

Synthèse de la préparation du séminaire de prospective scientifique
dans le domaine des Sciences de la Matière
La Rochelle, 17-20 Mars 2014

Avant propos

Les effectifs de la communauté scientifique engagée dans les recherches en micropesanteur sont en légère augmentation avec 38 équipes rassemblées dans un Groupement de Recherche (GdR) avec le CNRS et le CEA. Sur la période écoulée, le budget de soutien des laboratoires a augmenté sensiblement pour atteindre toutes lignes confondues 1,3 M€an. Il faut tout d'abord rappeler les recommandations du séminaire de prospective de 2009 pour faire un examen au premier ordre de leur suivi programmatique :

- L'exploitation de l'instrument DECLIC (Dispositif d'Etude de la Croissance et des Liquides Critiques) et de ses inserts, dédiés à l'étude des fluides critiques et à la solidification de matériaux modèles transparents.
- Le développement des expériences IMPACHT (Interface Microgravity PhAse Change and Heat Transfers) et DYNAGRAN (DYNAmique de la matière GRANulaire) dédiées respectivement à l'étude de l'évaporation de gouttes posées sur substrat à la matière granulaire soumise à des vibrations.
- L'exploitation des grands instruments du module Columbus développés dans le cadre du programme de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), le Fluid Science Laboratory (FSL) et le Material Science Laboratory (MSL) avec la poursuite de diverses recherches utilisant la micro pesanteur: la dynamique et la rhéologie des mousses et des émulsions, les réactions chimiques aux interfaces, la structure des plasmas colloïdaux, la détermination des propriétés thermo physiques des métaux fondus et l'analyse des microstructures lors de la solidification d'alliages métalliques.
- La mise en relation de travaux sur les recherches en micropesanteur et les technologies spatiales.
- Le rapprochement entre les sciences de la matière et les sciences de la vie

Sur ces cinq points, les éléments opérationnels suivants peuvent être notés :

- Exploitation de l'instrument DECLIC

L'instrument DECLIC a fonctionné parfaitement pendant environ 10000 heures depuis sa mise en orbite en Aout 2009. La coopération avec la NASA a été très effective et fructueuse comme le montre le rapport scientifique.

- Expériences IMPACHT et DYNAGRAN

Il n'a pas été possible de trouver simultanément le budget et la date de vol pour réaliser ces expériences.

- Exploitation des instruments de l'ISS par l'ESA

Les expériences suivantes ont été réalisées :

1. GEOFLOW : expérience de simulation d'écoulements géophysiques internes. L'insert du FSL a fonctionné pendant 900 h et généré un article important publié dans Jour. of Fluid Mech.

2. FASES : expérience d'étude des émulsions. L'instrument a fonctionné pendant 1400 h ; les données sont en exploitation.
 3. SODI : expérience de mesure des coefficients Soret dans les mélanges ternaires. L'expérience a fonctionné pendant 300 h. Les données sont en cours d'exploitation. Un scientifique Français y participe.
 4. CETSOL : transition entre croissance dendritique et croissance en grains lors de la solidification d'alliages métalliques. L'insert du MSL a fonctionné pendant 160 h pour solidifier 16 échantillons (sur 40) avant que le four ne tombe en panne pendant de nombreux mois avant réparation. Les échantillons ont été distribués aux laboratoires et sont en cours d'analyse
 5. MICAST : solidification dirigée sous champs magnétique de 10 échantillons sur 40. Les échantillons solidifiés sont redescendus au sol et distribués dans les laboratoires Européens pour analyse. (4 publications dans Act. Mater.).
Les 2500 h de fonctionnement pour l'ensemble des instruments de Columbus pour tous les partenaires Européen sont à mettre en perspective avec les 10000 heures de fonctionnement de DECLIC pour la France seule. Le tableau 1 de la page suivante montre que beaucoup d'expériences devant être réalisées sur la période écoulée ont été reportées en 2016. On trouvera sur le tableau 2 l'état du programme en 2009.
- La mise en relation de travaux sur les recherches en micropesanteur et les technologies spatiales. Les expérimentations dans la station de lévitation du CEA Grenoble se sont poursuivies avec une utilisation par Air Liquide pour mesurer les coefficients d'échanges thermiques sous ébullition en micropesanteur. Des travaux exploratoires ont été par ailleurs conduits par le CEA sur la formation de geysers lors d'accélération impulsives appliquée aux interfaces liquide-gaz confinées en micropesanteur.
 - Rapprochement entre sciences physiques et sciences de la vie
La dynamique des globules rouges en relation avec la dysfonction endothéliale s'est confirmée comme un sujet porteur et le rapprochement s'est concrétisé.

