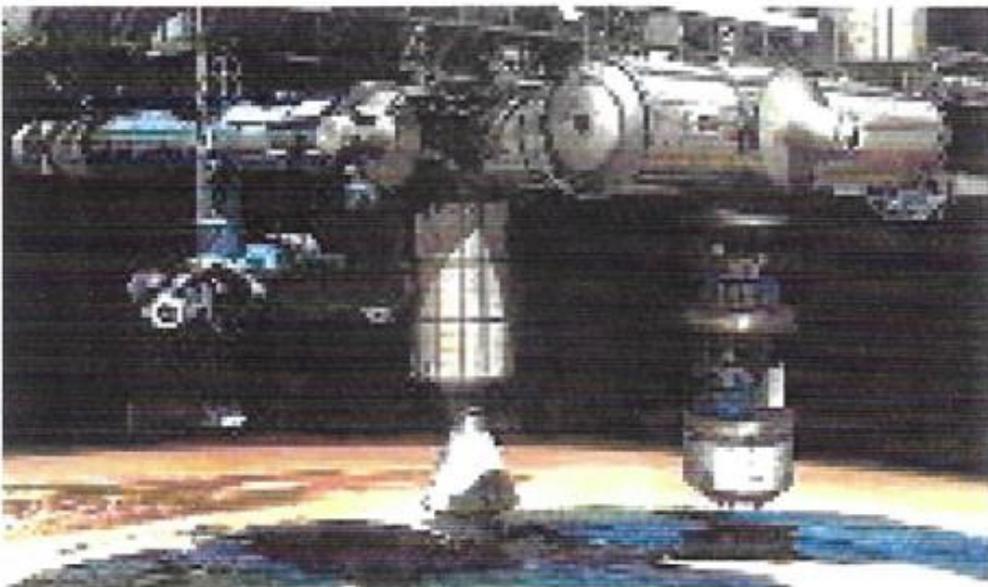
Nous mesurerons ainsi la taille des bulles et la fraction d'eau en fonction du temps pour tester la stabilité de mousses contenant de grandes fractions volumiques d'eau, ou encore de mousses instables sur terre. Cette cellule sera conçue pour étudier également la rhéologie de la mousse (projet de D. Durian, PI pour la NASA). La cellule pourra donc tourner autour de son axe, ce qui nous permettra de réaliser des expériences de drainage forcé et de tester des prédictions théoriques dans des domaines inaccessibles sur terre. La cellule est décrite dans le document FSL-ESA-RQ-TBD du 25 juin 2002.

Nous avons réalisé sur terre une étude détaillée du drainage libre et forcé avec des solutions de tensioactifs simples. Nous avons montré que le régime de drainage dépend de nombreux paramètres : taille des bulles, fraction volumique d'eau, viscoélasticité de surface, viscosité de volume. L'étude des solutions de protéines (concentrées afin d'obtenir des mousses stables sur terre) est en cours. Nous poursuivons également l'étude des solutions contenant des tensioactifs et des polymères (ne se complexant pas avec le tensioactif et affectant uniquement le volume des solutions). Nous avons observé des effets inattendus (drainage plus rapide que pour une solution de même viscosité mais sans polymère). Ces effets pourraient être dus à l'existence d'une viscosité élongationnelle pour le polymère que nous avons choisi (dans ce but d'ailleurs, il s'agit du polyoxéthylène).

Enfin, nous testons diverses machines pour la production de mousses en microgravité. En effet, les méthodes utilisées pendant Maxus 4 permettent de faire des mousses sèches et avec de grosses bulles. Nous voudrions profiter de la microgravité pour étudier des mousses contenant beaucoup de liquide et instables sur terre à cause du drainage. Pour pouvoir utiliser la diffusion multiple, il faut par ailleurs des petites bulles. Une série de vols paraboliques ont été réalisés dans ce but en avril 2003. Ceci nous a permis de déterminer un dispositif optimal. Nous avons pu également tester une cellule tournante, et un procédé d'élimination de mousse (problème loin d'être trivial en microgravité quand on veut remplacer une mousse par une autre). Nous préparons actuellement le prochain vol Maxus et un taxi flight pour 2004 où des expériences de drainage de mousses seront embarquées.



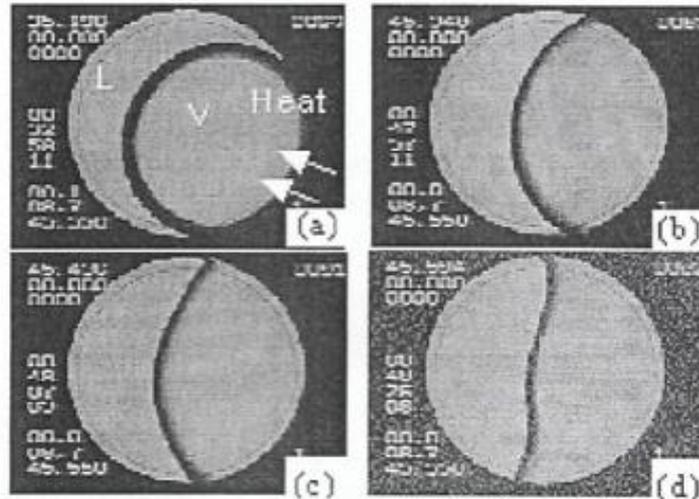
L'étude à des fins scientifiques ou technologiques des phénomènes physiques en micropesanteur est un élément de la recherche spatiale



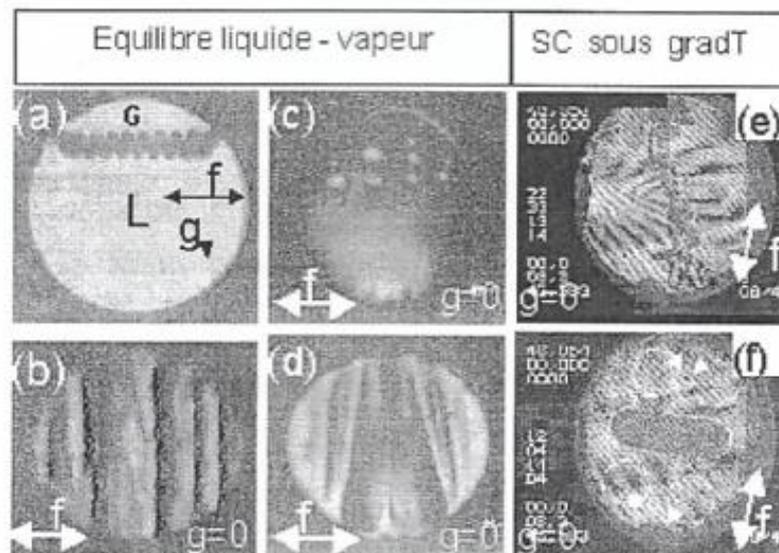
FLUIDES CRITIQUES

• Exemples d'acquis

- Changement de phase en proche critique :
 - mise en évidence d'une anomalie de mouillage de la paroi due au recul de la vapeur.



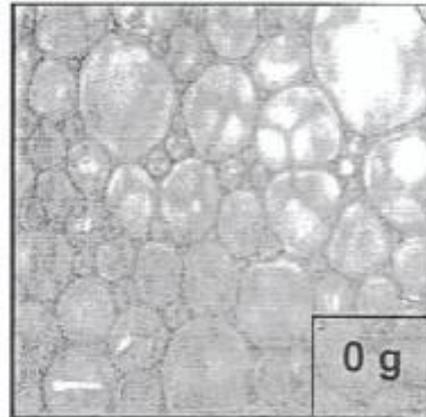
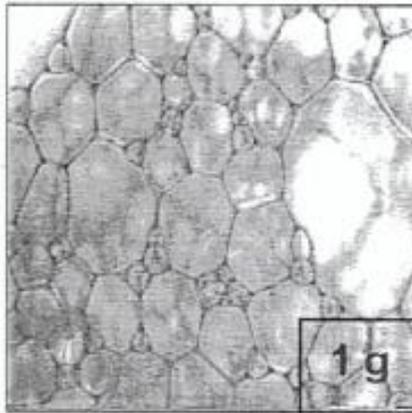
- Fluides critiques sous vibrations: formation de structures
 - Instabilité de Kelvin-Helmholtz
 - Amplification en Micropesanteur



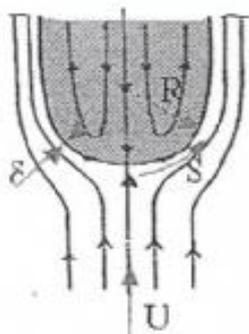
INTERFACES FLUIDES

•Exemple d 'acquis:

- Topologie et dynamique des mousses humides par tomographie optique
 - taux de croissance = f(nombre de faces)
 - relation universelle



- Interfaces étendus



$$S \propto U/R$$

$$\delta = \sqrt{D/S} = \sqrt{DR/U}$$

$$\delta/R = \sqrt{D/RU} = Pe^{-1/2}$$

FLUIDES MISCIBLES

P. Petitjeans, P. Kurowski, P. Philippe, F. Zoueshtiagh, M. Legendre

PMMH — ESFCI, 10, rue Vauquelin, 75005 Paris

L'objectif général de cette activité est l'étude des phénomènes qui peuvent se développer à "l'interface" entre deux fluides lorsque ces deux fluides sont miscibles. Plus particulièrement, nous avons étudié différents types d'instabilités (gravitationnelle, visqueuse, oscillante. Lorsque deux fluides sont *non miscibles*, il existe une tension de surface à l'interface. Lorsqu'ils sont *miscibles*, il n'existe plus, *a priori*, de tension de surface, et chaque fluide diffuse l'un dans l'autre. Cependant, cette diffusion étant en général extrêmement lente, on peut observer par exemple, pendant plusieurs heures une goutte d'un fluide dans l'autre sans que la diffusion moléculaire ait eu le temps de les mélanger complètement. Cette observation a conduit certains auteurs à définir formellement une "tension de surface effective" entre fluides miscibles, au moins pour des temps suffisamment courts :

$$\gamma^{eff} = \beta \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{dC}{dx} \right)^2 dx \text{ où } C \text{ est la concentration et } \beta \text{ un coefficient qui dépend des fluides.}$$

L'énergie interfaciale habituelle entre fluides non miscibles est une grandeur définie à l'équilibre thermodynamique qui représente la variation d'énergie libre à la traversée de l'interface à température constante. D'un point de vue microscopique, les molécules qui se trouvent dans l'interface 1-2 ne subissent pas la même attraction du côté 1 que du côté 2, l'énergie libre en excès dans l'interface étant justement l'énergie interfaciale. Lorsque les fluides sont miscibles, la seule différence est finalement une épaisseur de l'interface plus grande qui, de plus, augmente au cours du temps. Il reste un déséquilibre entre ce qu'une molécule située dans "l'interface" subit du côté 1 et du côté 2. Tant que le gradient de concentration est suffisamment important, un effet similaire à ce que l'on connaît dans le cas non miscible doit exister.

Notre démarche sur ce thème est donc double. En premier lieu, elle est exploratoire. C'est ainsi que nous avons développé un certain nombre de "petites manip" qui n'avaient pour objectif initial que la mise en évidence qualitative de certains phénomènes interfaciaux (typiquement développement d'instabilités). En second lieu, nous avons étudié très en détails certaines instabilités entre fluides miscibles telles que l'instabilité gravitationnelle dans une cellule de Hele-Shaw.

Depuis l'année 2000, P. Petitjeans est impliqué dans une coopération NASA/CNES et USC-Los Angeles/PMMH pour une expérience de déplacement visqueux à très bas nombre de Péclet qui va être installée dans la station spatiale internationale vers 2006. Cette expérience correspond à celle sur laquelle P. Petitjeans avait travaillé durant son postdoc, et dont les résultats ont conduit à ce projet, dont il est le co-PI.

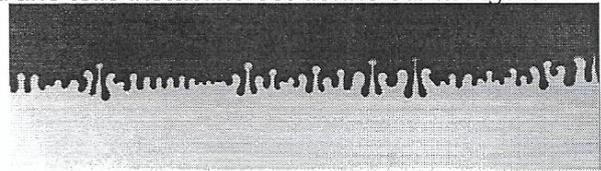
Instabilité gravitationnelle entre fluides miscibles dans une cellule de Hele-Shaw

Lorsqu'un fluide dense est placé au-dessus d'un fluide moins dense, il apparaît une instabilité gravitationnelle dite de Rayleigh-Taylor, qui se manifeste par la chute dans le fluide le plus léger, de gouttes pendantes du fluide le plus lourd et réciproquement. Ces gouttes se transforment en doigts puis en structures plus complexes au cours du temps.

Nous avons étudié expérimentalement et théoriquement cette instabilité dans une configuration de type Hele-Shaw dans le régime linéaire. De très nombreuses mesures ont été effectuées par J. Fernandez. Il a mis en évidence deux régimes: un régime dit "diffusif" à bas nombre de Péclet, et un régime dit "convectif" à plus grand Péclet. Dans le régime diffusif, la longueur d'onde adimensionnée par l'épaisseur de la cellule b varie en Pe^{-1} où $Pe = Ub/D$ avec $U = \Delta\rho g b^2 / 12\eta$, ce qui revient à dire que c'est la longueur de diffusion $l_D = \Delta\rho g b^2 / 12\eta$ qui fixe la longueur d'onde λ . Dans le régime convectif par contre, la longueur d'onde λ est fixée par l'épaisseur b de la cellule. L'essentiel des résultats est reporté dans l'article [*Density*

driven, unstable flows of miscible fluids in a Hele-Shaw cell, J. Fernandez, P. Kurowski, P. Petitjeans, E. Meiburg, J. Fluid Mech., 2002]. Un exemple de visualisation d'une telle instabilité est donné sur la Figure 1.

Figure 1: Instabilité gravitationnelle entre deux couches de fluides miscibles lorsque le plus lourd est placée au-dessus du plus léger. Les longueurs d'onde typiques sont de l'ordre de quelques mm.



La longueur d'onde et le taux de croissance sont représentés sur les figures 2 en fonction du nombre de Péclet. On observe très nettement les deux régimes à bas Pe et à grand Ra .

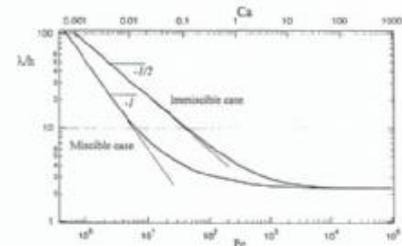
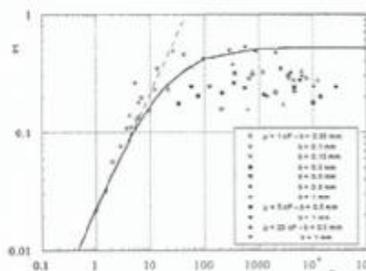
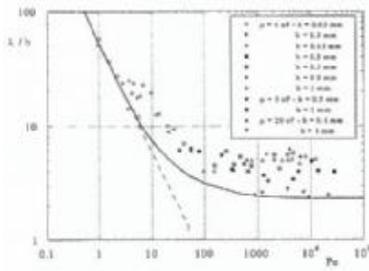


Figure 2-a: Longueur d'onde en fonction du nombre de Péclet, pour différentes épaisseurs et différentes viscosités.

Figure 2-a: Taux de croissance en fonction du nombre de Péclet,

Figure 3: Longueur d'onde en fonction du Péclet dans le cas miscible et du nombre capillaire dans le cas non miscible.

La courbe en trait plein est obtenu par la résolution de la relation de dispersion que nous avons proposée.

Un autre résultat important issu de ce travail concerne l'écriture d'une relation de dispersion valable des très petits aux très grands nombres de Péclet (presque 5 décades), qui représente très bien les résultats des expériences. Le point important consiste à utiliser une équation type Brinkman à la place de la relation de Darcy. Cette équation consiste à remplacer le terme visqueux de l'équation de Navier-Stokes $\mu \Delta_{\parallel} U - 12\mu U/e^2$ où U est la valeur moyenne de la vitesse dans l'épaisseur de la cellule, et où Δ_{\parallel} est le laplacien dans le plan de la cellule. Cette nouvelle analyse de stabilité linéaire permet d'écrire une relation de dispersion généralisée qui décrit à la fois le régime à bas Pe et le régime à grand Pe :

$$\Sigma = \frac{12}{Pe} + \frac{q}{2} \left[1 - \frac{q}{\sqrt{12 + q^2}} \right] - \frac{6}{Pe\Sigma} \left[1 - \frac{q}{\sqrt{Pe\Sigma + q^2}} \right]$$

où Σ est le taux de croissance adimensionné ($\Sigma = 12\eta\sigma/\Delta\rho g b$) où q est le nombre d'onde adimensionné par l'épaisseur de la cellule.

En particulier, nous obtenons une valeur constante de la longueur d'onde adimensionnée à grand Pe , comme cela est observé dans les expériences (Fig. 2). Notons que l'on a aussi écrit une relation de dispersion équivalente dans le cas non-miscible qui représente elle aussi les comportements qui ont été obtenus expérimentalement (Fig. 3). En particulier, on observe que la longueur d'onde adimensionnée tend vers la même valeur dans le cas miscible (i.e. à grand nombre de Péclet) et dans le cas non-miscible (i.e. à grand nombre capillaire). L'article [wavelength selection of fingering instability inside Hele-Shaw cell, j. Fernandez, P. Kurowski, L. Limat, P. Petitjeans, Phys. of Fluids, 13(11), 3120-3125, 2001] décrit cette étude.

Tension de surface effective entre fluides miscibles

Nous avons mis en marche une série d'expériences pour mesurer cette "tension de surface effective" par la méthode de la goutte tournante (Fig. 4). Les résultats obtenus entre du glycérol pur et de l'eau donnent une valeur de tension de surface de l'ordre de 0.58 dyne/cm (Fig. 5), soit de deux ordres de grandeur inférieure à des valeurs typiques entre fluides non miscibles. Cette valeur est compatible avec d'autres mesures indirectes qui ont été obtenues récemment.

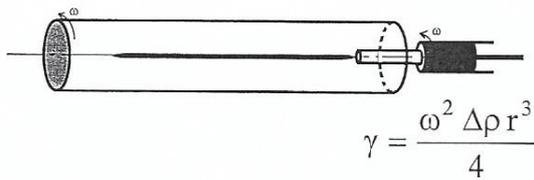


Figure 4: Méthode de la goutte tournante pour les mesures de petites tensions de surface. Dans notre cas, une longue goutte d'eau est entourée de glycérine de concentration C_g

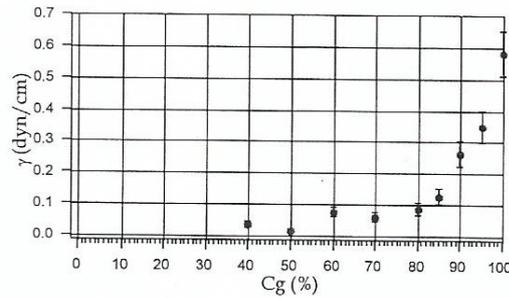


Figure 5: Tension de surface effective entre de l'eau et de la glycérine de concentration C_g .

Ces résultats sont détaillés dans l'article [une tension de surface pour les fluides miscibles, P, Petitjeans, CR. Acad., Sci. Paris II B, 322, 673-679, 1996].

Instabilité par forçage oscillant vertical (instabilité de Faraday)

Nous avons également étudié l'instabilité de deux couches de liquides miscibles gravitationnellement stables, soumis à une oscillation verticale. Après beaucoup de difficultés expérimentales liées pour l'essentiel à la mise en contact des deux fluides, nous arrivons maintenant à visualiser des ondes à l'interface. Cette étude est essentiellement effectuée par F. Zoueshtiagh. Nous explorons les différents régimes, puis nous essayons de corrélérer les résultats avec le gradient de concentration à travers l'interface. L'idée étant de regarder si c'est un effet de type tension de surface effective qui sélectionne les longueurs d'onde de l'instabilité. La mesure du profil de concentration est très délicate et les premières tentatives dans ce sens, mais sur un système beaucoup plus simple, sont en train de ce mettre en place avec Pierre Philippe (post doc dans l'équipe).

Figure 6: Visualisation de la déformation de l'interface entre deux huiles silicones soumises à une oscillation verticale d'amplitude 50 mm et de fréquence 2.5 Hz.



Cusp ou singularité d'une interface

Deux cylindres de rayon R sont mis en rotation contrarotative dans une cuve contenant un fluide très visqueux (huile silicone de 1000 à 10.000 cP). Il apparaît, au-dessus d'une vitesse de rotation critique, une singularité de l'interface appelée "cusp" (Fig. 7). Le rayon de courbure de l'interface au niveau de cette singularité a été évalué à quelques dizaines de nanomètres. Nous avons étudié les conditions d'apparitions de ce cusp en fonction de divers paramètres physiques (viscosité ν du fluide, vitesse de rotation Ω des cylindres) et géométrique (écartement G des cylindres, hauteur h du fluide par rapport à la surface libre). Les champs de vitesse ont aussi été déterminés par des mesures de PIV. Un nombre sans dimension F dépendant des paramètres physiques et géométriques du système a été

introduit $F = \frac{gh^2G}{\nu\Omega R^2}$. Ce nombre traduit la compétition entre les effets gravitationnels

(stabilisants) et les effets d'entraînement visqueux (déstabilisant). Nous avons étudié le mécanisme d'apparition du cusp grâce à des visualisations et à l'étude du champ de vitesse par PIV. Nous nous sommes aussi intéressés au seuil d'apparition du cusp en modifiant divers paramètres tels que la viscosité ν du fluide, la vitesse de rotation Ω des cylindres, la quantité h de fluide au dessus des cylindres (Fig. 8). Deux régimes ont pu être mis en évidence et ont été étudiés séparément: un régime pour lequel la surface libre est au-dessus des cylindres ($h > 0$) et un régime pour lequel elle est en dessous ($h < 0$). Une interprétation physique de ces deux régimes a pu être donnée.

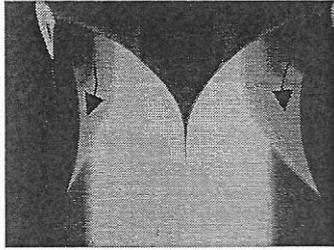


Figure 7: Visualisation du cusp. (diamètre des cylindres = 6 cm) Le sens de rotation des cylindres est indiqué sur la photo.

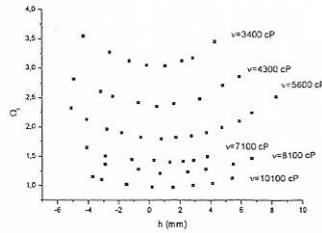


Figure 8-a Courbes de seuils $\Omega_c=f(h)$ pour différentes viscosités

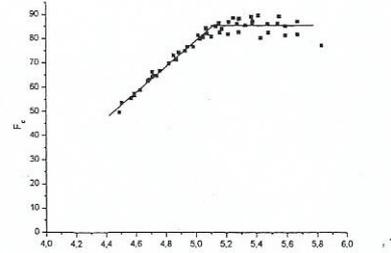


Figure 8-b: Courbe de seuil $F=f(h)$

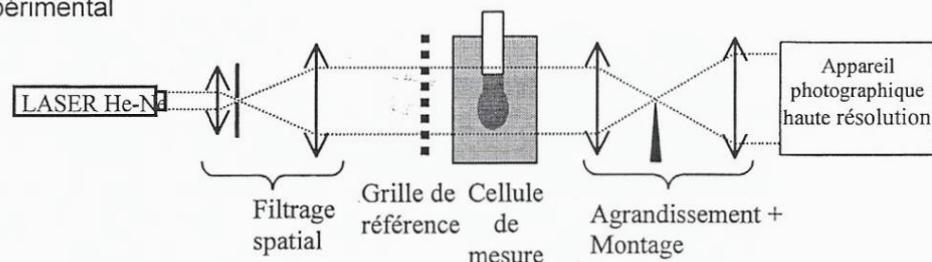
Conclusion et projets sur les interfaces miscibles

Comme nous l'avons vu, la démarche scientifique suivie pour ce projet est double. En premier lieu, l'aspect exploratoire est fortement présent par le montage de nombreuses "petites manips" dont le premier objectif était de mettre en évidence certaines instabilités. En second lieu, nous avons approfondi certaines études, - y compris celles pour lesquelles nous ne nous attendions pas à observer d'effet lié à une tension de surface effective. Lors de cette exploration, certaines "petites manips" ont montré leur potentiel, et nous reprenons ces études beaucoup - plus quantitativement (allée de colonnes tombantes, couche très mince sous un support,..). De plus, nous allons remettre en marche un système de mesure de tension de surface par la méthode de la goutte tournante. En particulier, cette technique, outre l'intérêt qu'elle présente de mesurer la tension de surface, permet aussi d'obtenir une longue goutte stable d'un liquide dans un autre liquide miscible avec une interface bien définie. Lorsque la rotation est arrêtée, on observe que cette longue goutte remonte avec une modulation le long de son axe que nous aimerions regarder d'un peu plus près. En effet, nous avons là une situation non confinée dans laquelle on peut étudier l'instabilité de Rayleigh-Taylor miscible.

Les autres expériences en cours actuellement vont devoir être poursuivies quelques temps encore: il s'agit de l'expérience de fluides sous vibrations verticales (instabilité de Faraday) qui produit à l'interface une modulation que nous aimerions bien (dans certains régimes) relier à la tension de surface effective (F. Zoueshtiagh) et de l'expérience du cusp.

L'autre grand projet en cours est la mise au point d'un système qui nous donne simultanément le profil de concentration à l'interface, et la tension de surface effective "macroscopique". Nous avons investi dans des moyens optiques de mesure du profil de concentration par déviation de faisceaux ou strioscopie laser (voir Fig. 9). Ceci est un très gros projet qui constitue une importante étape dans la caractérisation des interfaces entre fluides miscibles. Nous nous attendons à ce que la tension de surface effective varie avec le carré du gradient de concentration. Nous allons vérifier cette hypothèse et mesurer les coefficients numériques en fonction des fluides. Nous allons aussi démarrer des expériences avec des liquides qui ne deviennent "miscibles" qu'au dessus d'une température critique (fluides binaires). Cela devrait résoudre une bonne partie du problème de la mise en contact de deux liquides miscibles et du mélange initial. L'expérience consistera à mesurer le profil d'une goutte pendante d'un fluide donné dans un autre fluide miscible et très légèrement moins dense. La forme de la goutte doit alors permettre d'estimer la valeur de γ_{eff} tandis que le gradient d'indice optique, qui est relié au gradient de concentration, peut être déduit de la déviation de faisceau laser au niveau de l'interface. Pour se faire, nous envisageons d'utiliser une technique basée sur la déformation de l'image d'une grille.

Figure 9: Montage expérimental



STABILITE DES EMULSIONS DENSES EN L'ABSENCE DE GRAVITE

Annie STEINCHEN*, Albert SANFELD, Jean-Denis SYLVAIN**, Michaël ANTONI

*Laboratoire des Systèmes Chimiques Complexes UMR 6171- Unité de Thermodynamique des Phénomènes hors d'Equilibre- Université d'Aix-Marseille — Fac. Des Sciences St Jérôme
3d Escadrille Normandie Niémen — 13397 Marseille cedex 20
**Université de Nice-Sophia Antipolis — Campus Parc Valrose
06004 Nice

1. Elaboration du diagnostic optique

Après avoir observé par microscopie le comportement de gouttelettes d'émulsions denses en couches minces (évolution de la distribution de taille et mouvements non Browniens), il s'est avéré nécessaire d'observer les émulsions loin de l'influence de la surface libre et des parois solides. Un système de variation de profondeur de champ de l'objectif du microscope a donc été élaboré (Fig.2). Il permet une excursion sans choc dans la profondeur de l'émulsion (loin des parois) à l'aide d'un système de lames de haute précision [14][16]. Le plan objet est déplacé par translation, par pas de $0.1 \mu\text{m}$, avec une profondeur de champ suffisante pour enregistrer le maximum d'informations. Un logiciel de traitement d'images permet de reconstruire les positions et la distribution de tailles de l'émulsion par analyse des indicatrices de diffraction (Fig.1) [15]. Comparaison des performances de la tomographie microscopique avec l'holographie microscopique développée par Lambda X (Bruxelles) : cette dernière méthode peut donner des informations uniquement dans sa version «vélocimétrie » mais n'est absolument pas satisfaisante pour la détermination de la distribution de tailles et des positions. L'élaboration de l'instrumentation qui devra être adaptée aux exigences de la manip en Space Lab est au stade de l'étude de faisabilité par Astrium prestataire de l'ESA. Le système tomographique sera couplé avec la vélocimétrie holographique 3D. Plusieurs essais préliminaires en collaboration entre Nice Marseille et Bruxelles ont été réalisés à Bruxelles et Nice pour arriver à ces conclusions.

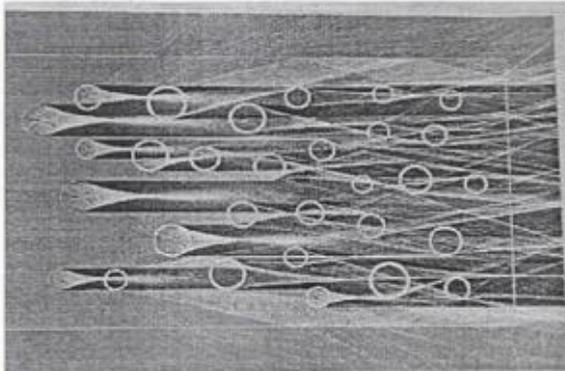


Fig.1 Image reconstruite d'un ensemble de gouttes

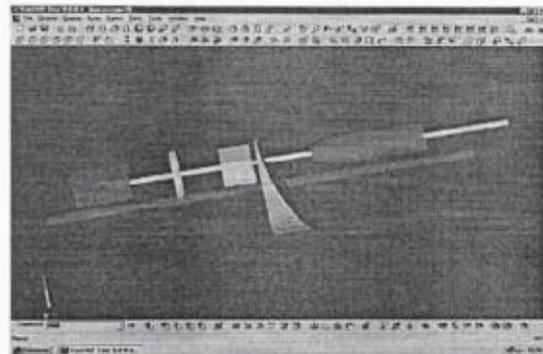


Fig.2 Lame retardatrice pour tomographie

2. Préparation des émulsions denses

Les essais en laboratoire ont été effectués permettant la création de l'émulsion au moyen d'un rotor spécifique à lames, directement dans le récipient mis sous l'objectif du microscope. Un tel système permet de produire des émulsions dont les gouttes ne sont pas trop petites (moyenne de 15 μm) et d'observer les variations de la distribution des tailles pendant tout le processus de formation et pendant la phase de relaxation qui est le but de notre étude [4]. Toutefois, dans ce cas, la densité des solutions est plus forte, et la dispersion de la distribution plus grande (nombreuses très petites particules, difficilement visibles et fortement diffusantes). L'identification des particules est alors très difficile.

3. Modèle théorique

Après une étude systématique des modèles d'interactions dans les émulsions diluées et une modélisation théorique de la coagulation et de la floculation dans les minima primaire ou secondaire [2], un modèle théorique d'interactions dans les émulsions denses ou moyennement denses est élaboré [3][14][15]. Il tient compte des forces de répulsion électrostatiques, des attractions de van der Waals avec effet de retard et des répulsions stériques, pour un ensemble en empilement dense de gouttelettes déformables d'eau en suspension dans une solution organique (huile) d'un tensioactif faiblement dissocié.

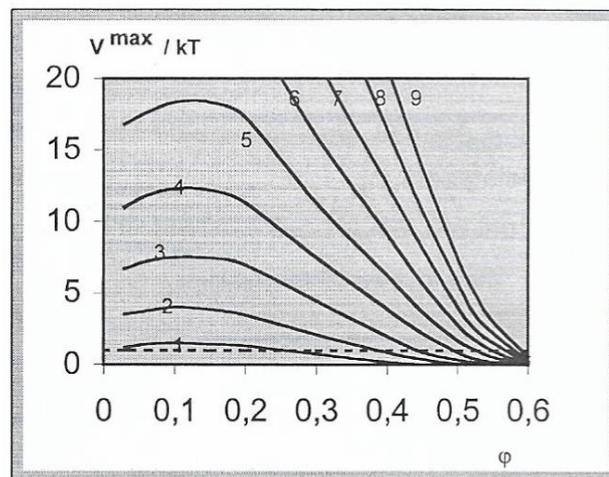


Fig.3 Abaissement de la barrière de potentiel en fonction de la fraction volumique

Cette approche théorique est une extension d'un ancien travail dû à Albers et Overbeek [J. Coll. 1959] pour une émulsion d'eau dans le benzène où seules les forces de répulsion de doubles couches étaient tenues en compte. Ce travail montrait la considérable réduction de la barrière répulsive par rapport aux systèmes dilués et prédisait donc une plus grande probabilité de coalescence dans les émulsions denses par écrantage des interactions.

L'écrantage des interactions dans les milieux denses diminue la barrière de répulsion - favorise la floculation. L'abaissement de la barrière de répulsion électrostatique est -d'autant plus important que la fraction volumique est grande et que κa est petit. La figure 3 montre les courbes de hauteur de barrière de potentiel en fonction de la fraction volumique obtenues pour un ensemble de gouttes homodisperses (non déformables) d'eau dans l'huile de rayon $a = 3\mu\text{m}$ compte tenu des attractions de v dW et de la répulsion des doubles couches pour $\kappa a = 2$. Les courbes 1-9 (Fig.3) correspondent à des potentiels $\psi_\delta = 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5$ et 25 mV. Pour des fractions volumiques $\varphi > 20\%$ $V_{\text{max}}/kT < 1 \rightarrow$ possibilité de floculation.

Dans le modèle actuellement en développement, cet effet est modulé, pour les grosses gouttes, par l'effet d'aplatissement des surfaces lors de leur rapprochement. De plus, la déformation des gouttes lors de leur rapprochement fait entrer en jeu les propriétés élastiques des surfaces tension interfaciale et élasticité de surface, ces dernières étant dépendantes des concentrations de tensioactif.

4. Simulation

Parallèlement, un code numérique 2D a été réalisé par M. Antoni permettant de simuler le vieillissement d'une émulsion polydisperse et tenant compte de la déformation des gouttes et du processus de coalescence. Un calcul de simulations canoniques à température constante par la technique de Hozé-Hoover consistant à modifier les équations obtenues dans le modèle Hamiltonien par l'ajout de termes dissipatifs. L'effet du thermostat est alors assimilable à un facteur d'amortissement ou de forçage. Pour les simulations canoniques, seule la température (i.e. l'énergie cinétique) est constante. Ceci permet une meilleure description des effets liés à la viscosité des interfaces et du milieu interstitiel.

Dans la simulation 2D réalisée, la séparation de phases est liée aux collisions et à la coalescence entre gouttes. Ces mécanismes dépendent de l'hydrodynamique du système et des propriétés aux interfaces. Lorsque les effets convectifs sont négligés (apesanteur) le vieillissement des émulsions diluées est décrit par un modèle Brownien (Smoluchowsky). Une telle description admet un mouvement purement diffusif des gouttelettes. Cette hypothèse est valide tant que la taille des gouttes n'est pas trop petite c'est-à-dire, tant que les effets interfaciaux ne dominent pas la dynamique (notamment effets de Marangoni). Le modèle réalisé comporte un ensemble de 500 gouttes hétérodisperses. Les surfaces déformables des gouttes sont décrites par un ensemble de points corrélés par des forces de rappel qui rendent compte de la tension interfaciale et de l'élasticité de surface. Le processus de coalescence entre deux gouttes en contact qui s'aplatissent apparaît pour une longueur de contact critique résultant des interactions (répulsions et attractions). Lors de

cette coalescence, un champ de concentration de surfactant est créé autour de l'agrégat. Ce champ de concentration est la force motrice du mouvement de Marangoni des petites gouttes environnantes vers les agrégats.

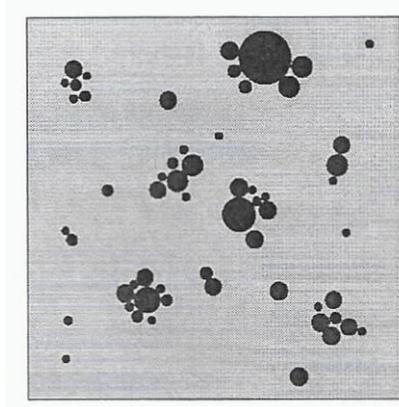


Fig.4 Simulation du processus de mouvement de Marangoni dans le champ de surfactant relargué lors de la coalescence

Les résultats tant expérimentaux que théoriques obtenus dans ont été présentés dans plusieurs réunions du projet FASES-ESA [6][7][8][11][16], ainsi qu'aux journées du GDR Matière en Microgravité à Grenoble juin 2000 [5] à Paris en mai 2001 [9], et à Aussois mai 2003 [15]. Une communication jointe des diverses équipes du contrat FASES — ESA a été présentée au congrès de Microgravité de Sorrente [4]. Dans le cadre d'une convention CEA Université d'Aix-Marseille, un réunion de travail a été organisée au CEA de Cadarache où A. Steinchen et M. Antoni ont fait une présentation orale de leur approche théorique de la stabilité des émulsions ainsi que de la stabilité des gouttes en évaporation [10].

COUPLAGE REACTION CHIMIQUE — HYDRODYNAMIQUE AU COURS DE LA PROPAGATION DE FRONT D'ONDE CHIMIQUE

Marc Leconte, Jérôme Martin, Nicole Rakotomalala et Dominique Salin

Laboratoire FAST, UMR 7608, Universités Paris VI, Paris XI, et CNRS
Bâtiment 502. Campus universitaire 91405 Orsay Cedex

Notre but est d'étudier quantitativement la morphologie des structures formées par le couplage non linéaire entre réactions chimiques et instabilités hydrodynamiques aux interfaces entre deux fluides.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet ESA (5 laboratoires) et propose une approche tant expérimentale, terrestre et embarquée, que théorique et numérique pour comprendre d'un point de vue fondamental la physique du couplage aux interfaces entre réactions chimiques et hydrodynamique dans deux situations prototypes les fronts d'ondes chimiques et les réactions chimiques aux interfaces liquide-liquide qui surviennent respectivement dans les fluides miscibles et immiscibles.

Notre contribution correspond à la première situation prototype du projet ESA, à savoir une étude expérimentale, numérique et théorique du couplage non linéaire entre les réactions autocatalytiques et les instabilités visqueuses et/ou gravitationnelles.

Expérimentalement, les réactions chimiques candidates à cette étude sont assez peu nombreuses. La réaction la plus proche de nos préoccupations est la réaction iodate-acide arsénieux (IAA) qui est exothermique. Il s'ensuit donc des instabilités supplémentaires liées à la convection thermique (Rayleigh-Bénard) et à la différence de densité (Rayleigh-Taylor). Les expériences en micro gravité doivent permettre de s'affranchir de ces instabilités qui risquent de masquer les phénomènes étudiés.

Compte tenu de nos expertises expérimentales et numériques et de celles de nos partenaires du cadre ESA, notre travail est le suivant :

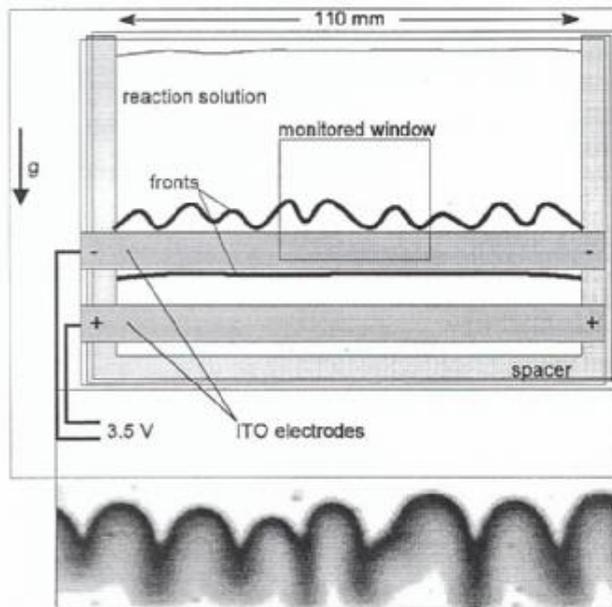
1) Développer cette expérience dans notre laboratoire en collaboration avec le groupe de Magdeburg (Martin Böckmann et Stefan Müller), chimistes spécialistes de la réaction autocatalytique. Etudier les instabilités apparaissant lors de la réaction chimique en cellule de Hele-Shaw, en utilisant nos techniques de visualisation.

2) Générer la réaction chimique dans nos simulations numériques de gaz sur réseau, afin de pouvoir mener une étude numérique en parallèle de nos expériences. Nous pourrions ainsi numériquement quantifier l'influence des différents paramètres de contrôle de cette instabilité en faisant varier les propriétés des fluides utilisés (densité et viscosité, tout en préservant la réaction chimique).

RESULTATS

Nous avons pu mener à bien l'étude de l'analyse linéaire de stabilité tant du point de vue numérique que théorique et surtout comparé nos prédictions et simulations avec les expériences de M. Böckmann et S. Müller. L'accord est très raisonnable et a conduit aux publications A2 et B4.

L'implantation de la technique de réaction chimique IAA au laboratoire a été possible grâce à la visite de Martin Böckmann, thésard du groupe de Magdeburg au laboratoire, un

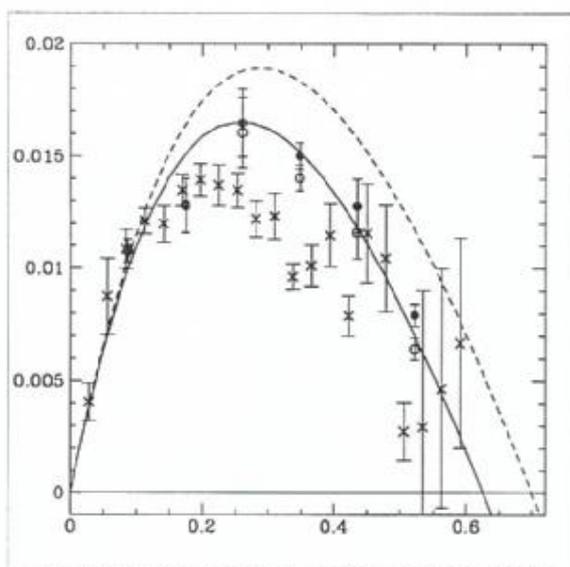


Fronts de réaction initiés électriquement à l'anode, dans une cellule de Hele-Shaw : le produit étant moins dense, le front du haut est instable par gravité. b) Déformation du front ascendant par l'instabilité de Rayleigh-Taylor dans une cellule d'épaisseur $e=500\mu\text{m}$

mois en Octobre 2000 et 4 mois (de Février à Mai 2001).

A partir de notre étude de l'instabilité de Rayleigh-Taylor entre deux fluides miscibles, en milieu infini et dans une cellule de Hélé-Shaw (A1), on note que dans le cas des fluides miscible, i.e. en l'absence de tension de surface, il existe néanmoins une longueur d'onde de coupure, due à l'effet conjoint des deux phénomènes stabilisants de diffusion, à savoir la diffusion moléculaire et la diffusion visqueuse de la quantité de mouvement. Cette longueur d'onde de coupure peut être avantageusement normalisée par la longueur caractéristique, L ($L^3=D\nu(\Delta\rho g/\rho)$), comparant les effets stabilisants des deux diffusions aux effets

déstabilisants de gravité. Cette longueur définie sur les seules propriétés intrinsèques des fluides en présence, peut être utilisée comme l'analogie miscible de la longueur capillaire. On a pu ainsi montrer que dans une cellule de Hele-Shaw, le confinement des fluides entre deux plaques ne joue de rôle significatif que lorsque l'épaisseur de la cellule devient comparable à L . En particulier, la description de l'écoulement en Hele-Shaw par un écoulement potentiel (loi de Darcy), n'est valable que pour une épaisseur de cellule faible devant L (publication A1). Nous avons montré qu'une description bidimensionnelle de l'instabilité de Rayleigh-Taylor dans une cellule de Hele-Shaw pouvait néanmoins être utilisée avec succès quel que soit le rapport entre l'épaisseur de la cellule et L , à condition d'inclure les effets de diffusion visqueuse dans le plan de la cellule (terme de laplacien de la vitesse) dans l'équation-bilan de la quantité de mouvement, en utilisant une équation de Stokes-Darcy.

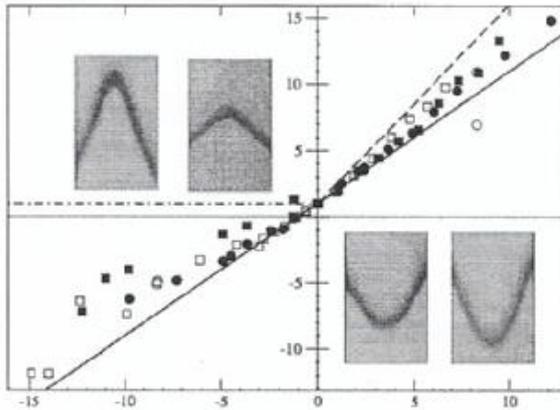


Courbe de dispersion normalisée de l'instabilité de Rayleigh-Taylor d'un front de réaction I.A.A. en cellule de Héle-Shaw d'épaisseur $e=900\mu\text{m}$. Les points expérimentaux (croix) sont comparés au modèle éikonal (tirets), à notre model NSD (trait plein), et aux simulations BGK 3D et 2D (ronds vides et pleins).

Cette approche a été étendue au cas de l'instabilité de Rayleigh-Taylor d'un front d'onde chimique. La réaction utilisée ici est la réaction iodate-acide arsénieux (IAA). Physiquement, les effets de diffusion, tendant à mélanger les deux espèces chimiques, peuvent être contrebalancés par la réaction chimique (auto catalytique du troisième ordre) pour donner lieu à la propagation d'un front d'onde dont la vitesse et la largeur sont contrôlées par le coefficient de diffusion et le taux de réaction. La densité du produit de la réaction étant plus faible, un front ascendant est instable par gravité.

Cette réaction pouvant être déclenchée à

une anode déposée sous forme de bande sur la cellule de Hele-Shaw, il est possible d'observer l'évolution d'un front initialement parfaitement plan sous l'effet de l'instabilité de Rayleigh-Taylor (Cette étude a fait l'objet de la thèse de Martin Böckmann, sous la direction de Stephan Müller, à l'université Otto-von-Guericke de Magdeburg sur l'étude de l'influence de la gravité sur les fronts d'onde chimiques Notre model N.S.D. proposé pour décrire l'instabilité gravitationnelle en cellule de Hele-Shaw a pu être adapté au cas de la propagation de fronts auto-catalytiques. Nous avons pu montrer notamment que l'interaction, entre l'écoulement provoqué par l'instabilité et l'évolution des concentrations des espèces, était nécessaire pour décrire correctement les résultats expérimentaux. De même, la prise en compte du cisaillement dans le plan de la cellule s'avérait indispensable pour rendre compte des courbes de dispersions obtenues dans la cellule d'épaisseur $e = 900\mu\text{m} = 6 \text{ L}$ (publications A2 B1). Ces études nous ont permis de tester l'efficacité de nos méthodes numériques de type B.G.K. à simuler l'effet de forces de volumes (gravité) et l'interaction entre écoulement et réaction chimique. Outre les tests de validations, il est à noter que les simulations numériques ont permis d'étudier l'influence respective des effets 3D et des effets de l'interaction entre différents modes sur l'instabilité.



Profils et vitesses de fronts chimiques mesurés dans le plan d'une cellule de Hele-Shaw pour différentes valeurs de vitesse débitante.

Après cette étude en « convection naturelle » des fronts d'ondes chimiques IAA, nous avons commencé (avec notamment le travail de thèse de Marc Leconte), un travail sur la « convection forcée ». Nous avons pu montrer expérimentalement, qu'en accord avec des prédictions théoriques récentes¹, un écoulement en milieu confiné (tube ou cellule de Hele-Shaw) peut affecter considérablement la forme et la vitesse de propagation d'un front chimique) (publications A3, B5, B6, B7).

Physiquement, réaction et diffusion définissent un front de réaction de largeur et vitesse définies. Diffusion et advection conduisent par ailleurs à une augmentation de la diffusion effective par le phénomène de dispersion de Taylor. Quand les trois phénomènes entrent en jeu, on obtient un front d'onde chimique se propageant à vitesse constante avec une vitesse augmentée par rapport à l'onde sans advection et avec une forme stationnaire réminiscente de l'advection sous-jacente. Ce travail devrait se poursuivre par l'étude de l'effet conjoint du contraste de densité (stabilisant ou déstabilisant) et d'un écoulement sur la propagation des fronts chimiques.

PERSPECTIVES

Ces travaux nous ont permis de maîtriser les expériences et les simulations numériques concernant les réactions chimiques. Nous avons maintenant une série d'outils tant expérimentaux que numériques pour appréhender ces systèmes et prévoir les expériences pertinentes pour la microgravité.

Analyse de la morphologie des structures d'instabilité et mesure de leur développement.
Etude numérique des paramètres de contrôle (viscosité, densité) sur la déformation des fronts d'ondes chimiques.

Essais de traceur de champ de vitesse.