TABLEAU 1

Proj. ESA avec Sc. Français financé	Sujet (PI)	2013	2014	2015	2016	2007
CDIC/FSL	Reac. Chim Interf. (Salin)	F. sonde ▼		F. sonde ▼		
VIP-GRAN (phase A/B)	Mat. Granulaire (Evesque)					ISS ▼
FASES/FSL (phase C/D)	Stab. Emuls. (Antoni)	▼		ISS		
DOLFIN/FSL (phase O/A)	Inter. Film-Paroi (Adler)				ISS ▼	
RUBI/FSL (phase A/B)	Transf. Ther. Ebul. (Tadrist)				ISS ▼	
FOAM 1/FSL (phase B)	Stab. Mousses (Adler)		Glovebox ISS ▼		ISS ▼	
FOAM 2/FSL (Δ phase B)	Muriss. Mousses (Rio/Langevin)				ISS ▼	
PKE 4 (phase C/D)	Plas. Coloïd. (Boufendi)		mod. russe ISS ▼	▼	ISS ▼	
BIOMIC/FSL (phase 0)	Objets biomimétiques (Misbah)	F. sonde ▼				
MICAS/MSL (phase D)	Microst. Solid. (Billia)		ISS ▼			
CETSOL/MSL (phase D)	Trans. Colon. Equi. (Billia)		ISS ▼			
CdTe/MSL (phase A)	CdTe croiss. (Duffar)				ISS ▼	
GEOFLOW (phase E)	Ecoul. Geophy. Int.	Glovebox ISS ▼				

TABLEAU N° 2

Proj. ESA avec Sc. Français financé	Sujet (PI)	2008	2009	2010	2011	2012
CDIC/FSL	Reac. Chim Interf. (Salin)	F. sonde ▼		F. sonde ▼		
VIP-GRA N (phase A/B)	Mat. Granulaire (Evesque)					ISS ▼
FASES/FSL (phase C/D)	Stab. Emuls. (Antoni)			ISS ▼		
DOLFIN/FSL (phase O/A)	Inter. Film-Paroi (Adler)				ISS ▼	
RUBI/FSL (phase A/B)	Transf. Ther. Ebul. (Tadrist)				ISS ▼	
FOAM 1/FSL (phase B)	Stab. Mousses (Adler)		Glovebox ISS ▼		ISS ISS ▼	
FOAM 2/FSL (Δ phase B)	Muriss. Mousses (Rio/Langevin)				ISS ▼	
PKE 4 (phase C/D)	Plas. Coloïd. (Boufendi)		mod. russe ▼ ISS	▼	ISS ▼	
BIOMIC/FSL (phase 0)	Objets biomimétiques (Misbah)	F. sonde ▼				
MICAS/MSL (phase D)	Microst. Solid. (Billia)		ISS ▼			
CETSOL/MSL (phase D)	Trans. Colon. Equi. (Billia +)		ISS ▼			
CdTe/MSL (phase A)	CdTe croiss. (Duffar)				ISS ▼	
GEOFLOW (phase E)	Ecoul. Geophy. Int.	Glovebox ISS ▼				

Rapport sur l'activité et les projets des laboratoires pour la période 2008-2012

Ce rapport a été réalisé à partir du rapport des membres du Groupe de Travail Sciences de la Matière sur le bilan à cinq ans (2008-2012) du Groupement de Recherche (GdR) Micropesanteur Fondamentale et Appliquée (MFA).

Christophe Josserand pour les sciences du vivant, Jean Paul Garandet pour la solidification, Patrick Guenoun pour les changements de phase, les fluides critiques et les réactions chimiques, Véronique Schmitt pour les émulsions et mousses, Eric Falcon pour objets en lévitation, les milieux granulaires et Hervé Combeau pour les écoulements avec changement de phase.

1. Biophysique et sciences du vivant (Christophe Josserand, Institut le Rond d'Alembert)

L'étude d'objets biologiques dans le cadre du GDR MFA est réalisée par deux équipes, une dans le laboratoire LIPhy à Grenoble, l'autre au PMMH de l'ESPCI à Paris et consiste à des études expérimentales au sol ainsi que d'expériences en vol parabolique et en fusées sondes.

1.1. Lévitation acoustique d'objets biologiques (M.Hoyos, ESPCI PMMH)

L'équipe du PMMH étudie une méthode de lévitation acoustique pour la manipulation d'objets biologiques. La gravité induit une migration des objets par sédimentation. La manipulation est obtenue par des ondes acoustiques qui peuvent ainsi contrebalancer la gravité ou déplacer des objets biologiques. Ces méthodes permettent le contrôle de l'agrégation cellulaire dans des expériences au sol. L'écoulement acoustique induit par les ondes acoustiques (acoustic streaming) permet la manipulation d'objets colloïdaux pour laquelle des expériences au sol ont été réalisées. Finalement, une étude prometteuse sur la manipulation acoustique de bactéries en suspension est en cours.

1.2. Dynamique d'objets biomimétiques (C.Misbah, Université Joseph Fourier)

1.2.1. Dynamique et rhéologie de vésicules et globules rouges

L'objectif vise une meilleure compréhension des phénomènes individuels et collectifs des vésicules et globules rouges sous écoulement, ainsi que leur rhéologie, tant en géométrie étendue qu'en microfluidique. Cette dernière activité est motivée à la fois par le besoin de mimer les architectures de la microvascularisation, et le souhait de comprendre les processus de transport sanguins en vue de contribuer aux aspects fondamentaux dans les technologies de laboratoires sur puces. Les travaux se font en symbiose entre expérience, théorie et simulations. Les études en microgravité (vols paraboliques et fusée sonde, MASER12), ont déjà donné lieu à plusieurs résultats importants comme l'étude de la force de portance et la diffusion hydrodynamique de globules rouges dans le sang.