Front d'ondes chimiques en milieux poreux (champs de vitesse désordonné)

Effet d'un champ de vitesse oscillant temporellement sur la propagation du front d'onde chimique.

¹ B. F. Edwards, *Poiseuille advection of chemical reaction fronts*, Phys. Rev.Lett., 89, 104501(2002)

CALCUL HAUTE PERFORMANCE EN MECANIQUE /CONVECTION VIBRATIONNELLE

Lyubimov DV., Prof. Invité ; Lyubimova T.L., Prof. Invitée ; Demine V., post-doc
Meradji S., post-doc CNES ; Chen G., Chargé de Recherche au CNRS ;
Fougère D., ingénieur de recherche ; Roux B., Directeur de Recherche au CNRS

Laboratoire : FRE-2405-MSNM (Modélisation et Simulation Numérique en Mécanique) L3M / IMT La
Jetée ; Technopôle de Chateau-Gombert ; 13451 Marseille Cedex 20

1. Présentation générale

La majeure partie des activités de recherche est orientée sur l'étude du comportement des fluides en situation complexe soumis à des champs de force externe (vibration, en particulier), dans un environnement de microgravité. Il s'agit d'une part de comprendre le rôle néfaste des g-jitters sur les expériences à bord des stations spatiales orbitales, et d'autre part d'étudier les possibilités d'utilisation des vibrations pour un contrôle actif de procédés (dans l'Espace ou au sol). Les études sont réalisées en étroite concertation avec le groupe d'expérimentateurs : D. Beysens, Y. Garrabos, P. Evesque (Grenoble, Bordeaux et Paris). L'Equipe s'appuie sur une coopération européenne et internationale très forte, en particulier avec les Centres scientifiques de Perm (Russie), depuis plus de 10 ans. Les problèmes modèles relatifs à ces études des possibilités de contrôle sont traités avec différentes approches appropriées:

- équations moyennées (dans le cas de vibrations de haute fréquence)
- traitements théoriques et numériques du problème (écoulements moyen et vibratoire, instabilités)
- approche numérique directe des comportements instationnaires.

L'activité liée au spatial concerne également le contrôle de procédés de solidification dirigée à partir de bains fondus. Les études correspondantes (contrôle par vibration et/ou par champ magnétique tournant) sont réalisées en étroite concertation avec d'autres expérimentateurs : B. Billia, (L2MP; Univ. Aix-Marseille 111), Institut de Cristallographie de Freiburg (groupe: Benz. Dold, Croell et Univ. Freiberg (Allemagne)).

Une autre partie de l'activité concerne le développement des approches de calcul haute performance avec l'utilisation des ordinateurs multiprocesseurs et l'algorithmique parallèle. L'acquisition d'équipements de calcul intensif autonomes, dans le cadre de programmes nationaux ou européens, et leur gestion, sont menées sous la responsabilité d'un ingénieur de recherche en informatique (Mme Dominique Fougère).

2. DYNAMIQUE VIBRATIONNELLE D'UN SYSTÈME FLUIDE DIPHASIQUE EN APESANTEUR

L'étude concerne l'influence de vibrations translationnelles harmoniques sur un système diphasique (liquide et vapeur) d'un fluide pur, proche des conditions critiques. Le but est d'interpréter des expériences au sol où les conditions d'apesanteur sont obtenues, par compensation magnétique, pour un fluide convenablement choisi pour ses propriétés diamagnétiques, dans une cellule de petite dimension (para-hydrogène dans une cellule de rayon $R_c = 1.5mm$). En apesanteur et au repos, le système diphasique se présente comme un ensemble d'une bulle unique au sein de la phase liquide. Lorsque la cellule est soumise à des vibrations, le système répond de différentes manières (excitation de modes propres : résonance à basse fréquence, et oscillations forcées). De plus, l'inclusion subit des effets moyens (déformation moyenne de l'interface liquide/vapeur, et déplacement moyen de la bulle).

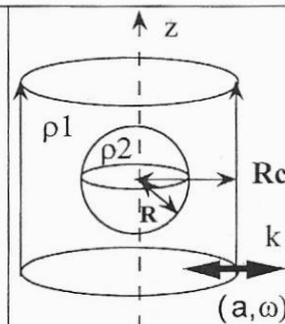


Fig.1 :Schéma du dispositif

La dynamique vibrationnelle d'un tel système est étudiée par simulation directe pour différentes valeurs des paramètres vibratoires (amplitude a et fréquence angulaire $\omega = 2\pi f$). On suppose qu'à l'instant initial, $t=0$, la bulle est placée au centre de la cellule. Les calculs sont effectués pour une inclusion de rayon $R = 0.5 R_c$ et pour les paramètres vibrationnels suivants $0.05\text{mm} \leq a \leq 0.25\text{mm}$ et $20\text{Hz} \leq f \leq 45\text{Hz}$.

- Pour les faibles valeurs de l'intensité vibratoire, la bulle oscille près du centre. Mais après un temps d'environ 5-6 périodes de forçage, la bulle se déplace hors du centre, le plus souvent vers la paroi du côté des $x < 0$ (direction de l'impulsion initiale de la cellule).
- Ce déplacement de la bulle au sein de la cellule s'accompagne très rapidement de fortes fluctuations de l'enveloppe de la bulle ; ce type de résonance correspond à la condition de synchronisme mise en évidence par Lyubimov et al. (1999) pour un système non confiné : les modes excités correspondent à l'interaction d'une paire de modes propres voisins lorsque la somme est égale à la fréquence d'excitation.
- L'étude théorique de stabilité d'une inclusion cylindrique au centre de la cellule, en régime non visqueux, appliquée aux conditions considérées ici, donne pour les modes propres 2 et 3 les valeurs suivantes : $f_{2,th} \simeq 13.4\text{Hz}$ et $f_{3,th} \simeq 2.60\text{Hz}$
- Les valeurs trouvées numériquement par une analyse en série de Fourier de la déformation de la bulle, sur l'intervalle : $0 < t < 0.7\text{s}$, révèlent la présence des modes 2 et 3 avec des fréquences qui sont en excellent accord avec la théorie ; on observe en effet, dans le cas d'un forçage $f = 38.5\text{Hz}$, les fréquences suivantes: $f_{2,num} \simeq 13.0\text{Hz}$ et $f_{3,num} \simeq 25.3\text{Hz}$, dont la somme est très voisine de la fréquence de forçage.
- Ce mécanisme de résonance, d'origine non visqueuse, s'accompagne d'une déformation de l'enveloppe qui, ramenée à une ellipse, serait alternativement aplatie dans la direction de vibration, puis dans la direction perpendiculaire, et ce, à la fréquence f ce mécanisme s'amortit rapidement, au bout d'une trentaine de cycles (soit environ 0.8-1 sec) au bout duquel la bulle atteint la paroi.
- Ensuite, lorsque la bulle atteint la paroi, deux mécanismes sont observés :
 - (a) pour les valeurs suffisamment élevées de l'intensité vibratoire, la bulle reste collée à la paroi ceci est interprété, par voie théorique, comme un fort mécanisme d'attraction par la paroi vibrante.
 - (b) pour des valeurs de l'intensité vibratoire moins élevées, on observe un «rebond» de la bulle dont le centre de gravité se déplace vers le centre de la cellule jusqu'à une distance d'un demi-rayon, puis revient vers la paroi. La force d'attraction de la paroi vibrante ne serait pas suffisante pour empêcher le rebond consécutif à l'impact de la bulle sur la paroi. Ce mouvement de rebond, qui est de nature oscillatoire amortie (avec une période de 0.8-1 sec.), n'est pas encore correctement compris.
- D'autres observations ont été faites, par voie numérique, qui montrent que la dynamique vibrationnelle d'un tel système en apparence simple, est très riche ; en effet :
 - (a) Pour les intensités vibrationnelles pas très fortes ($a\omega^2 < 1.5g - 2.5g$), le déplacement initial de la bulle se fait vers le côté opposé ($x > 0$). Ce mécanisme n'est pas encore élucidé.
 - (b) En modifiant les conditions initiales, avec un déphasage de $\phi = -\pi/2$ de l'accélération initiale de la cellule (i.e., vitesse initiale moyenne non nulle au sein du fluide), on observe des cas où la bulle traverse complètement la cellule dès les premiers instants (effets visqueux négligeables). Ce comportement correspond à certaines des observations expérimentales qui ont mis en évidence la traversée complète, d'un bord à l'autre, de la cellule par la bulle, dans la direction de vibration.

3. Influence des vibrations sur les écoulements et transfert de chaleur et de masse dans le système de croissance cristalline de type Czochralski

On s'intéresse ici aux écoulements et au transfert de chaleur et de masse résultant de la vibration d'un solide cylindrique en vibration au contact d'un liquide. Il s'agit d'une configuration modélisant le dispositif de croissance cristalline de type Czochralski. Le but est d'utiliser les vibrations axiales du cristal pour contrôler des écoulements dans le bain fondu au cours de la croissance.

On considère des vibrations de haute fréquence, mais non-acoustiques, et d'amplitudes faibles devant les dimensions du cristal et du creuset. Le modèle mathématique est développé dans le cadre de l'approche moyennée qui consiste à décomposer toutes les variables en une partie moyenne (à variation lente) et une partie à variation rapide. Les vibrations de haute fréquence induisent des effets moyens qui modifient la structure et l'intensité des écoulements résultants.

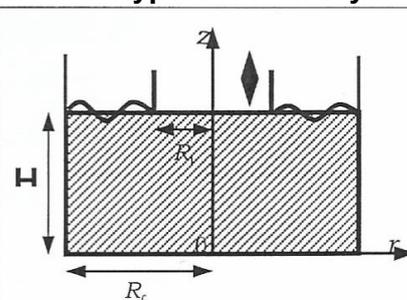


Fig.1 Configuration Czochralski

De plus, les vibrations apportent un aplanissement des isothermes dans le bain fondu, près du front, qui peut contribuer à une meilleure structure du cristal. Les principaux paramètres du problème modèle sont les suivants:

Paramètres géométriques : rapport de forme du creuset; rayon du cristal		$h = H / R_0 ; r_1 = R_1 / R_0$
Pour le cas sans vibration : nombre de Prandtl et nombre de Grashof		$Pr = \nu / \chi ; Gr = [g \beta \theta R_0^3] / \nu^2$
Paramètres vibratoires	Nombre de Reynolds pulsatoire Effet Schlichting (parois rigides vibrantes)	$Re_p = a^2 \omega / \nu$
	Nombre de Weber et viscosité adimensionnelle (surface wave mechanisms)	$We = \rho \omega^2 R_0^3 / \sigma ; \varepsilon^2 = 2\nu / \omega R_0^2$
	Nombre de Grashof vibrationnel ; mécanisme volumétrique : convection thermovibrationnelle	$Ra_v = (a\beta \theta L)^2 / (2\nu\chi)$

L'étude comporte le développement des équations du mouvement et des conditions aux limites appropriées, sous forme de deux systèmes (mouvement moyen, mouvement pulsatoire).

- Le champ pulsatoire, incluant les déformations pulsatoires de la surface libre, est résolu par une méthode de collocation.
- le champ moyen est résolu par une méthode aux différences finies.

Les résultats numériques ont permis de préciser l'interaction entre l'écoulement d'origine vibrationnelle et les mouvements convectifs initiaux (thermocapillaire et flottaison), ainsi que l'effet des vibrations sur la forme de l'interface entre le cristal en formation et le bain fondu. Les structures tourbillonnaires (vortex) occupent pratiquement la totalité du volume du bain fondu, par contre l'écoulement est presque au repos au voisinage de l'interface, et les isothermes sont aplaties (horizontales) près du front. Ceci montre bien qu'il est possible par dynamique vibrationnelle d'améliorer les conditions du bain fondu au voisinage du front de croissance en faisant vibrer convenablement le cristal en cours de sa formation. Des études expérimentales sont en cours pour vérifier les propriétés prédites numériquement sur la base du modèle d'équations moyennées.

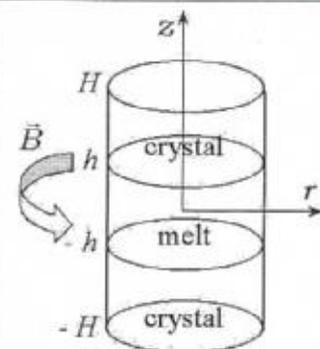
4. Etude numérique des écoulements convectifs dans un système de croissance cristalline ; influence d'un champ magnétique tournant dans un pont liquide en apesanteur

L'étude concerne la possibilité de contrôle de la croissance d'un semi-conducteur monocristallin par la technique de zone-flottante (en apesanteur) par champ magnétique tournant. On considère ici un modèle simplifié : pont liquide (sans tirage, sans changement de phase, front plan):

- chauffé radialement ; i.e., convection thermocapillaire du bain fondu, depuis les régions chaudes vers les régions froides (forte tension de surface) le long de la surface libre ;
- maintenu entre deux disques rigides co-axiaux, représentant le barreau d'alimentation cylindrique polycristallin et le monocristal cylindrique, respectivement.

La configuration étudiée est décrite schématiquement dans la figure ci-contre. Les équations du mouvement font apparaître quatre paramètres principaux: nombres de Prandtl, de Marangoni, de Biot et de Taylor magnétique (Pr, Ma, Bi, Ta_m).

L'étude numérique est réalisée dans le cas d'une distribution Gaussienne de la température le long de la surface libre ($T_s = \exp\{-z^2/d^2\}$, d étant la hauteur de l'élément radiatif qui génère un mouvement de convection thermocapillaire (convection Marangoni) dans une section méridionale du pont liquide. La force de Lorenz a seulement une composante azimutale qui conduit à l'apparition d'un flux de fluide dans la direction azimutale.



Le bain fondu n'est jamais au repos puisque le moindre gradient de température le long de l'interface produit une convection thermocapillaire qui reste stationnaire tant que le gradient de température ne dépasse pas un certain seuil. Dans les applications industrielles le gradient de température nécessaire au procédé de tirage lui-même (solidification dirigée) est généralement supérieur à ce seuil et l'on se trouve confronté à l'existence de régime oscillatoire du bain fondu, qui entraîne des micro-ségrégations d'impuretés et/ou des

inhomogénéités de dopants devant le front de cristallisation. L'une des façons classiques d'amortir ces régimes oscillatoires néfastes est d'utiliser un champ magnétique. Les calculs sont réalisés pour un fluide métallique ($Pr = 0.02$). L'étude montre donc que le contrôle magnétique de la croissance cristalline par zone flottante est possible, mais qu'il nécessite de réaliser un compromis, en choisissant des valeurs du nombre de Taylor magnétique qui soient suffisamment élevées pour réduire l'écoulement dans la section méridionale (suivant la direction z), mais pas trop élevées pour éviter la formation d'un écoulement azimuthal trop intense. Le choix optimal de la valeur intermédiaire du nombre de Taylor magnétique peut être réalisé grâce à la simulation numérique basée sur le modèle développé pour cette étude.

5. Convection thermo-électromagnétique dans un dispositif de zone-flottante soumis à un champ magnétique axial.

Ici, le but est d'étudier l'influence de la convection thermo-électromagnétique (TEMC) sur le comportement hydrodynamique d'un bain fondu électro-conducteur dans un processus de solidification sous champ magnétique. La convection TEM est engendrée par l'interaction des champs magnétiques avec les courants

thermo-électriques. Dans ce cas, le fluide est mis en mouvement par les forces de Lorentz force $\vec{j} \times \vec{B}$, où \vec{j}

et \vec{B} représentent la densité de courant et l'induction magnétique. Les courants thermo-électriques sont dus à l'apparition de différence de potentiel dans les matériaux chauffés non-uniformément à cause des variations du coefficient Seebeck ϕ aux interfaces ou aux gradients de ϕ liés aux inhomogénéités de composition

(concentration) : $\phi = \phi_0 (1 + \phi' \Delta C)$. Le problème a été résolu par une méthode aux différences finies, avec un schéma ADI pour de nombreuses valeurs du nombre de Hartman et du paramètre caractérisant l'effet TEM : $Te = \sigma \phi \Delta T B L^2 / (\rho \nu)^2$ où σ est la conductivité électrique, ou bien: $Te = \phi' \varepsilon (\Delta T)^2 / (\nu B_0)^2$ dans la cas d'une

variation de ϕ avec la composition (induit par l'effet Soret. par ex.). Les résultats confirment que la variation du coefficient Seebeck en fonction de la concentration est suffisant pour développer la convection TEM qui se manifeste sous forme d'un mouvement azimuthal. Les calculs réalisés pour $Te=100$ montrent que le maximum de la vitesse azimuthale ne varie pas de façon monotone avec le paramètre Te [5]; ce qui correspond à des résultats expérimentaux qui étaient inexplicables jusqu'ici [6].

6. Algorithmique parallèle en mécanique des fluides

Les travaux de parallélisation ont principalement été réalisés par O. Bessonov. pour un code instationnaire Navier Stokes 3D (en formulation rotationnel - potentiel vecteur) couplée avec l'équation de l'énergie, basé sur un schéma de discrétisation semi-implicite (méthode aux différences finies de type ADI pour les équations de transport) et méthode spectrale pour les équations du potentiel vecteur [7]. Une méthode très efficace est de combiner des schémas d'intégration semi-implicites (pour les équations de transport) et des solveurs directs rapides (pour l'équation de la pression). Ce type de méthode n'est pas facile à paralléliser avec haute performance à cause du temps de communication substantiel qu'elle exige (comparativement au temps de calcul). On utilise la formulation vitesse-pression et la discrétisation FVM, avec la résolution découplée des équations de quantité de mouvement, de pression et de température en utilisant la méthode à pas fractionnaire (avec correction de pression). Le schéma d'intégration temporel est partiellement implicite, avec le traitement implicite des termes les plus critiques en utilisant la méthode ADI (Alternating directions implicit). L'équation de Poisson pour la pression est résolue normalement en utilisant un solveur de Fourier efficace, ce qui implique des FFTs suivant deux des directions spatiales et la résolution de systèmes tridiagonaux dans la 3^{ème} direction. Cette méthode est directe et n'implique pas d'étapes itératives coûteuses. La méthode de parallélisation est basée sur un découpage du domaine de calcul suivant les deux directions, R et Z, avec les variantes suivantes: 1x1, 2x1, 4x1, 4x2 et 4x4, utilisant de 1 à 16 CPUs.

Références

- Lyubimov D.V., Cherepanov A.A., Lyubimova T.P. And Roux B., *Vibration influence of a two-phase system in weightlessness conditions* J. Physique IV, 11 (Pr6), p. 83-90 2001.
- Lyubimov DV., Lyubimova T.P., Meradji S., Roux B., Beysens D., Garrabos Y. And Chatain D. 2D unsteady motion and deformation of a gaseous bubble in a vibrating liquid at zero gravity. J. Physique IV, 11, 91-98, 2001.
- Lyubimov D., Lyubimova T., R. Skuridyn, Chen G., Roux B., Numerical investigation of deformations and flows in isothermal liquid bridge subject to high vibrations in 0-g conditions. Computers & Fluids, 31, 663-682, 2002.
- Dold P., Benz K.W., Croell A., Roux B. Lyubimov D. Lyubimova T., Skyridyn R. Vibration controlled convection -preparation and perspective of the MAXUS 4 experiment. Acta Astronautica, 48, p. 639-646, 2001.
- Les principaux résultats ont été publiés dans les Proceedings du 4th Pamir Int. Conf. MMD at dawn of 3rd Millennium; Giens, sept. 18-22, 2000, Vol.I, pp. 411-416.
- Gorbunov LA., Lumkis BD.: Peculiarities of influence of thermoelectromagnetic convection on hydrodynamics of me in the processing of monocrystals by Czochralski method under magnetic field. *Magnetic Hydrodynamics*' 2 (1990), 75-82.
- Bessonov O., Fougère D., Roux B., Parallel Simulation of 3D Incompressible Flows and Performance Comparison for Severa] MPP and Cluster Platforms. Lect. Notes Computer Sciences, 2127, pp. 2001.

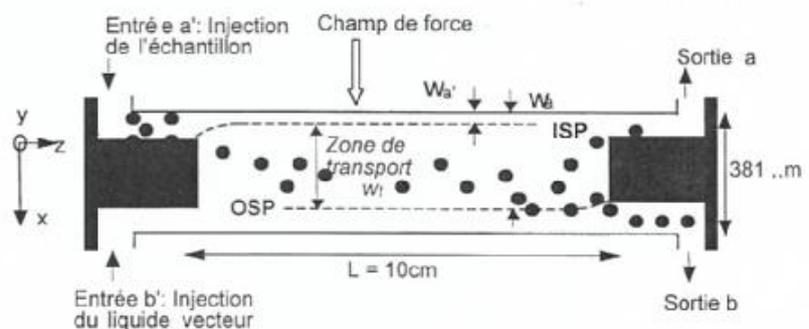
SEPARATION HYDRODYNAMIQUE

Mauricio Hoyos, Pascal Kurowski

PMMH – ESPCI, 10, rue Vauquelin, 75005 Paris

L'objectif général de notre recherche est d'étudier les phénomènes physiques qui sont à la base de la séparation de grosses espèces chimiques ($d > 1 \mu\text{m}$). Pour ce faire, nous utilisons un dispositif de séparation sous écoulement et en continu de type binaire appelé SPLITT (*Split-flow Thin cell fractionation*) (Giddings, Sep. Sci. Technol. 1992) capable de séparer les espèces d'un mélange, pour collecter soit une suspension purifiée d'une espèce donnée, fractionnement négatif, soit l'espèce toute seule, fractionnement positif. La caractéristique principale de ce séparateur est qu'il ne possède pas de membrane pour effectuer le tri, c'est l'hydrodynamique de la séparation qui joue ce rôle. Comme exemples d'applications possibles aux séparations d'espèces de grande taille, on peut citer les particules et gouttelettes (taille 1 à 100 μm), les cellules biologiques (cellules sanguines, cellules souches), les bactéries, les particules colloïdales (taille entre 0.1 μm et 1 μm) ou encore les macromolécules (50 à 3000 kDaltons). La figure 1 montre les principes de base de la méthode.

Figure 1 : Représentation schématique de la cellule de SPLITT comprenant un séparateur à l'entrée et à la sortie. L'existence d'une zone de transport autorise les particules à sortir en a et/ou en b suivant l'importance des effets hydrodynamiques mis en jeu. L'épaisseur de la zone de transport ($w_a - w_b$) dépend du rapport des débits d'entrée Q_a/Q et de sortie Q_b/Q où $Q = Q_a + Q_b = Q_a + Q_b$ est le débit total.



Etude de la migration non spécifique

Le champ gravitationnel est le champ utilisé le plus fréquemment dans les séparations de type SPLITT, notamment en vue d'applications liées à l'environnement. Mais des expériences récentes (Hoyos *et al. Sep. Sci. Technol.*, 2002) visant à trier des particules magnétiques et des cellules souches du sang, font appel à un champ magnétique. L'objectif est d'extraire des cellules souches du sang, des échantillons contenant tous ses composants, à savoir, des globules rouges, des globules blancs, des plaquettes, etc. La rareté des cellules souches nécessite d'en récupérer le plus possible et donc d'utiliser une zone de transport étroite. Mais l'utilisation d'une zone de transport étroite a mis en évidence l'existence d'une *migration transversale non spécifique* des particules, c'est-à-dire que des espèces non affectées par le champ, migrent malgré tout transversalement et traversent la zone de transport contaminant ainsi la fraction purifiée.

La migration transversale non spécifique observée expérimentalement dans toutes les cellules de SPLITT nuit dans la plupart des cas aux séparations. Afin d'étudier le phénomène, il faut supprimer tout champ de force extérieur, en particulier la gravité. Nous avons donc utilisé une cellule de SPLITT placée en position verticale, l'écoulement étant dans le même sens que la gravité. Dans le cas idéal, la fraction massique à la sortie b , F_b ,

devrait toujours être nulle, quelle que soit l'épaisseur $\delta W = W_a - W_s$ de la zone de transport. Nous avons mis en évidence et quantifié cet effet de migration transverse : à δW faible, F_b n'est jamais nulle et décroît quand δW augmente. Deux causes principales peuvent être considérées : la *diffusion induite par cisaillement* et les *forces de portance hydrodynamique*.

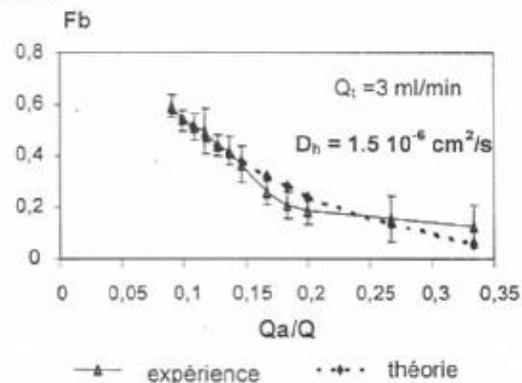
1. Diffusion induite par cisaillement et micropesanteur

La diffusion hydrodynamique induite par cisaillement est un phénomène de type collectif d'interaction entre particules qui migrent dans un canal dans un champ de vitesse non uniforme. Le résultat net est un déplacement moyen des particules vers le centre du canal, perpendiculaire à la direction de l'écoulement. La diffusion induite par cisaillement est

caractérisée par un coefficient de diffusion hydrodynamique ou effectif $D_h \propto \gamma a^2 f(\phi)$ où γ est le taux de cisaillement, a la taille des particules et f une fonction de la concentration ϕ .

Dans le cas de la cellule de SPLITT, le profil de vitesse dans l'épaisseur est parabolique: le cisaillement est donc maximal près des parois, zone où les particules sont injectées, et minimal au centre du canal. Notre hypothèse suppose que la migration non spécifique est contrôlée principalement par la diffusion induite par cisaillement et peut être décrite par l'équation de convection-diffusion. Le coefficient de diffusion qu'on identifie à un coefficient de diffusion effectif est alors pris comme paramètre ajustable. Un exemple de comparaison entre les résultats expérimentaux et le calcul numérique est représenté sur la figure 2 pour un débit total de 3 ml/min. De façon générale, le bon accord expérience-théorie confirme que le transport non spécifique par la technique de SPLITT est essentiellement de type diffusif. La dépendance du coefficient de diffusion effectif avec le débit total traduit la variation du coefficient avec le taux de cisaillement. Nous avons constaté que D_h augmente avec le débit, avec la taille des particules et la concentration, ce qui est en accord avec la théorie de Leighton et Acrivos (J. Fluid. Mech. 1987).

Figure 2 : Fraction massique F_b en fonction du débit normalisé à la sortie a pour des particules de silice de $5 \mu\text{m}$ et un débit total de 3 ml/min. Le coefficient de diffusion effectif déduit est de $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$.



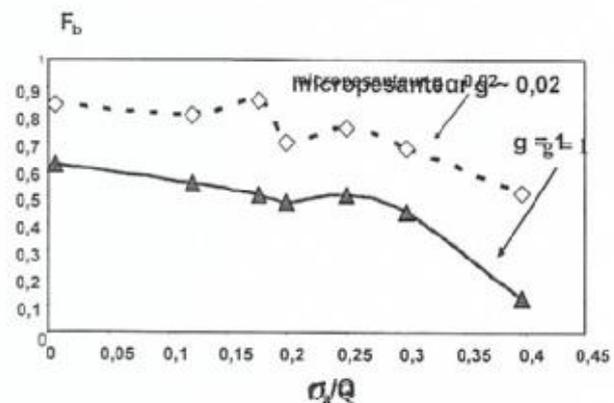
Re-suspension visqueuse et micropesanteur

Une autre façon de mettre en évidence la diffusion induite par cisaillement dans les séparations par la technique de SPLITT est de comparer nos résultats en micropesanteur avec ceux obtenus au sol. En effet, le modèle le plus proche de notre configuration expérimentale correspond à celui de la re-suspension visqueuse proposé par Leighton et Acrivos (Chem. Engng Sci. 1986) : la cellule est placée horizontalement (écoulement perpendiculaire à la gravité), l'injection s'effectuant par l'entrée a' dans la partie inférieure de la cellule. La suspension sera soumise d'une part à la diffusion hydrodynamique qui tend à l'éloigner de la paroi, et d'autre part à la pesanteur qui tend à la faire sédimenter.

Afin de découpler et de quantifier les effets de re-suspension (dus à la gravité) des effets de diffusion hydrodynamique induite par cisaillement (indépendants de g), nous avons comparé des expériences réalisées au sol et des expériences réalisées en micropesanteur (campagne de vols paraboliques Mars 2002). Les expériences ont été réalisées en injectant en a' des particules de silice de $5 \mu\text{m}$. Le liquide vecteur utilisé est de l'eau. Nous avons

tracé sur la figure 3 la fraction de particules récupérée à la sortie b, F_b , en fonction de Q_a/Q donc de l'épaisseur δW de la zone de transport.

Figure 3: F_b en fonction de Q_a/Q pour des expériences réalisées au sol et en micropesanteur



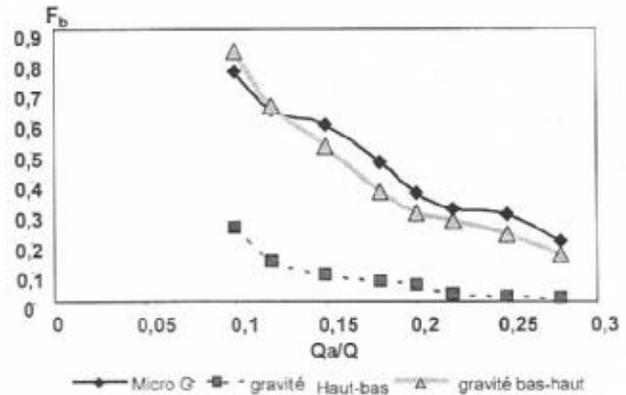
On remarque qu'à $g = 1$, F_b n'est jamais nul, sauf pour des zones de transport très larges ($Q_a/Q > 0,4$) ce qui montre que la sédimentation ne compense jamais complètement l'effet diffusif induit par le cisaillement. A Q_a/Q donné la valeur de F_b est plus importante en micropesanteur qu'au sol car nous avons éliminé la sédimentation.

L'écart entre les deux courbes semble constant ce qui veut dire que les deux effets sont additifs et par conséquent qu'il est possible d'isoler et de quantifier les seuls effets de diffusion hydrodynamique induit par cisaillement. Qualitativement nous pouvons conclure que la diffusion peut être considérée comme l'effet dominant responsable de la migration transverse non spécifique.

2. Forces de portance hydrodynamique et micropesanteur

Des particules entraînées par un liquide au voisinage d'une paroi subissent une force perpendiculaire à la vitesse, appelée portance ou force de lift. Cette force d'origine très différente de celle plus classique liée à l'effet Magnus, se manifeste même à des nombres de Reynolds relativement faibles (Ho et Leal J. Fluid Mech. 1976, Vasseur et Cox J. Fluid Mech. 1977). En utilisant la théorie de Vasseur et Cox, si l'injection des particules dans une cellule de SPLITT se fait près d'une paroi (entrée a') de haut en bas, les particules auront tendance à migrer vers la paroi, et dans le cas contraire, les forces vont pousser les particules vers le centre du canal et par conséquent un plus grand nombre de particules sortiront en b. Nous avons bien mis en évidence cet effet en injectant des particules de silice de $5 \mu\text{m}$ dans une cellule de SPLITT placée verticalement. Les résultats sont montrés sur la figure 4 : le fait qu'on récupère plus de particules quand l'écoulement est opposé à la gravité que quand l'écoulement est dans le même sens que la gravité est en accord qualitatif avec la théorie de Vasseur et Cox. Malgré tout, les valeurs de F_b obtenues sont bien trop importantes pour pouvoir être expliquées à partir des seules forces de portance. Notre hypothèse pour expliquer ce phénomène, considère que c'est la diffusion hydrodynamique induite par cisaillement qui joue un rôle majeur dans le transport non spécifique. Afin de découpler les forces de portance et la diffusion induite par le cisaillement, des expériences ont été réalisées dans l'A300 en micropesanteur (campagne de mars 2003). La figure 4 montre que dans des conditions de micropesanteur, les particules migrent plutôt vers le centre du canal ce qui est en accord avec le phénomène de diffusion induite par cisaillement.

Figure 4: Comparaison d'expériences faites en micropesanteur et au sol pour des particules de silice de $5 \mu\text{m}$ et de densité 2.5g/cm^3 , l'injection se faisant dans le même sens que la gravité (haut-bas) et dans le sens contraire (bas-haut)



3. Miniaturisation des séparations

Nous avons mis au point un mini canal de séparation basé sur la technique de SPLITT. Ce nouveau canal ne possède pas de diviseurs de débit mais l'écoulement est divisé grâce à un système de marche à l'entrée et à la sortie comme indiqué sur la figure 5.

Ce « mini SPLITT » de très petites dimensions par rapport à une cellule de SPLITT usuelle (60 mm de long, 2 mm de large et 0.15 mm d'épaisseur) permet, en utilisant la même gamme de débit, d'augmenter au moins d'un facteur 10 la vitesse moyenne des particules dans le canal, et par la suite d'augmenter les effets des forces de portance. La figure 6 représente la fraction massique F_b en fonction du rapport des débits Q_a/Q pour différents débits totaux Q . L'augmentation de F_b en fonction de Q , à Q_a/Q donné, rend bien compte de l'effet des forces de portance, effet d'autant plus important que le débit est grand. Ceci est en bon accord avec la théorie des forces de portance. Concernant la diffusion induite par cisaillement, elle existe mais nous avons montré qu'elle n'était pas dominante dans ces expériences de microfluidique. Nous concluons pour l'instant que ce sont les forces de portance qui dominent le transport transversal dans la mini-cellule de SPLITT.

Fig 5 : Schéma d'une mini cellule de SPLITT

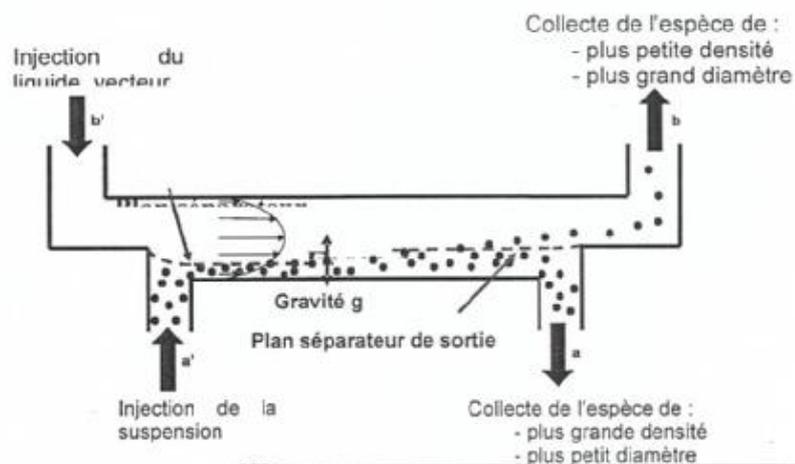
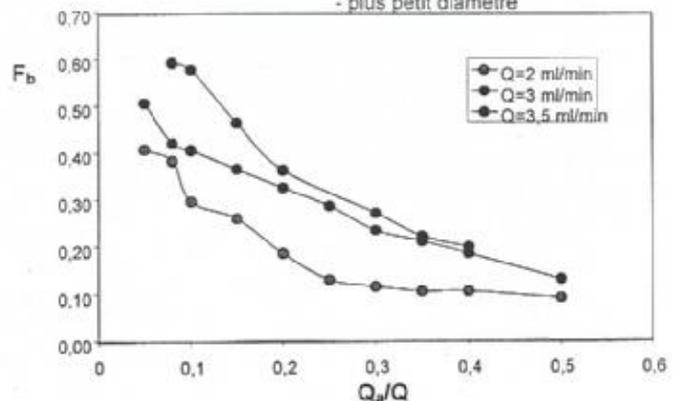


Figure 6 : Effet des forces de portance sur la migration transverse des particules de silice ($d = 5\mu\text{m}$, $\rho = 2.5 \text{g/cm}^3$) dans une mini-cellule de SPLITT. La cellule est horizontale et l'injection se fait par le bas.



COMPREHENSION ET CONTROLE DE LA DYNAMIQUE DES BULLES SOUS L'ACTION D'UN CHAMP ELECTRIQUE. APPLICATION A L'EBULLITION EN CAVITE EN MICROGRAVITE.

Estelle lacona

Laboratoire EM2C - Ecole Centrale Paris — CNRS UPR 288, Grande Voie des Vignes, 92295 Châtenay-Malabry, France

La compréhension des effets de la gravité sur les phénomènes présents en ébullition est nécessaire pour la conception d'équipements spatiaux mettant en oeuvre les échanges de chaleur diphasiques. L'amélioration des échanges de chaleur liés à l'ébullition sous l'influence ou non de champs électriques pourrait permettre le développement ou l'optimisation de structures spatiales (la Station Spatiale Internationale, le moteur Vinci ou des structures permettant l'exploration humaine de Mars). L'application de champs électriques pour générer une force qui remplacerait la force de gravité donnerait non seulement de grands espoirs pour augmenter la quantité de chaleur évacuée d'une surface en microgravité mais aussi pour contribuer à un meilleur contrôle du procédé d'ébullition.

Les principaux objectifs de la recherche proposée¹ étaient de contribuer à la compréhension des mécanismes intervenant dans la formation, le détachement et le mouvement des bulles, de comprendre si et comment un champ électrique influence les étapes du cycle de vie des bulles. A plus long terme, il s'agit de mettre en évidence des mécanismes physiques responsables de l'amélioration des transferts de chaleur par électrohydrodynamique (EHD) en ébullition en cavité dans des conditions de faible gravité et de quantifier cette amélioration pour des conditions opérationnelles et applicables en microgravité.

Afin de découpler les mécanismes de transfert et la dynamique des bulles, le travail effectué porte sur la croissance d'une bulle isolée. L'effet d'un champ électrique sur une bulle d'air injectée dans un liquide diélectrique et la possibilité d'étendre cette étude à l'ébullition en microgravité a été étudiée expérimentalement et théoriquement.

Etude expérimentale

Dans la première phase de la recherche, la formation et le détachement d'une bulle d'air injectée à débit constant dans un liquide diélectrique isotherme ont été visualisés et enregistrés par caméra rapide. La cellule d'étude est une cuve de dimensions 9cm*9cm*10cm dont les parois, en Polycarbonate permettent les visualisations. La cellule est remplie d'un fluide diélectrique transparent (PF5052). En partie basse de la cellule, de l'air est injecté, à débit constant, à travers un orifice de 1,5mm de diamètre, se trouvant au centre d'un cylindre de cuivre de 1,5cm de diamètre. Un champ électrique statique est formé entre la surface d'injection (électrode inférieure à la masse) et un second cylindre de cuivre de 1,5cm de diamètre dont la surface inférieure (électrode supérieure) est parallèle à l'électrode inférieure. La distance entre les deux électrodes est de 2cm et la différence de potentiel varie de 0 à 25kV. Cette géométrie permet d'obtenir un champ électrique initial uniforme dans le fluide. Une électrode supérieure de type sphère hors axe permet d'obtenir un champ électrique initial non uniforme. L'installation et la procédure expérimentale sont détaillées dans Herman et al (2002). À partir d'expériences menées en conditions terrestres et en microgravité (vols paraboliques dans le KC 135), l'influence des paramètres expérimentaux (intensité, polarité et uniformité du champ électrique, gravité, débit d'air d'injection) sur le cycle de vie d'une bulle a été étudiée. Les formes, dimensions et volume des bulles ont été mesurés. Les visualisations en microgravité mettent en évidence un certain

¹ Le travail a été financé par NASA research grant NAG3-1815 et Estelle lacona a été financée de septembre 2000 à septembre 2001 par une bourse de recherche postdoctorale de l'ESA. Les expériences dans le KC135 ont été menées par C. Herman, G. Suner, S. Marra et E. Scheinerman.

nombre de comportements typiques : coalescence verticale, instabilités à l'interface liquide-gaz, développement sphérique et continu des bulles sans détachement ou avec détachement irrégulier. En présence d'un champ électrique initialement uniforme d'intensité supérieure à 7,5kV/cm, les bulles se détachent de façon régulière, avec une direction privilégiée (celle des lignes de champ) et sont allongées dans cette direction (Fig. 1). Les résultats montrent que la période de formation diminue lorsque l'intensité du champ augmente. Le volume diminue donc, mais reste, pour l'intensité maximale (12,5kV/cm), d'un ordre de grandeur supérieur à la valeur mesurée en condition terrestre.



FIG. 1. Bulle d'air injectée au moment du détachement soumise à un champ électrique initialement uniforme en microgravité : a) $E=0\text{V/cm}$, $V_d=177\text{mm}^3$; b) $E=2.5\text{kV/cm}$, $V_d=167\text{mm}^3$; c) $E=5\text{kV/cm}$, $V_d=143\text{mm}^3$; d) $E=7.5\text{kV/cm}$, $V_d=100\text{mm}^3$; e) $E=10\text{kV/cm}$, $V_d=87\text{mm}^3$.

Etude théorique

En parallèle à l'étude expérimentale, des recherches théoriques et des calculs ont été entrepris selon deux directions.

D'une part, des modèles existants décrivant les caractéristiques des bulles au détachement après formation sur une surface solide ont été modifiés afin de prendre en compte les effets de la gravité et d'un champ électrique uniforme. La description de ces modèles et les résultats sont présentés dans Herman et al (2003). Les formes, volume et dimensions des bulles calculés présentent un bon accord avec les résultats expérimentaux.

D'autre part, les effets de la force électrique sur le fluide et sur les bulles sont en cours d'étude. Les différentes composantes de la force électrique seront déterminées pour des bulles caractérisées expérimentalement lors des visualisations. Les cas d'un champ électrique uniforme ou non-uniforme seront confrontés.

Perspectives

Dans le cadre de collaborations en cours², l'étude expérimentale sera étendue au cas de plusieurs bulles d'air injectées pour permettre la mise en évidence des interactions entre les bulles et de la coalescence. Dans un second temps, la surface d'injection sera chauffée de façon à générer un champ de température dans le fluide proche de la surface, sans atteindre l'ébullition. De même, une ou plusieurs bulles seront injectées. Dans tous les cas, l'influence de ϵ et de l'uniformité du champ électrique sera étudiée.

² Le projet "Enhancement of pool boiling heat transfer and control of bubble motion in microgravity using electric fields (BCOEL)", Cila Herman, Estelle lacona, est financé par NASA (Fluid Physics: Research and Flight Experiment Opportunities) de 2001 à 2004.

- Le projet international "Pool boiling heat transfer in microgravity with and without electric field effects (PBEEM)" financé par la NASA dans le cadre de "Microgravity Flight Research Opportunities on the International Space Station" regroupe plusieurs investigateurs: Cila Herman (The Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA), Jungho Kim (The University of Maryland, College Park, MD, USA), Johannes Straub (The Technical University Munich, Munich, Germany), Martin Zell (Astrium, Friedrichshafen, Germany) et Estelle lacona (Laboratoire EM2C, CNRS et ECP, France).

- Membre de la Boiling Topical Team de l'ESA.

COMBUSTION ET VAPORISATION DE GOUTTES ISOLEES

Renaud F., Legrand B., Shafirovich E., Chauveau C. et Gökalp I.

Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs, CNRS
1C, avenue de la recherche scientifique 45071 Orléans

La combustion des brouillards qui caractérisent les systèmes comme les moteurs à combustion interne du type diesel, les turbines à gaz ou les moteurs de fusées à propergols liquides, est le siège d'une multitude de phénomènes qui s'articulent autour de la vaporisation et de la combustion des gouttes individuelles. Les études de l'équipe « Combustion et Turbulence » du LCSR dans ces domaines ont pour objectif de fournir des modèles validés de gazéification de gouttes et particules dans diverses conditions dynamiques et thermodynamiques, en vue de leur intégration dans les codes de calcul numérique de combustion diphasique. Les principaux résultats obtenus dans ces domaines durant les quatre dernières années portent sur l'identification des effets de la haute pression et de la température sur ces phénomènes, ainsi que sur leur modélisation numérique.

La haute pression caractérise aujourd'hui la plupart des systèmes énergétiques où la combustion diphasique est le mode de conversion de l'énergie. En particulier, la vaporisation et la combustion en conditions supercritiques est un domaine de recherche en pleine expansion. La contribution du LCSR à ce domaine se fait dans le cadre de plusieurs programmes de recherche qui s'intéressent à divers systèmes réactifs, comme l'oxygène liquide, divers alcanes et alcools, les huiles végétales, et les particules d'aluminium et de magnésium. Plusieurs dispositifs expérimentaux spécifiques ont été développés pour étudier les effets couplés de la pression et de la température sur les régimes de gazéification de ces systèmes. Des expériences de combustion de gouttes en microgravité notamment lors des vols paraboliques des avions-laboratoire et dans la tour de chute libre japonaise JAMIC à Kamisunagawa ont été conduites. Elles permettent de réduire les effets de la convection naturelle qui deviennent très importants à haute pression. Ces expériences faites au sein d'une collaboration franco-japonaise, et utilisant différents moyens d'obtention de la microgravité, afin de faire varier ce paramètre d'accélération gravitationnelle, ont permis d'obtenir une corrélation générale qui rend compte des effets de la convection naturelle en fonction du nombre de Grashof.

Un nouveau dispositif expérimental installé au LCSR permet également d'étudier les effets couplés des hautes pressions et des hautes températures sur la vaporisation, (thèse de C. Morin). Durant cette thèse les travaux de recherche effectués portaient à la fois sur l'analyse physique de la vaporisation de gouttes de combustibles liquides à haute pression et haute température, mais également sur la description des mécanismes chimiques de l'oxydation dans des conditions semblables de pression et température. En effet, la littérature témoigne des lacunes scientifiques actuelles sur la vaporisation à haute température et haute pression. Très peu d'études expérimentales ont été entreprises sur le sujet, souvent pour des conditions limitées de température et de pression. L'originalité de ce travail, provient donc de l'étude de l'influence des deux paramètres combinés température - pression sur les mécanismes de vaporisation des hydrocarbures.

L'influence de la température seule sur la vaporisation de gouttes de n-alcanes (du n-C₅H₁₂ au n-C₁₀H₂₂) a tout d'abord été caractérisée, puis celle des paramètres combinés, température - pression sur la vaporisation de gouttes de n-heptane et n-décane. Les taux moyens et instantanés de vaporisation, les temps de chauffage et de vaporisation sont déterminés en fonction des paramètres thermodynamiques température - pression. Nous nous sommes attachés en particulier à préciser l'influence de la température et de la pression au regard des paramètres critiques du combustible liquide. Quand la température ambiante s'approche ou excède la température critique, l'évolution du taux de vaporisation

avec la pression change de manière radicale. Le taux de vaporisation augmente de plus en plus rapidement avec la pression pour des températures supérieures à la température critique, en passant toujours par un maximum pour le n-décane.

Les taux moyens de vaporisation ont été comparés à ceux calculés analytiquement par un modèle développé qui apporte des modifications au modèle standard quasi-stationnaire, en tenant compte non seulement de l'influence de la convection naturelle mais également de la période de chauffage. Les valeurs expérimentales et celles calculées à partir du modèle sont en bon accord lorsque nous considérons les deux effets combinés.

Cette étude expérimentale de la vaporisation des gouttes en fonction des effets couplés de la pression et de la température, comportait cependant un grave inconvénient, hormis le fait que l'effet de la convection naturelle soit couplé à la pression et à la température, la disparition de la tension superficielle aux voisinages des conditions supercritiques ne permet plus d'observer une goutte isolée pesante suspendue à une fibre. C'est pourquoi nous avons conduit en parallèle des études de vaporisation de goutte dans des conditions supercritiques de la phase gazeuse (azote) en microgravité lors du vol de la fusée-sonde Texus 38. Ce qui nous a permis la détermination, pour la première fois, des taux de vaporisation en régimes subcritiques et supercritiques, avec l'influence négligeable de la convection naturelle.

Ces différentes études nous ont ensuite conduits à envisager l'introduction d'un nouveau paramètre pouvant influencer la gazéification des brouillards, l'effet de l'interaction des gouttes entre-elles. Aussi dans le cadre de notre collaboration franco-japonaise, nous nous sommes attachés à définir un nouveau programme de recherche sur l'étude de la vaporisation de plusieurs gouttes en interaction en matrice. Cette vaporisation s'effectuant toujours dans un environnement contrôlé dans des conditions proches des conditions réelles d'application de la combustion diphasique.

Un dispositif expérimental, dévolu à cette étude, a été développé au Japon pour être utilisé dans le puits de chute libre JAMIC. Une première campagne expérimentale, en mars 2002, a permis l'étude de l'influence de l'interaction de neuf gouttes réparties suivant un réseau cubique centré. Les gouttes géométriquement positionnées étaient introduites dans un four à haute température et dans une chambre haute pression, les conditions d'environnement supercritiques étaient donc réunies. L'observation par visualisation rapide de l'évolution du diamètre des gouttes en fonction du temps de vaporisation, durant la microgravité, a permis d'obtenir les taux de vaporisation des différentes gouttes et de les comparer à ceux obtenus initialement pour des gouttes isolées. La goutte centrale donc celle qui est entourée des huit autres gouttes, voit naturellement son taux de vaporisation moyen décroître, par rapport aux gouttes externes. Cependant l'évolution temporelle du diamètre au carré de cette goutte, ne laisse pas apparaître la classique loi en d mais plutôt un modèle à deux pentes. Une première partie avec un taux de vaporisation modéré est suivie d'une seconde pente révélant l'accélération du taux de vaporisation. Cette évolution révélatrice d'un comportement propre à des gouttes interactives, laisse supposer qu'une certaine quantité de chaleur non utilisée pour la vaporisation de la goutte centrale bloquée par la vapeur des gouttes avoisinantes, a servi à augmenter la température de la goutte centrale, entraînant par la suite une augmentation du taux de vaporisation sur la fin de vie de la goutte.