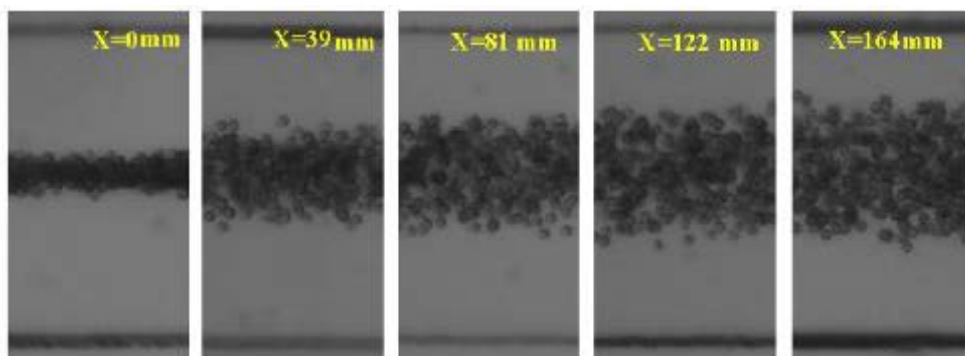
1.2.1.1. Force de portance

Un axe d'étude important concerne les effets de portance sur les vésicules sous cisaillement au voisinage d'une paroi. Afin de s'affranchir des effets de la sédimentation des échantillons, non négligeable aux échelles de temps concernées par ces phénomènes, ces expériences sont

réalisées en microgravité (plusieurs campagnes de vols paraboliques CNES et ESA, et en fusée sonde MASER12 en février 2012). L'analyse des premiers résultats obtenus en vols paraboliques a montré une loi de migration quantitativement en accord avec les prévisions théoriques. Cette force de portance est responsable de la présence d'une couche de déplétion près des parois vasculaires, et joue un rôle clef dans la rhéologie du sang.

1.2.1.2. Diffusion hydrodynamique

Il s'agit de l'étude de la diffusion hydrodynamique dans une suspension assez concentrée de globules rouges (GR). Le sang est injecté dans un canal, et est focalisé grâce à deux jets orthogonaux (la méthode dite « flow focusing »), comme le montre la Figure 2. Le jet focalisé évolue librement ensuite par le processus de diffusion hydrodynamique. Il est trouvé expérimentalement, et montré grâce à un modèle analytique simple, que la loi de diffusion est anormale (le jet s'élargit comme la racine cubique du temps et non comme la racine carré, comme cela arrive pour la diffusion Brownienne). La prise en compte de la force de portance qui tend à éloigner les GR des parois (couche de déplétion) et l'effet antagoniste de la diffusion hydrodynamique conduit à la sélection finale d'un jet stationnaire occupant une certaine proportion du canal. Cette étude, la première du genre, a permis d'expliquer la répartition de l'hématocrite au sein d'un canal, résultat crucial pour comprendre l'évolution de l'hématocrite dans le système circulatoire.



JET SANGUIN MONTRANT LA DIFFUSION HYDRODYNAMIQUE EN FONCTION DU TEMPS

1.2.1.3. Rhéologie du sang et mouvements et forme des globules rouges

L'étude systématique de la rhéologie d'une suspension concentrée de vésicules à deux dimensions a permis de confirmer le comportement qualitatif de la viscosité d'une suspension diluée (étudiée au sein du LIPhy) selon laquelle la viscosité effective de la suspension diminue quand on augmente la viscosité interne (résultat opposé à celui d'une émulsion). Quand la viscosité interne atteint une valeur critique, la viscosité effective atteint un minimum et croit ensuite. Il a été montré que le minimum coïncide avec une transition dynamique entre le mouvement dit « chenille de char » (tank-treading) vers le mouvement de bascule (tumbling), découverts en micropesanteur.

1.2.2. Dysfonction endothéliale et contrôle physique de la circulation, application à la microgravité.

L'environnement spatial induit chez l'homme des modifications de fonctionnement du système cardio-vasculaire Cette exposition à l'environnement spatial pourrait, à long terme, devenir un facteur de risque vasculaire. En effet l'absence de gravité induit une inactivité physique poussée, or nous savons que l'absence d'exercice physique régulier est un risque cardiovasculaire dans la population générale. Très rapidement s'installe un syndrome de

déconditionnement cardio-vasculaire associant une tachycardie de repos, une diminution des capacités à l'exercice physique et un risque de syncope en position debout.

Les vaisseaux sanguins sont soumis à des forces physiques importantes dont la pression transmurale (induite par la pression artérielle) et les forces de cisaillement (induites par la circulation sanguine). Si l'environnement spatial ne modifie pas de façon significative la pression artérielle systémique, il intervient sur les forces de cisaillement. Par la diminution de l'activité physique, l'hémodynamique générale se voit diminuée, et les forces de cisaillement chroniquement réduites. Ceci modifie l'aspect et la fonctionnalité des vaisseaux par un processus de remodelage. Il semble que les conséquences de ce remodelage ne soient pas les mêmes au niveau de la macro-circulation (artères de conduction) et au niveau de la micro-circulation (artérioles, capillaires et veinules).