Cependant à la suite de ces expériences, nous avons décidé d'améliorer considérablement les moyens expérimentaux mis en oeuvre afin de s'affranchir le plus possible des incertitudes liées aux dispositifs eux-mêmes. En particulier concernant le support des gouttes, nous utilisons depuis longtemps des fibres de quartz spécifiques (150 μm de diamètre) auxquelles nous venons accrocher des gouttes d'environ 1 mm à leur extrémité à l'aide de seringues automatisées. Le dispositif d'interaction utilisait le même principe (figure 1).

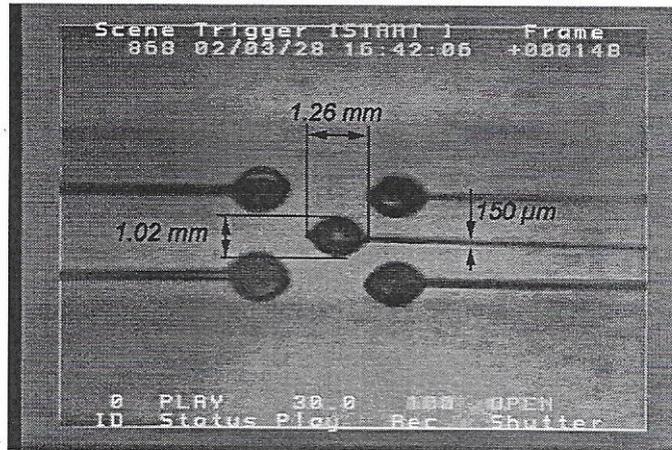


Figure 1 :Disposition des gouttes en interaction (Dispositif utilisé au japon à JAMIC)

Malgré leur faible taille, ces fibres pouvaient avoir un impact sur le taux de vaporisation des gouttes, surtout en fin de vie de la goutte. Nous avons donc développé un nouveau concept de maintien en position des gouttes basé aussi sur des fibres mais de beaucoup plus petite taille ($14 \mu\text{m}$). Un réseau de ces fibres est tissé suivant un cube et à chaque intersection est déposée une goutte. Un injecteur piézo électrique est utilisé pour générer ces gouttes d'un diamètre légèrement plus petit qu'auparavant ($650 \mu\text{m}$). Ce nouveau concept a été testé dans un premier temps pour la vaporisation d'une goutte unique, lors de la campagne de vols paraboliques de mars 2003 (figure 2), et la version multigouttes sera utilisée lors des prochaines campagnes de vols (figure 3). Les premiers résultats obtenus sont très prometteurs, et ont permis une analyse plus détaillée de la vaporisation de la goutte sur l'ensemble de sa durée de vie. Par ailleurs une plus grande variabilité du diamètre initial, nous a permis d'observer des gouttes ayant des caractéristiques dimensionnelles plus proches de celles trouvées dans les applications réelles.

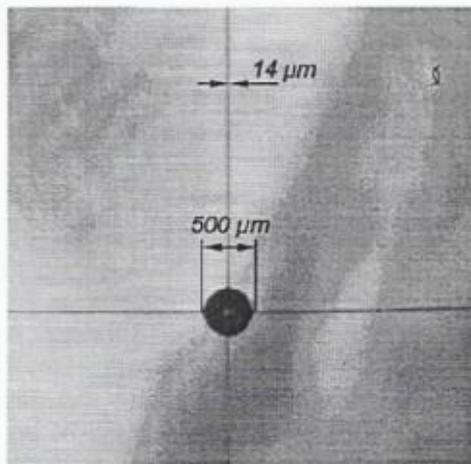


Figure 2 : nouveau support goutte isolée

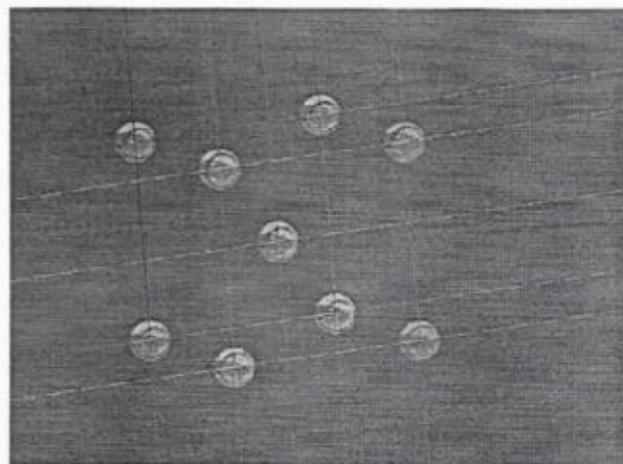


Figure 3 : nouveau support multigouttes

Dans un autre contexte, mais malgré tout, en connexion directe avec la combustion des gouttes isolées, la combustion des particules métalliques comme l'aluminium et le magnésium, est l'un des thèmes du domaine de la combustion diphasique sur lequel nous avons porté un effort particulier durant les quatre dernières années, dans le cadre du programme du CNES ASSM (ONERA-CNES-CNRS) portant sur les moteurs à propergols solides du lanceur Ariane V et dans le cadre du «Topical Team » de l'ESA sur la production in situ des propergols pour des missions sur Mars. L'étude sur la combustion des particules d'aluminium est motivée par l'utilisation d'aluminium pulvérulent dans les propergols des propulseurs à poudre. Les particules d'aluminium y brûlent sous pression, principalement dans les produits de combustion du perchlorate d'ammonium et du polybutadiène. L'objectif

global de l'étude est d'établir les lois de transformation d'une particule d'aluminium en particules d'oxyde d'aluminium, en s'intéressant plus particulièrement aux effets de pression et de composition du gaz ambiant. L'idée sous-jacente de cette étude est de pouvoir quantifier la quantité d'alumine formée, afin dans un premier temps d'identifier les problèmes que cela peut entraîner, (accumulation, détérioration des protections thermiques du booster, déséquilibre lors de la séparation, etc.) et dans un second temps d'y remédier si possible. Nous étions donc chargés d'étudier la combustion d'une particule d'aluminium dans des conditions aussi proches que possible de la réalité, c'est à dire en respectant les tailles, les pressions et l'environnement gazeux de l'application. Une approche expérimentale innovante a été développée; elle consiste à étudier la combustion de particules d'aluminium, de 50 μm de diamètre, dans un dispositif de lévitation électrostatique, placé dans une enceinte haute pression contenant des mélanges O_2 , CO_2 , N_2 . L'allumage est obtenu par un laser et la combustion est observée par vidéographie et caractérisée par photométrie. Les temps ou les taux de combustion, sont comparés aux temps prédits par un modèle de combustion de particules d'aluminium développé en parallèle. Ce modèle tient compte des effets de haute pression, de la recondensation de l'oxyde sur la goutte d'aluminium et de la diversité des oxydants (O_2 , H_2O , CO_2) il permet également de calculer la taille des résidus d'alumine. Il est aujourd'hui intégré dans les codes de calcul prédictifs de Bertin et de l'ONERA, afin de simuler le comportement des gouttes d'aluminium et d'alumine dans les "boosters" P230 du lanceur Ariane 5. Le même dispositif expérimental est également utilisé pour étudier la combustion des particules de magnésium dans le cadre d'un projet européen en cours d'élaboration et s'intéressant aux problèmes de propulsion des missions non-habitées de retour d'échantillons de Mars, en collaboration avec l'Académie des Sciences Russes (Dr. E. Shafirovich), le CNES, l'ESA, l'ONERA et le DLR. De même un autre dispositif expérimental a été utilisé dans le cadre de cette étude, permettant d'observer la combustion de particules de magnésium dans un environnement de CO_2 , mais celle fois en microgravité. Ce dernier aspect est conditionné par le fait que nous voulions travailler sur différentes tailles de particules, or la combustion des particules de taille plus importante est fortement influencée par la convection naturelle. Les régimes et caractéristiques de combustion de particules de magnésium dans du CO_2 , en gravité normale et en microgravité ont été déterminées. Des différences avec les régimes correspondants des particules d'aluminium ont été observées, montrant notamment la nature hétérogène de la combustion des particules de magnésium. Les effets de la convection naturelle sur les taux de combustion ont été quantifiés. Et un régime de combustion pulsée a été identifié mais n'est pas encore complètement élucidé.

Durant les quatre dernières années, notre équipe au sein du LCSR, s'est progressivement investie dans l'étude de l'atomisation et de la combustion de jets liquides, comme un prolongement naturel de ses études sur les gouttes isolées. Ce thème dénommé combustion de jets diphasiques, doit notamment permettre de contribuer au développement du mode de combustion dit « prévaporisé, prémélangé, pauvre ou 3P ». Il constitue, pour nous, le thème réunificateur des thèmes de recherche sur l'atomisation, la cassure et la vaporisation de gouttes, et celui de la combustion turbulente dans les systèmes de prémélange. L'objectif global de ce thème est de contribuer à la compréhension et la modélisation des divers régimes de combustion diphasique, en mettant l'accent de plus en plus sur les effets de haute pression.

ETUDE DE LA STRUCTURE DES FLAMMES DE DIFFUSION REPRESENTATIVES D'INCENDIE DANS DES ENVIRONNEMENTS SOUS GRAVITE REDUITE. Etablissement DES CRITERES D'INFLAMMATION ET DE COMBUSTION DES MATERIAUX DANS LEUR UTILISATION SPATIALE.

Pierre JOULAIN+, Hui Y. WAN+, G Sébastien ROUVREAU+, Pierre CORDEIRO+, Guillaume LEGROS+, Laurent DAVID*.

+ Laboratoire de Combustion et Détonique, UPR 9028 CNRS, ENSMA - Université de Poitiers, BP 40109, 86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex.

*Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques, UMR 6609, SP2MI — Université de Poitiers, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil 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.

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, nous nous sommes intéressés 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 microgravité. 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 ont fait l'objet, pour partie, de mémoires de thèse et également de plusieurs publications et conférences.

Plus récemment nous avons entrepris, avec une équipe du LEA (Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques) de Poitiers, une collaboration pour étudier la structure des écoulements à vitesse faible mis en jeu dans ces systèmes. Les travaux sont à la fois numériques et expérimentaux et visent à nous doter des outils pour modéliser la structure des flammes de diffusion dans un écoulement sur une surface réactive dans un environnement à gravité réduite.

Ces dernières années ont vu se poursuivre les études expérimentales, théoriques et numériques. L'essentiel des résultats est consigné dans les mémoires de thèse de S.Rouvreau [T1] et P.Cordeiro [2] dans les communications présentées lors de différents congrès, workshop, séminaires [C1-C12, P1-P7] et dans plusieurs publications et communications internationales [A1 – A12].

Présentation synthétique des travaux réalisés ces dernières années.

Approche expérimentale :

Cette approche comprend en gros trois aspects dont deux ont été pris en compte par P.Cordeiro dans son travail de thèse [T2] et le troisième par G. Legros, également dans son travail de thèse qu'il présentera fin 2003. Le premier s'est évertué d'une part, à caractériser la structure des flammes non-prémélangées, de type couche limite, dans un environnement sous gravité réduite et d'autre part à analyser le comportement d'écoulements semblables par la simulation hydrodynamique en collaboration avec l'équipe de L.David du Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques (LEA). Le second s'est plus principalement penché sur les propriétés et les transferts radiatifs de ce même type d'écoulement.

Structure des flammes de diffusion établies sur une plaque plane sous gravité réduite :

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 condensée et dans la phase gazeuse. Dans son travail de thèse P. Cordeiro a concentré ses efforts sur l'analyse des phénomènes mis en jeu dans la phase gazeuse. Dans cette optique il a réalisé des expériences à l'aide d'un brûleur poreux en métal fritté pour simuler la pyrolyse d'un combustible solide. La structure des flammes est analysée à partir de visualisations correspondant à l'émission spontanée des flammes, émission dans le spectre visible et émission liée à celle des radicaux CH. Simultanément la structure de l'écoulement est étudiée par vélocimétrie par image de particules (PIV). L'aspect purement aérodynamique de l'écoulement est également pris en compte en effectuant des tomographies laser et de la PIV en milieu réactif et non réactif (collaboration LEA). Les données expérimentales recueillies servent de plus à la validation d'un modèle numérique développé au laboratoire (cf. partie numérique) en vue de modéliser la structure des flammes de diffusion établies sur une surface réactive dans un environnement à gravité réduite.

Les expériences ont été réalisées au cours de campagnes de vols paraboliques financées par l'ESA et le CNES et au nombre de 3 en 2001 et de deux en 2002 et 2003. A cela il faut ajouter une campagne de 20 chutes à la tour de chute libre du ZARM à Brême. Les combustibles utilisés - éthane et éthylène - ont été brûlés dans un flux d'oxygène dilué à l'azote, à l'argon et au dioxyde carbone. Les visualisations ont été complétées par des mesures de température (thermocouples et caméra IR), d'extinction en collaboration avec l'Université d'Hokkaido au Japon, sans oublier les mesures relatives au flux radiatif et à la formation des suies, phénomènes d'importance pour le travail de thèse de G. Legros.

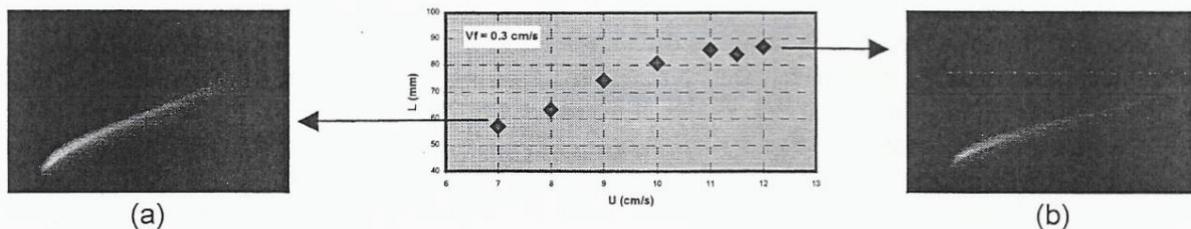
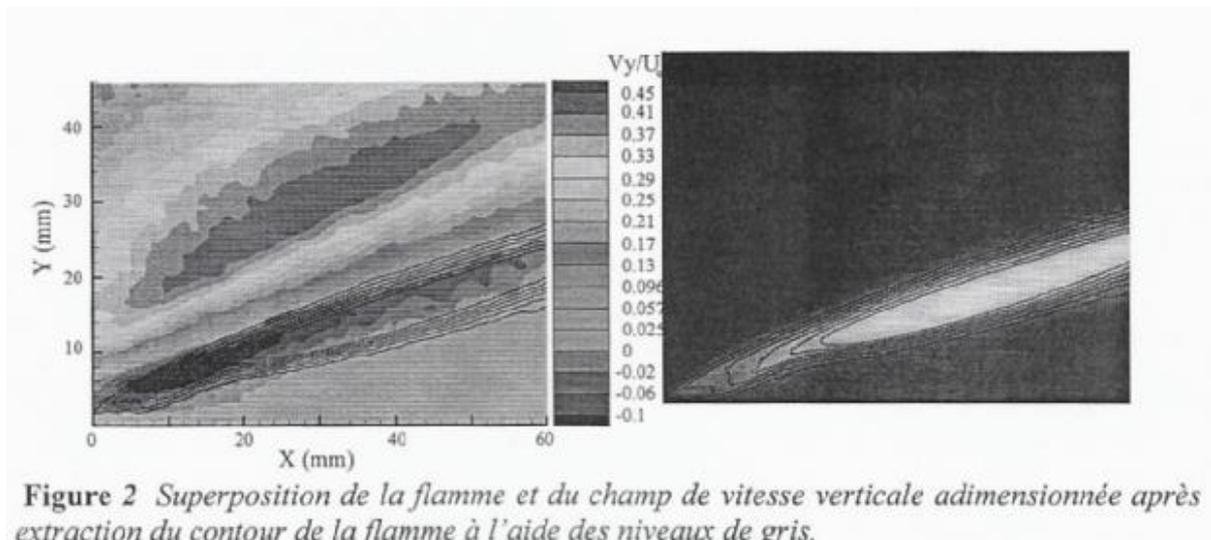


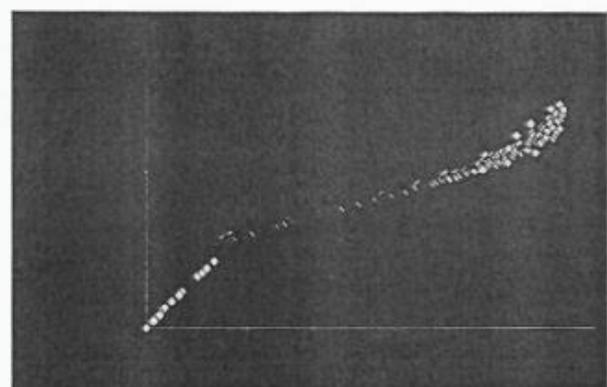
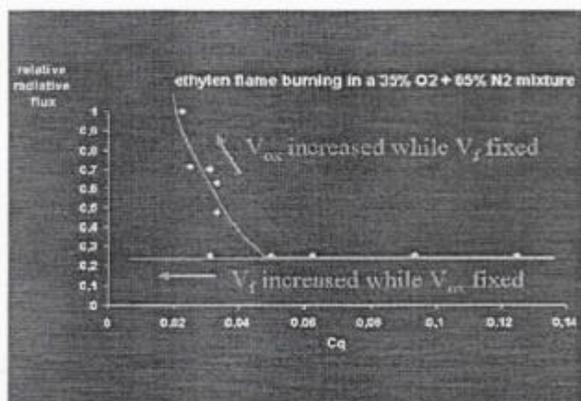
Figure 1 Influence de la vitesse moyenne de l'écoulement oxydant U sur la longueur de flamme L pour $V_f = 0.003$ m/s (vitesse d'injection du combustible): a) $U = 0.07$ m/s b) $U = 0.12$ m/s

La figure 1 résume brièvement une partie du travail de P. Cordeiro et notamment la forte dépendance de la géométrie et de la position de la flamme vis-à-vis des caractéristiques de l'écoulement. Parallèlement à cette étude paramétrique, basée sur l'analyse des images obtenues par visualisation directe ou de l'émission des CH, il a réalisé une étude complète de la structure de l'écoulement inerte et réactif par PIV. Le travail réalisé parallèlement en simulation hydrodynamique avec le LEA s'est également révélé très riche en enseignement. La figure 2 présente un exemple d'exploration PIV avec la mise en évidence de l'influence de la flamme, donc de l'expansion thermique, sur la structure de l'écoulement.

Analyse des propriétés et transports radiatifs d'une flamme de diffusion établie sous gravité réduite : Le besoin d'un critère d'inflammation des matériaux et du test qui le détermine s'est rapidement fait sentir dès lors que la sécurité des engins spatiaux habités, en terme



d'incendie a été sérieusement envisagée. Poursuivant les études précédemment entreprises et se basant sur les résultats obtenus, le nombre de transfert de masse, paramètre clé de la théorie d'Emmons sur la propagation de la flamme de diffusion, conduit à différentes limites essentielles pour définir un critère d'inflammabilité. En particulier, la détermination de ces limites est réalisable à gravité normale, dans le cadre d'un test de propagation ascendante. Cependant, l'estimation de l'indice de confiance en un tel critère passe par la connaissance de l'incertitude liée à la théorie menant au critère. L'approche radiative, négligée par Emmons, se révèle alors notablement nécessaire. Afin de découpler au mieux les phénomènes de pyrolyse et de dégagement de chaleur, une flamme d'éthylène, alimentée par un courant oxydant transversal, a été étudiée. Après avoir en particulier démontré l'existence d'un modèle radiatif de propagation [A6], plusieurs techniques ont été mises en oeuvre pour comprendre les mécanismes de ce mode de propagation (émission des CH, flux radiatif de la flamme, extinction d'un faisceau lumineux...). De plus l'effet thermophorèse semble ainsi devoir jouer un rôle primordial dans le transport des suies, elles mêmes actrices importantes des transferts radiatifs mis en jeu. L'analyse morphologique des agglomérats de suie s'avère par conséquent inéluctable. Enfin, une première comparaison aux calculs numériques a été rendue possible. Les figures ci-dessous (3-4) soulignent la relation entre le flux rayonné par la flamme et les caractéristiques de l'écoulement, à nouveau la position de la flamme et des zones riches en suies.



Etude numérique :

La plus grande partie du travail a fait l'objet du mémoire de thèse de S.Rouvreau [T1] et des travaux réalisés avec H.Y. Wang. Une étude numérique d'une flamme, en absence de gravité, issue de l'injection d'un combustible gazeux à travers un brûleur poreux, sur une plaque plane soumise à un écoulement oxydant parallèle à sa surface, a donc été entreprise. Cette étude a consisté à évaluer l'influence de l'injection seule et du dégagement de chaleur entraîné par la présence de la flamme. Dans un premier temps, l'étude de l'écoulement de type plaque plane sans injection pariétale a permis d'établir les caractéristiques de l'écoulement non perturbé, ce qui est une étape nécessaire à une évaluation correcte de l'influence des perturbations dues à l'injection et à la flamme. La collaboration avec L.David du LEA a conduit à la validation de notre outil numérique pour l'écoulement inerte. La seconde partie de l'étude a permis de mettre en évidence l'influence de l'injection pariétale sur l'écoulement. L'augmentation de la vitesse d'injection entraîne une augmentation de cette perturbation de pression liée à celle induite par le bord d'attaque de la plaque. Enfin, l'étude de l'influence de la flamme a permis de mettre en évidence son importance par rapport à celle d'une simple injection pariétale d'air. Le dégagement de chaleur introduit donc une perturbation significative dans l'écoulement. A cette forte perturbation de pression s'associe l'effet de la faible masse volumique entraînée par l'augmentation de température. Elle épaissit la couche limite et amplifie l'accélération, menant à des survitesses accrues de plus de 20% par rapport au cas sans injection. La présence de la flamme augmente aussi de manière importante la déflexion des lignes de courant dans la direction Y au bord d'attaque. D'autre part, la zone de réaction se trouve bien dans la couche limite pour cette famille d'écoulement, conformément aux hypothèses d'Emmons. Au-delà de la vitesse d'injection menant au décollement de l'écoulement, l'influence de l'injection devient du même ordre de grandeur que celle du dégagement de chaleur. La perturbation de pression, et donc les survitesses s'en trouvent fortement augmentées. Dans ce cas, le modèle d'Emmons est inapplicable puisqu'au moins deux des hypothèses sur lesquelles il est basé ne sont pas vérifiées (bidimensionnalité et inclusion de la flamme dans la couche limite).

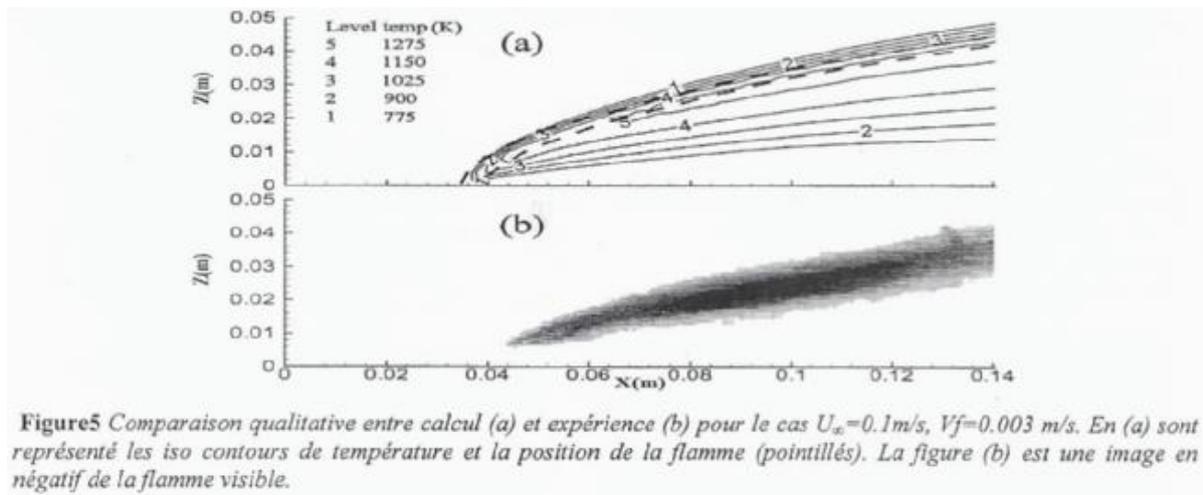


Figure 5 Comparaison qualitative entre calcul (a) et expérience (b) pour le cas $U_\infty=0.1\text{m/s}$, $V_f=0.003\text{ m/s}$. En (a) sont représentés les iso contours de température et la position de la flamme (pointillés). La figure (b) est une image en négatif de la flamme visible.

Perspectives : Un des objectifs majeurs des études en cours consiste à proposer des critères d'évaluation du potentiel d'inflammabilité des matériaux utilisés dans l'espace et de l'extension de leur combustion. Le travail expérimental sera conforté d'une part par les travaux de simulation hydrodynamique menés en collaboration avec le LEA et d'autre part par les investigations expérimentales de G. Legros sur la cinétique de formation des suies et les propriétés radiatives des dites flammes. L'approche expérimentale sera également complétée par des expériences sur la combustion des solides menées conjointement avec les chercheurs du ZARM à l'Université de Brême et de l'Université d'Hokkaido à Sapporo et des travaux sur l'extinction (thèse A. Fuentes). Les études numériques ne connaîtront pas non plus de répit (thèse L. Jabine). La modélisation numérique des transitoires entre la gravité normale et l'établissement du niveau de microgravité sera, avec l'amélioration des modèles de cinétique chimique, et de tous les phénomènes liés à la formation et au transport des suies, sans oublier l'impact sur les transports radiatifs un des axes majeurs de recherche.

MODES D'EVAPORATION ET MODES PULSANTS EN PROPAGATION DES FLAMMES DE BROUILLARD

Sylvain SUARD, Pierre HALDENWANG et Colette NICOLI

Laboratoire de Modélisation et Simulation Numérique en Mécanique
Unité de Recherche du CNRS et des Universités d'Aix-Marseille
IMT / La Jetée / LZM -38, Av. Joliot-Curie —13451 Marseille Cedex 2. @L3M.univ-mrs.fr

Résumé.

Nous rapportons un ensemble de résultats obtenus à propos de la modélisation de la propagation des flammes de brouillard. L'intérêt se porte vers un cas limite important: l'épaisseur de flamme est supposée grande devant la distance caractéristique entre deux gouttes. Cette hypothèse permet de dériver un modèle minimal pour la combustion des brouillards pauvres en hydrocarbure, composé d'un système d'équations de conservation, essentiellement pilotées par un seul paramètre: le nombre de Damköhler (Da). Celui-ci compare le temps caractéristique d'évaporation des gouttes de fuel composant le brouillard et le temps caractéristique de la réaction avec l'oxygène de l'air. La résolution numérique de ce modèle met en évidence les caractéristiques suivantes

- quand le taux d'évaporation est faible ($Da > 100$), le modèle met en évidence un régime de propagation totalement contrôlé par l'évaporation. Ce cas peut se présenter dans les brouillards composés de grosses gouttes ou encore dans les brouillards à haute pression. Ce régime nouveau, que l'on identifie à un régime de propagation par "évaporation- diffusion", peut être interprété comme le dernier régime de combustion homogène des brouillards, juste avant l'apparition du régime de combustion individuelle (ou par groupe) des gouttes.

- lorsque que le taux d'évaporation des gouttes de fuel est rapide (i.e. pour $Da < 1$), le modèle fournit en partie l'image classique d'une flamme de prémélange qui se propage précédée d'un front d'évaporation. Cependant, ce régime s'avère fortement sensible vis-à-vis de l'instabilité pulsatoire. Ce comportement nouveau pourrait être à l'origine de certains phénomènes inexpliqués à propos des flammes de brouillard.

I. INTRODUCTION

La combustion des brouillards est présente dans de nombreuses situations industrielles et un effort de recherche fondamentale s'avère nécessaire pour comprendre une phénoménologie surprenante à bien des égards. L'effet le plus frappant est l'augmentation de la vitesse de propagation vis-à-vis de la situation de richesse identique en gaz. D'autres observations sont également mal comprises, comme leur nature fortement plissées ou encore leur domaine de flammabilité, soit plus large, soit plus étroit, selon les configurations.

L'absence d'élucidation de ces phénomènes provient, pour une bonne part, de la difficulté de réaliser des expériences de laboratoire dans lesquelles le brouillard est totalement contrôlé. Il est indéniable que la micropesanteur offre un environnement favorable au contrôle de brouillards calibrés, à la fois, en tailles de gouttes et en distances inter-gouttes. On peut même envisager de faire varier continûment les caractéristiques précédentes à propos d'un réseau de gouttes stabilisées grâce à l'absence de gravité. De plus, le fait de pouvoir stabiliser des réseaux de grosses gouttes et d'y étudier la propagation d'une flamme, permet d'aborder les flammes de brouillards à haute pression. Pour ces derniers, on sait qu'a priori, ne sont plus satisfaites les hypothèses habituelles selon lesquelles la distance inter-goutte est plus petite que l'épaisseur de flamme. La propagation de la combustion s'apparente alors à la percolation d'une flamme dans un milieu fortement hétérogène.

Bien que, par nature, la combustion des brouillards concerne un milieu hétérogène, les travaux théoriques et numériques se sont intéressés en priorité aux régimes homogènes de propagation. Le modèle minimal que nous avons développé [1] adopte également ce point de vue. Nous envisageons ce modèle comme un point de départ dont il convient de bien connaître la phénoménologie avant toute étape ultérieure d'enrichissement. Ce modèle contient néanmoins les ingrédients de base pour étudier une flamme de brouillard : un processus préalable d'évaporation des gouttes dépendant de manière réaliste des conditions en température et composition du gaz environnant, une réaction chimique non-infiniment rapide et des équations de conservation relatives au fuel en phase liquide et en phase gazeuse. Afin que le modèle soit minimal, nous avons supposé l'oxygène en excès, ce qui supprime l'équation de conservation à propos de l'oxygène.

2. UN MODELE MINIMAL DE FLAMME PAUVRE DE BROUILLARD

Nous appliquons, en premier lieu, un procédé d'homogénéisation qui consiste à effectuer une moyenne spatiale des grandeurs sur une boule de rayon Λ_a supposé grand devant L_a , la distance inter-goutte. Pour ce faire, il faut supposer que le phénomène étudié (ici, attendu a priori à l'échelle de réaction-diffusion E_{RD}) soit

caractérisé par une échelle plus grande que Λ_g . En d'autres termes, il faut qu'il y ait une séparation d'échelle suffisante entre l'échelle du phénomène et L_d . Nous sommes également amenés à formuler une hypothèse sur la réaction chimique: celle-ci ne dépend que de grandeurs macroscopiques. Ceci revient à supposer que le temps d'homogénéisation est petit devant le temps chimique. De plus, comme il l'est généralement admis en combustion, nous adoptons les hypothèses suivantes : a) le phénomène de combustion est de type déflagration ; nous avons affaire à un écoulement à faible nombre de Mach où le transfert de chaleur est de type diffusif; b) la réaction est limitée à une seule étape, laquelle est contrôlée par une seule espèce : le fuel, car dans un mélange pauvre on peut considérer l'oxydant en excès.

Nous avons retenu un modèle d'évaporation dérivé de la loi classique dite du "D²", due à Spalding-Godsave. Cette loi est issue d'une solution analytique qui requiert que le système soit à pression modérée et que la distance entre les gouttes soit grande devant le rayon de goutte; cette dernière hypothèse étant d'autant mieux satisfaite que le brouillard est pauvre et à basse pression. D'autres hypothèses simplificatrices nécessaires encore à ce modèle sont reprises dans le cadre de notre modèle : les coefficients de transport de chaleur et de masse sont du même ordre, ils sont de plus invariants en fonction de la température et de la composition.

Considérons une goutte dont la température de surface est T_s . Notons Y_s , la fraction massique de fuel du gaz en contact avec la goutte. A basse pression, la courbe de coexistence liquide-vapeur assure une relation directe entre Y_s et T_s . Si T_g et Y_g , sont la température et la composition moyennes du gaz, un calcul simple montre [1] que la masse de fuel vaporisée par unités de temps et de volume s'écrit :

$$\rho_{\text{vap}} = n_d m_{\text{vap}} = 3 \frac{\tilde{\rho} Y_l}{r_d^2} \frac{k_g}{\rho_l C_p} \ln(1+B) = 3 \left[Y_l \tilde{\rho} \right]^{1/3} \left[(Y_l)_u (\tilde{\rho})_u \right]^{2/3} \frac{k_g}{\rho_l C_p R_d^2} \ln(1+B) \quad (1)$$

où Y_l , $\tilde{\rho}$ et ρ_l correspondent à la fraction massique de fuel en phase liquide, la densité du liquide et la densité instantanée du brouillard. L'indice u est relatif à la valeur des grandeurs du brouillard dans la zone amont de la flamme et l'indice b correspond à l'état du système après le passage de la flamme. k_g et C_p sont resp. la conductivité et la capacité calorifique de l'air. La fermeture du modèle nécessite de préciser le nombre B comme fonction des conditions moyennes du brouillard. D'une manière générale, B dépend de l'histoire de la goutte. Cependant, à pression modérée et pour des brouillards d'hydrocarbure, nous pouvons considérer comme une acceptable approximation les expressions suivantes :

$$\text{si } T_g < T_{\text{boil}} \quad , \quad B = Y_s (T_s = T_g) - Y_g \quad (2-a)$$

où T_{boil} est la température d'ébullition du fuel et $Y_s (T_s)$ correspond à la courbe de coexistence.

$$\text{si } T_g > T_{\text{boil}} \quad , \quad B = 7R/4L \left\{ T_g - T_{\text{boil}} + [(T_g - T_{\text{boil}})^2 + 8M_f/7M_a T_{\text{boil}}^2]^{1/2} \right\} \quad (2-b)$$

avec M_f [resp. M_a] la masse molaire du fuel [resp. air]. L'équation (2-a) exprime le fait que pour un gaz environnant en dessous de la température d'ébullition, le taux d'évaporation reste faible et, ainsi, la surface de la goutte peut atteindre une température voisine de son environnement. Quant à l'équation (2-b), elle indique que pour des hautes températures environnantes la surface de la goutte atteint une température proche de la température d'ébullition..

La conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et des espèces chimiques donnent lieu à des équations aux dérivées partielles. Le terme de production d'énergie est de type Arrhénius et assure une très forte dépendance en fonction de la température. Comme moins de 1/15 de la masse du brouillard correspond à une masse liquide, on néglige les transferts de masse entre les deux phases dans l'estimation de toutes les grandeurs caractéristiques du brouillard. Dans la présentation de ces lois de conservation nous adoptons les unités réduites comme il est classiquement fait en combustion des pré-mélanges. Notons tout d'abord T_b , la température adiabatique de flamme, donnée ici par :

$$T_b = T_u + \frac{Q}{c_p} (Y_g)_u + \frac{Q-L}{c_p} (Y_l)_u \quad (3)$$

où T_u est la température du brouillard frais. Définissons également U_L , la vitesse de la flamme de pré-mélange correspondante, issue de la théorie asymptotique ZFK :

$$U_L = \sqrt{\frac{2 L_c k \rho_b^2 Y_{O_2} F(T_b)}{C_p \rho_u^2 Z_c^2} \exp\left(\frac{-E_A}{2RT_b}\right)} \quad (4)$$

Couplée avec le processus de diffusion cette vitesse nous permet d'établir des échelles caractéristiques de longueur et de temps, $E_{RD} = D_u U_L^{-1}$ et $\tau_{RD} = D_u U_L^{-2}$, qui nous servent à réduire les grandeurs. Enfin, l'unité de masse est reliée à $(\tilde{\rho})_u$, les fractions massiques sont réduites par la fraction massique globale de fuel $(Y_l)_u + (Y_g)_u$ et une température réduite est définie par $\theta = (T - T_u)/(T_b - T_u)$. Ceci conduit à construire

$$Da = \frac{1}{3} \frac{\rho_l}{\rho_u} \frac{U_L^2 R_d^2}{D_u^2} = \frac{2}{3} \frac{\rho_l \rho_b L_e \rho_{O_2} F(T_b) R_d^2}{\rho_u^2 Z_e^2 D_u} \exp\left(\frac{-E_A}{RT_b}\right) \quad (5)$$

nombre que nous appelons de Damkoehler puisqu'il compare un temps caractéristique (d'évaporation) au temps de la réaction chimique. Ce nombre peut varier, notamment selon la pression, sur une très grande gamme de valeurs.

La simulation numérique recourt aux méthodes récentes [2] de résolution des équations gouvernant la propagation des fronts de combustion, lesquelles ont été appliquées par les auteurs à diverses situations de combustion en phase gazeuse pure et/ou en milieu diphasique [3-5]

3. UN REGIME DE PROPAGATION CONTROLE PAR L'EVAPORATION

Dans l'étude numérique qui est présentée, nous supposons que les effets diffusifs sont du même ordre et que les autres paramètres, hormis Da , sont choisis près de leur valeur standard pour des hydrocarbures. Quant à Da , nous lui donnons des valeurs de plus en plus grandes (i.e. pour des gouttes de plus en plus grosses). Contrairement à ce que nous verrons plus loin pour des petits nombres de Damkoehler, le lieu où l'évaporation se produit n'est pas découplé de la réaction chimique; il occupe en effet toute la zone de pré-chauffage et le taux d'évaporation va jusqu'à se confondre, dans sa partie terminale, avec le taux de réaction. En d'autres termes, la réaction est asservie à l'évaporation (on note en effet que les deux courbes en pointillés de la figure 1, se superposent en arrière du front).

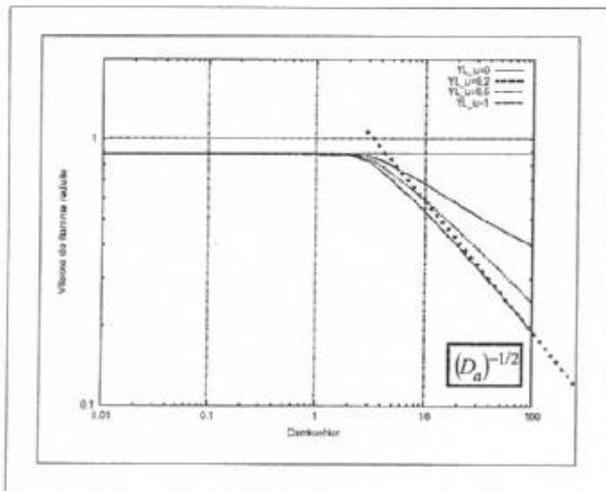
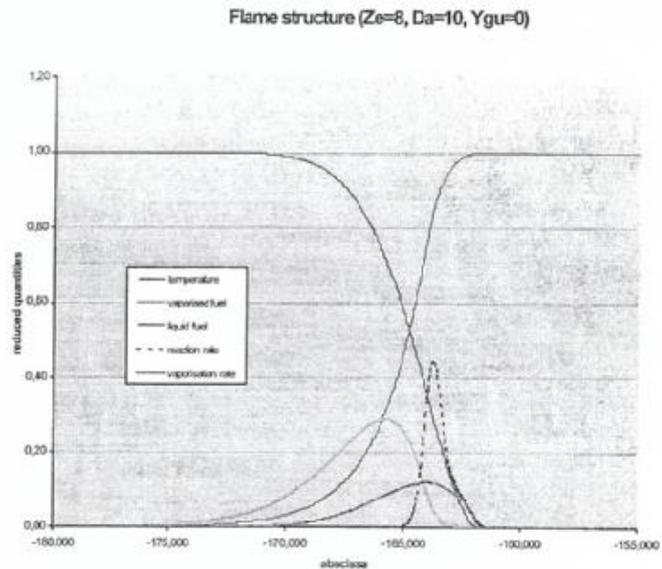


Figure 2

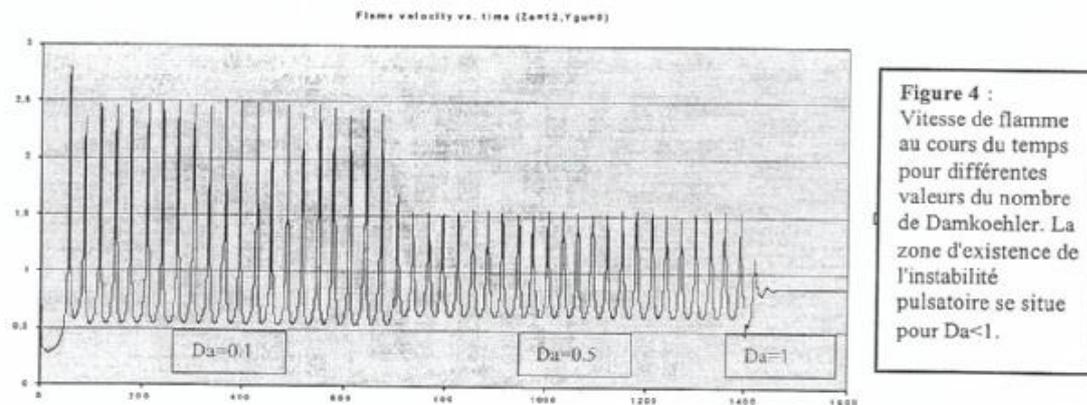
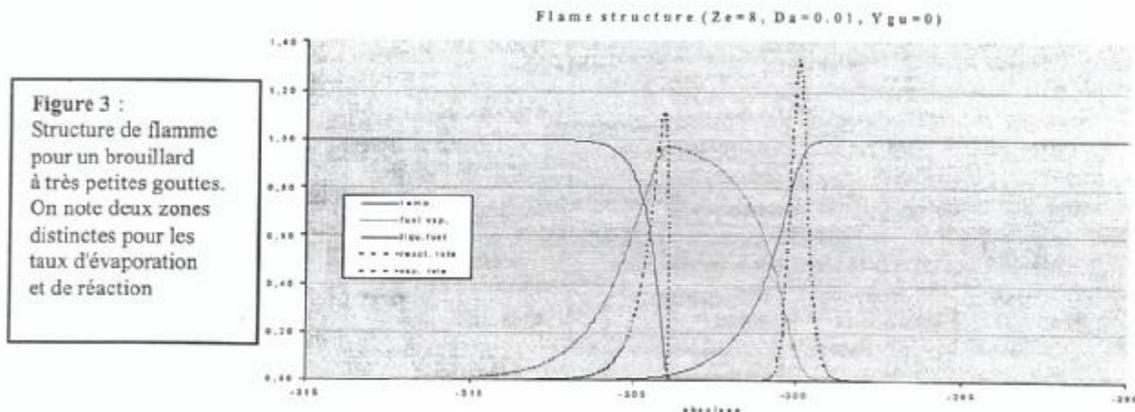
Notons par ailleurs que la réaction chimique affecte un pré-mélange loin de sa richesse initiale. En conséquence, la vitesse de propagation décroît. Ce mécanisme est illustré par la figure 2 où la vitesse de propagation est reportée en fonction du nombre de Damkoehler et pour différentes fraction massique initiales de fuel liquide. Pour un brouillard à tension de vapeur d'équilibre très faible, la vitesse de propagation se comporte en $Da^{-1/2}$. Reconstituée en grandeurs dimensionnées, la vitesse de flamme devient proportionnelle au coefficient de diffusivité divisé par le rayon d'une goutte. En d'autres termes le temps chimique n'est plus impliqué dans cette dépendance. Il s'agit bien d'un mécanisme d'évaporation - diffusion.

4. UN REGIME PULSATOIRE DE PROPAGATION

En diminuant le nombre de Damkoehler, la vitesse de flamme se rapproche de la vitesse des flammes de prémélange standard et, lorsque Da devient très petit, la structure de flamme se compose d'une front de combustion

précédé d'un front d'évaporation bien disjoint comme l'indique la figure 3. La flamme se propageant de la droite vers la gauche, la structure de flamme indique clairement qu'un front d'évaporation précède la zone de la conversion chimique. Ces deux zones sont nettement séparées lorsque $Da < 0.1$ et la flamme de brouillard admet un comportement proche de celle d'un pré-mélange car elle brûle un mélange gazeux de richesse identique à celle du brouillard.

Dans la gamme des nombres de Damkoehler compris entre 0.01 et 1, un phénomène nouveau se produit: la flamme est sujette à de brutales accélérations, suivies d'un ralentissement tout aussi rapide. Il s'agit d'un mode de propagation dit pulsant. Pour ce qui concerne les flammes de pré-mélange, ce mode avait été prédit pour des caractéristiques de pré-mélange rarement rencontrées dans la pratique. Ici, par contre, nous prédisons l'existence de ce mode pour des brouillards très standards. La figure 4 présente trois choix, successifs au cours du temps, du nombre de Damkoehler alors que les autres paramètres sont maintenus constants. L'existence de cette instabilité pourrait expliquer certains phénomènes inattendus qui affectent les flammes de brouillard.



References

- [1] SUARD S., NICOLI C. and HALDENWANG P., "Vaporisation controlled regime of flames propagating in fuel-lean spray", *J. Phys. IV (France)* vol. 11, pp 301-310 (2001)
- [2] HALDENWANG P., PIGNOL D., "Dynamically adapted mesh refinement for combustion front tracking" *Computers and Fluids*, vol. 31 (4-7) pp. 589-606 (2002)
- [3] NICOLI C., DENET B., HALDENWANG P. "Etude numérique de la combustion à la sortie d'un injecteur hydrogène/oxygène", *Combustion*, vol.2 (2) pp. 39-53 (2002)
- [4] RIPOLL J.-F. and HALDENWANG P., "A 1-D modelling of a pool fire" *Combustion Theory and Modelling*, vol. 6 (4), pp. 647-673 (2002)
- [5] NICOLI C., HALDENWANG P. and DENET B., "Combustion of gaseous co-flow jets" *Combustion Science & Technology*, vol. 175 (6), pp. 1143 - 1163 (2003)

MECANISMES DE PROPAGATION DES FLAMMES DANS LES MELANGES HETEROGENES GAZ- PARTICULES SOLIDES

B.VEYSSIERE, O.BOZIER

Laboratoire de Combustion et de Détonique, UPR 9028 CNRS, ENSMA, téléport 2, 1 avenue Clément Ader, 8P 40109, 86961 Futuroscope-Chasseneuil

1 – Motivations

Les milieux diphasiques réactifs mettant en jeu de fines particules solides en suspension dans une phase gazeuse interviennent dans un nombre croissant de domaines :

- utilisation des combustibles solides finement divisés pour produire de l'énergie: brûleurs à combustibles pulvérisés (charbon, lignites..), systèmes propulsifs (cas des particules métalliques) ;
- problèmes de sécurité vis à vis du risque d'explosion en raison de la présence de particules solides réactives dans un grand nombre de procédés industriels ou d'opérations de manipulation, transport, stockage de produits pulvérulents: exploitation minière, industries métallurgiques, chimiques, pharmaceutiques, agroalimentaires, silos à grains, ...

La connaissance des mécanismes de propagation de la combustion dans ces milieux reste encore très limitée, comparativement au cas des mélanges gazeux homogènes. Parmi les raisons de cette situation, deux peuvent être plus particulièrement soulignées :

* Les difficultés rencontrées pour générer une suspension de particules solides dans un milieu gazeux, uniformément répartie dans une enceinte et de caractéristiques bien contrôlées.

* Les connaissances acquises dans le cas des mélanges gazeux homogènes ne sont pas transposables aisément au cas des mélanges gaz-particules solides, en raison de l'épaisseur de la zone de réaction, qui remet en question la validité de l'hypothèse consistant à considérer la flamme comme une discontinuité de faible épaisseur.

2- Objectifs

Les travaux envisagés dans le cadre du GDR s'articulent autour de trois axes :

- Maîtrise des conditions initiales : Etude des mécanismes de génération d'une suspension de particules solides dans des conditions contrôlées et reproductibles.
- Détermination des paramètres caractéristiques des flammes laminaires de mélanges gaz-particules solides; comparaison avec le cas des flammes de prémélange gazeux "épaisses".
- Rôle de la turbulence dans le processus de génération de la suspension et de propagation de la flamme.

3- Contexte

Ces travaux s'effectuent à l'aide de plusieurs sources de financement, dans le cadre des partenariats suivants :

- Le CNES a apporté, dans le cadre des aides à la recherche, un support financier au cours des années 2000, 2001, 2002, destiné à la mise au point et la conduite des expériences.