Dans tous les types cellulaires eucaryotes se trouvent à la surface externe de longues chaînes de macromolécules, ou bio-polymères (glycoprotéines ou glycolipides) offrant une protection à la membrane interne. La couche de cellules endothéliales se trouve ainsi protégée par une brosse de bio-polymères, appelé *glycocalyx*, dont l'épaisseur peut atteindre 0.5 μm . Le rôle du glycocalyx est reconnu comme étant majeur en hémodynamique, mais néanmoins les questions de base concernant le couplage hydrodynamique entre le glycocalyx et les cellules circulantes sont loin d'être élucidées.

En collaboration entre le GIN (Institut des Neurosciences), l'Université de Naples (thèse en co-tutelle, co-directeur S. Guido) et le laboratoire IAB (A. Duperray, Institut Albert Bonniot, INSERM Grenoble) il a été entrepris une étude nouvelle sur le rôle du glycocalyx (couche de bio-polymères couvrant la paroi endothéliale des vaisseaux sanguins). Des études préliminaires ont été entreprises avec succès par Daria Tzvirikun (de Moscou) sur l'endothélisation de circuits artificiels mais aucune étude systématique n'a été réalisée à ce jour (le séjour de Daria a été interrompu très peu de temps après ces premiers tests qui vont reprendre en Avril 2014).

Les objectifs, combinant l'approche physique et l'approche biologique des fonctions vasculaires sont :

- Sur un plan fondamental de mieux comprendre les relations entre les forces de cisaillement et les fonctions vasculaires en portant un intérêt particulier au glycocalyx.
- Sur un plan appliqué de comprendre comment l'environnement spatial modifie ces forces de cisaillement et les fonctions vasculaires.

La mise en évidence expérimentale et la manipulation du glycocalyx sont difficiles, mais quelques tests préliminaires sont encourageants. Le glycocalyx peut être étudié par :

- Microscopie électronique ou par microscopie confocale après marquage en fluorescence.

L'équipe du LIPhy s'intéresse à la rhéologie et la dynamique de vésicules et de globules rouges au sol et en micro-gravité. La gravité joue un rôle important dans ces écoulements notamment au travers de la sédimentation des vésicules et globules rouge qui influence la dynamique. Les expériences en micro-gravité outre leur intérêt pour l'étude en environnement spatial, permettent donc de déterminer la rhéologie du sang en s'affranchissant des effets de la sédimentation. Les expériences en micro-gravité ont ainsi pu montrer la migration des objets à cause du cisaillement pariétal. L'étude au sol de la rhéologie d'une suspension de vésicules et globules rouge, en lien avec des équipes médicales du CHU de Grenoble, doit permettre d'améliorer la compréhension de la rhéologie sanguine à partir de systèmes modèles. Une

méthode de tri de vésicules à l'aide de circuits microfluidiques a été élaborée.

2. Solidification et croissance cristalline (Jean Paul Garandet, CEA Grenoble)

Ce rapport couvre les travaux réalisés par 3 groupes de recherche de l'IM2NP, l'INP et du LPMC sur les thématiques de formation des structures de solidification sur des échantillons élaborés à partir d'une phase liquide. Dans ce type de configuration, le recours à l'expérimentation en microgravité permet l'établissement de conditions de transport des espèces contrôlé par les lois de Fick, sans lesquelles la validation des modèles physiques utilisés pour décrire la croissance n'est pas possible. Sur cette thématique solidification, le fait marquant de la période 2010-2013 est la concrétisation du début du programme expérimental microgravité après une très longue attente, à la fois pour les alliages transparents (projet MISOL3D) et les alliages métalliques (projets CETSOL et XRMON).

Pour ce qui concerne les alliages transparents, les travaux menés à l'IM2NP ont notamment permis de remettre en question le mécanisme classiquement accepté de création de cellules par tip splitting. D'autre part, les résultats obtenus à la transition cellules-dendrites montrent un comportement différent de celui obtenu en lame mince au sol, ce qui conforte encore si besoin en était le besoin de recourir à l'expérimentation en microgravité pour l'élucidation des mécanismes dans des configurations représentatives de la réalité industrielle. En particulier un résultat très important a été obtenu au sujet d'instabilités secondaires consistant en l'oscillation désordonnée des cellules : ce phénomène n'avait pas pu être observé sur terre et est maintenant reproduit par les simulations de champ de phase qui sont donc alimentées de manière indispensable par les résultats en micropesanteur. Il importe de noter que c'est grâce à l'instrument DECLIC développé par le CNES, et plus précisément dans l'insert DSI (Directional Solidification Insert), embarqué à bord de l'ISS, que tous ces résultats ont pu être obtenus dans le cadre d'une coopération avec les meilleurs laboratoires.