L'ESA a sélectionné le projet MAP AO-99-095 (FVI: Flame Vortex Interaction). Dans le cadre de ce projet une chambre de combustion multifonction devait être construite. Celle-ci devait permettre de réaliser des expériences de combustion de suspensions de particules solides en condition de micropesanteur. Malheureusement, en raison de l'incapacité de la part des partenaires allemands à réunir le financement nécessaire à leur travaux, ce programme n'a pas pu être lancé. Ceci a entraîné

des conséquences importantes sur le développement de nos travaux, puisque nous nous sommes trouvés dans la nécessité de trouver une solution de substitution pour la chambre de combustion.

- L'INERIS et la région Poitou-Charentes ont cofinancé une bourse de thèse sur ce programme. En effet, l'INERIS organisme très impliqué dans le domaine de la sécurité contre les explosions de poussières, est très intéressé par le progrès des connaissances en ce domaine.

- Le programme POLONTUM 2000 du MENRT a permis la collaboration avec l'équipe du Professeur J.Jarosincki de l'université polytechnique de Lodz (Pologne). En effet, celle-ci est spécialisée dans l'étude des flammes laminaires de mélanges gazeux homogènes et de mélanges gaz-particules solides, et possède une petite installation pour conduire des expériences en condition de microgravité (plate forme de chute, $\Delta t = 1.2$ s).

4 - Travaux effectués

4.1 Etude de l'influence de la gravité sur la propagation des flammes laminaires de prémélanges gazeux aux limites d'inflammabilité.

Les données, en nombre limité, existant dans la littérature montrent que les flammes laminaires de mélanges biphasiques gaz-particules solides ont une vitesse fondamentale de flamme faible et une épaisseur importante. Une meilleure compréhension des mécanismes de la combustion dans ces milieux passe nécessairement, dans une première étape, par l'étude comparative des flammes de mélanges diphasiques et de celles de prémélanges gazeux homogènes. Par ailleurs, dans les mélanges gazeux homogènes lorsque l'on s'approche des limites d'inflammabilité, l'épaisseur de flamme devient très importante, de sorte que l'hypothèse, couramment utilisée, de la flamme mince n'est plus valable, et la propagation est très sensible aux effets de la gravité. On se trouve donc dans une situation comparable à celle des flammes de mélanges biphasiques gaz-particules solides, ce qui permet d'étudier certains aspects du problème dans des conditions mieux contrôlées, non influencées par les difficultés liées à la dispersion des particules solides.

Nous avons étudié l'effet de la gravité sur la propagation des flammes de propane et d'air près de la limite riche d'inflammabilité. Ce travail est mené en collaboration avec l'équipe du Pr. Jarosinski de l'Université Polytechnique de Lodz (Pologne). En gravité normale, il existe un écart considérable entre la limite supérieure d'inflammabilité en propagation ascendante (9.5% de propane) et en propagation descendante (6.3% de propane), cf.Fig.1.

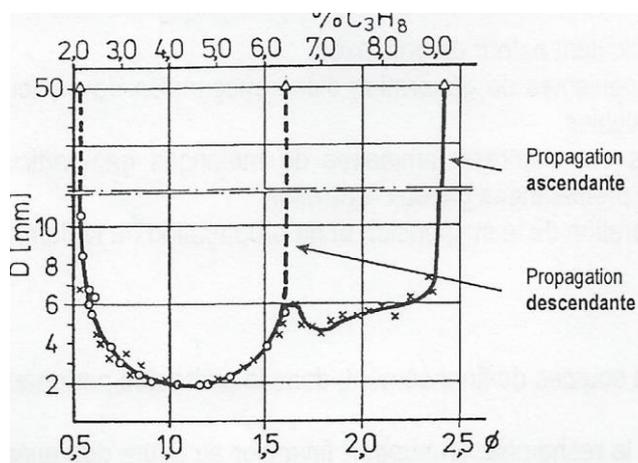


Fig.1 Limites d'inflammabilité et distance de coincement du mélange propane-air en fonction de la richesse

Les expériences effectuées, en conditions de microgravité, avec le montage expérimental et sur la plateforme de chute de l'Université de Lodz (durée 1.2s) (cf. Fig.2) ont conduit aux premiers résultats suivants :

- A la limite supérieure d'inflammabilité, deux critères d'extinction peuvent être définis, l'un basé sur l'observation optique d'une flamme, l'autre sur l'augmentation de la pression dans la chambre à volume constant.
- La limite supérieure d'inflammabilité est comprise entre 8.75% et 9% de propane, suivant le critère utilisé. En tout état de cause, elle est plus proche de la limite d'inflammabilité de la flamme en propagation ascendante en gravité normale.
- La vitesse fondamentale de flamme du mélange à 8.4% est estimée à 2.3 cm/s sous 1g et à 2 cm/s sous 0g.



Fig.2 Montage expérimental d'étude de l'extinction des flammes de propane-air

4.2 Etude des mécanismes de génération d'une suspension de particules solides dans une enceinte close

Le choix de l'enceinte fermée, même s'il n'est pas le plus favorable à l'observation des flammes, a été rendu nécessaire par les contraintes de sécurité inhérentes aux expériences dans les avions ou les engins spatiaux. Un montage spécialement adapté a été réalisé (cf. Fig.3). Il consiste principalement en une chambre cylindrique (cf. Fig.4) de section octogonale aux parois entièrement transparentes. La forme et les dimensions (volume 20 l, longueur $L = 0,50$ m, diamètre $D = 0,23$ m, $L/D \approx 2,2$) ont été choisies de manière à être proche des configurations expérimentales dans lesquelles on étudie les caractéristiques d'explosion des suspensions de poussières. La section octogonale, qui offre des surfaces planes, et les parois transparentes permettent la mise en œuvre de diverses méthodes de diagnostic par voie optique: Imagerie rapide pour suivre l'évolution de la suspension au cours du temps, et PIV pour en connaître les caractéristiques instantanées.

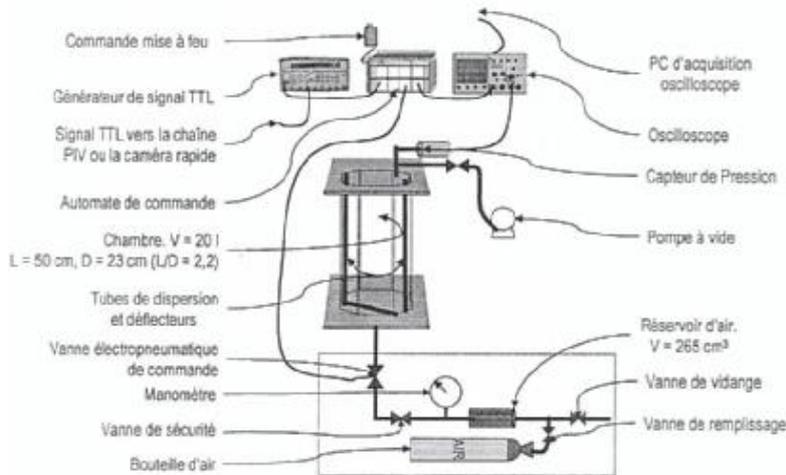


Fig.3 Schéma du montage expérimental

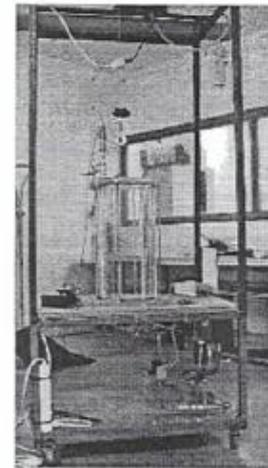


Fig.4 Enceinte de dispersion

Les premières expériences ont été effectuées avec des particules d'amidon de diamètre moyen $20 \mu\text{m}$. Les concentrations étudiées se situent entre 50 et 400 g/m^3 (la stoechiométrie du mélange est obtenue pour une concentration de 240 g/m^3). On a étudié, tout d'abord, le champ aérodynamique créé dans la chambre par le dispositif de génération de la suspension (cf. Fig.5), puis les caractéristiques de la suspension (localisation des particules, gradients de concentration,...) et leur évolution au cours du temps, en fonction des conditions initiales générées par le dispositif de dispersion (cf. Fig.6). Lorsque les expériences en laboratoire, à gravité normale, seront terminées, des expériences similaires en microgravité devront être effectuées pour savoir dans quelles conditions il pourrait être possible d'obtenir une suspension avec une vitesse des particules nulle, et la concentration locale en particules connue en chaque point de l'enceinte.

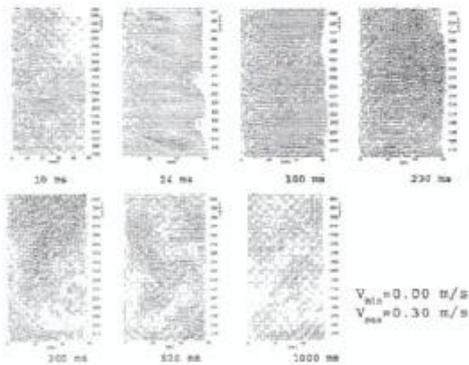


Fig.5 Evolution en fonction du temps du champ de vitesses généré par le dispositif de dispersion des particules (vue dans un plan vertical médian)

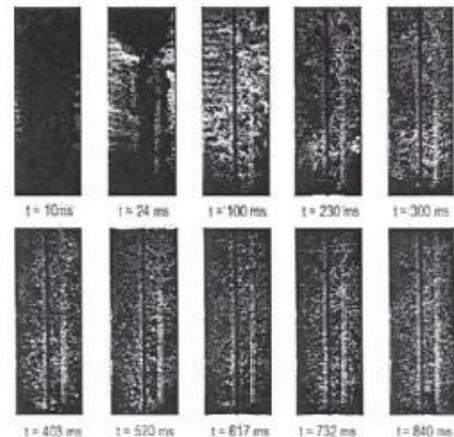


Fig.6 Séquence de dispersion des particules solides

4.3 Etude des caractéristiques d'explosion en chambre fermée des suspensions de particules solides

Le but est d'étudier les caractéristiques d'explosion en chambre fermée des suspensions de particules solides générées par la méthode précédente, et de corréler ces caractéristiques avec l'état initial de la suspension. Compte-tenu de l'annulation du programme ESA (cf. §3), il a été décidé de construire au LCD une chambre d'explosion (cf. Fig.7) de caractéristiques géométriques identiques à celles de la chambre utilisée pour l'étude des mécanismes de génération des suspensions (volume 20 l, longueur $L = 0,50$ m, diamètre $D = 0,23$ m, $L/D \approx 2,2$). Cette enceinte peut supporter des pressions statiques de 50 bar, ce qui permet d'étudier la combustion à volume constant de suspensions d'une grande variété de particules solides en suspension dans l'air ou dans des atmosphères gazeuses de compositions différentes (suroxyg n es ou combustibles). Le dispositif de génération de la suspension est identique à celui utilisé dans la chambre transparente ci-dessus. L'allumage du mélange sera obtenu par une étincelle électrique, dont on peut faire varier la position dans la chambre et le délai de mise en œuvre par rapport à l'instant initial du processus de génération de la suspension. La réalisation de cette chambre est en cours d'achèvement.

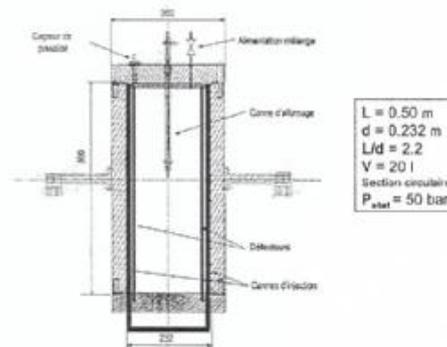


Fig.7 Schéma de la chambre d'explosion

5 - Perspectives

Les travaux entrepris se poursuivront dans les directions suivantes:

- Etude des mécanismes de génération de la suspension. On examinera plus particulièrement les temps caractéristiques d'amortissement du module du vecteur vitesse, l'évolution des structures turbulentes, la formation et la durée de vie des structures de grande échelle, en corélation avec la dispersion des particules et l'existence de gradients de concentration.
- Influence de la gravité sur la génération de la suspension. Les expériences seront renouvelées en condition de microgravité et leurs résultats comparés à ceux obtenus en condition de gravité normale.
- Influence des conditions initiales (turbulence, état initial de la suspension, gradients de concentration,...) sur les caractéristiques d'explosion en chambre fermée. Recherche des grandeurs caractéristiques fondamentales (vitesse de flamme, limites d'inflammabilité, énergie d'allumage, ...)

CHANGEMENTS DE PHASE, COMBUSTION, FORTS GRADIENTS

Stéphane Préau, Roger Prud'homme

Laboratoire de Modélisation en Mécanique (LMM) - UMR 7607 - Université Pierre et Marie Curie/CNRS - Boîte 162 -4 place Jussieu -75252 Paris CEDEX 05

1. Phénomènes critiques

Modélisation théorique de l'évaporation de gouttes au voisinage d'un point critique liquide-vapeur.

La thèse de Doctorat de Stéphane PREAU (Directeur de thèse: Roger Prud'homme depuis septembre 2000, en relation avec Bernard ZAPPOLI) est en voie d'achèvement. Cette thèse intitulée au départ ((Stabilité de gouttes et de bulles au voisinage du point critique » (bourse BDI cofinancée CNES/CNRS), porte sur la modélisation théorique de l'évaporation de gouttes au voisinage d'un point critique liquide-vapeur. Le problème intéresse tout particulièrement le CNES et le GDR « Phénomènes de Transport et Transitions de Phase en Micropesanteur », pour lesquels la dynamique des fluides critiques est un champ d'études privilégié relevant d'expériences spatiales. La combustion, en particulier dans les moteurs cryogéniques et dans les moteurs Diesel, est également concernée.

Les thèmes étudiés ont porté au début sur l'effet de la tension de surface sur l'équilibre thermodynamique d'une goutte en proche critique (2000-2001), puis se sont focalisés sur l'expansion isobare de poches sphériques (ou gouttes) de fluide critique ou légèrement supercritiques (étude analytique et comparaison avec les résultats numériques avec un code établi spécialement par J. Ouazzani).

Il a été procédé à des développements asymptotiques en s'inspirant des travaux de Crespo et Liñan d'une part et d'Arias-Zugasti et al d'autre part et une solution quasi-stationnaire originale a été mise en évidence. Pour ce nouveau type de solution, la limite intérieure de la zone de transition goutte-gaz considérée correspond à la densité initiale, tandis que sa limite extérieure est la sphère où le débit masse est maximum. L'analyse est menée en rapportant l'écart au rayon intérieur à l'épaisseur de cette zone de transition. La concordance entre résultats analytiques et numériques est assez remarquable dans une plage de conditions aux limites très large, allant à l'infini, du proche-critique à des conditions nettement supercritiques. Ce résultat est mis en évidence sur la Figure 1, où la courbe en pointillés représente l'évolution linéaire du rayon de la goutte élevé au carré en fonction du temps réduit r (temps divisé par le temps de vie de la goutte) obtenue avec la théorie quasi-stationnaire classique, les carrés noirs correspondant à la nouvelle analyse quasi-stationnaire pour laquelle une loi d'évolution approchée est :

$$r_g^\beta - \beta r_g = (1 - \beta)\sqrt{1 - \tau}$$

où β est un coefficient constant.

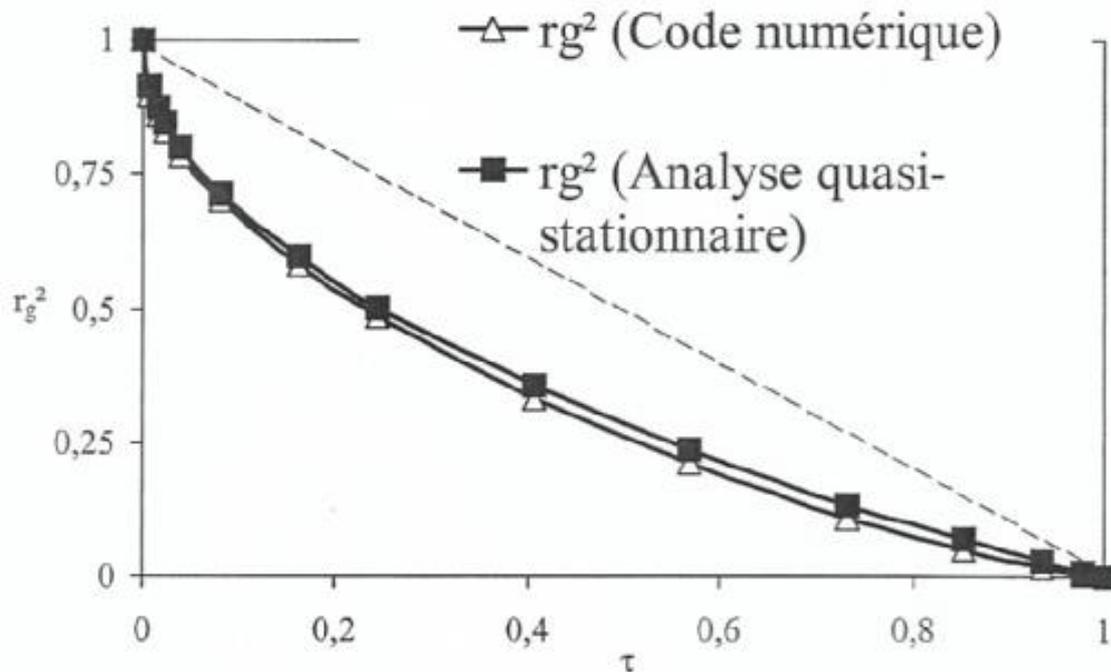


Figure 1. Récession temporelle du rayon d'une goutte de fluide critique pour un rapport de densités $\varepsilon = \rho_\infty / \rho_C = 0.25$ (APM2003, St Petersburg)

L'intérêt a été porté aussi, depuis 2001, sur les changements de phase dans le couple Naphtalène- CO_2 au voisinage du point critique, dans le cadre d'une collaboration avec Patrick BOUTOUX, Isabelle RASPO, Olivier SERRE et Bernard ZAPPOLI. L'expression de l'énergie libre du mélange a été établie sur la base d'une loi d'état du type Peng Robinson. Enfin, les valeurs des dérivées partielles de la pression par rapport aux fractions molaires le long de la courbe de coexistence au LCEP (lower critical endpoint) ont été établies.

Ces travaux ont fait l'objet d'une publication en 2001 dans le journal de Physique IV, une communication orale à la journée du GDR, le 28 mai 2002, à Paris, une autre à la journée thématique du GDR sur la combustion du 16 octobre 2002 et une autre au Séminaire d'Aussois du 26 au 28 mai 2003. Un poster a été présenté (APM St Petersburg du 23 juin au 2 juillet) et deux exposés oraux ont été présentés dans des congrès en 2003 (EFCM2003 du 25 au 28 août 2003 à Toulouse, CFM2003, Congrès Français de Mécanique du 1er au 5 septembre à Nice) et un article de 20 pages est soumis au Journal of Applied Physics.

2. Combustion

Evaporation et combustion de gouttes en régime instationnaire: expertise dans une étude menée à l'ONERA/DEFA par M. HABIBALLAH depuis 1999 dans le cadre

des instabilités HF dans les moteurs à propergols liquides. Un modèle d'échange thermique bi-couche pour les gouttes en régime transitoire d'évaporation subcritique a été mis au point. Le principe de ce modèle est de considérer la goutte comme un ensemble discret de deux sous-systèmes concentriques échangeant de la chaleur entre eux et avec la phase vapeur. Les équations thermiques obtenues sont couplées aux autres équations du problème. Appliquée au cas de petites perturbations acoustiques, cette modélisation montre la grande influence des échanges internes à la goutte sur la fréquence de coupure limitant le domaine instable. Deux paramètres interviennent le rapport ε du volume de la sphère intérieure au volume total de la goutte, et le coefficient d'échange thermique $\Lambda = \bar{\tau}_v / \bar{\tau}_T$ où $\bar{\tau}_v$ est le temps de vie moyen de la goutte et $\bar{\tau}_T$ le temps caractéristique de l'échange thermique interne. Ces deux coefficients sont reliés au nombre de Nusselt de la goutte par la relation de proportionnalité :

$$\Lambda \varepsilon^{1/3} \propto Nu_L$$

La figure 2 montre le résultat obtenu pour une goutte d'oxygène liquide dans la vapeur d'eau (représentative des produits de combustion H_2/O_2) pour $Nu_L=2$. On constate l'effet stabilisateur du transfert thermique interne à la goutte, non pris en compte habituellement. Il reste à déterminer la bonne valeur de ε , ce qui peut être fait par comparaison avec les résultats d'un calcul plus précis.

Ce modèle a été présenté lors de diverses réunions du groupe "High frequency Instability", du GDR 2258, et à deux congrès (APM2003 et EFCM2003), ainsi qu'à des séminaires du GDR.

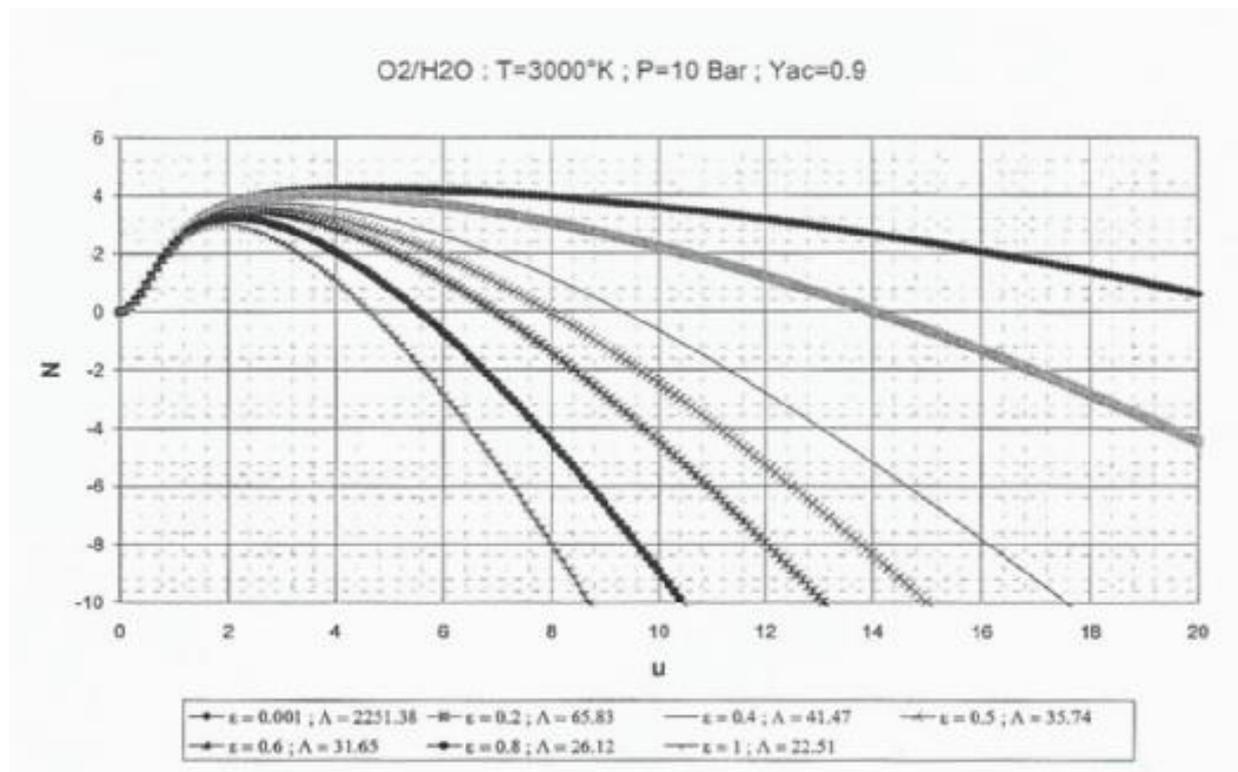


Figure 2. Facteur de réponse N d'une goutte d'oxygène pour différentes valeurs du coefficient d'échange thermique interne $\Lambda = \bar{\tau}_v / \bar{\tau}_T$, avec $Nu_L=2$ en fonction de la fréquence réduite $u = 3\omega \bar{\tau}_v$, de la perturbation de pression (APM2003, SI Petersburg)

3. Phénomènes d'interface

Modélisation des interfaces : rédaction d'un ouvrage « *Mechanical and thermodynamic modeling of fluid interfaces* » en collaboration avec R. GATIGNOL, édité en 2001 par World Scientific. Cet ouvrage comprend des parties se rapportant directement à la microgravité.
Interfaces entre fluides miscibles : encadrement d'un stage de DEA en 2001.

4. Solidification des matériaux

En 2002, une étude de synthèse sur *l'intérêt de la microgravité dans les études de solidification* (croissance orientée, méthodes de champ de phase) a été présentée lors d'un congrès et un article est en voie d'achèvement en 2003.
Les méthodes de champ de phase ont aussi donné lieu à une réunion thématique du G0R2258, où leur intérêt pour certains problèmes d'interfaces fluides a en particulier été mis en évidence.

PERSPECTIVES

Interfaces épaisses : Il s'agit d'approfondir la question des interfaces de fluides miscibles et des milieux où l'énergie interne volumique dépend du gradient de concentration ou de densité (étude commencée avec un stage de DEA en 2001). D'autre part, nous nous attachons à préciser les grandeurs extensives intervenant dans les zones interfaciales ou comprenant des densités volumiques d'aire.

Méthodes de champ de phase : On se propose d'envisager l'application aux interfaces fluides de méthodes utilisées en solidification des matériaux.

Méthodes de résolution des problèmes d'interfaces : projet d'éditer un ouvrage collectif. Ce livre comporterait des rappels théoriques, des méthodes analytiques et des méthodes numériques. Plusieurs auteurs sont d'ores et déjà en vue.

Ecole d'été: Le CISM d'Udine, m'a sollicité pour organiser une école d'été. Ce projet pourrait se réaliser en 2004-2005.

Changement de phase au voisinage du point critique: La suite de la thèse de S. Préau (Evaporation de gouttes au voisinage du point critique) pourrait donner lieu à une publication. Le cas du mélange Naphtalène-CO₂, abordé avec I. Raspo pourra être approfondi en vue d'expériences en μg .

DYNAMIQUE DE FORMATION ET CONTROLE DE LA MICROSTRUCTURE DE SOLIDIFICATION DIRIGEE D'ALLIAGES 3D : REFERENCES DIFFUSIVES ET EFFETS DE LA CONVECTION

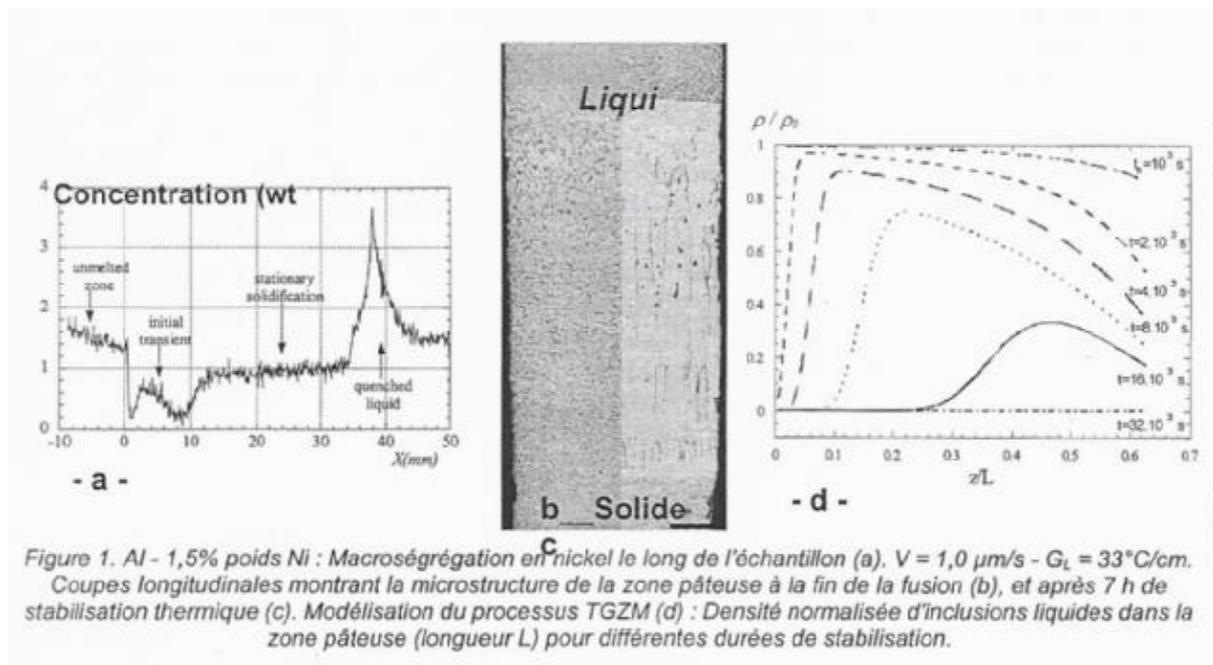
N. Bergeon, B. Billia, F. Célestini, J-M. Debierre, R. Guérin, H. Jamgotchian, H. Nguyen Thi

Laboratoire Matériaux et Microélectronique de Provence - L2MP, UMR CNRS 6137 / Université d'Aix-Marseille 3, Faculté des Sciences de St Jérôme, Case 142, 13397 Marseille Cedex 20

De 2000 à 2003, les recherches de l'opération "Modes et Formes de Croissance" du L2MP, effectuées dans le cadre du GDR ont porté sur les processus physiques et chimiques qui régissent la formation des microstructures de solidification. Ces microstructures, structures dissipatives modèles du point de vue des phénomènes hors équilibre, contrôlent les propriétés des matériaux élaborés en métallurgie, et sont rédhibitoires en microélectronique. L'originalité de notre approche réside dans le choix de trois voies complémentaires - systèmes modèles métalliques et semiconducteurs; - analogues organiques transparents (projet DECLIC du CNES) ; - modélisation et simulation numérique. Nous avons en particulier étudié - la formation de la microstructure interfaciale ; - les formes de croissance ; - la croissance libre. Le mode de croissance et l'anisotropie cristalline affectent les phénomènes. Il en est de même de la convection naturelle, d'où la nécessité d'études comparées à 1g et en microgravité sur des échantillons massifs pour lesquels seul l'espace (=Très Grand Equipement) permet des expériences dans la limite du transport diffusif.

I. Etat initial

Phases préparatoires de fusion et de stabilisation thermique : Les profils de concentration des échantillons Al-1,5 % pds Ni solidifiés au sol et en microgravité (Fig. 1a), complexes dans la partie entre le talon non fondu et le régime de croissance stationnaire, ont motivé une analyse spécifique des étapes préliminaires à la croissance dirigée.



Des expériences de fusion suivie d'une stabilisation thermique de durée variable ont été conduites. Le barreau de départ (cristaux équiaxes + eutectique) étant polyphasé, la fusion crée une zone pâteuse constituée de canaux et gouttes liquides riches en nickel dans une matrice solide d'aluminium (Fig. 1b). Pendant la stabilisation thermique, les parties liquides "remontent" le long du gradient de température par *Temperature Gradient Zone Melting (TGZM)*. Cette migration évacue le soluté de la zone pâteuse, qui se transforme en un solide homogène (Fig. 1c). La simulation numérique du processus TGZM est en excellent accord avec les observations (Fig. 1d). Elle montre une diminution globale de la quantité de zones liquides avec un maximum de composition dans la zone pâteuse, la

formation d'une couche d'Al primaire (quasi pur) en bas de cette zone et un temps de l'ordre de 10 heures pour obtenir de l'aluminium (J. Crystal Growth 253 (2003) 539).

Etude in situ de la fusion dirigée d'alliages transparents succinonitrile - acétone : Des gouttes liquides nucléent (Fig. 2a) et croissent dans la zone solide en surchauffe de constitution en avant du front de fusion, tout en remontant vers l'interface jusqu'à se fondre dans le bain fondu. Pendant sa croissance, la goutte voit son environnement thermique varier continûment du fait de la progression de la fusion et de sa remontée vers l'interface par TGZM. La croissance des gouttes est analysée par une modélisation de type croissance libre avec augmentation de l'écart à l'équilibre (Phys. Rev. E 65 (2002) 051604). En outre, comme en solidification, des instabilités morphologiques, dendrites de fusion, se développent à l'interface (Fig. 2d) et aux joints de grains (Fig. 2b,c).

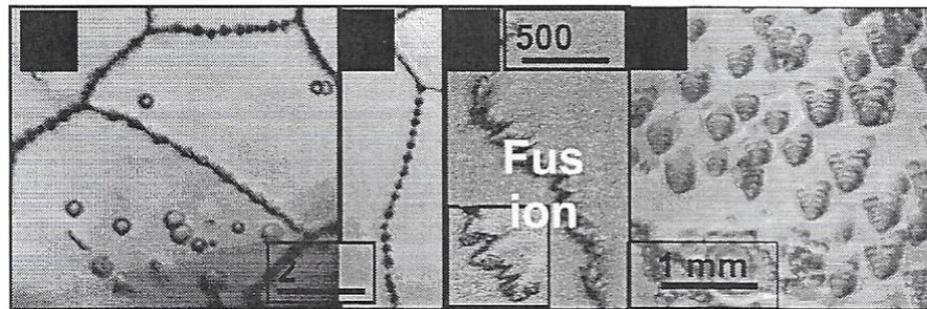


Figure 2. – a) Gouttes au sein des grains. – b, c) Instabilités aux joints. – d) Réseau de dendrites de fusion.

II. Transitoire initial de solidification

Dans le transitoire qui suit l'application de la vitesse de tirage le front de solidification recule, Le recul purement solutal prédit par le modèle de Warren-Langer est plus lent que celui mesuré par interférométrie sur des alliages succinonitrile-acétone. La prise en compte du recul des isothermes lié à la translation de l'échantillon et au dégagement de chaleur latente conduit à un recul trop rapide. Cet écart est attribué aux mouvements convectifs qui, en évacuant l'acétone rejetée, amènent le solide à croître à plus haute température. Les expériences en microgravité prévues dans le dispositif DECLIC devraient trancher ce point.

III Cellules et dendrites

Cellules rugueuses : Par l'approche d'interface abrupte, nous avons étudié la formation des cellules ou dendrites. L'équation de diffusion du soluté dans le liquide est résolue par différences finies. A chaque pas de temps, la vitesse du front est calculée et le front déplacé en conséquence. L'originalité est de pouvoir utiliser les paramètres physiques d'alliages réels, et comparer les résultats directement avec l'expérience. Différents modes de croissance (élimination, création, doublets, mode oscillant) ont été mis en évidence (Marietti, Thèse, Univ. Aix-Marseille 3, 2000), que l'on retrouve dans l'expérience comme les doublets observés parmi toute une variété de multiplets sur des alliages Al — 3,5 % poids Li solidifiés dans des conditions de transport diffusif lors d'expériences en microgravité (J. Crystal Growth 218 (2000) 419).

Cellules partiellement facettées : Lorsque l'anisotropie cristalline augmente, comme pour les semiconducteurs, l'anisotropie de la cinétique de croissance et de la tension de surface $\gamma(\theta)$ suivant la direction cristallographique se fait sentir. L'interface cellulaire/dendritique présente alors des facettes normales aux directions de singularité, reliées entre elles par des parties rugueuses. Nous avons étudié la dynamique de cellules partiellement facettées sur des alliages Bi - 1 % Sb. Pour une direction de croissance [110] on peut considérer le réseau de cellules comme 2D, avec des facettes (100) et (010), à 90° sur des sections [001].

La technique des marquages Peltier, qui laisse des microségrégations dans le solide, permet de suivre l'évolution de la microstructure de solidification sur une coupe longitudinale de l'échantillon. Le résultat majeur est la mise en évidence (Fig. 3) expérimentale et par simulation numérique de nouvelles microstructures, les "cellules t" (Dabo, Thèse, Univ. Aix-Marseille 3, 2001). Les côtés de ces cellules ont une (1F) ou deux (2F) facettes {100}, suivant le (demi)espacement local et

L'anisotropie du matériau. La division en $n (\geq 2)$ facettes a lieu lorsque la position du sommet rugueux impose une amplitude supérieure au (demi) espacement.

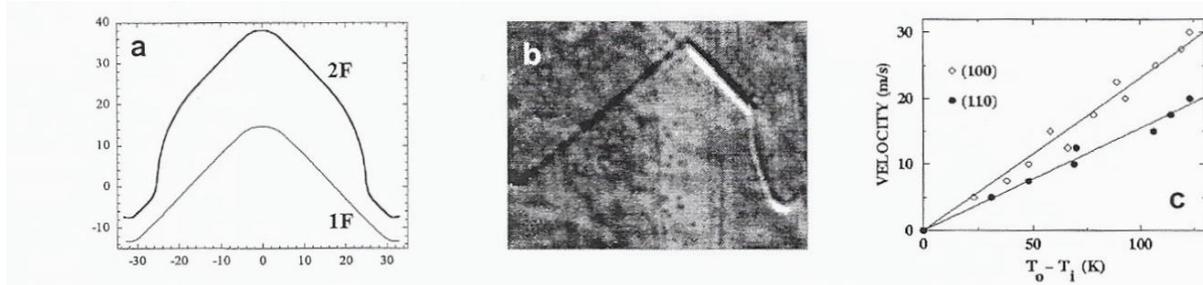


Figure 3. -a) Cellules 1F et 2F obtenues par simulation numérique en variant le degré d'anisotropie du matériau. -b) Observation d'une cellule 1F-2F par la technique des marquages Peltier. -c) Vitesse de l'interface solide-liquide en fonction du sous-refroidissement pour les orientations (100) et (110). Cas de l'or pur.

Simulation de la croissance dirigée par la méthode de dynamique moléculaire : *Le but est de calculer des grandeurs physiques interfaciales en fonction de la vitesse de tirage et de l'orientation cristalline. Ces paramètres, très difficilement accessibles expérimentalement, servent pour réaliser des simulations de champ de phase quantitativement comparables avec l'expérience. Nous avons étudié la solidification dirigée d'un alliage binaire dilué de Lennard-Jones, à l'aide de simulations numériques de dynamique moléculaire (DM). Les calculs ont été menés sur des temps suffisamment longs pour obtenir les grandeurs locales avec précision en moyennant sur un grand nombre de configurations. Le coefficient de partage k , rapport des concentrations dans le solide et le liquide à l'interface, a pu être estimé. Ce coefficient k , qui dépend fortement de la vitesse de tirage V , est en excellent accord avec la loi de Aziz (Phys. Rev. B 62 (2000) 1406). La solidification d'un métal pur (Au) par DM a permis de calculer (Fig. 3c) l'anisotropie du coefficient cinétique qui relie le sous-refroidissement à la vitesse de l'interface (Phy's. Rev, E 65(2002) 04105). En collaboration avec A. Karma et M. Asta, cette étude est actuellement étendue au cas de potentiels réalistes (EAM) décrivant des alliages métalliques (Al-Cu).*

Dendrites : Nous avons engagé l'étude de la formation de la microstructure dendritique colonnaire, ce qui inclut la formation de la zone solide-liquide pâteuse.

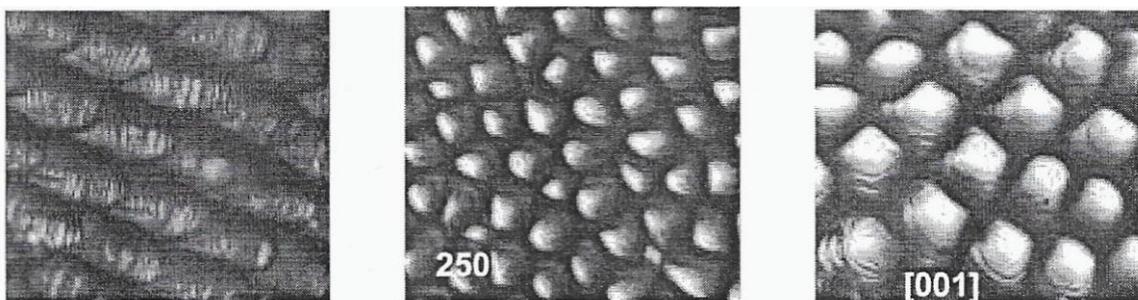


Figure 4. Vue de dessus de l'interface durant la solidification colonnaire montrant que la microstructure dendritique et la visibilité dépendent fortement de l'orientation du grain solide.

La Figure 4 est représentative de ce que l'on observe sur un échantillon polycristallin en vue de dessus. Le premier résultat est que, avec un éclairage suivant l'axe, il s'avère nécessaire d'orienter la croissance des dendrites parallèlement à l'axe du creuset par croissance sélective d'un grain bien orienté. Nous travaillons donc sur une méthode d'élimination de grains par fusion locale. La caractérisation des paramètres géométriques d'un réseau de dendrites [001] sera un des objectifs majeurs de l'étude des systèmes modèles transparents.

IV. Influence de la convection

La convection naturelle module le front de solidification. La macroségrégation chimique associée crée une variation à grande échelle du niveau d'instabilité morphologique (proportionnel à la concentration locale en soluté) sur l'interface.

Microstructures de solidification localisées : La situation idéale d'une microstructure étendue uniforme sur toute l'interface solide - liquide est bouleversée lorsque le paramètre de contrôle varie sur le front de croissance. Chen et al. ont prédit que l'interaction dynamique entre la solidification et des mouvements convectifs à grande échelle devant l'interface pouvait conduire à la localisation de l'instabilité morphologique là où les courants liquides convergent. C'est ce que nous avons pu pour la première fois observer pour divers modes de convection (Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 166105) grâce aux méthodes in situ (Meas. Sci. Technol. 11 (2000) 66) mises au point pour les systèmes transparents. Lorsque la solidification de l'alliage succinonitrile - 02% pds acétone est démarrée sur un talon solide fin, la force motrice de la convection est au début liée au rejet de soluté. Balayée par les courants liquides, l'acétone rejetée est accumulée aux parois des cellules de convection, millimétriques de type "outward hexagonal flow". Nous avons déterminé par interférométrie la forme macroscopique de l'interface solide - liquide (Fig. 11). L'instabilité morphologique est localisée à ces parois (Fig. 5a), ce qui visualise les cellules de convection solutale. Avec le temps, ou directement pour un talon solide de départ épais, la force motrice de la convection devient le gradient radial de température créé par le flux de chaleur latente vers la paroi conductrice du creuset. Le courant liquide advecte l'acétone vers centre, d'où une instabilité morphologique localisée de type "focus" (Fig. 5d).

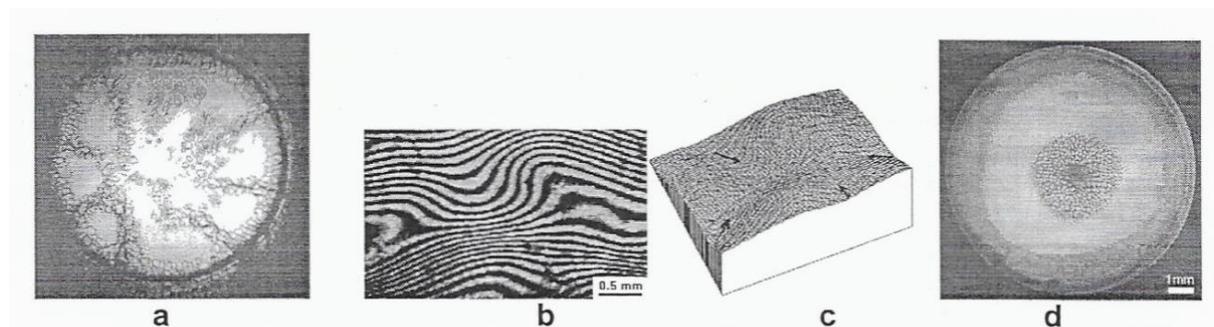


Figure 5. - a) Instabilité localisée de type "outward hexagonal flow", - b) interférogramme et -c) modulation macroscopique 3D de l'interface solide-liquide par la convection d'origine solutale après 67 min de croissance (talon solide fin, $V = 1,5 \mu\text{m/s}$). - d) Instabilité localisée de type "focus flow" (talon épais, $V = 2,5 \mu\text{m/s}$). Succinonitrile -0,2% pds acétone.

Microstructure dendritique localisée : Sur l'alliage Al—1,5% pds Ni, des phénomènes similaires de couplage microstructure - convection conduisent à la localisation (clustering) des dendrites, L'accumulation du soluté, en périphérie de l'échantillon dans ce cas, fait régresser les pointes des dendrites jusqu'à ce que le front eutectique l'emporte car sa température de croissance devient la plus élevée.

Etude de l'hydrodynamique : Les expériences révélant d'importants mouvements de convection dus aux gradients radiaux de température, nous avons introduit ces gradients dans nos simulations (J. Crystal Growth 244 (2002) 108). Les résultats montrent que, en dessous du seuil de convection, le front de solidification ne reste pas plan. La chaleur latente libérée lors de la solidification et la différence de conductibilité entre le liquide et le solide induisent une interface convexe (ou concave), dont la hauteur est fonction de différents paramètres liés aux dimensions du four et du creuset, à la vitesse de tirage et aux propriétés thermiques de l'alliage (Fig. 6a,b).

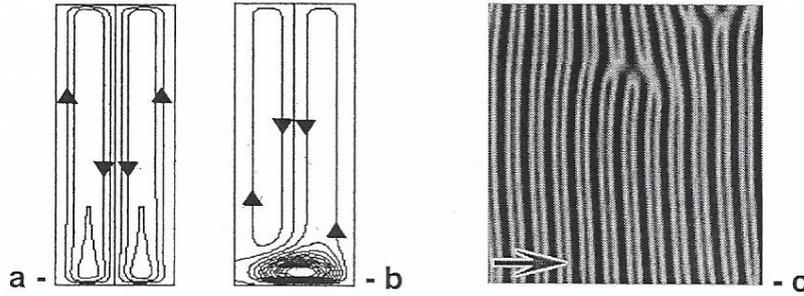


Figure 6. Mouvement du fluide pour un gradient thermique radial nul (a) et non nul (b). -c) Structure en forme de bandes.

Effets de la convection sur la microstructure interfaciale : L'influence d'un flux de cisaillement imposé dans la phase liquide sur la solidification 3D a été analysée, en collaboration avec K. Kassner (projet PROCOPE). L'évolution des structures cellulaires est simulée en utilisant une équation asymptotique (Pins. Rev. E 63 (2001) 66301, 66302). Les systèmes considérés sont assez étendus pour une description statistique et une comparaison directe avec l'expérience. Un nouveau mode de croissance en bandes perpendiculaires au courant est mis en évidence par une analyse linéaire de stabilité. Le flux est déstabilisant pour une interface plane et il fait dériver l'interface dans la direction qui lui est opposée (Fig. 6c). A flux modéré, ce mode permet notamment d'augmenter l'ordre des structures de croissance. Lorsqu'il est fort, le flux domine. La compétition entre les deux régimes conduit à des phénomènes nouveaux, comme la transition de la symétrie d'un réseau de cellules, d'hexagonale à rhomboédrique.

Contrôle vibrationnel de la convection : Avec le concours du Support Group de l'ESA (B. Rota ; T. Lyubimova,) pour la théorie et l'aide aux choix des paramètres, nous avons abordé le contrôle des courants convectifs dans le liquide par l'application de vibrations extérieures. Sur l'alliage Al -3,5 % pds Ni optimisé du point de vue de la porosité de la zone pâteuse (dendrites solides \pm liquide) (Fig. 7), l'étape actuelle consiste à essayer de supplanter la convection naturelle, dominante à basse vitesse de croissance, par des courants "façonnés" grâce au système de vibration axiale (amplitude $a \leq 1\text{mm}$, fréquence $f : 1- 50\text{ Hz}$) que nous avons d'installer sur le dispositif de solidification Bridgman spécifiquement conçu.

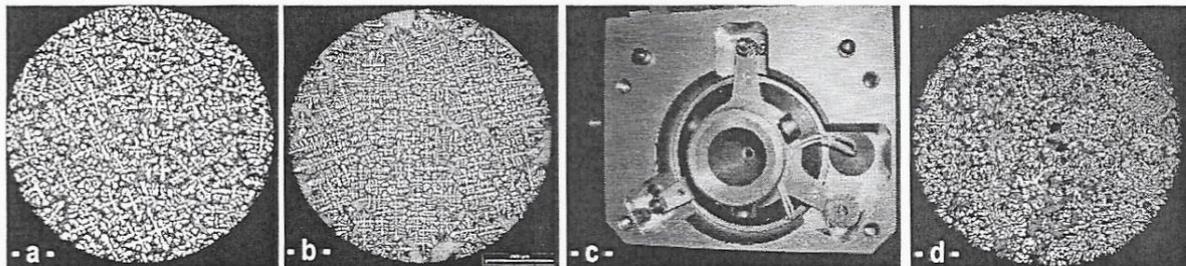


Figure 7. Al - 3,5 % pds Ni - $\varnothing 8\text{ mm}$: -a) Réseau dendritique régulier quand la convection naturelle est secondaire - $1g$, $V = 9,4\ \mu\text{m/s}$, -b) Clustering par la convection - $1g$, $V = 7,2\ \mu\text{m/s}$ -c) Dispositif électromécanique de vibration axiale (accélération vibrationnelle $g_{\text{vib}} = a.(2\pi f)^2$), -d) Microstructure "brisée" par vibration, $g_{\text{vib}} = 2,6g_0$.

Ce travail se poursuivra dans les années prochaines, en particulier par une étude comparative vibrations/champ électromagnétique pour le contrôle de l'hydrodynamique (collaboration avec EPM-Grenoble et ACCESS, Aix-la-Chapelle). Dans le cadre de la continuation du projet CETSOL, un programme expérimental a été établi (croissance dendritique colonnaire, transition colonnaire-équiaxe, croissance équiaxe) qui fera appel au MSL (Materials Science Laboratory) de l'ESA pour les expériences en microgravité à bord de la Station Spatiale Internationale.

V. Dendrite libre : étude du facettage par la méthode du champ de phase

Dans l'approche numérique du champ de phase introduite par A. Karma, l'interface est vue comme une zone d'épaisseur W finie dans laquelle le champ de phase ϕ passe continûment de la valeur $+1$ (solide) à la valeur -1 (liquide). Les équations physiques sont retrouvées dans la limite $W \rightarrow 0$. Les simulations numériques consistent à résoudre les équations d'évolution du champ. Cette approche permet de décrire un grand nombre de situations expérimentales, 2D comme 3D. Expérimentalement, des dendrites facettées ont été observées. Les singularités de l'énergie de surface correspondant aux orientations de facettes peuvent être approximées autant que nécessaire par des "arrondis" puis introduites dans le modèle du champ de phase. La convergence de notre approche étant démontrée pour des formes d'équilibre, nous avons étudié la croissance libre de dendrites dans un bain fondu en surfusion.

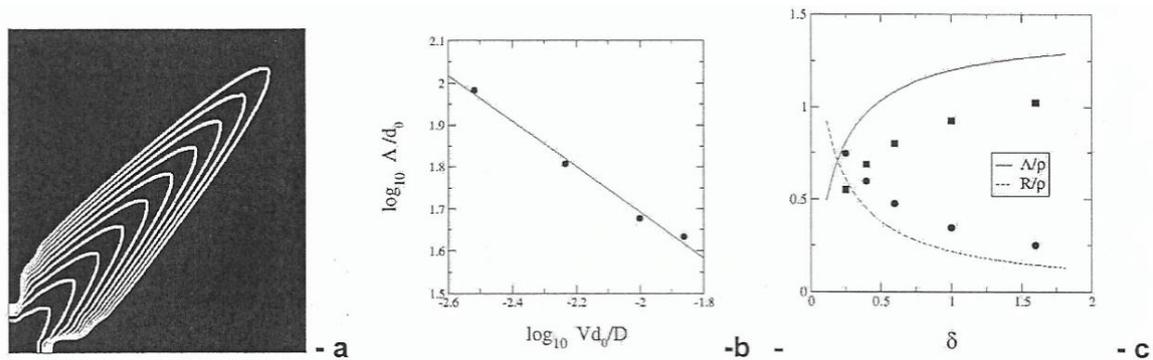


Figure 8. -a) Croissance dendritique d'un cristal partiellement facetté à partir d'un liquide pur (simulation numérique de champ de phase). - b) Vérification de la loi $\lambda \sim 1/\sqrt{V}$. - c) Comparaison des résultats de la simulation champ de phase (symboles) avec les prédictions théoriques (courbes).

La simulation donne des formes très proches des formes théoriques (Fig. 8a). Le régime de croissance stationnaire est fonction de l'anisotropie. La pointe de la dendrite adopte une forme comparable à la forme d'équilibre. Les résultats de la simulation champ de phase sont en accord avec la loi d'échelle $\Lambda \sim V^{-1/2}$ observée expérimentalement, où Λ est la longueur de facette et V la vitesse de croissance (Fig. 8b). En outre, il ressort que la variation de V et Λ avec δ est relativement bien prédite par une théorie analytique approchée d'interface abrupte (Fig. 8c). Cette approche est en cours d'extension à la solidification dirigée d'alliages binaires.

FRONTS DE SOLIDIFICATION

Gabriel FAIVRE, Silvère AKAMATSU, Sabine BOTTIN-ROUSSEAU

Groupe de Physique des Solides, UMR 7588, 2 place Jussieu, Tour 23, 75251 Paris

1. Rappel des objectifs

Les fronts de solidification des alliages subissent, au cours de leur propagation, des instabilités conduisant à la formation de structures non-linéaires hors d'équilibre (patterns) à l'échelle de la dizaine de μm lorsque la vitesse de propagation est de l'ordre du ms^{-1} . Ces morphologies sont concomitantes d'une modulation de la concentration des éléments d'alliage ("microségrégations") et des défauts de réseau. Cette structuration dynamique est d'un grand intérêt fondamental (physique non-linéaire) et d'une grande importance industrielle (microstructures des matériaux). Les phénomènes en jeu sont complexes et mal connus. La seule méthode expérimentale satisfaisante est l'observation in situ en temps réel du front dans son ensemble, ce qui n'est actuellement applicable qu'à des systèmes transparents observés par microscopie optique. De plus, l'interprétation des observations nécessite de les confronter continuellement aux résultats de simulations numériques dynamiques. Face à cette complexité, il convient d'aller, autant que faire se peut, du plus simple au plus compliqué, c'est-à-dire d'étudier la dynamique sans convection dans le liquide avant la dynamique en présence de convection, et la dynamique de fronts à une dimension (1D) avant celle de fronts 2D.

Durant dix années environ, nous avons étudié au sol (entre autres choses) la dynamique de la croissance eutectique d'alliages binaires transparents en échantillons minces ($\sim 10 \mu\text{m}$ d'épaisseur) dans lesquels la convection est bloquée et le front quasi 1D. Un solide eutectique binaire résulte de la croissance couplée de deux phases cristallines de symétries et concentrations différentes (appelées α et β plus bas), croissance gouvernée par l'échange de soluté entre α et β par diffusion dans le liquide en avant du front. Les fronts de ce type possèdent un état stationnaire périodique 1D consistant en une alternance régulière de lamelles α et β . Nous avons étudié en détail les instabilités de ces fronts, et avons ainsi pu répondre à plusieurs questions « historiques » de la solidification eutectique [M. Ginibre, 1995]. Nos résultats ont été corroborés par des simulations numériques d'autres auteurs, et leur validité reconnue par la communauté scientifique [G. Faivre, 1995 ; S. Akamatsu, 1997 ; G. Faivre, 2002]. Une question brûlante est maintenant de savoir ce qui, de ces résultats, est transposable aux fronts 2D des échantillons massifs.

Dans la période qui concerne ce rapport, nous avons poursuivi nos études en échantillons minces et nous avons démarré la construction de dispositifs d'observation en temps réel de fronts eutectiques d'échantillons massifs dans la perspective d'effectuer de telles observations en microgravité. Simultanément M. PLAPP (LPMC, Polytechnique) et A. KARMA (Boston), ont développé des techniques de « champ de phase » quantitatives permettant d'effectuer des simulations 3D correspondant à nos expériences futures.

2. Echantillons minces

2.1 Cinq thèmes nouveaux

Cinq thèmes nouveaux ont été explorés. Ce sont : 1- les eutectiques ternaires [Akamatsu, 2000] ; 2- les transitoires initiaux [Akamatsu, 2001] 3- les défauts de réseau [Bottin- Rousseau, 2002] ; 4- la cellulation des interfaces facettées [Börzsönyi, 2001] ; 5- l'effet sur la croissance eutectique d'une courbure des isothermes [non publié]. Chacune de ces études a apporté une foison d'observations nouvelles que nous ne pouvons énumérer ici.

2.2 Stabilité des eutectiques lamellaires au voisinage du sous-refroidissement minimum

Nous avons tout récemment résolu le dernier problème historique de la croissance eutectique 1D. En 1966, JACKSON et HUNT avaient calculé le sous-refroidissement moyen ΔT d'un front eutectique stationnaire (Fig. 1) en fonction de l'espacement lamellaire λ et de la vitesse de croissance V , et trouvé qu'à V fixé, ΔT présente un minimum à une certaine valeur λ_m de λ (Fig. 2). Conjecturant que les lamelles croissent perpendiculairement à l'enveloppe du front lorsque celui-ci se déforme ("conjecture de Cahn"), ils avaient avancé que λ_m est aussi la limite

de stabilité à petit λ . On sait maintenant qu'ils supposaient en fait que λ_m est le seuil d'instabilité d'Eckhaus λ_E de la microstructure lamellaire³. Cette conjecture n'avait jamais pu être testée expérimentalement, car les variations de $\Delta T(\lambda)$ sont très petites ($<10^{-3}K$). Nous avons réussi pour la première fois une mesure in situ de ΔT et avons pu prouver que l'état lamellaire reste en réalité stable loin en dessous de λ_m (Fig. 2), invalidant les hypothèses communes, et mettant en évidence des phénomènes nouveaux. M. PLAFP a atteint la même conclusion par le calcul [Akamatsu, 2002].

La dynamique de réarrangement de la microstructure lorsque λ est plus petit que λ_m est également très intéressante à étudier. En général, elle se fait par invasion de la microstructure instable par la structure stable. Il existe des hypothèses théoriques fameuses concernant la sélection de la vitesse dans ce type d'invasion ("stabilité marginale" de LANGER et col.) que nos observations contredisent [Akamatsu, à paraître].

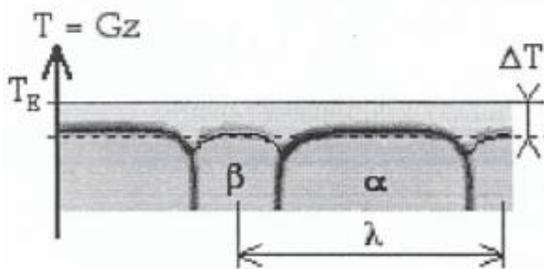


Figure 1 Front eutectique lamellaire. $CBr_4-C_2Cl_6$, $V = 0.5 \mu m s^{-1}$. Définition du sous-refroidissement moyen du front ΔT . T_E : température eutectique (coexistence des trois phases à l'équilibre). G : gradient thermique.

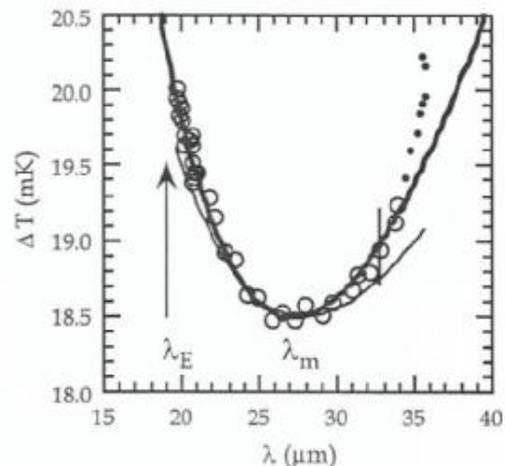


Figure 2 ΔT et λ : voir ci-contre. Symboles: mesures. λ_E : seuil d'instabilité observé. Courbe: loi de Jackson et Hunt. Dans cette expérience, $\lambda_E \approx 0.8 \lambda_m$.

3. Echantillons massifs. Fronts eutectiques lamellaires 2D

3.1 Effets 2D intrinsèques

Lors du passage de 1D à 2D, les degrés de liberté liés aux rotations du plan lamellaire autour de l'axe de croissance sont libérés. La dynamique est donc changée. De plus, il faut s'attendre à des effets d'anisotropie cristalline plus importants à 2D qu'à 1D [S. Akamatsu, 2001b]. Notre but premier est d'étudier ces changements intrinsèques (c'est-à-dire indépendants de la convection dans le liquide). En bref, il s'agit de refaire en échantillons épais ce que nous avons fait avec succès en échantillons minces. L'intérêt est double théorique (c'est un sujet presque vierge d'un point de vue fondamental) et pratique (les alliages industriels sont généralement élaborés sous forme massive).

3.2 Construction d'un montage au sol

Des dispositifs permettant la visualisation de fronts cellulaires-dendritiques 2D existent à Marseille et à Aix-la-Chapelle, mais ne peuvent être appliqués aux eutectiques parce que : 1- la taille de l'entité de base eutectique (paire de lamelles) est de quelques μm seulement 2- les dénivellations par rapport au front plan sont très petites ; 3- on ne peut pas éclairer le front à travers le solide, qui est biphasé. Compte tenu de ces contraintes, les principes que nous avons retenus pour la construction du nouveau dispositif sont : 1- l'illumination rasante ; 2- l'observation oblique en fond noir à l'aide d'un microscope extérieur à l'échantillon (fig. 3). Un montage expérimental a été réalisé suivant ces principes. Le microscope est du type "long-distance" (Questar). L'inclinaison de l'axe d'observation et la réfraction de la lumière par le liquide ($n \approx$

³ Une faible variation spatiale de λ relaxe vers λ uniforme selon une équation de diffusion $\partial_t \lambda = D_\phi(\lambda) \partial_{xx} \lambda$. Il y a instabilité d'Eckhaus lorsque D_ϕ est négatif et que, donc, les modulations de λ s'amplifient spontanément.

1.6) font que nous observons une image du front réduite selon l'axe y d'un facteur $w/e = \cos\theta \tan\theta'$, où $\sin\theta = n \sin\theta'$ (cf. encart de la fig. 3). Nous avons mesuré w/e en fonction de θ et vérifié qu'il obéit bien à cette formule. Ce rapport est maximum pour $\theta_m \approx 50^\circ$, et vaut environ 0,28.

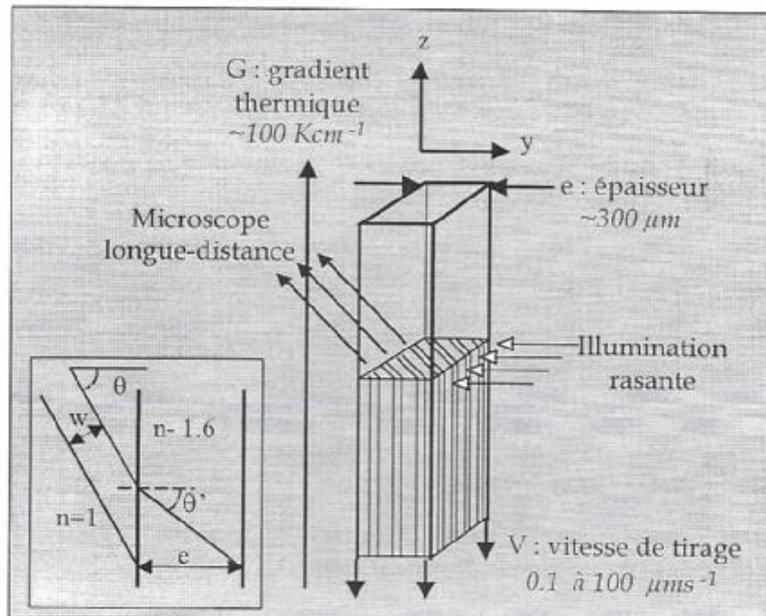


Figure 3. Schéma du dispositif d'observation d'échantillons eutectiques massifs. Encart : trajets optiques.

Au début de chaque expérience, le microscope est placé en orientation transverse ($\theta = 0$) pour vérifier que le front est perpendiculaire à l'axe de tirage, c'est-à-dire que le gradient thermique n'a pas de composante transverse significative. Le microscope est ensuite progressivement incliné, tout en étant déplacé pour garder la même région de l'échantillon dans le champ. Cette manipulation est délicate, et devra être rendue plus facile par la suite. L'éclairage est réalisé à l'aide d'une source linéaire. Son réglage (positionnement et inclinaison de la source) reste délicat, et devra être amélioré. Néanmoins, le montage est opérationnel pour l'essentiel, comme l'attestent les résultats préliminaires obtenus (Fig. 4). Des campagnes d'observation systématiques vont pouvoir commencer.

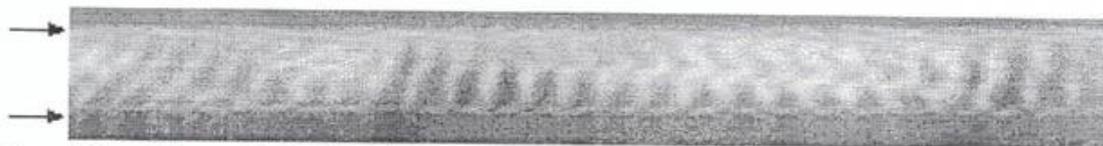


Figure 4. Vue oblique en fond sombre d'un front eutectique de $CBr_4-C_2Cl_6$. Flèches : lignes de contact du front avec les plaques de verre. Epaisseur d'échantillon : $100 \mu m$. Vitesse de tirage : $1 \mu m s^{-1}$. La morphologie en zigzag des lamelles est une instabilité morphologique spécifiquement 2D. Non publié.

3.3 Perspective d'expérience embarquée

Une étude de phase-zéro a été réalisée en collaboration avec un groupe d'ingénieurs du CNES animé par F. GONZALEZ [Rapport d'étude DSO/PASO/N°2002-005].

3.4 Test de nouveaux alliages transparents modèles

Avec T. BÖRZSÖNYI (Budapest), nous avons poursuivi l'étude de la solidification directionnelle d'alliages transparents facettés. D'autre part, nous avons exploré une série de nouveaux systèmes transparents dans plusieurs buts : 1- trouver des substituts à $CBr_4-C_2Cl_6$ au cas où ce dernier s'avérerait incompatible avec les normes de sécurité, 2- trouver des systèmes se prêtant mieux à l'étude de la transition lamelles-fibres ; 3- dans le cadre du projet ESA « SETA » (animateur : S. REX, Aachen), trouver des systèmes eutectiques transparents ternaires

présentant un point invariant ; 4- élargir nos recherches au cas des eutectiques dont l'une des phases solides est facettée [résultats non publiés].

4. Publications citées

G. Faivre, J. Cryst. Growth 166, 29 (1996) [9ème ICCG, La Haye, Juil. 1995]. *Morphologica instabilities of lamellar eutectic growth front A survey of recent experimental and numerical results.*

M. Ginibre, S. Akamatsu, and G. Faivre, Phys. Rev. E **56**, 780 (1997). *Experimental determination of the stability diagram of a lamellar eutectic growth front.*

S. Akamatsu and G. Faivre, Annales de Physique **22**, C2-39/02-46 (1997). (5th JFMSS, Sapporo, Oct. 1997). *Morphology diagrams in directional solidification of binary alloys.*

S. Akamatsu, and G. Faivre, Phys. Rev. E **61**, 3757 (2000). *Travelling waves, two-phase fingers and eutectic colonies in thin-sample directional solidification of a ternary eutectic alloy.*

S. Akamatsu, S. Moulinet and G. Faivre, Metall. Mater. Trans. **32A**, 2039 (2001a). *The formation of lamellar eutectic grains in thin samples.*

S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau et G. Faivre, J. Phys IV 11, **127** (2001 b) [Journées «Sciences de la Matière et Microgravité », Paris, Mai 2001]. *La dynamique de solidification des eutectiques lamellaires des échantillons minces aux systèmes massifs.*

T. Börzsönyi, S. Akamatsu, and G. Faivre, Phys. Rev. E **65** 1702 (2001). *Dynamics of a faceted nematic-smectic B front in thin-sample directional solid.*

S. Bottin-Rousseau, S. Akamatsu, and G. Faivre, Phys. Rev. B **66**, 054102 (2002). *Formation of grain subboundaries during directional solidification below the cellular-bifurcation threshold.*

G. Faivre, 14 ACCG, Seattle (2002). *Stability of lamellar eutectic growth. Recent advances and future prospects.*

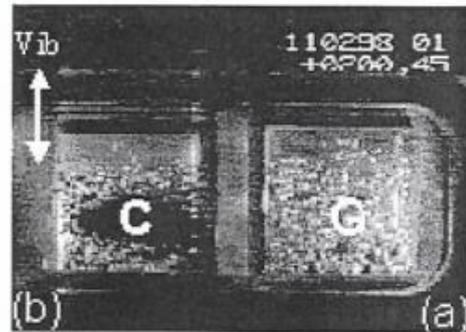
S. Akamatsu, M. Plapp, G. Faivre, A. Karma, Phys. Rev. E, **66** 30501 (2002). *Pattern Stability and Trijunction Motion in Eutectic Solidification.*

S. Akamatsu, M. Plapp, G. Faivre, A. Karma, soumis à Acta Met. (2002). *The stability of lamellar eutectic fronts close to the minimum-undercooling spacing.*

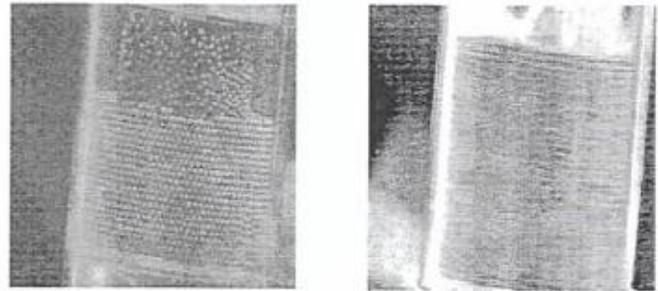
OBJETS FLOTTANTS

• Exemple d'acquis

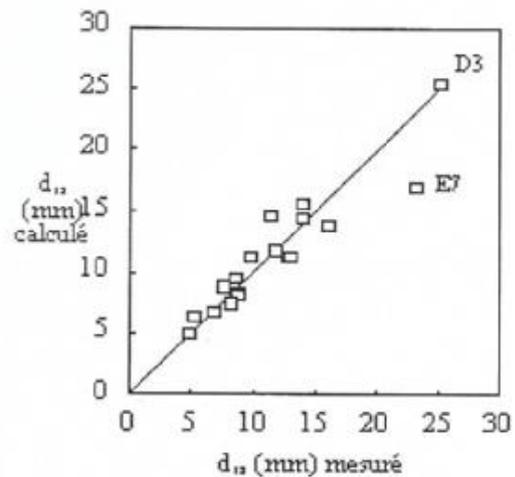
- Milieux granulaires secs sous vibration : condensation d'un milieu granulaire
 - si $\lambda \ll D$
 - le gaz granulaire n'existe qu'à l'état raréfié (régime de Knudsen)



- Suspensions magnétiques : structuration sous cisaillement d'un fluide de particules magnétiques



- Ecoulements diphasiques : évolution de la taille des bulles dans un écoulement turbulent en tube



CONVECTION, SOLIDIFICATION et CROISSANCE

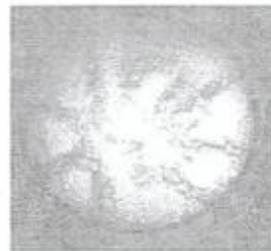
•Exemple d 'acquis

- Solidification d 'alliages transparents massifs

•Mécanisme d 'apparition d 'une structure lamellaire dans un alliage $Cbr_4-C_2Cl_6$

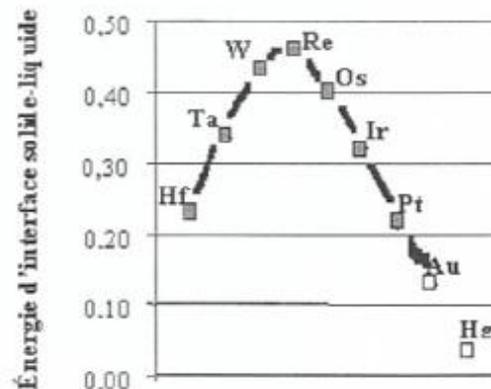


•Instabilité morphologique localisée



- Solidifications d 'alliages métalliques

•énergie interfaciale déduite de la mesure de la limite à la surfusion



•à faible vitesse, formation d 'une structure équiaxe orientée, au lieu d 'une structure mixte au sol

•les directions préférentielles des grains sont influencées par:

- le gradient de température
- les directions cristallographiques



COMBUSTION ET PHENOMENES REACTIFS



Une flamme de bougie, dont la forme allongée est bien caractéristique au sol, devient sphérique en l'absence de pesanteur

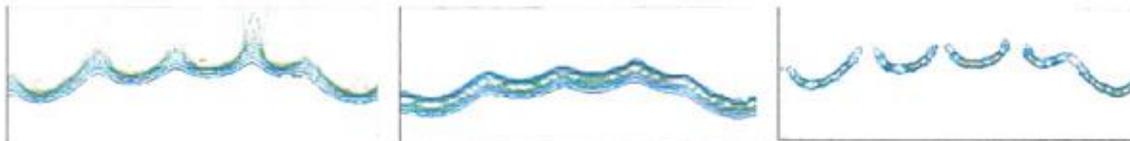
•Exemples d 'acquis:

- Exploration du problème d 'Emmons: géométrie et stabilité dans un courant convectif contrôlé.



- Vérification de la loi en D^2 du diamètre des gouttes en combustion
- Mesure du taux de combustion au voisinage des conditions critiques

- Modélisation numérique de la combustion de brouillards



CROISSANCE PHYSIQUE ET BIOPHYSIQUE

Sabine Bottin-Rousseau, Marc Georgelin, Alain Pocheau

Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (IRPHE)
49 rue Frédéric Joliot Curie, B.P. 146
13384 Marseille cedex 13

L'équipe croissance physique et biophysique de l'institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (IRPHE, UMR6594) a participé au GDR 2258 « Phénomènes de Transport et Transitions de Phase en Micropesanteur » par son activité centrée sur la solidification directionnelle en lame mince. En effet les phénomènes convectifs sont totalement inhibés dans cette géométrie quasi bidimensionnelle, ce qui permet de se placer dans des conditions de microgravité.

Plusieurs sujets ont été abordés, le problème du sous refroidissement de pointe, de la forme des cellules, de la limitation du domaine d'existence des cellules, et enfin l'auto-organisation sur un front de croissance courbé.

Sous-refroidissement et branches de solutions en croissance cristalline

La croissance cristalline directionnelle en lame mince permet une étude expérimentale simulant des conditions de microgravité par la suppression des effets convectifs. Les enjeux se situent à la fois dans le domaine fondamental de la dynamique d'un front de croissance obéissant à une équation de diffusion-advection-transition de phase, et dans le domaine de la solidification de matériaux de type alliages métalliques.

Dans le régime cellulaire ou faiblement dendritique, le système possède deux degrés de liberté, la forme de l'interface et sa position moyenne dans le gradient de température, c'est-à-dire le sous-refroidissement Δ de la pointe de cellule. Ces deux degrés de liberté sont librement ajustés par le système pour répondre aux contraintes imposées dans l'expérience, notamment la vitesse de tirage V , le gradient thermique, la concentration en soluté.

Des études théoriques avaient proposé plusieurs branches de solutions pour le front de croissance, qui se différencient notamment par leur valeur de Δ . La dépendance en vitesse de tirage que nous avons obtenue expérimentalement traduit en fait une absence de longueur caractéristique sur le front autre que la longueur de diffusion. Ce résultat, bien plus simple qu'escompté, montre que des modélisations pertinentes du phénomène de croissance restent à développer. Nous avons ensuite repris et poursuivi les différentes études théoriques pour prendre en compte l'effet de ces trois différentes branches de solutions (branche de type Saffman-Taylor, local constitutional supercooling, Brody-Bower-Flemings) sur l'amplification de perturbations à la pointe [A3].

Formes de pointe et de cellules en croissance cristalline

La forme de l'interface est un paramètre essentiel voire critique en croissance cristalline, tant vis-à-vis des instabilités que de la microségrégation induite dans la phase solide. Pour sa détermination, nous avons mis en évidence des grandeurs locales comme le rayon de courbure à la pointe. Toutefois, dans les régimes cellulaires, la longueur de diffusion et la largeur des cellules sont du même ordre (nombre de Péclet d'ordre unité). Par suite, les grandeurs locales ne suffisent pas : nous avons donc décrit plus globalement la forme cellulaire en fonction des trois paramètres essentiels de l'expérience. En particulier, une représentation synthétique de l'ensemble des formes observées a été obtenue sous la forme d'une famille à deux paramètres. Ceci constitue une donnée essentielle pour la validation des théories et simulations de croissance, et pour la compréhension de l'ajustement des formes dans ce système [B2, B3].

Limitation du domaine d'existence des cellules de croissance cristalline

L'étude des instabilités secondaires du réseau cellulaire de solidification directionnelle nous a amené à mettre en évidence les deux types d'instabilités limitant l'existence des cellules ou dendrites l'instabilité de disparition supprime les cellules les plus étroites, alors qu'une autre instabilité crée deux cellules à partir d'une seule trop large, le plus souvent par branchement latéral ou par « tip-splitting » [A2]. En déterminant les zones de l'espace des paramètres (vitesse- largeur de cellules) où interviennent ces instabilités, nous pouvons expliquer la variation particulière de la valeur moyennée de l'espacement des

cellules/dendrites avec la vitesse de solidification, fait observé depuis bien longtemps en métallurgie.

Auto-organisation sur un front de croissance courbé en croissance cristalline

En comparaison de la configuration idéale de croissance directionnelle, la croissance en milieu naturel ajoute souvent des perturbations stationnaires et à grande échelle sous la forme d'écoulements convectifs, de modulation de gradients de température ou de concentration. Est-il légitime de négliger ces perturbations pour la raison qu'elles sont faibles et de grande échelle ? Au contraire, peuvent-elles provoquer, par leur grand rayon d'action, des phénomènes jusque là ignorés ? Pour répondre à ces interrogations, nous avons considéré une configuration expérimentale induisant une courbure constante de l'interface [B1]. Celle-ci est créée simplement en déformant les isothermes par un découpage adéquat des conditions aux limites thermiques. Elle induit alors, dans le référentiel de l'interface, un écoulement apparent [A1].



Fig 1 : Front de croissance courbé. a) cellules étirées b) peu après, ces cellules se sont coupées.

Le rayon de courbure de l'interface, de l'ordre de 7mm, est grand devant la taille des cellules, typiquement 80 µm. C'est dire que la courbure est quasi imperceptible au niveau de chaque cellule (Fig.1a). Pour autant, elle s'avère de première importance envers leur comportement individuel et collectif. Des nucléations de cellules sont ainsi générées de manière répétitive (Fig.1b). Initialement décorréliées en temps et en espace, elles se synchronisent de manière surprenante aux temps longs: la dynamique de l'interface est alors auto-organisée (Fig.2a). Pour expliquer ce phénomène, la dynamique cellulaire a été modélisée par une équation d'advection-diffusion de phase non-linéaire. Ceci revient simplement à adjoindre à l'équation modèle des fronts plans un terme d'advection par l'écoulement apparent. Bien que de complexité minimale, ce modèle reproduit largement les observations (Fig.2b). Cela montre que la diffusion joue ici un rôle stabilisant analogue à celui opéré dans le mécanisme d'instabilité de Turing. Il en résulte un moyen simple et pratique d'ordonnement de la croissance

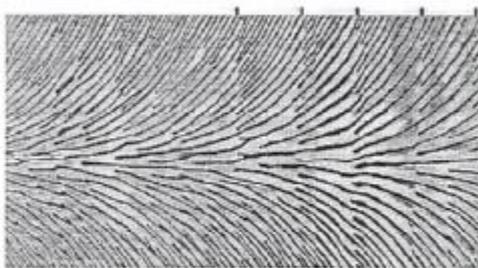


Figure. 2a

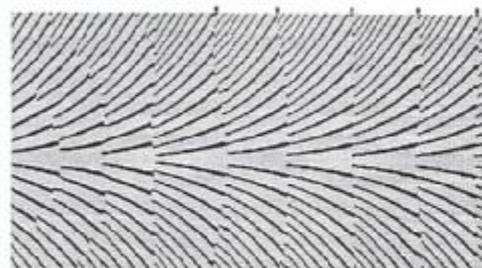


Figure.2b

Fig 2 : Diagrammes spatio-temporels du front de croissance. Le temps s'écoule de gauche à droite. Les lignes sombres représentent les trajectoires des sillons, les nouvelles lignes attestent donc de la création de cellules. Après une phase initiale désorganisée, les nucléations se synchronisent, on aboutit à une croissance auto-organisée.

INFLUENCE DES CHAMPS EXTERNES SUR LA SOLIDIFICATION

Thierry Duffar, Yves Fautrelle, René Moreau
Marie-Danielle Dupouy, Nathalie Mangelinck,
Carmen Stelian, Alina Mitric, Alexandru Ciobanas, Kader Zaïdat

EPM-CNRS, ENSHMG, BP 95, 38402 St Martin d'Hères
Phone 33(0)4 76 82 52 13, Fax 33 (0)4 76 82 52 49, thierry.duffar@inpg.fr

L'activité de recherche sur l'effet des champs externes, gravité et électro-magnétiques, sur les mécanismes de la solidification existait au laboratoire EPM (UPR 9033) (Francis Durand, Yves Fautrelle, René Moreau, Peter Lehmann). Elle a été récemment renforcée dans la continuité des recherches menées dans le cadre de l'accord CEA-CNRS « Gramme », suite à deux événements successifs, d'une part le départ de T. Duffar du CEA pour l'INPG et EPM (en 2000) et d'autre part l'arrêt brutal des activités du CEA sur l'étude de la solidification en microgravité. Suite à cet arrêt, M.D. Dupouy a également intégré EPM début 2002, des équipements (fours) ont été transférés ainsi que certains programmes de recherches. Entre-temps N. Mangelinck a été recrutée par le CNRS.

Le laboratoire EPM a décidé de continuer les recherches initiées au CEA sur les thématiques cristallogénèse et structure de grains, en les élargissant à l'effet des champs électromagnétiques. L'équipe a ainsi été introduite dans le GDR fin 2001. Les études concernent d'une part la croissance avec interface solide-liquide plane (pour applications de cristallogénèse) et avec une interface déstabilisée (applications en métallurgie). La démarche est la suivante :

- 1) Comprendre l'origine des structures de solidification et des défauts.
- 2) Déterminer les lois physico-chimiques qui les gouvernent.
- 3) En déduire les paramètres pertinents pour intervenir, tout particulièrement l'action de champs externes, électromagnétiques et de gravitation.
- 4) Appliquer ces connaissances à l'amélioration ou à la création de procédés.

Les études comprennent des expériences en micro-pesanteur et sous divers champs électromagnétiques, des simulations numériques des phénomènes physiques et leur comparaison. EPM a organisé une journée thématique du GDR « Influence des champs externes sur la ségrégation et la structuration en solidification : expériences et simulations », le 21 mars 2003.

Cristallogénèse

L'étude de l'effet de la gravité sur les ségrégations chimiques en cristallogénèse se poursuit. Les études soutenues, tant expérimentales que théoriques, des quelques 25 dernières années ont permis de clarifier l'effet de la convection naturelle sur le mécanisme de transport dans le soluté dans le cas des alliages dilués [1-4] (cristaux faiblement dopés). Cependant, dans le cas de la convection instationnaire (fluctuations de gravité, turbulence) et surtout dans le cas des alliages concentrés, les mécanismes restent hypothétiques. L'étude des ségrégations se poursuit donc suivant plusieurs axes :

- Développement de modèles de simulation numérique des échanges techniques, hydrodynamiques et solutaux et leur validation par comparaison avec des expériences spatiales ou au sol [5, 13]. Les résultats obtenus pour les alliages dilués sont bons et les modèles sont en cours d'extension aux alliages concentrés.

- Expériences au sol sur l'opportunité d'utiliser un piston se déplaçant avec l'interface, dans le liquide, pour contrôler la convection dans la couche limite. [9-10, 28-29]. Ces études, menées en collaboration avec V. Golyshev, Alexandrov, Russie, ont permis de montrer que des cristaux homogènes axialement pouvaient être obtenus.

- L'expérience SUIBSA (5^{ème} équipage de l'ISS, deuxième semestre 2002), en collaboration avec A. Ostrogorsky, RPI, USA, a utilisé le même principe pour tenter de s'affranchir de l'effet des fluctuations de gravité dans l'espace [26, 27, 32]. 7 échantillons ont été fondus, avec et sans piston, et ramenés au sol. Les résultats sont en cours d'exploitation.

- Un équipement en provenance du CEA est en cours de modification pour permettre d'effectuer des expériences de croissance d'alliages semiconducteurs concentrés sous champ magnétique alternatif, afin de s'affranchir de la très forte courbure de l'interface qui résulte du rejet de soluté [31].

Un autre aspect lié à la croissance cristalline dans l'espace est le phénomène de démouillage. Il s'agit du décollement observé entre l'échantillon et le creuset lorsque la solidification se produit en microgravité. La qualité structurale, dans le cas des cristaux est remarquablement améliorée. L'explication du phénomène fait essentiellement intervenir l'angle de mouillage entre le liquide et le creuset et l'absence de pression hydrostatique. Cette compréhension a permis d'imaginer un procédé permettant d'obtenir cet effet au sol. Les recherches récentes ont porté sur l'application de cette technique à la croissance de CdTe, un cristal semiconducteur très sensible aux effets du creuset. On a montré qu'il a été possible d'obtenir des monocristaux de façon reproductible, au sol, par cette méthode [Un contrat avec l'ESA devrait permettre de reprendre dès 2003 l'étude théorique de ce phénomène de démouillage, en particulier la stabilité de la croissance tant au sol que dans l'espace.

Métallurgie-Matériaux

Notre action dans le domaine de la métallurgie est centrée sur l'influence de la convection naturelle et forcée sur la qualité des matériaux métalliques lors de leur solidification. Notre objectif général est d'étudier l'influence de la convection naturelle et forcée sur les structures de grains et certains types de défauts apparaissant lors de la solidification d'alliages métalliques, à savoir les macro et méso ségrégations. Nous développons d'une part un modèle numérique de prévision des macro et méso ségrégations [11, 14, 19] et nous proposons des expériences de solidification d'alliages métalliques comparatives en microgravité et au sol, qui font suite au programme expérimental développé par M.D. Dupouy et D. Camel, dans le cadre du CEA Grenoble [12,15 - 18]. La convection forcée est obtenue avec un brasseur électromagnétique (champ magnétique alternatif). En approche complémentaire de la modélisation numérique, nous proposons une approche analytique et en lois d'échelles du couplage entre l'hydrodynamique et la zone pâteuse mi-solide mi-liquide, résultant de la croissance dendritique.

L'enjeu industriel réside dans la possibilité de maîtriser la structure métallurgique ainsi que les défauts lors de la phase de solidification. Une structure métallurgique contrôlée permet de donner certaines propriétés d'usage au matériau solidifié. Cette structure peut être soit colonnaire (grain solides allongés) ou équiaxe (ensemble de grains solides sans direction privilégiée), ou encore les deux à la fois lorsque se produit la transition colonnaire-équiaxe" (CET). Parmi les défauts les plus importants, il faut citer les " ségrégations ", c'est-à-dire les inhomogénéités de composition des éléments d'alliages au sein du matériau solide, qui se produisent à l'échelle mésoscopique de plusieurs dendrites (canaux ségrégés) et/ou à l'échelle du lingot (macroségrégation).

Les projets engagés qui visent à une meilleure compréhension du phénomène de transition du régime colonnaire à équiaxe et de la croissance des grains équiaxes sont les suivants :

- 1) Utilisation d'un champ magnétique glissant afin de créer un brassage forcé dans le bain fondu lors de la solidification sous gradient d'alliages d'Al-Ni affinés ou non (particules AT5B). Ce projet fait l'objet d'un travail de thèse (K. Zaïdat).*
- 2) Utilisation de vibrations afin de contrôler les écoulements dans le bain fondu au cours de la solidification d'Al-Ni affiné sous gradient en collaboration avec le L2MP qui est maître d'oeuvre. Ce projet fait l'objet du travail d'un étudiant de DEA (L. Sylla).*
- 3) Expérience «benchmark» de solidification dirigée à gradient thermique et vitesse de solidification variable, mise au point par G. Quillet dans le cadre de sa thèse soutenue récemment, qui a pour objectif de valider les modélisations numériques en cours sur les macro et méso ségrégations ainsi que les modèles numériques de prédiction de croissance de grains, développés à l'Ecole des Mines de Nancy (LSG2M)*
- 4) Expérience « benchmark» de solidification « isotherme») d'un alliage base Aluminium affiné. On s'intéressera à caractériser d'une part les microstructures de solidification. Pour ce faire, un dispositif de trempe des cristaux en croissance permet de mieux étudier la morphologie de ces cristaux (globulaires ou dendritiques) en fonction de la vitesse de refroidissement, et d'obtenir des données expérimentales sur le mode de croissance équiaxe.*

Les quatre projets s'inscrivent dans le cadre des MAPs CETSOL et MICAST.

LISTE GENERALE DES PUBLICATIONS



La liste des publications qui suit est présentée par équipe et par thème et suit l'ordre de présentation des rapports.

Les publications se divisent en trois parties pour chaque équipe du GDR :

- A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture**
- B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture**
- C. Autres publications**

LISTE GENERALE DES PUBLICATIONS



La liste des publications qui suit est présentée par équipe et par thème et suit l'ordre de présentation des rapports.

Les publications se divisent en trois parties pour chaque équipe du GDR :

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture

C. Autres publications

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture.

- A1. Beysens D., Garrabos Y. *The phase transition of gas and liquids*. Physica A 2000, **281**, p. 361-380.
- A2. Beysens D., Forgacs G., Glazier J. A. *Cell sorting is analogous to phase ordering in liquids*. PNAS 2000, **97**, p. 9467-71.
- A3. Nikolayev V., Beysens D., Lagier G.-L., Hegseth J. *Growth of a dry spot under a vapor bubble at high heat flux and high pressure*. Int. J. Heat & Mass Transfer 2000, vol. **44/18**, p. 3499-3511.
- A4. Wunenburger R., Garrabos Y., Chabot C., Beysens D. and Hegseth J. *Thermalization of a two-phase fluid in low gravity : heat transfer from cold to hot*. Phys. Rev. Lett. 2000, **84**, p. 4100-4103.
- A5. Wunenburger R., Chatain D., Garrabos Y., Beysens D. *Magnetic compensation of gravity forces in (p-) Hydrogen near its critical point; application to weightlessness conditions*. Phys. Rev. 2000, **E 62**, p. 469-476.
- A6. Beysens D. and Garrabos Y. *Near-critical fluids under microgravity : status of the Eseme program and perspectives for the ISS*. Acta Astronaut. 2001, vol. **48**, n° 5-12, p. 629-638.
- A7. Beysens D. *Near-critical fluids under microgravity : Highlights and perspectives for Europe*. J. de Physique IV, 2001, **11**, p. Pr6-7 - Pr6-22.
- A8. Beysens D., Nikolayev V., Garrabos Y., Chabot C., Delville J.-P., Hegseth J. *Phase Transition Phenomena in a Radial Force Field in CO₂ under Low Gravity*. Int. J. Thermophys. 2001, (in press).
- A9. Evesque P., Beysens D., Garrabos Y. *Mechanical behavior of granular gas and heterogeneous fluid systems submitted to vibrations under microgravity*. J. de Physique IV, 2001, **11**, p. Pr6-49 - Pr6-56.
- A10. Garrabos Y., Lecoutre-Chabot C., Hegseth J., Nikolayev V.S., Beysens D., Delville J.-P. *Gas spreading on a heated wall wetted by liquid*. Phys. Rev. E, 2001, vol. **64**, 051602, p. 1-10.
- A11. Garrabos Y., Lecoutre C., Beysens D., Nikolayev V. S., Dejoan A., Wunenburger R. *Piston effect in a supercritical fluid sample cell : a phenomenological approach of the mechanisms*. J. de Physique IV, 2001, **11**, Pr6-23 - Pr6-34.
- A12. Lyubimov D., Lyubimova T., Meradji S., Roux B., Beysens D., Garrabos Y., Chatain D. *2D unsteady motion and deformation of a gaseous bubble in a vibrating liquid at zero gravity*. J. de Physique, 2001, **11**, Pr6-91 - Pr6-98.
- A13. Polezhaev V., Emelianov V., Ivanov A., Kalmykov A., Beysens D., Garrabos Y. *An Experimental Study of the Effect of Vibration on Heat Transport in a Supercritical Fluid under Microgravity Conditions*. J. of Cosmic Research 2001, **N 2**, (in press)
- A14. Beysens D. and Garrabos Y. *Critical and supercritical fluids and related phenomena*. In « Physics of Fluids in Microgravity. Ed. R. Monti (Taylor & Francis, London, 2001) pp. 223-262.
- A15. Andrieu C., Beysens D., Nikolayev V.S., Pomeau Y. *Coalescence of sessile drops*, J. Fluid. Mech., 2002, **453**, 427 - 438.
- A16. Beysens D., Y. Garrabos, Nikolayev V. S., C. Lecoutre, J.-P. Delville, and J. Hegseth *Liquid-vapor phase separation in a thermocapillary force field*, Europhysics Letters, 2002, **59** (2) , pp. 245 - 251.
- A17. Chatain D., Nikolayev V. S., *Using magnetic levitation to produce cryogenic targets for inertial fusion energy: experiment and theory*, Cryogenics, 2002, **42**, 253 - 261. Nikolayev V.S., Beysens D., *Relaxation of non-spherical sessile drops towards equilibrium*, Phys. Rev. E, 2002, **65**, 046135.
- A18. J. Hegseth, Y. Garrabos, V. S. Nikolayev, C. Lecoutre-Chabot, R. Wunenburger, D. Beysens, *Gas "wets" a solid wall in orbit*, Int. J. of Thermophysics, 2002, **23**, 89 - 101.
- A19. Wunenburger R., Garrabos Y., Lecoutre C., Beysens D., Hegseth J., Zhong F., Barmatz M. *Thermal response of a two-phase near-critical fluid in low gravity : strong gas overheating as due to a particular phase distribution*. Int. J. of Thermophysics, 2002, **23**, 103-115.
- A20. Beysens D., Nikolayev V. S., Y. Garrabos, *Vapor spreading and the boiling crisis*, J. Phys.: Condensed Matter, 2003, **15**, S435-S442.
- A21. Nikolayev V.S., A. Dejoan, Y. Garrabos & D. Beysens *Fast heat transfer calculations in supercritical fluids versus hydrodynamic approach*, Phys. Rev. E, 2003, **67**, 061202-1- 11.

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture.