Pour les alliages métalliques, le point le plus remarquable porte sur le développement d'un dispositif permettant l'imagerie par radiographie X de la solidification en temps réel et qui a été embarqué dans une fusée sonde (MASER 12). Il est à noter que le laboratoire IM2NP travaille également sur cette thématique d'imagerie X dans le cadre de programmes réalisés au synchrotron de Grenoble. Toutes ces études ont permis de faire progresser la connaissance des mécanismes en jeu lors de la transition colonnaire-équiaxe, notamment sur le blocage de la croissance colonnaire et sur l'interaction des grains en croissance équiaxe. Il s'agit de sujets relevant non seulement de la recherche fondamentale, mais qui peuvent avoir des applications industrielles importantes, notamment dans le domaine de la métallurgie.

Du côté de l'INP, le programme expérimental microgravité sur la solidification eutectique n'a pas encore débuté, mais l'équipe est très active sur le design de l'instrument DIRSOL d'imagerie optique destiné à être installé dans le Microgravity Science Glovebox de l'ISS à l'horizon de fin 2014. Il convient de rappeler que la conception de cet appareil repose sur une idée originale issue des travaux de l'INP. Par ailleurs, l'équipe poursuit des études sol d'une grande richesse qui ont notamment conduit à la découverte d'une microstructure de solidification originale, la "dendrite biphasée spiralée" consistant en un doigt biphasé à la surface duquel les deux phases forment une structure solide. Dans ce cas également, une étude de recherche de base pourrait se révéler avoir des applications industrielles importantes en métallurgie.

Il importe aussi de rappeler que les programmes expérimentaux des équipes de l'IM2NP et de l'INP bénéficient de l'apport de collaborations avec des spécialistes de modélisation numérique utilisant la technique du champ de phase qui s'est imposée depuis quelques années comme la méthode de référence pour les problèmes de simulation à l'échelle des microstructures. Plus précisément, l'équipe de l'IM2NP collabore avec le Pr. Karma (Northeastern University, Massachusetts), celle de l'INP avec le Dr. Plapp (LPMC, Ecole Polytechnique). Dans les deux cas, l'enrichissement mutuel entre équipes expérimentales et de modélisation est indiscutable, et il convient pour le CNES de continuer à encourager des collaborations aussi fructueuses. Il est à noter que le principe d'un article de revue sur ces thèmes vient d'être accepté (In situ monitoring of solidification dynamics in diffusive conditions by Akamatsu et Billia, dans Acta Materialia).

3. Fluides critiques, changement de phase (Patrick Guenoun)

Les fluides critiques sont à la fois des objets d'études fondamentales encore fascinant par la complexité de la description nécessaire pour rendre compte des phénomènes statiques ou dynamiques proches du point critique (PC), et aussi des états de la matière utilisés dans les propulseurs. Leurs comportements en accélération ou gravité variable doivent donc être maîtrisés et ce d'autant plus qu'ils sont hypercompressibles à l'approche du point critique (divergence de la compressibilité). Le projet DECLIC a donc été réalisé par le CNES et l'instrument éponyme se trouve opérationnel sur ISS depuis Octobre 2009. DECLIC est équipé de plusieurs inserts, chacun étant dédié à une classe d'expérience. Par ailleurs une station de compensation magnétique de la gravité est opérationnelle à Grenoble (CEA-INAC) et permet des expériences sur l'oxygène ou l'hydrogène en petits volumes. Les thèmes explorés et les résultats obtenus se déclinent de la manière suivante :

3.1. Approche ultime du point critique et validation des paramètres de l'équation d'état

L'absence de gravité permet de s'approcher à quelques centaines de micro Kelvins du point critique tout en conservant une densité égale à sa valeur critique. L'approche n'est limitée que par les inhomogénéités de température, notamment dans le cas de l'eau supercritique (insert HTI) où la température critique est élevée (400°C). La comparaison aux modèles théoriques se fait par l'intermédiaire de la mesure de la lumière transmise à travers la cellule ou plus exactement de la turbidité qui mesure la diminution de cette transmission due à la divergence des fluctuations critiques à l'approche du PC. Cette turbidité a été mesurée avec une précision inégalée dans les conditions critiques et off-critiques pour le CO₂ ainsi que pour H₂ et O₂ sous lévitation magnétique. On extrait de ces mesures les paramètres critiques qui entrent dans les équations d'état essentielles pour la prédiction du comportement de ces fluides d'intérêt technologiques dans l'espace.