- B1. Garrabos Y., Wunenburger R., Lecoutre C, Nikolayev V., Beysens D., Hegseth J. *Heat and Mass Transfer Phenomena in Two-phase Near-critical Fluid Observed in Microgravity*. In: *1st International Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Sciences and Biotechnology*,

- Sorrento (Italy), Sept. 10-15 2000. Eur. Space Agency [Spec. Publ.] ESA SP 2001, vol. **454**, p. 157-164
- B2. Lecoutre-Chabot C., Delville J.-P., Garrabos Y. and Beysens D. *Phase separation in gas and liquids in the absence of gravity : laser induces particular bubble growth*. In: *1st International Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Sciences and Biotechnology*, Sorrento (Italy), Sept. 10-15 2000. Eur. Space Agency [Spec. Publ.] ESA SP 2001, vol. **454**, p. 235-241.
- B3. Ivanov A. I., Kalmykov A. V., Polezhaev V. I., Emelianov V., Putin G. F., Garrabos Y., Beysens D. and Zwilling J. F. *An experimental study of the effect of controlled accelerations on transport phenomena in supercritical fluid. Organization, carrying out and preliminary results of the experiment with Alice-2 instrument onboard MIR station*. In: *Proceedings of the International symposium on International scientific cooperation onboard MIR, Palais des Congrès, Lyon, France, 19-21 mars 2001*. Ed. C. N. d. E. Spatiales. Toulouse: CNES, 2001, p. 283-289. ISBN.
- B4. Beysens D., Wunenburger R., Chatain D., Garrabos Y. *Magnetic Compensation of Gravitational Forces in (p-)Hydrogen Near its Critical Point: Application to Weightlessness Conditions*. *Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2000)*, Albuquerque, New Mexico, January 30 - February 3, 2000. Ed. M. S. El-Genk, AIP Conf. Proc. No. 504 (ISBN 1-56396-919), Springer-Verlag, New-York, 2000, pp. 902-908. CD-ROM Version, ISBN 156396-920-3
- B5. Beysens D., Nikolayev V., Garrabos Y., Lecoutre-Chabot C., Delville J. P., Hegseth J. *Phase Transition Phenomena in a Radial Force Field in CO₂ under Low Gravity*. *Proceedings of the 14th Symposium on Thermophysical Properties*, Boulder, Colorado, June 25-30, 2000. Eds. W. M. Haynes and R. A. Overfelt. Available at : <http://www.symp14.nist.gov/PDF/LOW02BEY.PDF>
- B6. Beysens D., Nikolayev V. S., Garrabos Y. *Coalescence of Sessile Drops*. *Proceedings of the 14th Symposium on Thermophysical Properties*, Boulder, Colorado, June 25-30, 2000, Eds. W. M. Haynes and R. A. Overfelt. Available at : <http://www.symp14.nist.gov/PDF/WET05BEG.PDF>
- B7. Beysens D., Garrabos Y. *The Phase Transition of Gas and Liquids*. *Proceedings of the Stat-Phys Taiwan 1999 Meeting*. *Publisheh in "Physica A (2000)".
- B8. Beysens D. and Garrabos Y. *Near-Critical Fluids under Microgravity : Status of the ESEME Program and Perspective for the ISS*. *Proceedings of the 51st International Astronautical Congress*, Rio de Janeiro, Brazil, October 2-6, 2000, IAF-00-J.3.04.
- B9. Beysens D., Nikolayev V., Garrabos Y., Lecoutre-Chabot C., Wunenburger R., Hegseth J. *New Developments in the Study in Low Gravity of Two-Phase Fluids Near Their Critical Point*. *Présenté au International School on Non-linear Problems of Hydrodynamical Stability*, Moscow (Russie), 13-20/2/2000.
- B10. Evesque P., Falcon E., Wunenburger R., Fauve S., Lecoutre-Chabot C., Garrabos Y., Beysens D. *Gas-Cluster transition of Granular Matter under Vibration in Microgravity*. *Proceedings of the First International Symposium on Microgravity Research & Applications in : Physical Sciences and Biotechnology*, Sorrento, Italy, September 10-15, 2000, Eur. Space Agency [Spec. Publ.] ESA SP 2001, vol. 454, p. 829-834.
- B11. Garrabos Y., Wunenburger R., Hegseth J., Lecoutre-Chabot C., Beysens D. *Critical Boiling Phenomena Observed in Microgravity*. *Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2000)*. Albuquerque, New Mexico, January 30 - February 3, 2000., Ed. M. S. El-Genk, AIP Conf. Proc. No. 504 (ISBN 1-56396-919), Springer-Verlag, New-York, 2000, pp. 737-743. CD-ROM Version, ISBN 156396-920-3
- B12. Garrabos Y., Le Neindre B., Wunenburger R., Lecoutre-Chabot C., Beysens D. *Universal Scaling-Form of the Equation of State of a Critical Pure Fluid*. *Proceedings of the 14th Symposium on Thermophysical Properties*, Boulder, Colorado, June 25-30, 2000., Eds. W. M. Haynes and R. A. Overfelt. Available at : <http://www.symp14.nist.gov/PDF/CRI02GAR.PDF> Published in International Journal of Thermophysics
- B13. Garrabos Y., Wunenburger R., Beysens D., Chabot C. *Influence of wetting and phase distribution on two-phase heat transfer in pure fluids near the critical point*. *Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2000)*, Albuquerque, New Mexico, January 30 - February 3, 2000. Ed. M. S. El-Genk, AIP Conf. Proc. No. 504 (ISBN 1-56396-919), Springer-Verlag, New-York, 2000, pp. 821-827, CD-ROM Version, ISBN 156396-920-3.
- B14. Hegseth J., Garrabos Y., Lecoutre-Chabot C., Wunenburger R., Nikolayev V., Beysens D. *Gas « wets » a solid wall in orbit*. *Proceedings of the 14th Symposium on Thermophysical Properties*, Boulder, Colorado, June 25-30, 2000. Eds. W. M. Haynes and R. A. Overfelt. Available at : <http://www.symp14.nist.gov/PDF/WET05HEG.PDF> Published in International Journal of Thermophysics
- B15. Nikolayev V. S., Beysens D., Hegseth J., and Garrabos Y. *Boiling Crisis as a Non-Equilibrium Drying Transition*. *Proceedings of the 14th Symposium on Thermophysical Properties*, Boulder, Colorado, June 25-30, 2000., Eds. W. M. Haynes and R. A. Overfelt. Available at : <http://www.symp14.nist.gov/PDF/WET10NIK.PDF>

- B16.** Wunenburger R., Garrabos Y., Lecoutre-Chabot C., Beysens D., Hegseth J., Zhong F., Barmatz M. *Thermal Response of a Two-Phase Near-Critical Fluid in Low Gravity : Strong Gas Overheating as due to a Particular Phase Distribution. Proceedings of the 14th Symposium on Thermophysical Properties*, Boulder, Colorado, June 25-30, 2000, Eds. W. M. Haynes and R. A. Overfelt. Available at : <http://www.symp14.nist.gov/PDF/LOW02WUN.PDF> Published in International Journal of Thermophysics.
- B17.** Wunenburger R., Beysens D., Lecoutre-Chabot C., Garrabos Y., Evesque P., Fauve S. *Oscillatory Accelerations on Gas-Liquid Systems. Proceedings of the Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2000)*, Albuquerque, New Mexico, January 30 - February 3, 2000. Ed. M. S. El-Genk, AIP Conf. Proc. No. 504 (ISBN 1-56396-919), Springer-Verlag, New-York, 2000, pp. 821-827, CD-ROM Version, ISBN 156396-920-3
- B18.** Evesque P., Beysens D., and Garrabos Y. *Mechanical behavior of granular gas and heterogeneous fluid systems submitted to vibrations under microgravity. Proceedings Journées « Sciences de la Matière et Microgravité »* Ed. Prud'homme R., Langevin D., Fèvre G., Paris, France, 14-15 Mai 2001. *Publication J. de Physique IV*, 2001, vol. 11, Pr6-49 – Pr6-56.
- B19.** Garrabos Y., Lecoutre C., Beysens D., Nikolayev V. S., Dejoan A., Wunenburger R. *Piston effect in a supercritical fluid sample cell : a phenomenological approach of the mechanisms. Proceedings Journées « Sciences de la Matière et Microgravité »*. Ed. Prud'homme R., Langevin D., Fèvre G., Paris, France, 14-15 Mai 2001. *Publication J. de Physique IV*, 2001, vol. 11, Pr6-23 – Pr6-34.
- B20.** Ivanov A. I., Kalmykov A. V., Polezhaev V. I., Emelianov V., Putin G. F., Garrabos Y., Beysens D., and Zwilling J. F. *An experimental study of the effect of controlled accelerations on transport phenomena in supercritical fluid. Organisation, carrying out and preliminary results of the experiment with ALICE-2 instrument onboard MIR station. Proceedings of the International symposium on International scientific cooperation onboard MIR*, Palais des Congrès, Lyon, France, 19-21 mars 2001. ed. C. N. E. Spatiales. Toulouse: CNES, 2001. p. 283-289. ISBN
- B21.** Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Meradji S., Roux B., .. Beysens D, and Garrabos Y. *2D unsteady motion and deformation of a gaseous bubble in a vibrating liquid at zero gravity. Proceedings Journées « Sciences de la Matière et Microgravité »*, Ed. Prud'homme R., Langevin D., Fèvre G., Paris, France, 14-15 Mai 2001. *Publication J. de Physique IV*, 2001, vol. 11, Pr6-91 – Pr6-98.
- B22.** Nikolayev V., Beysens D., Garrabos Y., Hegseth J. *CHF as a Non-Equilibrium Drying Transition, Proceedings of the 4th International Conference on Multiphase Flow (ICMF)*, New Orleans, LA (USA), May 27-June 1, 2001, Ed. E. E. Michaelides, published on a CD-ROM , paper 937, Tulane University (2001).
- B23.** Polezhaev V. I., Emelianov V., Gorbunov A. A., Soboleva E. B., Zuizgin A. V., Putin G. F., Sazonov V. V., Avdeev S. V., Ivanov A. I., Kalmykov A. V., Beysens D., Garrabos Y., Frolich T. and Zappoli B. *Study of supercritical fluid on MIR using the Alice-1 instrument. In: Proceedings of the International symposium on International scientific cooperation onboard MIR, Palais des Congrès, Lyon, France, 19-21 mars 2001.* ed. C. N. d. E. Spatiales. Toulouse: CNES, 2001. p. 309-316. ISBN
- B24.** Polezhaev V. I., Emelianov V., Gorbunov A. A., Soboleva E. B., Zuizgin A. V., Putin G. F., Sazonov V. V., Avdeev S. V., Ivanov A. I., Kalmykov A. V., Beysens D., Garrabos Y., Frolich T. and Zappoli B. *Study of supercritical fluid on MIR using the Alice-1 instrument. In: Proceedings of the International symposium on International scientific cooperation onboard MIR, Palais des Congrès, Lyon, France, 19-21 mars 2001.* ed. C. N. E. Spatiales. Toulouse: CNES, 2001. p. 309-316. ISBN
- B25.** Wunenburger R., Dejoan A., Lecoutre-Chabot C., Garrabos Y., Beysens D, Evesque P. *Analogous behavior of strong density gradients and liquid-vapor interfaces near the critical point when submitted to vibrations in microgravity. Proceedings Workshop « Fluides miscibles »*, Paris, France, 04-15 Juillet 2000.
- B26.** Garrabos Y., Lecoutre C., Beysens D, Nikolayev V. S., Dejoan A., Wunenburger R. *Piston effect in a supercritical fluid on the MIR station : influence of the geometry, the materials and the residual gravity variations. Symposium International « International Scientific Cooperation onboard MIR »*, Lyon, France, 19-21 March 2001, Résumé In: *Proceedings of the International symposium on International scientific cooperation onboard MIR, Palais des Congrès, Lyon, France, 19-21 mars 2001.* ed. C. N. E. Spatiales. Toulouse: CNES, 2001. p. 291. ISBN.
- B27.** V. S. NIKOLAYEV, D. A. BEYSENS, «2D BEM modeling of a singular thermal diffusion free boundary problem with phase change », Boundary elements XXIV (Incorporating meshless solutions), Eds. C.A. Brebbia, A. Tadeu & V. Popov, Int. Series on Advances in Boundary Elements, 13 WIT Press (Southampton, Boston) 2002, pp. 501-525.
- B28.** G. CAMBON, B. ZAPPOLI, R. LAUVER, D. BEYSENS, Y. GARRABOS, C. LECOUTRE, B. BILLA, H. JAMGOTCHIAN, N. BERGEAON, *DECLIC : the experiment program and its potentialities*, 53rd International Astronautical Congress, 2002, IAC-IAF/IAA-02-J.04

- B29.** D. BEYSENS, D. CHATAIN, V. NIKOLAYEV, Y. GARRABOS, *Magnetic facility gives Heat transfer data in H₂ at various acceleration levels*. 4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion". 3-6 December 2002 – Liege (Belgium) (2003, to appear)
- B30.** D. BEYSENS, V. S. NIKOLAYEV, Y. GARRABOS, *Vapour spreading and the boiling crisis*, 5th Liquid Matter Conference of the EPS Ko,nstanz, 14-18 September 2002. Published in. *Phys. Condens. Matter* 15 (S435-S442) (2003).

C. Autres publications

- C1.** Garrabos Y. *Fluides Critiques. Réunion Thématique GDR 2258 « Phénomènes de Transport et Transitions de Phases en Micropesanteur »*, CEA-Grenoble, 19-20 Juin, 2000
- C2.** Hegseth J., Beysens D., Nikolayev V., Garrabos Y., Lecoutre-Chabot C., Wunenburger R. *Physics and Chemistry Experiments using Near-Critical Fluids. 1st Meeting of the ESA Topical Team « Chemical-Physics in Near-Critical and Supercritical Fluids »*, ESA Headquarters, Paris, March 24, 2000.
- C3.** Nikolayev V., Chatain D. *Magnetic Levitation for IFE Targets Production. Part III. A Theoretical Analysis*. Note SBT/CT 00-59 (2000).
- C4.** Nikolayev V., Beysens D. *Out of equilibrium drying transition*. Présenté au Workshop Wetting: *From microscopic origins to industrial applications*, Hyères, 6-12/5/2000.
- C5.** Wunenburger R., Chatain D., Beysens D., Garrabos Y. *Magnetic compensation of gravitational forces in (p)-hydrogen to prepare experiments under weightlessness. Poster Journées « Sciences de la Matière et Microgravité »*, Paris, France, 14-15 Mai 2001.
- C6.** Beysens D. *Phase Transition in hydrogen under Vibrations*. ELGRA meeting, Banyuls , France, 26-28 Septembre 2001.
- C7.** Nikolayev V. S., Beysens D., Y. Garrabos, *Crise d'ébullition, force de recul et phénomènes près du point critique*, Journée thématique " Nucléation de bulles dans les liquides et les milieux hétérogènes ", 10/12/2002, IUSTI, Marseille.
- C8.** Régis Wunenburger - *Thèse*. Direction : Yves Garrabos - Soutenance : le 13 Octobre 2000. Sujet : *Transfert de chaleur et effet des vibrations dans les fluides purs diphasiques au voisinage du point critique*.

Prix et récompenses

2000 - Prix Gaz de France (Physique des Fluides) décerné par l'Académie des Sciences -D.

Beysens, Y. Garrabos, B. Zappoli

A. Articles dans les revues à comité de lecture

S. Residori, R. Berthet, B. Roman and S. Fauve, "Noise induced bistability of parametric surface waves", *Phys. Rev. Lett.* 88, (2) 024502 (2001).

N. Mujica and S. Fauve, "Sound velocity and absorption in a coarsening foam", *Phys. Rev. E* 66, 021404 (2002).

R. Berthet, R. Labbé and S. Fauve, "Study of the sound-vortex interaction: direct numerical simulations and experimental results", *Eur. Phys. J. B* (accepté, 2003).

N. Mujica, R. Wunenburger and S. Fauve, "Sound scattering by a vibrating surface", *Eur. Phys. J. B* (2003).

N. Mujica, R. Wunenburger and S. Fauve, "Scattering of sound by sound in the vicinity of the liquid-vapor critical point", *Phys. Rev. Lett.*, in press (2003).

B. Communications à des congrès à comité de lecture

R. Berthet, A. Petrossian, S. Residori, B. Roman and S. Fauve, "Effect of multiplicative noise on parametric instabilities", *Physica D* 174, 84-99 (2003).

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

A. Aouizerat-Elarby, H. Dez, B. Prevel, J.F. Jal, J. Bert, and J Dupuy-Philon : Diffusion processes in LiCl, RH₂O solutions - *J. Mol. Liquids*, **84**, 299 (2000).

C. Annarelli, L. Reyes, J. Fornazero, J. Bert, R. Cohen, and A.W. Coleman : Ion and molecular recognition effects on the crystallization of bovine serum albumin-salt mixtures - *Cryst. Eng.*, **3**, 173 (2000).

J. Bert
Dictionnaire Scientifique Anglais-Français *Éd. Dunod*, Collection Sciences Sup (2000).

C.C. Annarelli, J. Fornazero, J. Bert, and J. Colombani : Crack patterns in drying protein solution drops - *Eur. Phys. J. E*, **5**, 599 (2001).

J. Colombani, B. Herve et J. Bert : Gravité et transport de masse dans les mélanges liquides - *J. Phys. IV*, **11**, Pr6-35 (2001).

L. Reyes, J. Bert, J. Fornazero, R. Cohen, and L. Heinrich : Influence of conformational changes on diffusion properties of Bovine Serum Albumin : a holographic interferometry study - *Colloids and Surfaces B : biointerfaces*, **25**, 99 (2002).

J. Colombani, G. Galliero, B. Duguay, J.P. Caltagirone, F. Montel, and Ph.A. Bopp : A molecular dynamics study of thermal diffusion in a porous medium - *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **4**, 313 (2002).

G. Galliéro, J. Colombani, B. Duguay, J.-P. Caltagirone et F. Montel : Evaluation de la thermodiffusion en milieu poreux nanométrique intégré par dynamique moléculaire hors équilibre directe - *Entropie*, **38**, 239/240, 98 (2002).

J. Colombani, G. Galliero, B. Duguay, J.P. Caltagirone, F. Montel, and Ph.A. Bopp : Molecular dynamics study of thermal diffusion in a binary mixture of alkanes trapped in a slit pore - *Phil. Mag.*, sous presse.

J. Colombani and J. Bert : Early sedimentation and crossover kinetics in an off-critical phase-separating liquid mixture Soumis.

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture

Présentations orales

J. Colombani and J. Bert : Microgravity and earth thermal diffusion in liquids - Holographic visualization of convection - *Space Technology and Applications International Forum*, Albuquerque (Etats-Unis), 2000.

J. Bert and J. Colombani : Thermal diffusion in molten salts - *Réunion du Topical Team ESA « Mass Transport in Liquids »*, Paris, ESA HQ, 2000.

G. Galliero, J. Colombani, B. Duguay, J.P. Caltagirone, F. Montel, and Ph.A. Bopp : Molecular dynamics of thermal diffusion in a structured porous medium - *4th International Meeting on Thermodiffusion*, Bayreuth (Allemagne), 2000.

J. Colombani et J. Bert : Influence de la gravité sur le transport de masse dans les mélanges liquides *Colloque « sciences de la matière et microgravité »*, Paris, ESPCI, 2001.

J. Colombani (invité): Molecular dynamics study of thermal diffusion in a porous medium - 5th International Meeting on Thermodiffusion, Lyngby (Danemark), 2002.

Posters

G. Galliero, J. Colombani, B. Duguay, J.P. Caltagirone, Ph.A. Bopp, and F. Montel : On the influence of integrated nanoporous medium on thermal diffusion of a binary mixture, a non-equilibrium molecular dynamics approach - 4th International Meeting on Thermodiffusion, Bayreuth (Allemagne), 2000.

J. Colombani, B. Hervé, and J. Colombani : Transport properties of demixing aqueous protein solutions - 7es Journées Européennes de Thermodynamique Contemporaine, Mons (Belgique), 2001.

G. Galliero, J. Colombani, B. Duguay, J.-P. Caltagirone et F. Montel, Evaluation de la thermodiffusion en milieu poreux nanométrique par dynamique moléculaire hors équilibre directe 7es Journées Européennes de Thermodynamique Contemporaine, Mons (Belgique), 2001.

Séminaires

Jean Colombani, Laboratoire MASTER, Ecole Nationale Supérieure de Physique et Chimie de Bordeaux, 2000.

Jean Colombani, Laboratoire de Thermodynamique des Solutions et des Polymères, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand 2, 2000.

Jean Colombani, Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux, CNRS, 2000.

Modélisation numérique (Patrick Bontoux)

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

- AMIROUDINE S., BONTOUX P., LARROUDÉ P., GILLY B., ZAPPOLI B., «Direct numerical simulation of instabilities in a two-dimensional near-critical fluid layer heated from below», *J. Fluid. Mech.*, vol.442, 119-140, 2001.

- RASPO I., AUMAÎTRE S., GILLY B., BONTOUX P., ZAPPOLI B., «Direct numerical simulation of the time – dependent convection in a supercritical fluid layer : temporal evolution of the convective structures in highly non linear regimes.» *J. Physique IV*, Sciences de la Matière et Microgravité 86, vol. 11, p. 65-71, 2001.

- RASPO I., EL GANAOUI M., "Computations of instabilities in complex fluid mechanic problems using efficient finite volume methods", *Finite Volume for Applications III*, R. Herbin & D. Kröner Eds., Hermès Science Publications, p. 631-638, 2002.

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires

- BONTOUX P., RASPO I., AMIROUDINE S., ZAPPOLI B., «Rayleigh – Bénard instability in a near critical fluid». *20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2000)*, Chicago, août 2000.

- BONTOUX P., RASPO I., EL GANAOUI M.*, «Convective instabilities in a supercritical fluid layer under Rayleigh-Bénard configuration.» ,Topical Team, Chemical-physics in near critical and supercritical fluids . ESA Paris, 24 March 2000.

- RASPO I., GILLY. B., SERRE E., BONTOUX P., ZAPPOLI B., «Direct numerical simulation of time-dependent convection and reverse transition in supercritical fluid layers», *Colloque Sciences de la matière et micropesanteur*, ESPCI, 14-15 mai 2001.

- RASPO I., EL GANAOUI M., "Computations of instabilities in complex fluid mechanic problems using efficient finite volume methods", *3rd International Symposium on Finite Volume for Applications*, Porquerolles, 24-28 juin 2002.

- RASPO I., ACCARY G., BONTOUX P., ZAPPOLI B., «Etude des transferts thermiques en régime transitoire dans du CO2 supercritique en configuration de Rayleigh-Bénard», *Séminaire du GDR 2258 P2TPM*, Aussois, 26-28 mai 2003.

- RASPO I., ACCARY G., GILLY B., BONTOUX P., ZAPPOLI B., «Competition between thermoacoustic effects and convection in supercritical CO2 under Rayleigh-Bénard configuration», *5th Euromech Fluid Mechanics Conference*, Toulouse, août 2003.

Phénomènes critiques et fluides complexes (Henri Gouin)

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture.

H. Gouin and L. Espanet, Bubble number in a cavitating flow, *Comptes-rendus Acad. Sc. Paris*, t. 328, 11b, p. 151-157, 2000.

S.L. Gavriluyk and H. Gouin, Symmetric form of governing equations for capillary fluids, in the book: "Trends in Applications of Mathematics" (ed. by J. looss et al), Chapman & Hall/CRC (ISBN 1-58488-035-X) p. 306-311, 2000

S.L. Gavriluyk and V.M. Teshukov, Generalized Vorticity and Flow Properties for Bubbly Liquid and Dispersive Shallow Water Equations, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, vol. 13, p. 365-382, 2001.

H. Gouin. The hysteresis in the wetting problem, *Journal de Physique IV*, vol. 11, Pr6 p. 261-269, 2001

H. Gouin and S.L. Gavriluyk, Rankine-Hugoniot conditions for one-entropy two-fluid models, In: *Proceedings "WASCOM 99" 10th Conference on Waves and Stability in Continuous Media*(World Scientific, ISBN 981-02-4540-8) p. 209-218, 2001.

S.L. Gavriluyk and R. Saurel, Mathematical and Numerical Modeling of Two-Phase Compressible Flows with Microinertia, *Journal of Computational Physics*, vol. 175, p. 326-360, 2002.

V.M. Teshukov and **S.L. Gavriluyk**, Kinetic model for a motion of compressible bubbles in a perfect fluid, *Eur. J. of Mechanics, B/Fluids*, vol. 21, p. 469-491, 2002

H. Gouin, The wetting problem of fluids on a solid surface and the Young angle hysteresis in: *Proceedings "WASCOM 2001" 11th Conference on Waves and Stability in Continuous Media*(World Scientific, ISBN981-23-8017-5) p. 220-232, 2002.

H. Gouin, The wetting problem of fluids on solid surfaces. Part 1: the dynamics of contact lines, *Cont. Mech. and Therm.*, vol.14 p. XX¹, 2003

H. Gouin and T. Ruggeri, Hamiltonian Principle in the Binary Mixtures of Euler Fluids with Applications to the Second Sound Phenomena, *Rendiconti Lincei, Série IX*, vol.13, p. XX¹, 2003

H. Gouin, The wetting problem of fluids on solid surfaces. Part 2: the contact angle hysteresis, *Cont. Mech. and Therm.*, vol.14 p. XX⁵, 2003

H. Gouin and F. Cubisol, An estimation of the number of droplets in formation of aerosol, in press, *Mechanics Research Communications*, 2003, ref. MRC 789.

S.L. Gavriluyk, H. Gouin and V.M.Teshukov, Bubble effect on Kelvin-Helmholtz' instability, in press, *Cont. Mech. and Therm.*, 2003.

R. Saurel, **S.L. Gavriluyk** and F. Renaud, A multiphase model with internal degrees of freedom: Application to shock-bubble interaction, *accepted Journal of Fluid Mechanics*, 2003.

H. Gouin, Adiabatic waves in a fluid near its critical point: *Proceedings "WASCOM 2003" 12th Conference on Waves and Stability in Continuous Media*(World Scientific, ISBN981-23-8017-5 to appear 2003.

⁵ Nota: les pages notées XX correspondent à des articles sous presse.

B. Conférences invités dans des congrès internationaux

S.L. Gavriluyk, Invited Lecture: Workshop sur la structure mathématique des fluides complexes. Institut Henri Poincaré, Paris, June 14-15, 2000.

S.L. Gavriluyk, Invited Lecture: Mechanics of Fluids with Inertia Effects Workshop "Dynamics of Phase Boundaries and non classical waves", Kirzharten, Germany. May 2001.

H. Gouin, Invited Lecture: *Dynamics of wetting*, Wascom 2001 (11th International Conference), Porto Ercole, Italie, June 3-9, 2001

H. Gouin, Invited Lecture: *Material Waves in mixtures near critical point*, Problemi Matematici Non lineari di Propagazione e Stabilità nei Modelli dell Continuo, MIUR 2000-2002, Bressanone, Italie, 10-12 January 2002.

S.L. Gavriluyk, Invited Lecture: Kinetic model of bubbly fluids, Workshop « Diffuse Interface Models», ENS de Lyon, April 24-26, 2002

H. Gouin, Invited Lecture: *The dynamics of lines between fluids and solid surfaces*, workshop "Diffuse Interface Models", ENS de Lyon, France, 24-26 April 2002.

H. Gouin, Invited Lecture: *Adiabatic waves*, Wascom 2003 (12th International Conference), Cagliari, Italie, June 1-7, 2003

C. Autres publications et communications

H. Gouin, Energie d'interaction entre parois et liquides: le problème du mouillage pour les mélanges de fluides, séminaire de mécanique et de génie civil, Université de Montpellier II, 12 janvier 2000.

H. Gouin, Le problème du mouillage pour les mélanges près d'un point critique, séminaire CENG, Grenoble, 20 janvier 2000.

S.L. Gavriluyk, Equations du mouvement d'un milieu diphasique, 12^{ième} séminaire "Mécanique des fluides numériques" (CEA, Saclay) 25-27 janvier 2000.

S.L. Gavriluyk, Modélisation des Ecoulements Diphasiques Compressibles, CEMRACS 2000 (CIRM), Marseille, Août 2000.

H. Gouin, Les équations de Navier-Stokes sont-elles un bon modèle pour représenter la cavitation? Séminaire de Mécanique, Laboratoire de machines hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, le 16 octobre et 17 octobre 2000.

S.L. Gavriluyk, What does « potential flow » mean for liquids containing gas bubbles, Séminaire à l'Université de Lisbonne, Dpt de Mathématiques, Portugal, janvier 2001.

S.L. Gavriluyk, Modélisation Mathématique et Numérique des Ecoulements Diphasiques Compressibles avec les Effets de l'Inertie, 13^{ième} séminaire mécanique des fluides numériques, CEA, Saclay, 30 janvier - 1er février 2001.

H. Gouin, Le mouillage des mélanges de fluides avec une paroi solide au voisinage d'un point critique. Séminaire de Mécanique théorique, L.M.M., Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 9 mars 2001.

S.L. Gavriluyk, Mechanics of fluids with inertia effect, Séminaire Université de Minneapolis, Dpt of Aerospace Engineering and Mechanics, USA, avril 2001.

S.L. Gavriluyk, Mechanics of fluids with inertia effect, Séminaire de Michigan, Dpt of Mathematics, USA, avril 2001.

H. Gouin, Dynamique de la ligne de contact et hystérésis de l'angle de Young dans le mouillage, Colloque "Sciences de la matière et microgravité", Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle de Paris, 14-15 mai 2001.

S.L. Gavriluyk, Mécanique des fluides avec effet de l'inertie, Laboratoire de Mathématiques, ENS Paris, mai 2001.

S.L. Gavriluyk, Modélisation Mathématique et Numérique des Ecoulements Diphasiques Compressibles, Séminaire IUSTI, Marseille, mai 2001.

S.L. Gavrilyuk, Mathematical and Numerical Modeling of Two-Phase Compressible Flows with Micro Inertia, Wascom 2001 (11th International Conference), Porto Ercole, Italie, June 3-9, 2001.

H. Gouin, Waves and kirks in mixtures near critical points, International workshop on miscible interfaces, Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle de Paris, 2-5 juin 2001.

S.L. Gavrilyuk, Mathematical and Numerical Modeling of Two-Phase Compressible Flows with Micro Inertia, Euromech 421, Grenoble, septembre 2001.

S.L. Gavrilyuk, Mathematical and Numerical Modeling of Two-Phase Compressible Flows with Micro Inertia, Séminaire Université de Lisbonne, Dpt de Mathématiques, Portugal, janvier 2002.

S.L. Gavrilyuk, Propriétés acoustiques d'un modèle diphasique à phases compressibles, 14ième séminaire mécanique des fluides numériques, CEA, Saclay, 29 janvier - 31 janvier 2002

H. Gouin, Série de séminaires au CIRAM, Université de Bologne, Le principe d'Hamilton en mécanique des fluides; Les mélanges près d'un point critique; Les ondes dans les mélanges, Italie, janvier-février 2002.

S.L. Gavrilyuk, Mécanique des fluides avec effet de l'inertie, Séminaire de Mécanique théorique, L.M.M., Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), février 2002.

S.L. Gavrilyuk, Mathematical and Numerical Modeling of Two-Phase Compressible Flows with Micro Inertia, 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Moscow, August 19-13, 2002.

H. Gouin, Répartition des gouttes dans les aérosols, Journée IFP/IUSTI Nucléation de bulles dans les liquides et les milieux hétérogènes, Marseille, 10 décembre 2002.

H. Gouin, The wetting problem of fluids on a solid surface and the Young angle hysteresis, seminarios de análise funcional, equações diferenciais e análise numérica, Centro de Matematica e aplicações fundamentais, Lisbonne, Portugal, 16 janvier 2003.

H. Gouin, Ondes adiabatiques dans les fluides au voisinage du point critique, Journées du GdR, Aussois, 26-28 mai 2003.

Contrats de recherche

Action thématique cavitation du CEA de cadarache. En liaison avec l'EPFL de Lausanne/ Laboratoire de Machines Hydrauliques, 2000. Responsable : Henri Gouin.

Contrat Collaboration Scientifique OTAN, PST CLG 976878 "Mathematical models of complex media" durée 2 ans depuis septembre 2000. Responsable : Sergey Gavrilyuk.

Contrat CEA Bruyères le Château N° 200110, Etude d'un modèle bifluide pour le mélange par train d'ondes de compression de fluides non miscibles depuis 2000. Responsable : Sergey Gavrilyuk (en collaboration avec Richard Saurel, professeur à l'Université de Provence, IUSTI).

Contrat CEA N° 4600045026/P6E33, Etude du mouillage d'un mélange de fluides sur une paroi solide, 2002-2003. Responsable : Henri Gouin.

Influence des vibrations sur les transferts convectifs dans les fluides incompressibles, compressibles et supercritiques (Abdelkader Mojtabi)

A. Publications :

A1 A. JOUNET, A. MOJTABI, J. OUZZANI and B. ZAPPOLI, " Low-frequency vibrations in a near-critical fluid" *Physics of Fluids*, Vol. 112 N° 1. Janvier 2000

A2 O. SOVRAN, G. BARDAN, M.C.CHARRIER-MOJTABI and A. MOJTABI, "Finite frequency external modulation in doubly diffusive convection" *Numerical Heat Transfer, Part A*, 37 :877-896, 2000

A3 G. BARDAN, A. MOJTABI and SOUHAR "Numerical investigation of vibrational high-frequency field upon double diffusive convection in microgravity" *Quarterly Microgravity Vol 1, N° 2 pp1-9, 2000*

A4 G. BARDAN, A. BERGEON, E. KNOBLOCH and A. MOJTABI, "Non linear study of double diffusive convection in vertical enclosures" *Physica D* . 138, 91-113, 2000

A5 A. JOUNET, B. ZAPPOLI, and A. MOJTABI "Rapid relaxation in near-critical fluids and critical speeding up: discrepancies caused by boundary effects", *Phys.Rev. Letters* Vol 84/15 pp.3224-3227 April 2000

A6 G. BARDAN, E. KNOBLOCH and A. MOJTABI, "Natural doubly diffusive convection with vibration" *Fluid Dynamic Research* Vol28, N.3 pp 159-187, 2001

A7 G. BARDAN and A. MOJTABI, «On Lapwood convective instability of porous medium with vertical vibration» *Physics of Fluids* Vol. 12 N.11 pp 2723-2731, 2001

A8 O. SOVRAN, M.C.CHARRIER-MOJTABI et A. MOJTABI, « Naissance de la convection thermosolulale en couche poreuse infinie avec effet Soret ». *C.R. Acad. Sci. Paris, Série IIb N° 329, p287-293, 2001*

A9 G. BARDAN, G. PINAUD et A. MOJTABI, « Convection thermovibrationnelle dans un cube saturé d'un milieu poreux » *C.R. Acad. Sci. Paris, Série IIb N° 329, p.283-286 2001*

A10 A. MOJTABI, J.K. PLATTEN and M.C. CHARRIER-MOJTABI, «Onset of free convection in solutions with variable Soret coefficients»,: *Journal of non Equilibrium Thermodynamics*, Vol.27(1) Mars/2002

A11 A. JOUNET, G. BARDAN «Onset of thermohaline convection in a rectangular cavity in the presence of vertical vibration», *Phys.of Fluids*, 13 3234 / 2001

A12 A. JOUNET,«Density relaxation of near-critical fluid in response to local heating and low frequency vibration in microgravity» *Phys. Rev. E* 65 (2002).

A13 A. MOJTABI, J.K. PLATTEN and M.C. CHARRIER-MOJTABI, Onset of free convection in solutions with variable Soret coefficients,: *Journal of non Equilibrium Thermodynamics*, Vol.27(1) Mars/2002

A14 M.C. CHARRIER- MOJTABI, K. MALIWAN, Y. PEDRAMRAZI, G. BARDAN and A.MOJTABI ,«Contrôle des écoulements thermoconvectifs au moyen des vibrations »*Journal de mécanique et industrie* 2003 à paraître

A15 A. MOJTABI and M.C. CHARRIER-MOJTABI" Double diffusive convection in porous media"Chapitre du *Hand-Book of Porous Media* Edit by K. VAFAI et H. HADIM copyright 2000 by Marcel Dekker New York. Basel

Articles Soumis en 2002-2003

A16-I. CISSE, G. BARDAN et A. MOJTABI,«Rayleigh Bénard convective instability of a fluid under high-frequency vibration» *Int. Journal of Fluid Mechanics Research»*

A17- Y. PEDRAMRAZI, K. MALIWAN, and A. MOJTABI ,« Stability studies of Horton-Rogers-Lapwood problem under the influence of vertical vibration by two different approaches» *Journal of Fluid Mechanic*

A18 A. MOJTABI and M.C. CHARRIER-MOJTABI" Double diffusive convection in porous media"Chapitre du *Hand-Book of Porous Media* Edit by K. VAFAI et H. HADIM copyright 2000 by Marcel Dekker New York. Basel

A19 Remise à jour du chapitre " Double diffusive convection in porous media" Pour la nouvelle édition 2003 du *Hand-Book of Porous Media* by Marcel Dekker New York. Basel (50 pages)

B.4 Chapitre de synthèse :

B. Communications dans des congrès nationaux et internationaux avec actes publiés

- C.1 G. BARDAN and A. MOJTABI, "Three-dimensional convection in a cubic box of fluid-saturated porous material with vibration", *First International Symposium on Microgravity Research Sorrento Italia, 2000*
- C.2 O. SOVRAN, M.C. CHARRIER-MOJTABI, M. AZAIEZ, and A. MOJTABI «Linear and non-linear hydrodynamic stability theory of Soret driven convection in a porous medium» *Fourth International Meeting on Thermodiffusion Bayreuth Germany, September 11-15, 2000*
- C.3 A. MOJTABI and G. BARDAN "Porous medium heated from below with vertical vibration" *16th IMACS World Congress Lausanne Suisse 2000*
- C.4 A. JOUNET, A. MOJTABI and B. ZAPPOLI "Modelling and Simulation of natural Convection Flows with Large Temperature Differences: Benchmark for low Mach Number solvers" *12th Computational Fluid Dynamics Seminar, CEA Saclay January 26, 2000.*
- C.5 A. MOJTABI, J.K. PLATTEN and J.F. DUTRIEUX "The thermogravitational process at negative Soret coefficient and the Rayleigh-Bénard problem in extremely confined geometries" *Proceedings of the 7th European Days on Contemporary Thermodynamics, 349-354, Mons, Aout 2001.*
- C33 O. SOVRAN, M.C. MOJTABI, M. AZAIEZ and A. MOJTABI, "Onset of Soret-driven convection in porous medium under vertical vibration", *International Heat Transfer Conference, p.839-844 IHTC12 Grenoble, Août 2002.*

Communications dans des congrès nationaux et internationaux avec actes publiés

- D. 1 G. PINAUD, G BARDAN, O. SOVRAN, A. MOJTABI et CHARRIER MOJTABI "Influence des vibrations sur la naissance de la convection dans une couche chauffée par le bas" *Congrès S.F.T. 2000, Lyon*
- D. 2 Y. PEDRAMRAZI et A. MOJTABI, "Utilisation de l'analyse d'échelle pour la prévision de la naissance de la convection en géométrie confinée" *Congrès français de thermique, SFT 2001, Nantes, 29-31 Mai 2001.*
- D.3 G. BARDAN et MOJTABI " Convection vibrationnelle dans les milieux poreux", *15^{ème} congrès français de mécanique, Nancy, Septembre 2001.*
- D.4 Y. PEDRAMRAZI et A. MOJTABI, "Influence de la direction des vibrations sur la naissance de la convection thermosolutale en présence d'effet Soret". *Congrès français de thermique, SFT 2002, Nancy, 3-6 Juin 2002*
- D. 5 A. MOJTABI "The effect of harmonic vibration on the onset of convective motion in porous media" *First International Conference on Applications of Porous Media, Jerba, Tunisia, p. 704-721 June 02-08, 2002*
- D. 6 K. MALIWAN, Y. PEDRAMRAZI, M.C. MOJTABI, M. AZAIEZ and A. MOJTABI, "Influence of direction of vibration on onset of Soret-driven convection in porous medium", *First International Conference on Applications of Porous Media, Jerba, Tunisia, p.489-497 June 02-08, 2002*
- D. 7 Y. PEDRAMRAZI, K. MALIWAN and A. MOJTABI, "Two different approaches for studying the stability of the Horton-Rogers-Lapwood problem under the effect of vibration", *First International Conference on Applications of Porous Media, Jerba, Tunisia, p. 479-488 June 02-08, 2002*
- D.8 I. CISSE, G. BARDAN et A. MOJTABI "Convection thermo-solutale vibrationnelle" AFM avec le partenariat de AAF, XIII^e colloque CHOCS ET BRUITS, 12-14 Juin 2002 E.C.Lyon
- D. 9 A. MOJTABI "Contrôle et instabilités des écoulements convectifs : approches numériques et théoriques" *Journées AUM & AFM, Mécanique et Sciences de l'Ingénieur, 2-3 Septembre 2002*
- D.10 D. LYUBIMOV, T. LYUBIMOVA, A. MOJTABI, A. VOROBIEV and B. ZAPPOLI "Vibration influence on a near critical fluid filling a square cavity" "XXX Summer School "Advanced Problems in Mechanics" Russia, St. Petersburg, June 27-July 6, APM 2002
- D.11 Y. PEDRAMRAZI, K. MALIWAN et A. MOJTABI "Naissance de la convection thermosolutale en présence de l'effet Soret sous l'effet de vibrations " *Congrès français de thermique, SFT 2003, Grenoble, 3-6 Juin 2003*
- D.12 E. PIQUER, M.C. MOJTABI, M. AZAIEZ et A. MOJTABI "Simulation numérique 3D de la convection thermosolutale, en milieu poreux, avec prise en compte de l'effet Soret" *6^{ème} Congrès de Mécanique de Tanger Maroc, du 15 au 18 Avril 2003*

Microgravité : effets des vibrations sur les fluides hétérogènes, granulaires ou hyper compressibles en apesanteur (Pierre Evesque)

A. Articles

- P. Evesque, «Fluctuations, Correlation and representative elementary volume (REV) in granular materials», *Poudres & Grains* 11 (1), (20 janvier 2000), 6-17
- P. Porion, N. Sommier & P. Evesque, «Dynamics of mixing and segregation processes of grains in 3d-blender by NMR imaging investigation», *Europhys. Lett.* 50 (3) p. 319 (2000)
- P. Evesque, «Deformation Modes of a Packing of Rigid Grains: Rotation, Counter-rotation, dislocation field», *Poudres & Grains* 11 (2), (mars 2000), 19-41
- A.A. Ivanova, V.G. Kozlov, and P. Evesque, « Ozhizhenie sipuchej sredi v viazkoi zhidkosti, vizvanoej vertikal'nimi vibratsiami », *Mekhanika Zhidkosti i Gasa*, No3, pp.113-122, 2000
- A.A. Ivanova, V.G. Kozlov, and P. Evesque, Fluidization of a granular medium in a viscous fluid under vertical vibration, *Fluid Dynamics*, Vol.35, No.3, pp. 406-413, (2000)
- P. Evesque, «Eléments de mécanique quasistatique des milieux granulaires mouillés ou secs », *Poudres & Grains NS-1* 1-155 (décembre 2000)
- P. Evesque, The jamming surface of granular matter determined from soil mechanics results, *Poudres & Grains* 11 (4) 58-59 (décembre 2000)
- P. Evesque, «The thermodynamics of a single bead in a vibrating container», *Poudres & Grains* 12 (2) 17-42 (mars 2001)
- P. Evesque, »1d Granular gas with little dissipation in 0g: A comment on "Resonance oscillations in granular gases", *Poudres & Grains* 12 (3) 50-59 (avril 2001)
- P. Evesque, «Comparison between classical-gas behaviours and granular-gas ones in micro-gravity», *Poudres & Grains* 12 (4), 60-82 (mai 2001)
- P. Evesque, D. Beysens & Y. Garrabos, «Mechanical behaviour of granular-gas and heterogeneous-fluid systems submitted to vibrations in micro-gravity», *J. de Physique IV* 11, Pr6-49 to 56
- A. Modaresi & P. Evesque, « Is the friction angle the maximum slope of a free surface of a non cohesive material», *Poudres & Grains* 12 (5), 83-102 (juin 2001)
- P. Evesque, «Influence of boundary conditions on 2-fluid systems under horizontal vibrations», *Poudres & Grains* 12 (6), 107-114 (août-septembre 2001)
- F. Adjemian & P. Evesque, «Experimental stick-slip behaviour in triaxial test on granular matter», *Poudres & Grains* 12 (7), 115-121 (octobre 2001)
- P. Evesque, «Macroscopic Continuous Approach versus Discrete Approach, Fluctuations, criticality and SOC. A state of the question based on articles in *Powders & Grains 2001*», *Poudres & Grains* 12 (7), 122-150 (Novembre 2001), ISSN 1257-3957, **Erreur! Signet non défini.**
- A.A. Ivanova, V.G. Kozlov & P. Evesque, [Dinamika granitsi razdela nesmeshivajushchisja zhidkosti pri gorizont'al'nih vibratsiah] Dynamics of two immiscible liquids interface under horizontal vibrations/, *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Mekhanika Zhidkosti i Gaza* 3, 28-35 (2001)
- A.A. Ivanova, V.G. Kozlov & P. Evesque, «Interface dynamics of immiscible fluids under horizontal vibrations», *Fluid Dynamics* 36 (3), 362-368 (2001)
- P. Evesque, «Are Temperature and other Thermodynamics Variables efficient Concepts for describing Granular Gases and/or Flows ?», *Poudres & Grains* 13 (2), 20-26 (Mars-Avril 2002) ISSN 1257-3957, **Erreur! Signet non défini.**

P. Jean, H. Bellenger, P. Burban, L. Ponson & P. Evesque, «Phase transition or Maxwell's demon in Granular gas?» , *Poudres & Grains* 13 (3), 27-39 (Juillet-Août 2002) ISSN 1257-3957, **Erreur! Signet non défini.**

P. Evesque, « Quelques aspects de la dynamique des milieux granulaires », *Poudres & Grains* 13 (4), 40-73 (Novembre 2002) ISSN 1257-3957, **Erreur! Signet non défini.**

P. Evesque, F. Adjémian, «Stress fluctuations and macroscopic stick-slip in granular materials», *Eur. Phys. J. E* 9, 253-259 (2002) DOI: 10.1140/epje/i2002-10082-4

P. Evesque, «Snapshots on Some Granular States of Matter: Billiard, Gas, Clustering, Liquid, Plastic, Solid», To appear in RSC Publication Title: *Advances in Granular Materials: Fundamentals and Applications.*

B. Publications dans les conférences:

P. Porion, N. Sommier & P. Evesque, «MRI demonstration of the efficiency of the turbula blender as a separating machine even for quite similar particles», XXVII summer school « Nonlinear Oscillations in Mechanical Systems »NOMMS 99, Saint Petersburg, Russie, 1-8 sept. 1999, pp. 96-105, (2000)

P. Evesque, «A new simple non linear modelling of the quasi statics mechanics of granular media : previsions and comparisons to experimental data», XXVII summer school « Nonlinear Oscillations in Mechanical Systems »NOMMS 99, Saint Petersburg, Russie, 1-8 sept. 1999, pp. 84-95, (2000)

V.G. Kozlov, P. Evesque, A. Ivanova, «About the mean dynamics of two liquids interface under translational vibration», XXVII summer school « Nonlinear Oscillations in Mechanical Systems »NOMMS 99, Saint Petersburg, Russie, 1-8 sept. 1999, pp. 114-121, (2000)

A.A. Ivanova, V.G. Kozlov, P. Evesque, «New features of Faraday vibrational effects in sand in viscous liquid», XXVII summer school « Nonlinear Oscillations in Mechanical Systems »NOMMS 99, Saint Petersburg, Russie, 1-8 sept. 1999, pp. 106-113, (2000)

R. Wunenburger, D. Beysens, C. Lecoutre-Chabot, Y. Garrabos, P. Evesque & S. Fauve, «Oscillatory Accelerations on Gas-Liquid Systems», *Proceedings of the STAIF 2000*, January 2000, Albuquerque, New Mexico, USA

P. Evesque, «A new simple non linear modelling of the quasi-statics mechanics of granular media: previsions and comparisons to experimental data». In the proceedings of the 4th International scientific technical Conference on "Vibrational Machines and Technologies", Kursk state Technical University, ISBN 5-7681-0045-8, pp. 11-18; (Kursk, Russia, december 1999)

P. Evesque, «A simple non linear modelling of the quasi statics of granular media: Previsions and comparisons to experimental data», In *Books of abstracts of the 4th Euromech Conference*, 2nd volume, Metz, France, June 26-30th, 2000, p. 588

P. Porion, N. Sommier & P. Evesque, «Mixing and Segregation of solids in a turbulence mixer studied by MRI». In *Books of abstracts of the 4th Euromech Conference*, 2nd volume, Metz, France, June 26-30th, 2000, p. 400

P. Evesque, « Les lois de la mécanique des sols sont-elles si complexes », In *Colloque "Physique et Mécanique des Milieux Granulaires"*, tome 1, Ecole des Ponts & Chaussées, 5-7 sept. 2000 , pp. 91-96 (2000)

N. Sommier, P. Evesque & P. Porion, « Etude par IRM du mélange et de la ségrégation de grains dans un mélangeur tridimensionnel », In *Colloque "Physique et Mécanique des Milieux Granulaires"*, tome 2, Ecole des Ponts & Chaussées, 5-7 sept. 2000 , pp. 357-362 (2000)

P. Evesque, E. Falcon, R. Wunenburger, S. Fauve, C. Lecoutre-Chabot, Y. Garrabos & D. Beysens, «Gas-Cluster transition of granular matter under vibration in microgravity», In "First international Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Science and Biotechnology", 10-15 Sept 2000, Sorrento, Italy, (ESA-SP 454, 829-834, 2001)

P. Evesque, A.A. Ivanova & V.G. Kozlov, «Experimental study of two-liquid interface under micro-gravity», In "First international Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Science and Biotechnology", 10-15 Sept 2000, Sorrento, Italy, (ESA-SP 454, 919-924, 2001)

N. Sommier, P. Porion & P. Evesque, «Mixing and segregation in Turbula blender», In *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 627, pp. BB5.9.1-6 (2000)

P. Evesque, «A new simple non linear modelling of the Quasi-statics of granular medi: predictions, comparisons with experiments», In *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 627, pp. BB6.6.1-6, (2000), San Francisco, Ca, USA)

P. Evesque, A.A. Ivanova & V.G. Kozlov, «Experimental study of two-liquid interface under micro-gravity», In "Proceedings of theFirst international Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Science and Biotechnology", Sorrento, Italy, 10-15 Sept 2000, pp. 919-924

P. Evesque, E. Falcon, R. Wunenburger, S. Fauve, C. Lecoutre-Chabot, Y. Garrabos & D. Beysens, «Gas-cluster transition of granular matter under vibration in microgravity», In "Proceedings of theFirst international Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Science and Biotechnology", Sorrento, Italy, 10-15 Sept 2000, pp. 829-834

P. Porion, A.M. Faugère, N. Sommier & P.Evesque, «How to use Turbula® mixer as a good blender with dry beads», In "Powders & Grains 2001", Y. Kishino ed, (Balkema, 2001), pp. 335-339

A. Modaressi & P.Evesque, «Study of avalanching at a free surface using computer simulation», In "Powders & Grains 2001", Y. Kishino ed, (Balkema, 2001), pp. 483-487

P.Evesque, «A simple modelling of experimental data on compressions of granular media», In "Powders & Grains 2001", Y. Kishino ed, (Balkema, 2001), pp. 233-237

P.Evesque, «Modelling the micro-macro passage in the quasi-statics regime of granular matter» , in "Powders & Grains 2001", Y. Kishino ed, (Balkema, 2001), pp. 153-157

P. Evesque, D. Beysens & Y. Garrabos, «Mechanical behaviour of granular-gas and heterogeneous-fluid systems submitted to vibrations in micro-gravity», Colloque: *Sciences de la Matière en Microgravité*, ESPCI, Paris, (14-15 Mai 2001), *J. de Physique IV France* 11, Pr6-49 to 56

P.Evesque, A.A. Ivanova & V.G. Kozlov, «Liquefaction of granular matter in viscous liquid under vertical vibration » , In "Powders & Grains 2001", Y. Kishino ed, (Balkema, 2001), pp. 517-520

R. Wunenburger, Y. Garrabos, C. Lecoutre, A. Dejoan, D. Beysens & P.Evesque, «Analogous behavior of strong density gradients and liquid-vapor interfaces near the critical point when submitted to vibrations in microgravity», In "Procceddings of the International workshop on miscible interfaces", Paris, ESPCI, July 2-5, 2001", Ph. Petitjeans ed., pp. 35-36

D. Beysens, D. Chatain, P.Evesque & Y. Garrabos, «Dynamics of Liquid-vapor phase transition under high frequency vibrations», In "Procceddings of the International workshop on miscible interfaces" Paris, ESPCI, July 2-5, 2001", Ph. Petitjeans ed., pp. 49

P.Evesque, A.A. Ivanova & V.G. Kozlov, «Granular matter and water under rapid vibration», In "Procceddings of the International workshop on miscible interfaces" Paris, ESPCI, July 2-5, 2001", Ph. Petitjeans ed., pp. 51-52

P. Porion, N. Sommier, A.M. Faugère & P.Evesque, « Etude par IRM du mélange et de la ségrégation de grains dans un mélangeur tridimensionnel, Colloque: Rhéologie: Génie civil & environnement », GFR (groupement français de rhéologie) Marne-la-Vallée(?) 10-12 oct. 2001; pp. 151-157 (2001)

P. Evesque & F. Adjémian, «Experimental Stick-slip behaviour in Triaxial test on granular Matter», *Proceedings of the COST P4*, Dortmund, Allemagne, Nov 2001

A.F.Kuzaev, A.A.Ivanova and P.Evesque, «Viscosity dependence of the behaviour of a heavy sphere in a cavity filled with liquid and subject to rotary vibration», Proc. 30 International Summer School "Advanced Problems in Mechanic (APM'2002)". St.Petersburg (Repino), Russia.