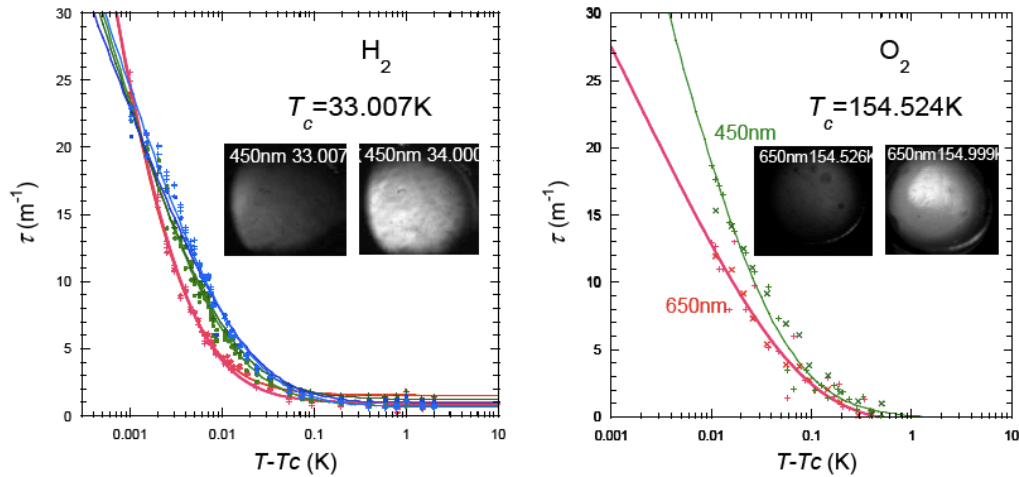


Fig. 1 : Turbidité dans (a) H₂ et (b) O₂. Les ajustements à l'Eq. 3 donnent (H₂) $\kappa T_0 + \xi_0 = 57 \times 10^9 \text{ Pa}^{-1}$ et $\xi_0 = 2.2 \text{ \AA}$ et (O₂) $\kappa T_0 + \xi_0 = 15 \times 10^9 \text{ Pa}^{-1}$ et $\xi_0 \approx 2.5 \text{ \AA}$.

3.2. Transport de phase vapeur par changement de phase.

Le mouvement thermocapillaire (Marangoni) d'une bulle de gaz sous un gradient de température n'existe pratiquement pas dans un fluide pur. En effet, dans un tel système, l'interface vapeur-liquide est toujours isotherme (à la température de saturation). L'évaporation du côté chaud et la condensation du côté froid peuvent se produire et cependant déplacer la bulle. Ce phénomène a été observé dans deux fluides différents, l'hydrogène et l'eau, les deux sous gravité réduite. Le mouvement a été comparé aux théories existantes et des simulations 1D numériques. Les expériences et l'analyse ont été réalisées à proximité du point critique afin de tirer bénéfice de l'universalité critique. Les expériences avec l'hydrogène (température critique : 33 K) ont été réalisées en lévitation magnétique tandis que l'expérience avec l'eau près de sa température critique ($T_c = 373.995^\circ \text{C}$, comme déterminé avec précision sous apesanteur, voir § 8.1) a été effectuée avec l'insert HTI dans l'instrument DECLIC à bord de l'ISS (Fig. 2). La cause du phénomène, comme confirmé par une simulation numérique, réside effectivement dans l'effet piston différentiel qui, de part et d'autre de la bulle, provoque des taux d'évaporation et de condensation différents des deux côtés et génère le mouvement.

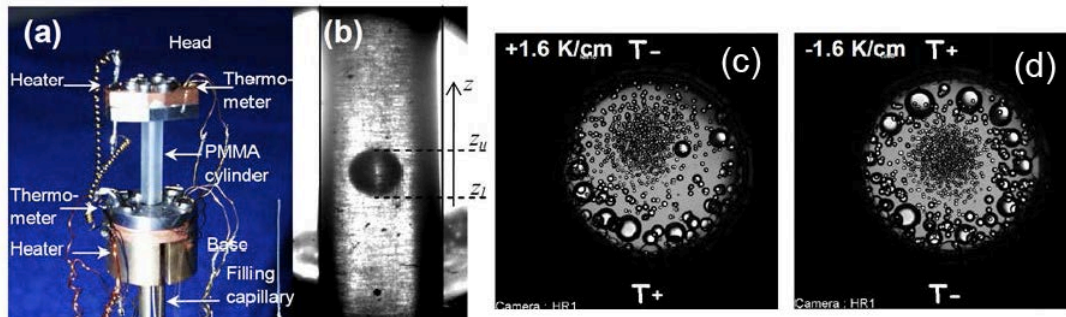


Fig. 2 : Déplacement de bulles d'hydrogène gazeux (à gauche) et d'eau vapeur (à droite) vers la partie chaude de la cellule

3.3. Transitoires d'accélération dans O₂

L'installation de lévitation (OLGA), qui permet de léviter l'oxygène, a été modifiée pour étudier des variations rapides de champ de pesanteur. Les conditions de ré-allumage de fusées en orbite ont été reproduites par une variation du champ de zéro-g vers 0.4g. Des résultats intéressants ont été obtenus sur les écoulements transitoires induits sur un réservoir rempli d'oxygène liquide et gazeux à la pression et la température des réservoirs de fusées (2 bar, 90K). Les grandes bulles d'oxygène sont lévitées à l'intérieur d'une colonne liquide d'oxygène à saturation. Le champ magnétique est alors rapidement modifié, ce qui provoque la formation d'un geyser dans la bulle, comme déjà observé dans les réservoirs de fusée lors du re-allumage en orbite. On observe sur le geyser une instabilité de Plateau, ce qui jamais n'avait jamais encore été rapporté. Des simulations numériques 2D ont été également effectuées et les comparaisons des résultats expérimentaux, numériques et théoriques montrent une bonne concordance, validant ainsi la méthode magnétique pour étudier, sur les fluides cryo-propulseurs eux-mêmes, une hydrodynamique similaire à l'hydrodynamique des réservoirs durant les transitoires d'accélération.

3.4. Effets de vibrations dans les fluides critiques

Ces études concernent l'étude des phénomènes induits dans les fluides par des vibrations périodiques. Ces vibrations (typiquement d'amplitude 0.1-0.5 mm et de fréquence 1-100 Hz) sont externes aux fluides et sont transmises par les parois de la cellule le contenant. Le fluide se trouve ainsi soumis à des déplacements périodiques dont la vitesse dépend de la densité locale du fluide. Des écoulements moyens s'ensuivent. Sur terre, ceux-ci sont en général très fortement couplés à la gravité. L'absence de pesanteur simplifie bien évidemment les nombreux comportements qui découlent de l'effet des vibrations car les écoulements à grande portée dus à la sédimentation et la convection thermo-gravitationnelle sont en effet totalement supprimés. D'un point de vue appliqué, l'effet sur un fluide en apesanteur des vibrations d'une station orbitale ou d'un vaisseau spatial reste très mal connu.

3.4.1. Instabilités thermo-vibrationnelles supercritiques ($T > T_c$)

Une instabilité de Rayleigh vibrationnelle peut se former quand la direction de la vibration est parallèle (tangentielle) à la couche limite thermique. Quand la direction de la vibration est perpendiculaire à la couche limite thermique, des instabilités de nature paramétrique peuvent à leur tour se développer. Par simulation numérique 2D, trois différentes conditions d'états de frontière thermiques ont été considérées (tous murs isothermes, mur vertical adiabatique/mur horizontal isotherme, mur horizontal adiabatique/mur vertical isotherme) et différentes proximités en température au point critique ($T - T_c = 10$ mk, 100 mk, et 1 K). Les résultats mettent en évidence des instabilités de Rayleigh vibrationnel et des instabilités paramétriques dans un champ thermique (Fig. 3). Ce dernier type d'instabilité est observé pour la première fois dans de telles conditions. On observe de plus que le rôle des coins des cellules est accentué (on observe une instabilité dite « de coin »).

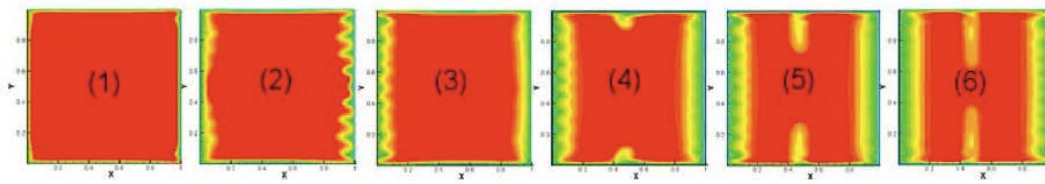


Fig. 3 : Evolution du champ thermique (vibration horizontale, amplitude 20mm, fréquence 5.56 Hz, $T-T_c=1K$, trempe thermique 0.1K) et 4 murs isothermes. Différents types d'instabilités sont observés: (1) instabilité de coin; (2)–(6) instabilité paramétrique sur les murs verticaux; et (4)–(6) instabilité de Rayleigh vibrationnel sur les murs horizontaux.

3.4.2. Instabilités vibrationnelles en diphasique ($T < T_c$)

Dans un système diphasique en apesanteur, la phase liquide mouille les parois de la cellule et la vapeur se met sous forme de bulle, plus ou moins sphérique suivant le remplissage (la fraction volumique) et la forme de la cellule. Quand la vibration est imposée au fluide, la direction de celle-ci pourra donc dans certaines régions être *tangentielle* au fluide et *perpendiculaire* dans d'autres, induisant ainsi différents types d'instabilité. Ainsi les vibrations peuvent induire des instabilités du type Faraday (paramétriques) et/ou de Rayleigh-Taylor pour la portion d'interface gaz-liquide perpendiculaire à la vibration ou de type Kelvin-Helmholtz (« ondes gelées ») pour la portion d'interface parallèle à la vibration. Ces instabilités ayant des seuils différents, suivant la distance au point critique et les valeurs que prennent les différents paramètres du fluide (tension interfaciale σ , différence de densité liquide-vapeur $\Delta\rho$), tel ou tel type d'instabilité se produit. $T_c=45mK$. Dans H_2 en lévitation magnétique une instabilité de Faraday, à fréquence moitié de l'excitation, apparaît sur l'interface perpendiculaire à la direction de vibration. Ces observations confirment l'existence des ondes de Faraday en conditions d'apesanteur. La longueur d'onde de l'instabilité diminue en approchant le point critique et, la dissipation visqueuse devenant trop importante, les carrés se transforment en rouleaux pour $(T_c-T)/T_c \approx 3 \cdot 10^{-4}$.

Une instabilité d'onde gelée, qui apparaît à une interface de liquide-vapeur quand une vibration harmonique est appliquée dans une direction tangentielle, a aussi été détectée dans H_2 diphasique. Le diagramme de stabilité de l'instabilité a été obtenu et correspond à un modèle théorique non visqueux (D.V. Lyubimov et A.A. Cherepanov, Fluids Dynamics 21, 849-854 (1987)) indépendamment du niveau de gravité. Cependant l'amplitude de l'instabilité dépend fortement du niveau de gravité et diverge à $g=0$ (Fig. 4) ce qui permet d'expliquer des structures en bandes qui avaient été observées lors de précédents expériences en microgravité.