N.V. Selin, V.G. Kozlov, P. Evesque, «Experimental study of convection in rectangular cavity subject to nontranslational vibration», in Proc. 30 Summer School "Advanced Problems in Mechanics (APM'2002)". Russia, St. Petersburg (Repino), 2002. St. Petersburg: IPME RAS, 2002. P. .

C. Autres publications:

P. Evesque, «Introduction to the Scientific interest in forming a topical team on g-jitter and vibrations», In proceedings of the Topical team on vibrational phenomena in micro-gravity, ESA HQ, Paris, 16 march 2000 , p. 4

D. Beysens, P. Evesque, S. Fauve, E. Falcom, Y. Garrabos, A. Ivanova, V. Kozlov & R. Wunenbger, «Vibration Effects on Heterogeneous Hypercompressible Fluids in Microgravity», In proceedings of the Topical team on vibrational phenomena in micro-gravity, ESA HQ, Paris, 16 march 2000 , p. 8

A. Ivanova, V. Kozlov, P. Evesque, «Vibrational hydromechanics of heterogeneous medium», In proceedings of the Topical team on vibrational phenomena in micro-gravity, ESA HQ, Paris, 16 march 2000 , p. 20

F. Palencia, C. Lecoutre, Y. Garrabos, P. Evesque & D. Beysens, «Dispositif de vibration de systèmes hétérogènes pour des expériences en vol parabolique », Séminaire Labview Poitiers (juin 2003)

Equipe Mécanique et Transfert - Thème Modélisation numérique des instabilités thermoconvectives dans les fluides supercritiques (Sakir Amiroudine)

REFERENCES

[1] AMIROUDINE S., BONToux P., LARROUDE P., GILLY B., ZAPPOLI B., *Direct numerical simulation of unsteady instabilities inside a near-critical fluid layer heated from below*, **J. of Fluid Mech.**, Vol. **442**, pp 119-140, 2001.

[2] S.AMIROUDINE, A.KOGAN, H.MEYER AND B.ZAPPOLI, *Convection onset in a compressible near-critical fluid : comparison between experiment and numerical simulation*, the **20th IUTAM Congress, ICTAM 2000** Chicago, Aug 27-Sept 2, 2000.

[3] S.AMIROUDINE, «Piston Effect Induced Thermal Oscillations at the Rayleigh-Bénard Threshold in Supercritical ³He», **XII^{ème} Conférence Internationale sur les transferts de chaleur**, Grenoble, 18-23 Août 2002.

[4] AMIROUDINE S. AND ZAPPOLI B., *Piston effect induced thermal oscillations at the Rayleigh-Bénard threshold in supercritical He³*, **Phys. Rev. Lett.**, **90**, 105303, 2003.

[5] AMIROUDINE S. AND ZAPPOLI B., *Instabilités thermoconvectives dans les fluides supercritiques*, **16^{ème} congrès français de Mécanique**, Nice, 1-5 Septembre 2003.

[6] AMIROUDINE S. AND ZAPPOLI B., *Instabilités thermoconvectives dans les fluides supercritiques*, **soumis au numéro spécial C.R.A.S (section de Mécanique) consacré aux fluides et aux phénomènes de transfert en micropesanteur**, Septembre 2003.

A. OUVRAGES

Thèses et DEA

RIOU X., Contribution à l'écriture d'une équation d'aire interfaciale, *Thèse INP Toulouse*, 2002

MARINO D., Dispersion des bulles en écoulement cisailé, *DEA de Dynamique des Fluides INP Toulouse* 2000

Journaux

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.

LEGENDRE D., COLIN C., FABRE J., MAGNAUDET 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.

RISSO F. The mechanisms of deformation and breakup of drops and bubbles. *Multiphase Science and Technology*, **12**, pp. 1-50, 2000.

KAMP A., CHESTERS A.K., COLIN C., FABRE J., Bubble coalescence in turbulent flows: a mechanistic model for turbulence induced coalescence applied to bubbly pipe flows under microgravity conditions, *International Journal of Multiphase Flow*, **27**, 1363-1396, 2001.

COLIN C., FABRE J., Bubble dynamics and deformation in microgravity, *J. Phys. IV France* **11**, 231-238, 2001.

COLIN C., Two-phase flow in microgravity: some open questions, *Microgravity Science and Technology*, 2002.

CHAHED J., COLIN C., MASBERNAT L., Turbulence and phase distribution in bubbly pipe flow under micro-gravity condition, *Journal of Fluid Engineering*, Vol 124, pp 951-956, 2002.

B. Congrès internationaux et nationaux

COLIN C., LEGENDRE D., FABRE J., Bubble distribution in a turbulent pipe flow, *First international symposium on physical science and biotechnology*, Sorrento, Italie du 10 au 15 septembre 2000.

COLIN C., LEGENDRE D., BUBBLE DISTRIBUTION IN TURBULENT SHEAR FLOWS: EXPERIMENTS AND NUMERICAL SIMULATIONS ON SINGLE BUBBLES, *4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOWS*, NEW ORLEANS, USA, 2001, ACTES SUR CD ROM.
COLIN C., FABRE J., Two-phase flow in microgravity: some open questions, *Conférence invitée au Drop Towers Days 2000*, Brême (Allemagne), du 10 au 12 octobre 2000.

RIOU X., FABRE J., COLIN C., Closure laws for the transport equation of interfacial area in dispersed flow, *Keynote lecture, Joint US ASME-European Fluids Engineering Summer Conference*, Montreal (Canada), 14-18 Juillet 2002.

COLIN C., RIOU X., Bubble coalescence in turbulent pipe flows in microgravity conditions *Euromech Fluid Mechanics Conference*, Toulouse, 24-28 August 2003

JUANEDA Y., COLIN C., Dynamique de bulles en micropesanteur dans un écoulement de Couette en régime faiblement inertiel. 16^{ème} Congrès Français de Mécanique - Colloque f : Microgravité et transferts. - Nice, 1-5 septembre 2003.

A Publications dans des revues ou ouvrages à comité de lecture

- A1 Monnereau C., Vignes-Adler M., Kronberg B. "Influence of gravity on foams", *J. Chimie Physique* **96**, 958-967, 1999
- A2 Monnereau C., Vignes-Adler M., Pittet N. (1999) "Coarsening of a 3D reconstructed foam under Surface-Evolver", *Phil. Mag. B*, **79**, 8, 1213-1222, 1999.
- A3 C. Monnereau, B. Prunet-Foch, M. Vignes-Adler "Topology of slightly polydisperse real foams", *Phys. Rev. E*, **63**, 061402-1-061402-10, 2001.
- A4 M. Vignes-Adler, F. Graner, "La vie éphémère des mousses", *Pour la Science*, 48-55, Mars 2002 (article invité).
- A5 F. Rouyer, S. Cohen-Addad, M. Vignes-Adler, R. Höhler "Dynamics of yielding observed in three-dimensional dry aqueous foams", *Phys. Rev E*, **67**, 021405-(1-7), 2003.

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture

- B1 M. Adler "Topology and dynamics of slightly polydisperse real foams", *Ecole de Physique des Houches Recent developments in foams, Juin 2001 (conférence invitée)*.
- B2 M. Adler "Topologie et dynamique des mousses faiblement polydisperses" *Groupe Matière Condensée et Matériaux, Université de Rennes, Janvier 2001*
- B3 M. Adler "Topology and dynamics of slightly polydisperse real soaps", *Department of Chemical Engineering, Univ. California at Berkeley, Juillet 2001*.
- B4 M. Adler "Foam dynamics", *Istituto Pluridisciplinar, Universidad Complutense, Madrid, Juillet 2001*.
- B5 M. Adler "Physique des mousses polyédriques", *Séances de la section de Mécanique de l'Académie des Sciences, Paris, Octobre 2001*.
- B6 O. Pitois, X. Chateau (poster) "Behaviour of hydrophobic and hydrophilic particles in a foam : a bubble point of view" *Eurofoam 2002, Manchester, 7-10 July, 2002*.
- B7 F Rouyer, R Hohler, S Cohen-Addad, M Vignes-Adler "Strain-rate dependent elastic limit of a three-dimensional aqueous dry foam under simple shear" *Eurofoam 2002, Manchester, 7-10 July, 2002*

C. Autres : actes de colloques

- C1 C. Monnereau-Pittet and M. Vignes-Adler, "Topology of real three-dimensional foams", in *Foams and Films*, (Eds D. Weaire and J. Banhart), Verlag Metall Innovation Technology MIT Bremen, 79-82, 1999.
- C2 B. Kronberg, L.M. Trejo, M. Adler, P. Holm, "Investigation of a non-aqueous foam under microgravity condition", in *Foams and Films*, (Eds D. Weaire and J. Banhart), Verlag Metall Innovation Technology MIT Bremen, 9-16, 1999
- C3 M. Andersson, B. Kronberg, C. Lockowandt, B. Prunet-Foch, M. Vignes-Adler "Transient mechanisms in transient foams under microgravity conditions", in *Sciences de la Matière et microgravité*, (Eds R. Prud'homme, D. Langevin, G. Faivre) *J. Physique IV*, **11**, Pr6-227-Pr6-230, 2001.
- C4 M. Vignes-Adler, B. Prunet-Foch, B. Kronberg, M. Andersson, M. Johansson, B. Svensson, C. Lockowandt, H. Schneider, O. Jansson, P. Holm, M. Lundin, "The foam experiment module and its flight on Maxus 4", *Proceedings of the 15th ESA Symposium on European Rocket and Ballon Programmes and Related Research, Biarritz*, pp 415-418, ESA SP-471, aug 2001.

Mousses et films de savon (Dominique Langevin)

A. Revues

D.Langevin "Stratification of foam films made from surfactant solutions" Eur.Phys.J.E, **5**, 2001, 81

R.Klitzing, A.Espert, A.Colin, D.Langevin, "Comparison of different polymer-like structures in the confined geometry of foam films" Colloids and Surfaces A, **176**, 2001, 109

F.Bauget, D.Langevin, R.Lenormand "Dynamic surface properties of asphaltenes and resins at the oil-air interface" J.Colloid Interface Sci. **239**, 2001, 501

M.Durand, D.Langevin "Physico-chemical approach to the theory of foam drainage" Eur.Phys.J.E, **7**, 2002, 35

A.Saint-Jalmes, D.Langevin "Time evolution of aqueous foams: drainage and coarsening" J.Phys.:Condens.Matter **14**, 2002, 9397

D.Langevin, A.Saint-Jalmes, M.Durand, M.Safouane, "Les mousses" Bulletin de la SFP, **134**, 2002, 11

Márquez, S. Guillot, D.Langevin "Stratification phenomena in thin liquid films containing polyelectrolytes and stabilized by ionic surfactants", soumis pour publication

B. Congrès

J.Banhart, F.Bäumgartner, S.J.Cox, B.Kronberg, D.Langevin, S.Odenbach, D.Weaire, T.Wübber, "Development of advanced foams under microgravity" dans "Proceedings of the first international symposium on microgravity research and applications in Physical Sciences and Biotechnology", ESA SP-454, 2001

M.Safouane, M.Durand, A.St Jalmes, D.Langevin, V.Bergeron "Aqueous foam drainage: role of the rheology of the foaming fluid" dans "Sciences de la Matière en Microgravité", Eds R.Prud'homme, D.Langevin, G.Faivre, J.Phys IV, **11**, 2001, 275

Fluides Miscibles (Philippe Petitjeans)

Miscible displacements between silicone oils

J. Kuang, T. Maxworthy, P. Petitjeans
European Journal of Mechanics/Fluids, **22**, 271-277, 2003

Instabilités à l'interface entre fluides miscibles par forçage oscillant horizontal

M. Legendre, P. Petitjeans, P. Kurowski
C.R. Acad. Sci. Paris II B, Soumis, 2003

Density driven, unstable flows of miscible fluids in a Hele-Shaw cell

J. Fernandez, P. Kurowski, P. Petitjeans, E. Meiburg
J. Fluid Mech., **451**, 239-260, 2002

Instabilité gravitationnelle entre fluides miscibles dans une cellule de Hele-Shaw: des petits nombres de Péclet aux grands nombres de Péclet

P. Kurowski, J. Fernandez, L. Limat, P. Petitjeans
J. de Physique IV, **11**, 221-225, 2001

Déplacement visqueux dans un tube: Une expérience prévue dans la Station Spatiale Internationale

P. Petitjeans, T. Maxworthy, J. Kuang
J. de Physique IV, **11**, 247-253, 2001

Measurement of the diffusion coefficient of miscible fluids using both interferometry and Wiener's method

N. Rashidnia, R. Balasubramaniam, J. Kuang, P. Petitjeans, T. Maxworthy
International Journal of Thermophysics, **22** (2), 547-555, 2001

Wavelength selection of fingering instability inside Hele-Shaw cell

J. Fernandez, P. Kurowski, L. Limat, P. Petitjeans
Phys. Fluids, **13** (11), 3120-3125, 2001

Thèse de doctorat (Université Paris 6): Instabilités gravitationnelles entre fluides miscibles

Juan Fernandez, Janvier 2001

Miscible quarter five-spot displacements in a Hele-Shaw cell and the role of flow-induced dispersion

P. Petitjeans, C.Y. Chen, E. Meiburg, T. Maxworthy
Phys. Fluids, **11** (7), 1705-1716, 1999

Instabilités à l'interface entre deux fluides miscibles - Emergence d'une tension de surface effective

P. Petitjeans, P. Kurowski, J. Fernandez, M. Hoyos
J. de Chimie Physique, **96**, 991-996, 1999

Stabilité des Emulsions Denses en l'absence de gravité. Evaporation de gouttes à plusieurs constituants. Mesure et Modélisation (Annie Steinchen)

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

- [1] M. Antoni and A. Steinchen, Numerical approach to life time and phase separation in a liquid-liquid model emulsion, J. Physics IV, July 2001
[2] N.A. Mishchuk, R. Miller, A. Steinchen and A. Sanfeld, Coagulation and flocculation within the primary or secondary minimum, J. Colloid Interf. Sci. **256**, 435-450 (2002)
[3] N.A. Mishchuk, A. Sanfeld and A. Steinchen, Interparticle interaction and peculiarities of coagulation in concentrated W/O emulsions, (submitted)

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture

- [4] L. Liggieri, A. Passerone, F. Ravera, M. Ferrari, R. Miller, G. Loglio, D. Clause, A. Steinchen, J.D. Sylvain, A. Di Lullo, Adsorption Dynamics, Interfacial Elasticity and Emulsion Stability : The Scientific Basis of the FASES MAP Project, Proc. 1st Int. Symp. Microgravity Research & Appl. In Phys. Sci. & Biotech., Sorrento September 2000, ESA SP-454, January 2001

C. Autres publications

- [5] M. Antoni et A. Steinchen, A propos de la modélisation des émulsions denses Réunion GDR CNES-CNRS Microgravité Grenoble juin 2000
[6] M. Antoni, Modelling of emulsions in microgravity, Réunion FASES-ESA ESTEC novembre 2000,
[7] A. Steinchen, M. Antoni and J.D. Sylvain, Dynamics and ageing of dense emulsions under microgravity, Réunion FASES-ESA Berlin 1-3 décembre 2000,
[8] A. Steinchen, M. Antoni and J.D. Sylvain, Stability of dense Emulsions-Experiments and Modelling, Réunion FASES-ESA Compiègne 25-26 mai 2001
[9] Journées du GDR 2285 Paris 14-16 mai 2001, 2 affiches
[10] A. Steinchen et M. Antoni, CEA Cadarache, Modélisation de la stabilité des émulsions denses, 1 communication orale, 28 juillet 2001
[11] J.D. Sylvain, Method of processing data of microscopic diagnostics on emulsions, MAP ESA FASES midterm report contract AO-99-052, Carry-le-Rouet May 2002
[12] J.D. Sylvain, Critical comparison between microscopic holography and classical microscopy on emulsions, ESTEC meeting September 23d 2002
[13] A. Sanfeld and A. Steinchen, Project of modelling dense emulsions with multiplets interactions - FASES Midterm report MAP-ESA contract AO-99-052- Carry-le-Rouet, May 2002
[14] A. Steinchen, FASES final report contract AO-99-052, presented at ESTEC April 2003
[15] A. Steinchen, A. Sanfeld, N. Mishchuk et J.D. Sylvain, Stabilité des émulsions denses en microgravité: aspects expérimentaux et modélisation, Journées du GDR 2258, Aussois mai 2003
[16] J.D. Sylvain, new experimental developments for microscopic tomography inside emulsions, Noordwijk, ESTEC meeting May 2003

Couplage Réaction chimique – Hydrodynamique au cours de la propagation de front d'onde chimique (Dominique Salin)

A. OUVRAGES

1. **Gravitational instability of miscible fluids in a Hele-Shaw cell.** MARTIN J., RAKATOMALALA. N. AND SALIN D. Physics of fluids., **14**, 902 (2002).
2. **Buoyancy-Driven Instability of an Autocatalytic Reaction in a Hele-Shaw cell.** MARTIN J., RAKATOMALALA. N. SALIN D. AND BOCKMANN. M. - Phys. Rev. E., **65**, 051605 (2002)
3. **Pattern of reaction diffusion front in laminar flows** - LECONTE M., MARTIN J., RAKATOMALALA N. AND SALIN D. - Phys. Rev. Lett., **90**, 128302 (2003).

B. COMMUNICATIONS

4. **Gravitational instability of miscible fluids in a Hele-Shaw cell and chemical reaction.** MARTIN J., RAKATOMALALA. N. AND SALIN D. BÖCKMANN. M AND MÜLLER - J. PHYS. IV., **14**, 902 (2001).
5. **Reaction-diffusion front in laminar flows.** - LECONTE. M, MARTIN J., RAKATOMALALA. AND N. SALIN D. - Gordon Conference "Oscillations and Dynamic Instabilities in Chemical Systems" Juillet, 2002, Oxford, UK.
6. **Pattern of reaction diffusion front in laminar flows.**- LECONTE. M, MARTIN J., RAKATOMALALA. AND N. SALIN D.- FRONTS EN PATTERN IN CHEMICAL SYSTEMS IHP PARIS OCTOBRE 2002
7. **Autocatalytic reaction front in laminar flows.** - LECONTE. M, MARTIN J., RAKATOMALALA. AND N. SALIN D. - Reactor Workshop janvier 2003 Budapest

A. Ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

- A.1. Tatarchenko V.A., Uspenski V.S., Tatarchenko E.V., Roux B. Theoretical investigation of crystal growth shaping process with the wetting boundary condition. *J. Crystal Growth*, 148, p.415-420, 2000.
- A.2. Bessonov O., Fougere D., Roux B., Parallel Simulation of 3D Incompressible Flows and Performance Comparison for Several MPP and Cluster Platforms. *Lect. Notes Computer Sciences*, vol. 2127, pp.401-409, 2001.
- A.3. Lyubimov D.V., Cherepanov A.A., Lyubimova T.P. And Roux B., Vibration influence of a two-phase system in weightlessness conditions ; *J. Physique IV*, 11(Pr6), p. 83-90, 2001.
- A.4. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Meradji S., Roux B., Beysens D., Garrabos Y. And Chatain D. 2D unsteady motion and deformation of a gaseous bubble in a vibrating liquid at zero gravity. *J. Physique IV*, 11(Pr6), p. 91-98, 2001.
- A.5. Dold P., Benz K.W., Croell A., Roux B. Lyubimov D. Lyubimova T., Skyridyn R.. Vibration controlled convection – preparation and perspective of the MAXUS 4 experiment. *Acta Astronautica*, 48, p. 639-646, 2001.
- A.6. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., R.V. Skuridyn, Chen G., Roux B., Numerical investigation of deformations and flows in isothermal liquid bridge subject to high vibrations in zero-g conditions. *Computers & Fluids*, 31, p. 663-682, 2002.

En cours d'édition:

- A.7. Bessonov O., Fougere D., Roux B., Analysis of architecture and design of linear algebra kernels for superscalar processors. *Lecture Notes in Computer Science*, à paraître, sept. 2003.

B. Publications dans les actes de colloque avec comités de lecture

- B. 1. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Roux B.. Thermo-electromagnetic convection in a floating zone for a liquid bridge subject to axial magnetic field. *Proc. 4th Pamir Int. Conf. MHD at dawn of 3rd Millenium*; Vol.1, pp.411-416, 2000.
- B. 2. Bessonov O., Fougere D., Roux B., Parallelization of 3D solver for incompressible flows in a cylinder; in "Parallel CFD" special edition of ERCOFTAC Bulletin, Ed. Dave Emmerson, 50, p.13-16, 2001.
- B. 3. Meradji S., Lyubimova T.P., Lyubimov D.V., Roux B., Numerical simulation of a liquid drop freely oscillating. *Proc. Solfidap Workshop, special issue "Crystal Res. Tech."*, 36(7), 729-744, 2001
- B. 4. Bessonov O., Fougere D., Roux B. Using a Parallel CFD Code for Evaluation of Clusters and MPPs. *Int'l Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS '03)*. Nice, France; april 22-26, 2003

C. Liste des conférences

- C.1. D.V.Lyubimov, T.P.Lyubimova, B.Roux. Vibrational effects on heterogeneous systems. *ESA Topical Team "Vibrational phenomena under microgravity"*; Paris, 16 mars 2000.
- C.2. D.V.Lyubimov, T.P.Lyubimova, B.Roux. Vibrational effects on heterogeneous systems. *ESA Topical Team "Chemical-physics in near-critical and supercritical fluids"*; Paris, 24 mars 2000.

- C.3. T.P.Lyubimova, R.V. Skyridyn, D.V.Lyubimov, V.A. Demin, G. Chen, B.Roux. Theoretical and numerical study of axial vibration effect on flow and resonance in a liquid bridge. *ICTAM 2000*, aug.27-sept.2 2000, Chicago (USA).
- C.4. D.V.Lyubimov, T.P.Lyubimova, R.V. Skyridyn, B.Roux. Meniscus deformation and flow in isothermal liquid bridge subject to high frequency axial vibrations. *Symposium GO.1 "The impact of the gravity level on materials processing and fluid dynamics"*; 33rd COSPAR 2000, Warsaw, July 16-19, 2000.
- C.5. D.V.Lyubimov, T.P.Lyubimova, R.V.Skuridyn, B.Roux, P. Dold, A. Croell, K.W. Benz. High-frequency vibration influence on thermocapillary flow in a floating-zone system. *First Int. Symp. on Microgravity Research & Applications in Phys. Sc. & Biotechnology*. 10-15 sept., 2000, Sorrento (Italie)
- C.6. P. Dold, K.W. Benz, A. Croll, T.P.Lyubimova, R.V. Skyridyn, D.V.Lyubimov, B.Roux. Vibration controlled convection – preparation and perspective of the MAXUS 4 experiment. *51th IAF congress*, Rio de Janeiro, oct. 2-6, 2000.
- C.7. D.V.Lyubimov, T.P.Lyubimova et B.Roux.. Physics of pattern formation in heterogeneous continuous media and vibration-induced ordering in two-phase system. *ESA-ESTEC brainstorming on phenomena possibly involved in micro-structures interactions in condensed medium*. Noordwijk, mars 2001
- C.8. D.V.Lyubimov, T.P.Lyubimova, S. Meradji, B.Roux.. Unsteady motion and deformation of a gaseous bubble in a vibrating liquid in zero gravity. *4th Int. Conf. on Multiphase Flow: ICMF'01*, New Orleans, may 27, 2001.
- C.9. V.A.Demin, D.V.Lyubimov, T.P.Lyubimova, B.Roux. Rotating magnetic field influence on thermocapillary flow in a liquid bridge. *VIII International Conference on Stability and Turbulence of Homogeneous and Heterogeneous Flows*, 25-27 April, 2001, Novosibirsk, Russia.
- C.10. D.V.Lyubimov, T.P.Lyubimova, R.V.Skuridyn, K.W. Benz, P. Dold, A. Croell, B.Roux., Numerical simulation of flows and heat transfer in a floating zone subject to vibrations. *Preparation of space experiment. The 8th All-Russian Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, August 23-29, 2001, Perm, Russia.
- C.11. O. Bessonov, D. Fougère, B. Roux. Parallel Simulation of 3D incompressible flows and performance comparison for several MPP and cluster platforms. *Parallel Computing Technologies (6th Int. Conf. PaCT-01)*, 3-7 Sept. 2001, Novosibirsk, Russia.
- C.12. D. Lyubimov, T. Lyubimova, S. Meradji, D. Beysens, Y. Garrabos, B. Roux. Dynamics of a bubble in a liquid subjected to high frequency vibrations. *Spring Meeting of the « Vibrational Phenomena under micro-gravity »*. ESPCI, Paris, 19 mars 2002.
- C.13. D. Lyubimov, T. Lyubimova, A. Alabushev, K. Ponomareva, B. Billia, B. Roux. The influence of axial vibrations with finite frequency on directional solidification. *Spring Meeting of the « Vibrational Phenomena under micro-gravity »*. ESPCI, Paris, 19 mars 2002.
- C.14. D. Lyubimov, T. Lyubimova, S. Meradji, D. Beysens, Y. Garrabos, B. Roux. Dynamics of a bubble in a liquid subjected to high frequency vibrations. *Journée "Fluides sous vibrations"*. ESPCI, Paris, 20 mars 2002.
- C.15. D. Lyubimov, T. Lyubimova, A. Alabushev, K. Ponomareva, B. Billia, B. Roux. The influence of axial vibrations with finite frequency on directional solidification. *Journée "Fluides sous vibrations"*. ESPCI, Paris, 20 mars 2002.
- C.16. Lyubimova T.P., Scuridin R.V., Demin V.A., Lyubimov V.D., K.Benz, A.Croell, P.Dold, U.Kerat, Roux B., G.Chen. Control of flows and heat/mass transfer in crystal growth by floating zone method by vibration and rotating magnetic field. *CNES/CNRS GDR 2258; Journée thématique sur l'influence des champs externes sur la ségrégation et la structuration en solidification: expériences et simulations*; Grenoble 21 mars 2003.

- C.17. Lyubimova T.P., Lyubimov D.V., A.M.Vorobyev, E.V.Zharikov, A.N.Kovalenko, Roux B. Vibrations influence on flows and heat/mass transfer in crystal growth by Czochralsky method. CNES/CNRS GDR 2258; Journée thématique sur l'influence des champs externes sur la ségrégation et la structuration en solidification: expériences et simulations ; Grenoble 21 mars 2003.
- C.18. Bessonov O., Fougere D., Roux B. Using a Parallel CFD Code for Evaluation of Clusters and MPPs. Int'l Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS '03). Nice, France; april 22-26, 2003.
- C.19. Lyubimova T.P., Scuridin R.V., Demin V.A., Lyubimov V.D., K.Benz, A.Croell, P.Dold, U.Kerat, Roux B., G.Chen. Control of flows and heat/mass transfer in crystal growth by floating zone method by vibration and rotating magnetic field. CNES/CNRS GDR 2258; Journée thématique sur l'influence des champs externes sur la ségrégation et la structuration en solidification: expériences et simulations ; Grenoble 21 mars 2003.
- C.20. B. Billia, H. Nguyen Thi, Y. Dabo, B.H. Zhou, D.Lyubimov, T.Lyubimova, B.Roux. Contrôle vibrationnel de la convection lors de la solidification dirigée d'alliages binaires. Séminaire GDR 2258 "Phénomènes de Transport et Transitions de Phase en Micropesanteur ", Aussois, 26-28 mai 2003.
- C.21. T.P.Lyubimova, D.V.Lyubimov, A.M.Vorobyev, E.V.Zharikov, A.N.Kovalenko, B. Roux. Vibrations influence on flows and heat/mass transfer in crystal growth by Czochralsky method. Séminaire GDR 2258 "Phénomènes de Transport et Transitions de Phase en Micropesanteur ", Aussois, 26-28 mai 2003.
- C.22. T.P. Lyubimova, V. Demin, V.D. Lyubimov, B. Roux et G. Chen. Etude numérique des écoulements convectifs dans un système de croissance cristalline; influence d'un champ magnétique tournant sur les écoulements dans un pont liquide en apesanteur. Séminaire GDR 2258 "Phénomènes de Transport et Transitions de Phase en Micropesanteur ", Aussois, 26-28 mai 2003.
- C.23. D.V. Lyubimov , T.P. Lyubimova, S. Meradji, D. Beysens, D. Chatain, B. Roux. Dynamique vibrationnelle d'un système fluide diphasique en apesanteur. Séminaire GDR 2258 "Phénomènes de Transport et Transitions de Phase en Micropesanteur ", Aussois, 26-28 mai 2003.

Présentations acceptées:

- C.24. D.V. Lyubimov, T.P. Lyubimova, S. Meradji, D. Beysens, D. Chatain, B. Roux. Vibrational dynamics of a two-phase fluid in weightlessness conditions. Fifth Euromech Fluid Mechanics Conference, Toulouse, 24-28 Août 2003.
- C.25. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Tcherepanov A.A., Roux B. Vibration influence of fluid interfaces. Congrès Français de Mécanique. Nice, 1-5 sept. 2003.
- C.26. Bessonov O., Fougere D., Roux B. Analysis of architecture and Design of linear algebra kernels for superscalar processors. 7th int. Conf. Parallel Computing Technologies (PaCT-2003) Nizhny Novgorod, Russia; sept.15-19, 2003;

Séparation hydrodynamique (Mauricio Hoyos)

PUBLICATIONS

- Rôle des forces de portance et diffusion hydrodynamique dans les processus de séparation par la technique de SPLITT, M. Hoyos, P. Kurowski, Journal de Physique IV, 11, 6, (2001) 76-81.
- Pulse injection studies of blood progenitor cells in quadrupole magnetic flow sorter. M. Hoyos, K. McCloskey, L. R. Moore , M. Nakamura, B. J. Howell, J. J. Chalmers and M. Zborowski, Separation Science and Technology, 37 4 (2002) 745-767.
- Magnetic cell separation is a function of antibody binding capacity (ABC) Kara E. McCloskey, Lee R. Moore, Mauricio Hoyos, Alex Rodriguez, Jeffrey J. Chalmers, and Maciej Zborowski. Biotechnology progress, (Accepté, 2002).
- 25- Characterization of the non-specific crossover in SPLITT fractionation Mauricio Hoyos, Pascal Kurowski, Dorra Salhi, Lee R. Moore, Sarah Mills and Maciej Zborowski Journal of Chromatography, Soumis 2003.

A - OUVRAGES

Herman C; Iacona E; Földes IB; Suner G; Milburn C (2002) Experimental visualization of bubble formation from an orifice in microgravity in the presence of electric fields. *Experiments in Fluids* 32:396-412

Herman C; Földes IB; Iacona E; Milburn C (2003) Bubble detachment in microgravity under the influence of electric fields: Modeling and experiments. *Heat and Mass Transfer*, sous presse.

B - COMMUNICATIONS

Iacona E., Herman C., Chang S. (2003) Electric field effect on bubble detachment in variable gravity environment, *Proceedings of the Space Technology & Applications International Forum STAIF 2003*, CP654, Ed. by M.S. El-Genk, American Institute of Physics.

Iacona E., Herman C., Chang S. (2002) Electric field effects on an injected air bubble at detachment in a low gravity environment. *Heat Transfer 2002, Proceedings of 12th IHTC*, Edited by J.Taine, Vol. 3, pp 407-412.

Chang S., Herman C., Iacona E. (2002) Bubble detachment in variable gravity under the influence of a non-uniform electric field. *Proceedings of the 10th International Symposium on Flow Visualization, F0122*, August 26-29, Kyoto, Japan.

C. Autres publications

Herman C., Iacona E., Chang S. (2002) Bubble formation and detachment in reduced gravity. *Proceedings of the Sixth Microgravity Fluid Physics and Transport Phenomena Conference*. Vol 1, p294-305, NASA/CP-2002-211212.

Herman C., Chang S., Iacona E. (2002) Bubble detachment in variable gravity under the influence of uniform electric fields. *Proceedings of IMECE '02, 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*.

Iacona E., Herman C., Földes I., Milburn C. (2001) Electric fields effects on an injected air bubble in terrestrial and microgravity conditions. *Proceedings of the Second Pan-Pacific Basin Workshop on Microgravity Sciences*, Edited by N. Ramachandran and M. Lee, Paper AT-FT-1153.

Iacona E., Herman C., Földes I., Milburn C. (2001) Electric fields effects on an injected air bubble in terrestrial and microgravity conditions. *Gordon Research Conference: Gravitational Effects in Physico-Chemical Systems: Interfacial Effects*, July 8-13, New London, NH, USA

Herman C., Iacona E., Acquaviva T., Coho B., Grant N., Nahra H., Taylor A., Julian E., Robinson D., VanZandt D. (2001) Enhancement of pool boiling heat transfer and control of bubble motion in microgravity using electric field - BOECL. *AIAA Conference & Exhibit on International Space Station Utilization-2001*, 15 - 18 Oct, Cape Canaveral, FL, USA, AIAA-2001-5115.

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

GÖKALP, I., CHAUVEAU, C., MORIN, C., VIEILLE, B., and BIROUK, M. Improving droplet break-up and vaporisation models by including high pressure and turbulence effects, *Atomization and Sprays*, 10, 475-510 (2000)

CHAUVEAU, C., GÖKALP, I., SEGAWA, D., KADOTA, T. and ENOMOTO, H. Effects of Reduced Gravity on Methanol Droplet Combustion at High Pressures *Proceedings of the Combustion Institute*, 28, 1071-1077 (2000)

LEGRAND, B., MARION, M., CHAUVEAU, C., SHAFIROVICH, E. and GÖKALP, I. Ignition and combustion of levitated magnesium and aluminium particles in carbon dioxide *Combustion Science and Technology*, 165:151-174 (2001)

CHAUVEAU, C., GÖKALP, I. et MORIN, C., Vaporisation de gouttes en condition supercritiques: analyse préliminaire des résultats obtenus lors des expériences en fusée sonde Texas 38. *J. Phys. IV France*, 11: 315-324 (2001)

LEGRAND, B., CHAUVEAU, C., SHAFIROVICH, E., GOLDSHLEGER, U., CARREA, E., MOUNAIM-ROUSSELLE, C., ROUAN, J-P., and GÖKALP, I., Combustion of magnesium particles in carbon dioxide under microgravity conditions, *J. Phys. IV France*, 11: 311-314 (2001)

B. Communications à des Congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture

GÖKALP, I., CHAUVEAU, C., VIEILLE, B., MORIN, C., BIROUK, M. New models for droplet breakup and vaporization for high pressure spray combustion applications. **11th Annual symposium on Propulsion. Propulsion Engineering Research Centre**, Pennsylvania State University, State College, Pa, November 18-19, 2000 (papier dans CD)

MORIN, C., CHAUVEAU, C., GÖKALP, I. Vaporization of n-alkane droplets at high temperature and pressure **Eight International Conference on Liquid Atomization & Spray Systems**, 16-20 juillet 2000, Pasadena, Californie

LEGRAND, B., CHAUVEAU, C., SHAFIROVICH, E., GOLDSHLEGER, U., CARREA, E., MOUNAIM-ROUSSELLE, C., ROUAN, J-P., and GÖKALP, I., Combustion of magnesium particles in carbon dioxide under microgravity conditions, **Sixth International Microgravity Combustion Symposium, NASA/CP-2001-210826**, pp. 225-228, May 2001

A. Articles:

A1 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, Vol.6, pp.373-384,2000.

A2 Vietoris T., Ellzey J.L., Joulain P., Mehta S.N., Torero J.L., «*Laminar diffusion flames in microgravity: The results of the MiniTexus 6 sounding rocket experiment*» 28th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh PA, USA, Vol. 28, pp 2883-2889, 2000.

A3 Joulain P., Vietoris T., Torero J.L., «*Gas-gas and gas-solid laminar flat plate in microgravity: structure and stability*» Microgravity Science and Technology Journal, Vol.XIII/1, 2001.

A4 Torero J.L., Vietoris T., Legros G., Joulain P., «*Evaluation d'un nombre de transfert réel d'une flamme ascendante*», J.Phys.IV France, Vol.11, pp.291-300, 2001.

A5 Wang H.Y., Cordeiro P., Joulain P., «*Direct numerical simulation of a laminar diffusion flame established over a horizontal flat plate, in micro-gravity environment*», J.Phys.IV France, Vol.11, pp.331-338, 2001.

A6 Torero J.L., Vietoris T., Legros G., Joulain P., «*Estimation of a total mass transfer number from the stand-off distance of a spreading flame*» Combust. Sci. and Tech., 174 (11&12): 187-203, 2002.

A7 Wang H.Y., Cordeiro P., Joulain P., «*Effects of wind and oxygen on a laminar diffusion flame established over a horizontal flat plate in microgravity environment*», Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.27, n°4, pp.395-408, 2003.

A8 Rouvreau S., Joulain P., Wang H.Y., P.Cordeiro, Torero J.L., «*Numerical evaluation of boundary layer assumptions used for the prediction of the stand-off distance of a laminar diffusion flame*» 29th Symposium International on Combustion, University of Hokkaido, Sapporo, Japan, July 21-26, 2002. (accepté pour présentation et publication)

A9 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 (2003).

A10 Vietoris T., Joulain P., Torero J.L., «*Laminar diffusion flames established over a thermally thick fuel, Part I: Flame geometry*» accepted for publication *Combustion and Flame* (2003).

A11 Vietoris T., Joulain P., Torero J.L., «*Laminar diffusion flames established over a thermally thick fuel, Part II: Stability*», accepted for publication *Combustion and Flame* (2003).

A12 Rouvreau S., Joulain P., Torero J.L., «*Diffusion flames in microgravity: Influence of the gaseous flame on the aerodynamics of the flat plate boundary layer flow and limits of the Emmons formulation*» (submitted to the Journal of Fluid Mechanics).

B. Communications:

C1 Vietoris T., Joulain P., Torero J.L., «*Study of a microgravity gas- solid combustion in a sounding rocket*», First International Symposium on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology, Sorrento, Italy, September 10-15, 2000.

C2 Joulain P., Vietoris T., Torero J.L., «*Gas-gas and gas-solid laminar flat plate diffusion flame in microgravity: structure and stability*», Drop Tower Days, Zarm, University of Bremen, Germany, October 9-12, 2000. (Conférence invitée)

C3 Most J.M., Most A., Susset A., Baillargeat J., Joulain P., «*Flame characterization by PIV in microgravity conditions*», 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques in Fluid Mechanics, July 10-13, 2000, Lisbon, Portugal.

C4 Joulain P., Cordeiro P., Torero J.L., «*Characterisation of a laminar flat plate diffusion flame in microgravity using PIV, visible and CH emission*» Sixth International Microgravity Combustion Workshop, Cleveland Ohio USA, May 22-24, 2001.

C5 Cordeiro P., Joulain P., Torero J.L., «*Experimental study of low Reynolds number reacting flows: gas-gas laminar flat plate diffusion flame in microgravity*» Eighteenth ICDCERS, University of Washington, Seattle, Wa., USA, July 29-August 3, 2001.

C6 Wang H.Y., Cordeiro P., Joulain P., «*Effects of wind and oxygen on a laminar diffusion flame established over a horizontal flat plate in microgravity environment*», Proceedings Second Mediterranean Symposium on Combustion, Editors: M.Kamel & M.S.Mansour, Vol.1, pp.419-430, Charm-El- Cheikh, Egypt, January, 2002.

C7 Torero J.L., Vietoris T., Legros G., Joulain P., «*Estimation of a total mass transfer number from stand-off distance of a spreading flame*», Proceedings Second Mediterranean Symposium on Combustion, Editors M.Kamel & M.S.Mansour, Vol.2, pp.901-912, Charm-El- Cheikh, Egypt, January, 2002.

C8 Rouvreau S., Wang H.Y., Joulain P., Torero J.L., «*Numerical simulations of gas diffusion flames in microgravity on a flat plate in a flow of oxidizer parallel to its surface. Stand-off distance and boundary layer assumption.*» Ninth International Conference on Numerical Combustion, Hilton Sorrento Palace, Sorrento, Italy, April 7-10, 2002. (Accepté pour présentation et publication).

C9 Rouvreau S., Joulain P., Wang H.Y., Torero J.L., «*Evaluation of the influence of a diffusion flame established on a flat plate on a cross flow of air in microgravity: Case of a very low fuel injection velocity*» Seventh International Symposium on Fire Safety Science, Worcester, Ma, June 16-21, 2002. (Accepté pour présentation et publication).

C10 Wang H.Y., Joulain P., «*Numerical simulation of wind-aided turbulent fire propagation in a ventilated model tunnel*» Seventh International Symposium on Fire Safety Science, Worcester, Ma, June 16-21, 2002. (Accepté pour présentation et publication).

C11 Cordeiro P., Legros G., Rouvreau S., Joulain P., J.L.Torero, «*Detailed description of a low velocity laminar diffusion flame in microgravity*» 7th International Workshop on Microgravity Combustion and Chemically Reacting Systems – NASA - Cleveland, Ohio, USA, June 3-6, 2003.

C12 Legros G., Joulain P., Vantelon J.P., Breillat C., Torero J.L., «*Estimation of a soot layer optical thickness produced by a diffusion flame established in microgravity*» 3rd Mediterranean Combustion Symposium, Marrakech, Morocco, June 8-13, 2003.

C. Autres publications:

P1 Legros G., Blase K., Torero J.L., Vietoris T., Joulain P., «*Evaluation of a realistic mass transfer number from images of an upward spreading flame*» Second Joint Sections of The Combustion Institute, Oakland, Ca., USA, March 26-28, 2001.

P2 Joulain P., Legros G., Vietoris T., Torero J.L., «*Evaluation d'un nombre de transfert de masse réel d'une flamme ascendante*» Colloque Sciences de la Matière et microgravité, ESPCI Paris, 14-15 Mai, 2001. (Parue dans le Journal de Chimie Physique).

P3 Wang H.Y., Cordeiro P., Joulain P., «*Direct numerical simulation of a laminar diffusion flame established over a horizontal flat plate in microgravity environment*» Colloque Sciences de la Matière et microgravité, ESPCI Paris, 14-15 Mai, 2001. (Parue dans le Journal de Chimie Physique).

P4 Cordeiro P., David L., Calluau D., Joulain P., « *Visualisation par tomographie laser polychromatique d'une flamme de diffusion soumise à un écoulement forcé* » FLUVISU 2001, Colloque Francophone de Visualisation et de traitement d'images en Mécanique des Fluides, INSA de Rouen, 18-21 Juin 2001.

P5 Calluau D., David L., Rouvreau S., Joulain P., « *Écoulement laminaire autour d'un cylindre carré. Comparaison calcul-expérience* » XV^{ème} Congrès Français de Mécanique, Nancy, 3-7 Septembre 2001.

P6 Wang H.Y., Cordeiro P., Joulain P., Torero J.L., « *Effect of wind and oxygen on a laminar diffusion flame established over a horizontal flat plate in microgravity environment* » ELGRA Biennial Meeting and General Assembly, Banuyls sur Mer, France September 25-28. ELGRA News, Vol.22, p.44, 2002.

P7 Legros G., Joulain P., Vantelon J.-P., Breillat C., Torero J.L., « *Épaisseur optique d'une couche de suie formée par une flamme de diffusion en micropesanteur* », XVI^{ème} Congrès Français de Mécanique, Nice, 1-5 Septembre, 2003.

Thèses :

T1 Rouvreau S., « *Étude numérique d'une flamme de diffusion de gaz en microgravité sur une plaque plane soumise à un écoulement d'air parallèle à sa surface* ». Thèse de l'Université de Poitiers, 22 Février 2002.

T2 Cordeiro P., « *Analyse de la structure des écoulements réactifs à faible vitesse sur une plaque plane : cas de la flamme de diffusion laminaire dans un environnement sous gravité réduite* » Thèse de l'Université de Poitiers, 2003.

Combustion de brouillards, changements de phase (Pierre Haldenwang)

A) Revues

GUERIN R., EL GANAOUI M., HALDENWANG P. and BOUTOUX P; "Finite volume and spectral methods applied to Pb-30%Ti alloy solidification" - **J. Phys. IV (France)** vol. 11, pp 151-159 (2001)

NICOLI C., HALDENWANG P., DENET B. "Combustion de jets supercritiques" in "**Combustion dans les moteurs fusées**", CNES / Cépaduès Ed. (Toulouse), pp. 233-243 (2001)

SUARD S., NICOLI C. and HALDENWANG P. "Vaporisation controlled regime of flames propagating in fuel-lean spray" **J. Phys. IV (France)** vol. 11, pp 301-310 (2001)

HALDENWANG P., PIGNOL D. "Dynamically adapted mesh refinement for combustion front tracking" **Computers and Fluids**, vol. 31 (4-7) pp. 589-606 (2002)

NICOLI C., DENET B., HALDENWANG P. "Etude numérique de la combustion à la sortie d'un injecteur Hydrogène/oxygène" **Combustion**, vol.2 (2) pp. 39-53 (2002)

GUERIN R., EL GANAOUI M., HALDENWANG P. "Spectral and finite volume numerical approximations for solutal convection in melted alloys" **Lecture Notes in Comput. Science and Engineering**, vol. 21, Springer Verlag, pp. 253-260 (2002)

HALDENWANG P. and GUERIN R. "Transverse thermal effects in directional solidification" **J. of Crystal Growth**, vol. 244, pp. 108-122 (2002)

RIPOLL J.-F. and HALDENWANG P. "A 1-D modelling of a pool fire" **Combustion Theory and Modelling**, vol. 6 (4), pp. 647-673 (2002)

NICOLI C., HALDENWANG P. and DENET B. "Combustion of gaseous co-flow jets" **Combustion Science & Technology**, vol. 175 (6), pp. 1143 - 1163 (2003)

GARBA A. and HALDENWANG P. "Study of preconditioners for collocation Chebyshev approximation of the 2-D and 3-D Generalized Stokes Problem". **J. Computational Physics**, accepté (2003)

Colloques avec actes internationaux

GUERIN R. and HALDENWANG P. "Striation induced by unsteady flow in Bridgman directional solidification" **Proc. 11th Int. Symp. on Exp. Methods for Microgravity Materials Science**, San Diego, March 1-3, (1999), 10 pages.

HALDENWANG P. and GUERIN R. "Heat extraction induced transverse effects in directional solidification" **Proc. 11th Int. Symp. on Exp. Methods for Microgravity Materials Science**, San Diego, March 1-3, (1999), 21 pages.

GUERIN R., EL GANAOUI, A. LAMAZOUADE, P. HALDENWANG.
Numerical study for solutal convection in liquid alloy by spectral and finite volumes approximations. **Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2000**, Springer Verlag, p. 210-217 (2002)
Proceedings of the 11th Eur. Conf. Math. and Industry, Palermo, 26-30 september 2000.

R. GUÉRIN, M. EL GANAOUI, P. HALDENWANG.
Numerical Study for Solutal Convection in Liquid Pb-30% TI Alloy by Spectral and Finite Volume Approximations. **Int. FORTWIHR Conf. 2001. High-Performance Scientific and Engineering Computing Methods, Developments, and Applications**. Erlangen, March 12th-14th, 2001.

B) Communications

HALDENWANG P. (invited paper)
Numerical studies of deflagration phenomena.

Colloquium "Modellings of Reaction Fronts", Lyon, April 19-21 1999

HALDENWANG P., NICOLI C., DENET B.
Numerical schemes for low Mach number combustion.

Colloquium "State of the Art in Computational Fluid Dynamics", Marseille, 13-14 septembre 1999

DENET B., HALDENWANG P., NICOLI C. (invited paper)
Stabilization of a triple flame in a shear layer with variable density.
French-japanese Colloquium "Direct Numerical Simulations and Experiments in Turbulent Combustion", Cargese, October 6-8, 1999.

BORCHI R., DESMOULIN F. X., HALDENWANG P., NICOLI C., DENET B.
"Sur quelques investigations numériques en combustion diphasique", Actes du séminaire sur la Modélisation numérique en aérothermochimie pour la propulsion spatiale, Document CNES RT-NT-2122 (30 pages).
Paris / CNES, 9 mai (2000)

EL GANAOUI M., P. BONTOUX, P. HALDENWANG.
Instabilités et interfaces déformables dans les techniques d'élaboration de matériaux par solidification.
Colloque du Groupement de Recherche "phénomènes de transport et transition de phase en micropesanteur".
CEA, Grenoble 19-20 Juin 2000.

HALDENWANG P. (conférence invitée)
"Sur quelques méthodes de multi-résolution par volumes finis pour poursuivre une petite échelle."
Ecole de Printemps du CNRS/SPI en Mécanique des Fluides Numérique.
Aussois, 13-19 mai 2001

M. EL GANAOUI, R. GUERIN, P. HALDENWANG AND P. BONTOUX
Etude de la convection dans un bain fondu binaire par des approximations numériques de type spectrale et volumes finis. Actes du 15-ème congrès Français de Mécanique. Nancy 3-7 Septembre 2001.

SUARD S., NICOLI C., HALDENWANG P.
"Spray combustion : some properties of a minimal model."
Actes du FORUM CPS, "Modélisation numérique en propulsion spatiale", Document CNES, 16 pages,
CNES / Paris, 11 septembre 2001.

FORESTIER M., HALDENWANG P.
"Thermal control of a cylindrical cryogenic tank : numerical study of the free convection in vapour."
Proceedings of the First COMPERE Day, Document CNES/ONERA/DLR/AirLiquide/Astrium/EADS-LV (17 pages)
Grenoble / LEGI/ENSHMG/INPG, 17 octobre 2001

HALDENWANG P., NICOLI C., DAOU J.
"Evaporation et dilution d'une goutte LOX en régimes sous-critique et supercritique."
Colloque du GdR "Phénomènes de Transport et Transitions de Phase en Micro Pesanteur",
Grenoble / CEA, 19-20 juin (2000)

HALDENWANG P., NICOLI C., DENET B.
"Flame attachment in co-flow injection"
Colloquium on Computational Methods for Multidimensional Reactive Flows (CoMMReF)
Heidelberg University, Germany, September 25-27, (2000)

HALDENWANG P., PIGNOL D. (invited paper)
"Dynamically adapted mesh refinement for combustion front tracking and multiresolution."
International ERCOFTAC / DFG / CNRS Meeting on Numerical Simulation and Turbulence Control,
Université Louis Pasteur, Stasbourg, April 2-3, (2001)

HALDENWANG P., NICOLI C., SUARD S.,
"Sur un modèle minimal de combustion des brouillards"
Colloque Sciences de la matière et microgravité, CNES/CNRS, ESPCI-Paris, 14-15 mai (2001)

NICOLI C., HALDENWANG P., DENET B.
"Combustion de jets supercritiques"
Colloque de synthèse du Groupe de Recherche CNES / CNRS / ONERA / SNECMA "Combustion dans les moteurs-fusées", Toulouse, Cité de l'Espace, 26-28 juin (2001)

BONTOUX P., EL GANAOUI M., GUERIN R et HALDENWANG P. (conférencier invité)
"Contrôle des transferts thermo-solutaux en croissance directionnelle Bridgman"
Minicolloque Thermomécanique de l'Elaboration et la Mise en Forme des Matériaux
15-ème congrès Français de Mécanique. Nancy 3-7 Septembre 2001.

HALDENWANG P., PIGNOL D. (conférence invitée)
"Méthodes auto-adaptatives par volumes finis pour la combustion."
2^{de} Journée CEA / CNRS en Mécanique des Fluides Numérique.
Saclay / INSTN, 10 octobre (2001)

GARBA A., HALDENWANG P. (conférencier invité)
"Study of preconditioners for solving Chebyshev approximations of generalised Stokes problem."
Euromech-Ercoftac Colloquium 432 on Spectral Methods and Timestepping Schemes
for Incompressible Flows in Complex Geometries, pp. 21-22, October 18-19, Toulouse (2001)

SUARD Sylvain, NICOLI Colette and HALDENWANG Pierre
"Elementary modeling for spray flame propagation"
Workshop on combustion under microgravity, Poitiers, 15-16 octobre 2002

Colloques sur invitation à l'étranger

HALDENWANG P. (invited paper)
Numerical studies of low speed combustion phenomena.
Invited paper at the IMA Minisymposium on "Mathematical Investigations of models in Combustion",
Institute for Mathematics and its Applications, Minneapolis, November 14-17, 1999

HALDENWANG* P., NICOLI C., DENET B. (invited paper)
"Dynamics and Combustion of Cryogenic Co-flow Jets studied by Direct Numerical Simulation"
JSPS - CNRS Joint Seminar "Direct Numerical Simulations and Analytical Experiments for Constructing Detailed Turbulent-Combustion Model", 5 - 7 March, 2003, XIV TOBA, Anraku-cho, Toba-shi, Mie, Japan, 2003

A- Revues à comité de lecture

J.Jarosinski., J. Podfilipski, A.Gorczakowski, B.Veyssièrè, *Experimental study of flame propagation in propane-air mixture near rich flammability limits in microgravity*. Combustion, Science and Technology, vol.174, n°9, pp.21-48, 2002.

B- Colloques

J.Jarosinski, J.Podfilipski, B.Veyssièrè. *Transition from flame propagation to extinction under microgravity conditions*. Proceedings of the 1st International Symposium on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology, pp.307-312, Sorrento, Italy, 10-15 September 2000.

J.Jarosinski., J. Podfilipski, A.Gorczakowski, B.Veyssièrè, *Investigation of the role of microgravity on extinction conditions of premixed gaseous flames*. Colloque CNES/CNRS Sciences de la matière en microgravité, ESPCI, Paris, mai 2001.

O.Bozier, B.Veyssièrè, *Etude expérimentale de la génération contrôlée d'une suspension de particules solides dans une enceinte fermée*. Actes du 8^{ème} Congrès de l'AFVL, pp.385-390, Orsay, Septembre 2002.

C - Autres publications

B.Veyssièrè, *Etude des mécanismes de combustion des mélanges gaz-particules solides en condition de microgravité*. Rapport d'activité programme Polonium 2000. Septembre 2000

B.Veyssièrè, *Etude des mécanismes de combustion des mélanges gaz-particules solides en condition de microgravité* Rapport d'activité programme Polonium 2000. Septembre 2001.

B.Veyssièrè, O.Bozier, *Mécanismes de propagation des flammes dans les milieux hétérogènes gaz-particules solides*. Rapport d'activité de la convention CNES-CNRS n°793/00/CNES/8234/00. Octobre 2001

B.Veyssièrè, *Influence de la gravité sur la propagation des flammes dans les mélanges gaz-particules solides*. Séminaire de prospective du CNES. Novembre 2001

O.Bozier, Rapport d'activité, Région Poitou-Charentes. Janvier 2002.

O. Bozier. *Etude de la propagation des flammes dans les milieux hétérogènes gaz-particules solides*. Présentation à la Journée nationale des doctorants du GFC, Orléans 2002.

O.Bozier, B.Veyssièrè, *Mécanismes de propagation des flammes dans les milieux hétérogènes gaz-particules solides*. Rapport d'activité de la convention CNRS-INNERIS. Septembre 2002.

B.Veyssièrè, O.Bozier, *Mécanismes de propagation des flammes dans les milieux hétérogènes gaz-particules solides*. Rapport d'activité de la convention CNES-CNRS n°793/01/CNES/8601/00. Octobre 2002

O. Bozier. *Etude de la propagation des flammes dans les milieux hétérogènes gaz-particules solides*. Présentation à la Journée nationale des doctorants de l'INNERIS, Verneuil-en Halatte, 2002.

O.Bozier. Rapport d'activité, Région Poitou-Charentes. Janvier 2003.

B.Veyssièrè. *Combustion des suspensions gaz-particules solides*. Réunion thématique combustion GDR P2TPM – Groupe des sciences de la matière du CNES. Janvier 2003.

O.Bozier, B.Veyssièrè. *Etude de l'influence de l'état initial sur les caractéristiques de combustion d'une suspension de particules solides réactives dans une enceinte fermée*. Séminaire du GDR n°2258 P2TPM. Aussois, mai 2003.

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

A1. R. GATIGNOL & R. PRUD'HOMME (2001) – "Mechanical and thermodynamical modeling of fluid interfaces" - Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, Vol. 58, *World Scientific*, (266 pages).

A2. R. PRUD'HOMME « Combustion en micropesanteur » - Le Point sur.../Concise Review Paper, *C.R. Académie des Sciences, Série II, t. 329, N°3, mars 2001. Fascicule b. Mécanique*.

A3. R. PRUD'HOMME, D. LANGEVIN, G. FAIVRE, EDS. (2001) – Sciences de la matière et microgravité - *Journal de Physique IV*, 11, Pr6, Octobre 2001, (352 pages).

A4. S. PREAU, R. PRUD'HOMME « Evaporation de gouttes près du point critique : influence de la tension superficielle sur les conditions d'équilibre » in « Sciences de la matière et microgravité » *Journal de Physique IV*, 11, Pr6, Octobre 2001, 325-330. (Ouvrage).

A5. R. MOREAU, R. PRUD'HOMME « Préface » in « Sciences de la matière et microgravité » *Journal de Physique IV*, 11, Pr6, Octobre 2001, 325-330. (Ouvrage).

A6. R. PRUD'HOMME, M. EL GANAOU, E. SANCHEZ-PALENCIA, EDS. (2003) – Phénomènes de transfert et Micropesanteur – Numéro spécial des Comptes Rendus à l'Académie des Sciences – Section Mécanique (en préparation).

A7. R. PRUD'HOMME, M. EL GANAOU, EDS. (2003) – Microgravité et Transferts – Numéro spécial de Mécanique et Industries (en préparation).

A8. R. PRUD'HOMME, R. GATIGNOL - « Thick fluid interface modeling ». *Int. J. of Thermal Sciences* (accepté, janvier 2003).

A9. R. PRUD'HOMME - « L'intérêt de « l'outil Microgravité » pour la mécanique des fluides et ses applications ». *Mécanique et Industries*. (accepté, janvier 2003).

A10. S. PREAU, R. PRUD'HOMME, J. OUAZZANI, B. ZAPPOLI - « Isobaric vaporization of a Droplet near the critical point : a new quasi-steady analysis » *Physical Review* (en préparation, mars 2003)

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture

B1. R. PRUD'HOMME, R. GATIGNOL « Thick fluid interface modeling » – *The 13th International Symposium on Transport Phenomena, Victoria CA, July 14-18, 2002. (Actes)*

B2. R. PRUD'HOMME « Pertinence of micro-gravity studies for solid/liquid phase change » (Invited conference) - Mini-symposium - "Solid/liquid phase change : transitions and interfaces" - *The 13th International Symposium on Transport Phenomena, Victoria CA, July 14-18, 2002. (Actes)*

B3. R. PRUD'HOMME : « Modélisation des interfaces ». Conférence invitée, Université de Limoges, 11 décembre 2002.

B4. R. PRUD'HOMME, M. HABIBALLAH, A. NICOLE "On Transient heating and dynamic response to acoustic oscillation of a vaporizing droplet ». *XXXI Summer School – Conference "Advanced Problems in Mechanics" (APM2003) June 23-July 2, 2003 - St. Petersburg, Russia*.

B5. S. PRÉAU, J. OUAZZANI, R. PRUD'HOMME & B. ZAPPOLI « On evolution of a pure supercritical droplet near the critical point ». XXXI Summer School – Conference “Advanced Problems in Mechanics” (APM2003) June 23-July 2, 2003 - St. Petersburg, Russia (poster).

B6. S. PRÉAU, J. OUAZZANI, R. PRUD'HOMME & B. ZAPPOLI « Relaxation of a cold near critical fluid package: corrections to the quasi-steady approximation”. 5th Euromech Fluid Mechanics Conference – Toulouse – 24-28.8.2003 (accepté, communication orale).

B7. R. PRUD'HOMME, M. HABIBALLAH, S. PRÉAU « Simplified model for droplet transient heating » 5th Euromech Fluid Mechanics Conference – Toulouse – 24-28.8.2003 (accepté, communication orale).

B8. S. PREAU, J. OUAZZANI, R. PRUD'HOMME, B. ZAPPOLI “Evaporation d'une goutte de corps pur dans sa vapeur près du point critique : pertinence de l'hypothèse quasi-stationnaire et corrections au deuxième ordre” . Congrès Français de Mécanique, Nice, 1-5 septembre 2003 (accepté, communication orale, actes à diffusion restreinte).

C AUTRES PUBLICATIONS

C1. R. PRUD'HOMME, R. GATIGNOL (2001) – « Thick fluid interface modeling” *International Workshop on Miscible Interfaces, 2-5 July 2001, ESPCI, Paris.* (Actes).

C2. R. PRUD'HOMME (2001) – « Droplet evaporation and combustion: - quasi-steady analysis review of assumptions and main results – preliminary analysis of droplet dynamics » *R et T Program on High Frequency Combustion Instability in Liquid Rocket Engines, Second Scientific Progress Meeting, 3 may 2001, IRPHE, Marseille.*(Actes).

C3. R. PRUD'HOMME « Phénomènes de Transport et Transitions de Phase en Micropesanteur. Présentation du GDR 2258 » *Journées du GDR 2258 « Phénomènes de transport et Transitions de Phase en Micropesanteur », ESPCI, Paris, 27-28 mai 2002.*

C4. R. PRUD'HOMME « Combustion, milieux réactifs » *Journées du GDR 2258 « Phénomènes de transport et Transitions de Phase en Micropesanteur », ESPCI, Paris, 27-28 mai 2002.*

C5. S. PREAU, J. OUAZZANI, R. PRUD'HOMME & B. ZAPPOLI « Relaxation en densité d'une poche de gaz dense en atmosphère infini » *Workshop Combustion sous gravité réduite, 15-16 octobre 2002, LCD/ENSMA, Futuroscope.*

C6. R. PRUD'HOMME « Modèle à deux couches pour l'évaporation des gouttes avec échanges thermiques internes » *Workshop Combustion sous gravité réduite, 15-16 octobre 2002, LCD/ENSMA, Futuroscope.*

C7. R. PRUD'HOMME & S. ZALESKI « Interfaces et Mécanique des fluides » *Journée thématique du Département SPI, 10 septembre 2002, LMM, Paris.*

C8. R. PRUD'HOMME « Présentation du GDR 2258 ». *Comité scientifique du LMM, 3 octobre 2002, LMM, Paris.*

C9. S. PREAU, R. PRUD'HOMME, J. OUAZZANI, B. ZAPPOLI “*Etude analytique et numérique de l'expansion isobare d'une poche de fluide légèrement supercritique dans une ambiance de densité plus faible*”. Séminaire du GDR 2258 – Aussois – 26-28 mai 2003.

C10. R. PRUD'HOMME, M. HABIBALLAH, A. NICOLE « *Modélisation analytique de l'évaporation de gouttes en régime transitoire* ». Séminaire du GDR 2258 – Aussois – 26-28 mai 2003.

C11. S. PREAU, J. OUAZZANI, R. PRUD'HOMME & B. ZAPPOLI « *Evaporation d'une goutte au voisinage du point critique : un nouveau type d'analyse quasi-stationnaire* ». Journée CNES des Jeunes Chercheurs – CNES Toulouse – 11-13 juin 2003.

Solidification d'alliages (Bernard Billia)

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

Microsegregation in Peltier Interface Demarcation - DABO Y., NGUYEN THI H., CORIELL S.R., MCFADDEN G.B., LI Q., BILLIA B. - *J. Crystal Growth* **216** (2000) 483

Electrical Pulsing during Directional Solidification: Analysis of Transients by Laplace Transform. CORIELL S.R., MCFADDEN G.B., BILLIA B., NGUYEN THI H., DABO Y. - *J. Crystal Growth* **216** (2000) 495

Solidification of Aluminum-Lithium alloys near the cell/dendrite transition - Influence of Solutal Convection. DREVET B., NGUYEN THI H., CAMEL D., BILLIA B., DUPOUY M.D. - *J. Crystal Growth* **218** (2000) 419

Optical device dedicated to the non-destructive observation and characterization of the solidification of bulk transparent alloys in situ and in real time - NOËL N., ZAMKOTSIAN F., JAMGOTCHIAN H., BILLIA B. *Measurement Science and Technology* **11** (2000) 66

Nonequilibrium molecular dynamics simulation of rapid directional solidification - CELESTINI F., DEBIERRE J.M. - *Phys. Rev. B* **62** (2000) 1406

In situ observation and interferometric characterisation of solid-liquid interface morphology in directionally growing transparent model systems - JAMGOTCHIAN H., BERGEON N., BENIELLI D., VOGÉ P., BILLIA B. - *J. Microscopy* **203** (2001) 119

Directional cellular growth of succinonitrile - 0.075 wt% acetone bulk samples. Part 2: Analysis of cellular pattern.- KAUERAUF B., ZIMMERMANN G., REX S., BILLIA B., JAMGOTCHIAN H., HUNT J.D. *J. Crystal Growth* **223** (2001) 277

Localized microstructures induced by fluid flow in directional solidification - JAMGOTCHIAN H., BERGEON N., BENIELLI D., VOGÉ P., BILLIA B., GUÉRIN R. - *Phys. Rev. Letters* **87** (2001) 166105

Microstructure and control in advanced casting processes - BILLIA B., FECHT H.J. in «*A World without Gravity, Research in Space for Health and Industrial Processes*» - ESA SP-1251, European Space Agency, Noordwijk, (2001) p. 186

Pattern formation in directional solidification under shear flow. I : Linear stability analysis and basic patterns - MARIETTI Y., DEBIERRE J.M., BOCK T.M., KASSNER K. - *Phys. Rev. E* **63** (2001) 66301

Pattern formation in directional solidification under shear flow. II : Morphologies and their characterization - MARIETTI Y., DEBIERRE J.M., BOCK T.M., KASSNER K. - *Phys. Rev. E* **63** (2001) 66302

Free Growth and Instability Morphologies in Directional Melting of Alloys - BENIELLI D., BERGEON N., JAMGOTCHIAN H., BILLIA B., VOGÉ P. - *Phys. Rev. E* **65** (2002) 051604

Measuring kinetic coefficients by molecular dynamics simulation of zone melting - CELESTINI F., DEBIERRE J.M. - *Phys. Rev. E* **65** (2002) 041605

Transverse thermal effects in directional solidification - HALDENWANG P., GUERIN R. - *J. Crystal Growth* **244** (2002) 108

Preparation of the initial solid – liquid interface and melt in directional solidification - NGUYEN THI H., DREVET B., DEBIERRE J.M., CAMEL D., DABO Y., BILLIA B. - *J. Crystal Growth* **253** (2003) 539

Phase-field approach for faceted solidification -DEBIERRE J.M., KARMA A., CELESTINI F., GUERIN R. - Phys. Rev. E, soumis

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture

Comparative Study of the Influence of Convection on Columnar and Equiaxed Microstructures in Directional Solidification of Non-refined and Refined Al-Ni Alloys
CAMEL D., DUPOUY M.D., VERRIER S., DREVET B., DABO Y., NGUYEN THI H., BILLIA B.
Proc. *First International Symposium «Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology»*, B. Schürmann Ed., ESA-SP-454, European Space Agency, Noordwijk (2001) p. 581

In situ characterization of the effect of thermal and thermosolutal convection on directional solidification of succinonitrile-acetone alloy
JAMGOTCHIAN H., BERGEON N., BENIELLI D., VOGÉ P., GUÉRIN R., BILLIA B.
Proc. *First International Symposium «Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology»*, B. Schürmann Ed., ESA-SP-454, European Space Agency, Noordwijk (2001) p. 599

Localized morphologies observed in directional solidification of binary alloys into three-dimensional flows.
BILLIA B., BERGEON N., BENIELLI D., DABO Y., GUÉRIN R., JAMGOTCHIAN H., NGUYEN THI H., VOGÉ P. in *«Interactive dynamics of Convection and Solidification»*, P. Ehrhard, D.S. Riley, P.H. Steen Eds, Kluwer, Dordrecht (2001), p. 5

Interactive dynamics of fluid flow and interface microstructure in directional solidification of alloys.
BILLIA B., BENIELLI D., BERGEON N., DABO Y., GUÉRIN R., JAMGOTCHIAN H., NGUYEN THI H., VOGÉ P. in *«Solidification Science and Processing : Outlook for the 21st Century»*, B.K. Dhindaw, B.S. Murty, S. Sen (Science Publishers, Enfield, NH, USA, 2001) p. 25

Effect of gravity on the formation of dendritic or cellular microstructures during directional solidification of binary or refined Al-Ni alloys
DUPOUY M.D., CAMEL D., DREVET B., NGUYEN THI H., DABO Y., BILLIA B.
Proc. International Conference on the «Science of Casting and Solidification» (SoCaS), D.M. Stefanescu, R. Ruxanda, M. Terean, C. Serban Eds (Editura Lux Libris, Brasov, Roumanie, 2001) p. 22

Influence of the Melting and Stabilization Stages on the Initial Solidification Transient
NGUYEN THI H., CAMEL D., DABO Y., DREVET B., BILLIA B.
Proc. International Conference on the Science of Casting and Solidification (SoCaS), D.M. Stefanescu, R. Ruxanda, M. Terean, C. Serban Eds (Editura Lux Libris, Brasov, Roumanie, 2001) p. 60

Solidification dirigée d'alliages Al-1,5 % pds Ni : Analyse des étapes préparatoires de fusion et de stabilisation
NGUYEN THI H., DABO Y., BILLIA B., CAMEL D., DREVET B.
J. Physique IV Pr6 (2001) 161

Influence de la convection thermique en solidification dirigée à base d'alliage succinonitrile – acétone : Etudes comparées simulations numériques - expériences.
BENIELLI D., EL GANAOUI M., SEMMA E., BERGEON N., JAMGOTCHIAN H., VOGÉ P., BILLIA B., BONTOUX P.
J. Physique IV Pr6 (2001) 135

Etude numérique de la convection solutale dans la phase liquide lors de la solidification dirigée d'alliages binaires : Comparaison entre méthode spectrale et volumes finis
GUERIN R.; EL GANAOUI M., HALDENWANG P., BONTOUX P.
J. Physique IV Pr6 (2001) 151

Spectral and Finite Volume Numerical Approximations for Solutal Convection in Melted Alloys

GUERIN R., EL GANAOUI M., HALDENWANG P. in *«High performance scientific and engineering computing»*, M. Breuer, F. Durst, C. Zenger Eds
Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol. 21, Springer- Verlag (2002) p. 253

Numerical Study for Solutal Convection in Liquid Pb-30 % TI Alloy by Spectral and Finite Volume Approximations
GUERIN R., EL GANAOUI M., LAMAZOUADE A., HALDENWANG P. in *«Progress in industrial mathematics at ECMI 2000»*, A.M. Anile, V. Capasso, A. Greco Eds _ Mathematics in Industry Series, Vol. 1, Springer- Verlag (2002) p. 210

DECLIC: The experiment program and its potentialities
CAMBON G., ZAPPOLI B., LAUVER R., BEYSENS D., GARRABOS Y., LECOUTRE C., BILLIA B., JAMGOTCHIAN H., BERGEON N.
Proc. 53rd International Astronautical Congress, IAF/IAA-J2.04 (Houston, 2002)

Formation de l'état initial en solidification dirigée
BENIELLI D., BERGEON N., DABO Y., BILLIA B., JAMGOTCHIAN H., NGUYEN THI H., VOGÉ P. Proc. Matériaux 2002 : De la conception à la mise en œuvre, Tours, 2002 - CD-ROM, ISBN n° 2-914279-08-6

Ségrégations induites par la fusion et la stabilisation thermique précédant la solidification dirigée : comparaison des systèmes Al-Li et Al-Ni
DREVET B., CAMEL D., DABO Y., NGUYEN THI H., BILLIA B.
Proc. Matériaux 2002 : De la conception à la mise en œuvre, Tours, 2002 - CD-ROM, ISBN n° 2-914279-08-6

C. Autres publications

Etude numérique de la solidification dirigée d'alliages binaires
MARIETTI Y. : Thèse, Université d'Aix-Marseille 3, nov. 2000

Dynamique de formation de réseaux cellulaires en solidification dirigée d'alliages
DABO Y. : Thèse, Université d'Aix-Marseille 3, jan. 2001

Equipe Fronts de solidification (Gabriel Faivre)

Publications citées

G. Faivre, J. Cryst. Growth **166**, 29 (1996) [9th ICCG, La Haye, Juil. 1995]. *Morphological instabilities of lamellar eutectic growth front. A survey of recent experimental and numerical results.*

M. Ginibre, S. Akamatsu, and G. Faivre, Phys. Rev. E **56**, 780 (1997). *Experimental determination of the stability diagram of a lamellar eutectic growth front.*

S. Akamatsu and G. Faivre, Annales de Physique **22**, C2-39/C2-46 (1997). (5th JFMSS, Sapporo, Oct. 1997). *Morphology diagrams in directional solidification of binary alloys.*

S. Akamatsu, and G. Faivre, Phys. Rev. E **61**, 3757 (2000). *Traveling waves, two-phase fingers and eutectic colonies in thin-sample directional solidification of a ternary eutectic alloy.*

S. Akamatsu, S. Moulinet and G. Faivre, Metall. Mater. Trans. **32A**, 2039 (2001a). *The formation of lamellar eutectic grains in thin samples.*

S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau et G. Faivre, J. Phys IV **11**, 127 (2001b) [Journées « Sciences de la Matière et Microgravité », Paris, Mai 2001]. *La dynamique de solidification des eutectiques lamellaires : des échantillons minces aux systèmes massifs.*

T. Börzsönyi, S. Akamatsu, and G. Faivre, Phys. Rev. E **65** 11702 (2001). *Dynamics of a faceted nematic-smectic B front in thin-sample directional solid.*

S. Bottin-Rousseau, S. Akamatsu, and G. Faivre, Phys. Rev. B **66**, 054102 (2002). *Formation of grain subboundaries during directional solidification below the cellular-bifurcation threshold.*

G. Faivre, 14th ACCG, Seattle, (2002). *Stability of lamellar eutectic growth. Recent advances and future prospects.*

S. Akamatsu, M. Plapp, G. Faivre, A. Karma, Phys. Rev. E, **66** 30501 (2002). *Pattern Stability and Trifurcation Motion in Eutectic Solidification.*

S. Akamatsu, M. Plapp, G. Faivre, A. Karma, soumis à Acta Met. (2002). *The stability of lamellar eutectic fronts close to the minimum-undercooling spacing.*

Croissance et Elasticité (Alain Pocheau)

A) Ouvrages

A1 Bottin S., Pocheau A., Self organized dynamics on a curved growth interface, Physical Review Letters, vol 87, n°7 p. 76101-1-4, 2001

A2 Pocheau A., Georgelin M., From the stability of cells to the mean behavior of growth fronts: A directional solidification study, J. Phys. IV France 11 p. 169-178, 2001

A3 Pocheau A., Georgelin M., Validation Criterion for Noise-Induced mechanism of sidebranching in directional solidification, Eur.Phys.J.B 21 p. 229-240, 2001

A4 Pocheau A., Georgelin M., Cellular arrays in binary alloys : from geometry to stability, Journal of Crystal Growth 250 p100-106,2003

B) Communications

B1 Bottin S., Pocheau A. Dynamique non-linéaire d'un front courbé, Compte-Rendus de la Rencontre du Non-Linéaire, Paris 9 au 10-03-2000. Les Ulis: Editions Paris XI 2000

B2 Georgelin M., Pocheau A. Experimental study of sidebranching in directionnal solidification in « Branching in nature ». Fleury V., Gouyet J-F., Leonetti M. Centre de Physique des Houches, n°14, Les Ulis: EDP Sciences, Berlin: Springer. p.409-414, 2001

B3 Pocheau A., Georgelin M. Conférence invitée à " Fourteenth American Conference on Crystal Growth and Epitaxy Seattle, Washington, USA, 4- 9 Aout 2002,

A. Ouvrages, contributions à des ouvrages, articles dans des revues à comité de lecture

- [1] "Fluid Flow and segregation in crystal growth from the melt"
J.P. Garandet, T. Duffar
Chapter 13 in "Physics of fluids in microgravity", R. Monti Editeur, Taylor & Francis, London, 2001, ISBN 0-415-27581-4, pp. 433-488
- [2] "Crystal growth in microgravity conditions"
T. Duffar
Article dans "Encyclopedia of Materials: Science and Technology", éditeurs: K. Buschow, R. Cahn, M. Flemings, B. Ilshchner, E. Kramer, S. Mahajan (Pergamon), September 2001, pp. 1873-1880
- [3] « Crystal Growth of Inorganic Materials »
K.W. Benz, T. Duffar, M. Fiederle
In « A World without Gravity », G. Seifert Editor, pp 172-185; ESA Publications SP 1251, 2001, ISBN 92-9092-604-X
- [4] "Rationale and results of bulk crystal growth in space"
T. Duffar
Conférence invitée, Int. School on Crystal Growth of Technologically important Electronic Materials, 20-27 January 2003, Mysore, India
Allied Publishers, 2003, ISBN 81-7764-375-4, pp. 553-562
- [5] "Numerical simulation of solute segregation during directional solidification and comparison with experiments"
C. Stelian, T. Duffar, I. Nicoara
Under press in J. Crystal Growth
- [6] "CdTe single crystal growth on earth by the dewetting process"
Nicolas Chevalier, Pierre Dusserre, Jean-Paul Garandet, Thierry Duffar
Accepted for publication, J. Crystal Growth
- [7] "Dewetted growth of CdTe, Part 1: Growth in Microgravity (STS-95)"
M. Fiederle, T. Duffar, V. Babentsov, K.W. Benz, P. Dusserre, V. Corregidor, E. Dieguez, G. Roosen, J.C. Launay, V. Chevrier
Submitted for publication, J. Crystal Growth
- [8] "Dewetted growth of CdTe, Part 2: Growth on Earth"
M. Fiederle, T. Duffar, V. Babentsov, A. Fauler, W. Witte, K.W. Benz, J.P. Garandet, P. Dusserre, N. Chevallier, V. Corregidor, E. Dieguez, G. Roosen, J.C. Launay, V. Chevrier
Submitted for publication, J. Crystal Growth
- [9] "Investigation of a potentiality for obtaining compositionally homogeneous $In_xGa_{1-x}Sb$ crystals under conditions of low intensity melt flows"
S.V. Bykova, V.D. Golyshev, M.A. Gonik, V.B. Tsvetovsky, T. Duffar, M.P. Marchenko, I.V. Frjazinov
Crystallographya, 2003, in press
- [10] "Numerical-experimental research into growth features of doped GaSb crystals obtained by the AHP method"
S.V. Bykova, V.D. Golyshev, M.A. Gonik, V.B. Tsvetovsky, M.P. Marchenko, I.V. Frjazinov, J.A. Serebrjakov, B.G. Zaharov, E. Diéguez, T. Duffar, J.L. Santailier
Crystallographya, 2003, in press
- [11] "Channel Segregates en Solidification, 2D Simulation of the Effects of an AC Travelling Field "

M. Medina, Y. Du Terrail, F. Durand And Y. Fautrelle, Metal. and Mat. Trans, accepted for publication in 2003.

[12] "Convective Patterns in Directional Columnar and Equiaxed Dendritic Solidification of Binary Alloys"
M.D. Dupouy, D. Camel, chapitre d'ouvrage "Recent Research Developments in Crystal Growth Research", Vol.2 (2000), ed. S.G. Pandalai, Transworld Research Network

B. Communications à des congrès, colloques, séminaires, à comité de lecture

- [13] « Influence of temperature oscillations on the interface velocity during Bridgman crystal growth »
C. Stelian, T. Duffar, J.L. Santailier, I. Nicoara
13th Int. Conf. Crystal Growth, Kyoto, 29 juillet-3 Août 2001
J. Crystal Growth 237/239 (2002) 1701-1706
- [14] "Modelling of the Meso-Segregations in a Binary Alloy Under the Influence of a Forced Convection",
G. Quillet, A. Ciobanas, P. Lehmann, Y. Delannoy, M. Medina And Y. Fautrelle Proc. of the Int. Conf. On Modelling of Casting, Welding and Adv. Solidification Processes X, Sandestin (Flo. USA), May 25-30, p. 253, 2003.
- [15] "Experimental and Numerical Study of Convective Pattern and Segregation in Upward Solidification with a Stabilising Solutal Density Gradient",
M.D. Dupouy, I. Vannier, D. Camel, S. Verrier, A. Brun, C. David-Granat, H. Combeau Proceedings of Modelling Casting Welding and Advanced Solidification Processes IX SIM 2000, Aachen, (2000), pp. 624-631
- [16] "Comparative study of the columnar-Equiaxed Transition in microgravity and on ground during directional solidification of a refined Al-3.5 wt% Ni alloy",
D. Camel, M.D. Dupouy J. Phys. IV France 11 (2001), Pr6-119
- [17] "Transition colonnaire-équiaxe au sol et en microgravité pour la solidification dirigée d'un alliage affiné Al - 3,5 %poids Ni »
M.D. Dupouy, D. Camel, J.E. Mazille, colloque 11, Tours 2002
- [18] "Influence of natural convection on columnar to equiaxed transition during directional solidification of refined Al based alloys - relevance of microgravity experiments",
M.D. DUPOUY, D. CAMEL, J.E. MAZILLE, Proc. of the Int. Conf. On Modelling of Casting, Welding and Adv. Solidification Processes X, Sandestin (Flo. USA), May 25-30, p. 685, 2003
- [19] "Modelling of the meso-segregations under the influence of forced convection : a statistical phase-averaged approach"
Y. Fautrelle, P. Lehmann, G. Quillet, M. Medina, F. Durand, Y. Du Terrail, EUROMECH Colloquium 408, "Interactive dynamics of convection and solidification" 18-22 March 2000, ed. by Kluwer Pub., p.87-97, 2001.
- [20] M. MEDINA, F. DURAND, Y. DU TERRAIL and Y. FAUTRELLE, «Numerical simulation of the Meso-Segregation of Binary Alloys : Influence of Permeability Laws and Body Forces», Colloque SF2M – JA99, Paris, Novembre 1999, ed. by La Revue de Métallurgie, p. 127, 1999.
- [21] F. DURAND, M. MEDINA, Y. DU TERRAIL and Y. FAUTRELLE, «Solidification under Convection – Present Trends at EPM-MADYLAM », Proceedings of Japan – France Cooperative Science Program Seminar on New Aspects of Electromagnetic Processing of Materials, p. 33-36, Nikko Toshiigi (Japan), April 1-4, 1999.
- [22] M. MEDINA, Y. DU TERRAIL, F. DURAND and Y. FAUTRELLE, « Effect of an AC Travelling Field on Medium Scale Segregation, Some Results of a Numerical Model », Proc. 3rd Int. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya (Japan), April 3-6, 2000, edited by I.S.I.J., 2000.

[23] M. MEDINA, F. DURAND, Y. DU TERRAIL and Y. FAUTRELLE, « Segregation in solidification with natural and forced convection », Proc. 3rd Mercosur Congress on Process System Engineering, Santa Fe (Argentina), September 16-20 2001.

[24] M. MEDINA, Y. DU TERRAIL, F. DURAND and Y. FAUTRELLE, « Effect of an AC Travelling Field on Medium Scale Segregation, Some Results of a Numerical Model », Proc. 3rd Int. Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya (Japan), April 3-6, 2000, edited by I.S.I.J., 2000.

C. Autres publications

[25] G. QUILLET, A. CIOBANAS, P. LEHMANN and Y. FAUTRELLE, « Meso-segregations during solidification in a binary alloy under the influence of convection », Proc. of The Int. Colloquium « Modelling for Electromagnetic Processing », 24-26 March 2003, Hannover (Germany).

[26] "Directional Solidification of InSb crystals"
A. Ostrogorsky, C. Marin, M. Volz, P. Luz, L. Jeter, R. Spivey, T. Duffar
1st Conference and Exhibit on International Space Station Utilization, Cape Canaveral, Florida, October 15-18, 2001. Acta Astronautica, à paraître (paper AIAA 2001-5117)

[27] "Directional Solidification in the Microgravity Science Glovebox"
A. Ostrogorsky, C. Marin, T. Cummings and T. Duffar
40th Aerospace Sciences Meeting of the AIAA, Reno, Nevada, Jan 14-17, 2002. Acta Astronautica, à paraître (paper AIAA 2002-0189)

[28] "Study of an opportunity for obtaining compositionally homogeneous ingots of Ga_{1-x}In_xSb alloys at weak melt flow"
S.V. Bykova, T. Duffar, I.V. Fryazinov, V. D. Golyshev, M.A. Gonik, M.P. Marchenko, V.B. Tsvetovsky, Abstracts of X Russian Conference on Crystal Growth, Russia, Moscow, IK RAN, November 24-29, 2002

[29] "Comparative investigations of doped GaSb crystal growth by the AHP and the Vertical Bridgman technique" S.V. Bykova, E. Dieguez, T. Duffar, I.V. Fryazinov, V. D. Golyshev, M.A. Gonik, M.P. Marchenko, J.L. Santaller, J.A. Serebriakov, V.B. Tsvetovsky, B.G. Zakharov, Abstracts of X Russian Conference on Crystal Growth, Russia, Moscow, IK RAN, November 24-29, 2002

[30] « Effect of axial magnetic fields on buoyancy convection and solute segregation during vertical Bridgman growth ». Stelian, D. Vizman, T. Duffar
Séminaire universitatea de Vest din Timisoara, septembre 2002
A paraître dans Annals of West University Timisoara.

[31] "The use of magnetic fields in the Bridgman Crystal Growth of concentrated semiconductor alloys"

Alina Mitric, Carmen Stelian, Thierry Duffar
Proc. Int. Sci. Colloq. "Modelling for Electromagnetic Processing", Hannover, 24-26 March 2003, B. Nacke and E. Baake Edit., ISBN 3-00-011073-9, pp. 79-84

[32] "SUBSA, première expérience sur les matériaux dans l'ISS"
Thierry Duffar, Daniela Stoica, Aleksandar Ostrogorsky
Journées du GDR "Transport et transformation de phase en microgravité", Aussois, 26-28 mai 2003

Perspectives

Des perspectives ont été données par les équipes dans leur rapport d'activité p. 15 à 122. Elles sont à situer dans le cadre des priorités énoncées par le CNES lors de la préparation du prochain séminaire de prospective.

Nous nous référerons ci-dessous aux orientations définies lors des réunions de préparation du groupe "Sciences de la matière" du CNES, dont un bilan a été fait le 10 avril 2002.

Enfin la création d'un nouveau Groupement fait l'objet d'une demande auprès du CNRS.

Priorités scientifiques (extraits du compte-rendu de la réunion du groupe de travail "Sciences de la matière" du CNES du 10 avril 2002)

Dans un contexte peu favorable, la communauté scientifique nationale des sciences de la matière s'est cependant rassemblée autour de ce qu'elle fait de mieux dans le domaine, en obtenant notamment le financement de l'instrument DECLIC dédié à l'étude des fluides critiques à haute température et à celle de la solidification de matériaux transparents. Elle a su, au cours d'un colloque organisé en mai 2001, constater la qualité des travaux qu'elle conduisait et dégager ses priorités scientifiques qui ont été affinées au cours de la préparation du séminaire de prospective.

Celles ci correspondent pour certaines à de nouvelles directions à l'intérieur des thèmes déjà identifiés en physique de la matière condensée, combustion, solidification et croissance cristalline, phénomènes critiques, objets flottants et interfaces fluides. On peut citer dans cette catégorie les phénomènes collectifs lors de la combustion de brouillards denses ou de réseaux de gouttes, la dynamique des mousses humides ou les interfaces de solidifications d'alliages eutectiques lamellaires de matériaux modèles transparents ou encore le comportement sous vibration de la matière granulaire. Ces priorités sont pour certaines autres l'approfondissement de sujets déjà abordés mais que le contexte des très rares opportunités de vol n'a pas permis d'explorer. On peut citer ici les études sur la réactivité chimique dans les fluides critiques à haute température, l'exploration des phases métastables dans les alliages réfractaires et la solidification le long d'un parcours eutectique dans les alliages à base d'aluminium.

Thèmes choisis pour définir les objectifs scientifiques :

- Convection, solidification et croissance cristalline
- Combustion et phénomènes réactifs
- Interfaces fluides
- Objets flottants
- Fluides critiques

- Convection, solidification et croissance cristalline

- o Solidification d'alliages transparents massifs
 - sélection et stabilité des microstructures
 - alliages eutectiques lamellaires transparents
 - fibres eutectiques
- o Solidification d'alliages métalliques
 - contrôle des mouvements du fluide par vibrations (base Al)
 - Solidification sans contact d'alliages réfractaires (Ir,

- . germination
- . sélection des phases
- Brassage contrôlé du bain fondu pour caractériser la formation des structures (Al-Ni) les directions préférentielles
- Transition plan-cutectique

- Combustion et phénomènes réactifs

- o Combustion de surface plane
 - méthode de test de tenue au feu de matériaux
 - production des suies
 - rayonnement, propagation
 - critères d'inflammabilité
- o Combustion hétérogène
 - gouttes de mélanges à haute pression.
 - phénomènes collectifs dans les réseaux de gouttes.
 - combustion de brouillards à haute pression
 - combustion de particules de magnésium dans CO₂
 - interaction flamme vortex
- o Modèles numériques:
 - Mise en évidence de régime de propagation lente spécifique à la micropesanteur et contrôlé par l'évaporation des gouttes

- Interfaces fluides

- o Mousses

Etudes physico-chimiques sur mousses instables humides

 - mûrissement
 - drainage forcé
 - rhéologie
 - présence de particules
- topologie modifiée en fonction du taux de cisaillement
- o Bulles
 - Ebullition
 - Comprendre la loi flux de chaleur-écart de température en ébullition en micro-pesanteur
 - Rôle et existence des gradients de tension de surface sur la convection
- o Interfaces étendus
 - Interfaces avec réactions chimiques
 - Interfaces entre fluides miscibles

- * Existence d'une tension de surface dans un gradient de densité
- ** Structures d'instabilités associées
- * Digitation visqueuse

- Objets flottants

- o Milieux granulaires secs
 - forces constantes dans le temps générées par non linéarités
 - effets inertiels
 - localisation des interfaces
 - mélanges granulaires fluides
 - sédimentation sous vibration
- o Emulsions: nouveau programme
 - stabilité des émulsions denses
 - coalescence et propriétés interracialles
 - transport aux interfaces
 - émulsification spontanée
- o Forces de portance sur les particules
 - étude des forces de portance agissant sur la séparation en canal de Hele-Shaw
 - vésicules déformables
- o Rhéologie des suspensions magnétiques
- o Ecoulements diphasiques
 - dynamique de la croissance et du détachement
 - migration
 - coalescence
 - déformation et rupture

- Fluides critiques

- o Ebullition au voisinage du point critique
 - Poursuite de l'étude de l'étalement d'une bulle sur une paroi en liaison avec le comportement de la ligne triple
- o Hydrodynamique
 - Poursuite de l'étude du rôle de l'effet piston dans l'hydrodynamique des fluides très compressibles (instabilités, interfaces diffuses, transition)
- o Mesure de coefficients de transport au voisinage du point
 - Viscosité de compression
 - Turbulence compressible
- o Ecoulement turbulent et vitesse de nucléation

Demande de création d'un nouveau Groupement de Recherche CNES/CNRS

Demandeur: Bernard ZAPPOLI, Responsable du programme Sciences de la Matière au CNES
Intitulé du groupement Micropesanteur Fondamentale et Appliquée, Intitulé réduit ou sigle : MFA
Département scientifique : SPI.

Nos de sections d'évaluation du Comité national de la recherche scientifique : 10, 05, 15, 19
Adresse du groupement: CNES, 18 Avenue Edouard Belin, 31401, Toulouse Cedex

La mission du groupement est:

- Assurer la cohésion de la communauté des laboratoires utilisateurs de l'ambiance de micropesanteur
- Conduire les actions de promotion et de diffusion de l'information scientifique Uournées, séminaires, colloques)
- Préparer l'eupéanisation (action à deux ans)
- Préparer et prendre les actions de rapprochement avec les technologies spatiales (CNES, autres GdR)

Définir des actions communes avec les Centres de Compétence Techniques du CNES

Liste des équipes participantes (noms et prénoms des responsables intitulés des équipes) regroupées par organismes d'appartenance avec indication du laboratoire de rattachement.

- Yves GARRABOS & Daniel BEYSENS (Supercritique pour l'Environnement, les Matériaux et l'Espace, ESEME, CNRS/SCH-CEA Talence),
- Stéphan FAUVE (Instabilités et Phénomènes non linéaires, LPS/ ENS, Paris),
- Jacques BERT & Jean COLOMBANI (Groupe des transitions de comportement de milieux supercritiques, CNRS/SPM - Université Lyon 1, Villeurbanne),
- Patrick BONToux & Pierre HALDENWANG (Modélisation numérique, L3M-CNRS/SPI, Château Gombert),
- Henri GOUIN (Phénomènes critiques et fluides complexes, LMMT, Marseille),
- Abdelkader MOJTABI (Convection thermique, thermosolutale et thermovibrationnelle en micropesanteur, UFR MIG, Toulouse),
- Sakir AMIROUDINE (Equipe Mécanique et Transfert - Thème Modélisation numérique des instabilités convectives dans les fluides supercritiques, Angers)
- Pierre EVESQUE (Microgravité: effets des vibrations sur les fluides hétérogènes hyper compressibles en apesanteur, MssMat, CNRS - ECP, Chatenay Malabry),

- Catherine COLIN & Jean FABRE (Interfaces, Ecoulements Diphasiques en Micropesanteur, IMFT, CNRS/SPI, Toulouse),
- Michèle VIGNES-ADLER (Interfaces, LPMDI, CNRS/SPI, Marne La Vallée)
- Dominique LANGEVIN (Mousses et films de savon, LPS, Orsay),
- Eric ARQUIS (Ecoulements à Interfaces Réactives, ENSCPB, Talence)
- Philippe PETITJEANS (Fluides Miscibles, ESPCI/LMMH, Paris),
- Annie STEINCHEN (Stabilité des Emulsions Denses. Evaporation de gouttes à plusieurs constituants. Mesure et Modélisation., CNRS/SCH- Marseille),
- Dominique SALIN (Couplage réaction chimique-hydrodynamique au cours de la propagation de front d'onde chimique, FAST CNRS/SPI, Orsay),

- Bernard ROUX (Calcul Haute Performance en Mécanique/ Convection vibrationnelle, L3M-CNRS/SPI Château Gombert),
- Estelle IACONA (Propriétés radiatives des gaz, thermophysique, EMC2, ECP, CNRS/SPI, Chatenay Malabry)
- Mauricio HOYOS (Séparation hydrodynamique, ESPCI/LMMH, Paris),

- Iskender GÖKALP & Christian CHAUVEAU (Combustion et Turbulence, LCSR, CNRS/SPI, Orléans),
- Pierre JOULAIN (Flamme de Diffusion et Brûleurs, LCD/ENSMA, CNRS/SPI, Futuroscope),
- Bernard VEYSSIERE (Détonations, Déflagrations et Explosions, LCD/ENSMA, CNRS/SPI, Futuroscope)
- Roger PRUD'HOMME (Changements de phase, combustion, forts gradients, LMM, CNRS/SPI, Univ. P. & M. Curie, Paris),
- Laurent DAVID (Labo. d'Etudes Aérodynamiques, CNRS Futuroscope).

- Bernard BILLIA (Solidification d'alliages, LMMP, CNRS / SPM - Univ. d'Aix-Marseille 111, Marseille),
- Gabriel FAIVRE (Equipe Fronts de Solidification, LPS, CNRS/SPM, Univ. Paris 6 & 7),
- Daniel HENRY & Hamda BEN HADID (Instabilités, Croissance Cristalline et Microgravité, LMFA, CNRS/SPI - Ecole Centrale de Lyon - Université Lyon 1, Ecully),
- Peter LEHMANN & René MOREAU (Mesure des coefficients de diffusion chimique dans les liquides métalliques, EPM/ENSHMG, CNRS/SPI, St Martin d'Hères),
- Alain POCHEAU (Croissance et Elasticité, IRPHE, Château Gombert),
- Thierry DUFFAR (Influence des champs externes sur la ségrégation et la structuration en solidification, EPM/ENSHMG, CNRS/SPI, St Martin d'Hères).
- Alain MAILFERT (Compensation de la pesanteur par des forces magnétiques, ENSEM - INPL, Vandoeuvre les Nancy),