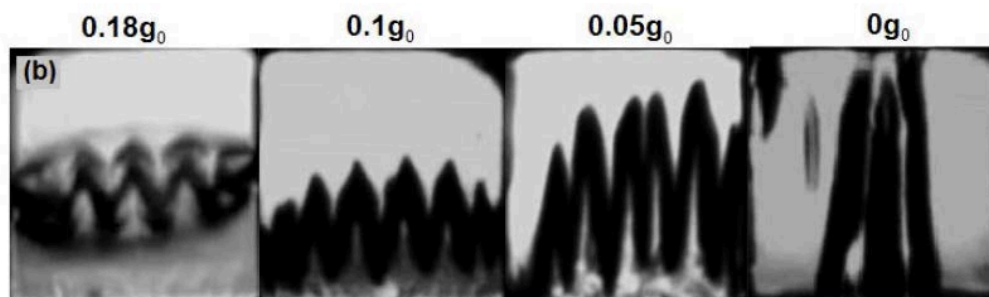


Fig.4 : Evolution de l'amplitude de l'instabilité d'onde gelée en fonction du niveau de gravité

3.5. Ebullition à différentes distances du point critique

Ce thème à la fois expérimental et théorique s'intéresse à la physique de l'ébullition en fonction de la gravité et à l'évolution temporelle de la surface libre des bulles de vapeur en croissance sur une paroi chauffante. L'accent est mis sur la forme de la surface au voisinage de la ligne triple de contact vapeur-liquide-solide (paroi chauffante). C'est dans cette région de la surface de la bulle que sont observés les taux d'évaporation les plus importants. L'objectif principal du projet est de comprendre la crise d'ébullition, c'est-à-dire la transition de l'ébullition nucléée vers l'ébullition en film où la paroi chauffante est couverte d'un film continu de vapeur. La transition s'effectue par l'étalement des bulles de vapeur, c'est-à-dire par un mouvement de la ligne triple. La partie expérimentale concerne avant tout les expériences au voisinage du point critique liquide-gaz. On peut alors observer l'ébullition «au ralenti» grâce au ralentissement critique de la diffusion de chaleur. Cela permet de résoudre des détails qui sinon seraient cachés par les mouvements violents des bulles qui évoluent très rapidement à basse pression. Cependant, la gravité réduite est nécessaire pour ce type d'expérience pour garder la géométrie conventionnelle convexe des bulles de vapeur. Effectivement, au voisinage du point critique la tension superficielle diminue et on est obligé de faire diminuer la gravité pour que la longueur capillaire reste grande par rapport à une dimension caractéristique macroscopique (idéalement, par rapport à la taille de la cellule expérimentale). Un autre type d'expérience a été utilisé pour étudier la transition inverse à la crise d'ébullition en fonction de la gravité: le passage de l'ébullition en film à l'ébullition nucléée loin du point critique, à la pression normale.

3.5.1. Ebullition en film et nucléée en fonction du niveau de gravité :

La méthode de mesure consiste à immerger rapidement un disque (à 300K) en cuivre dans un bain d'oxygène liquide (à 90K) à des niveaux fixés de gravité et de sous-refroidissement (station OLGA). La température du disque est mesurée en temps réel. La cinétique de refroidissement est corrélée avec le coefficient d'échange thermique à la paroi et avec des images vidéo. Juste après la trempe, le liquide rentre en ébullition intense autour du disque, une grande quantité de gaz est générée et ce dernier couvre le disque. Il s'agit du régime d'ébullition en film, au cours duquel les bulles de vapeur sont générées au niveau de l'interface vapeur-liquide. Lorsque la température de disque devient suffisamment faible, le liquide peut entrer en contact direct avec lui et des bulles de vapeur commencent à être nucléées directement à la surface solide. C'est le début du régime de l'ébullition nucléée, avec un transfert de chaleur beaucoup plus efficace. On remarque que le temps de refroidissement diminue avec le niveau de la gravité. En zéro g, la couche de vapeur entourant le disque ne montre pas de changement après sa création initiale. Il n'y a pas de régime d'ébullition nucléée. Il est à noter que la bulle de vapeur persiste même après la fin du refroidissement: il n'y a aucune raison pour sa re-condensation en raison des conditions de saturation. Cette expérience a une implication directe pour le développement des moteurs spatiaux cryogéniques qu'il faut refroidir avant de les redémarrer: un sous-refroidissement, même faible, accélère considérablement le refroidissement de ses composants après leur immersion dans un fluide froid. Le sous-refroidissement peut être atteint par la pressurisation transitoire du réservoir.

3.5.2. Ebullition près du point critique :

Le ralentissement de l'ébullition nucléée est étudié dans deux types d'expériences : compensation magnétique de gravité et DECLIC à bord de l'ISS. Les expériences compensation magnétique de gravité expériences ont été menées dans deux installations :

HYLDE et OLGA. Au moment de la crise d'ébullition, l'assèchement de la paroi chauffante est observable (Fig. 5). La crise d'ébullition existe pour n'importe quelle valeur du flux un certain temps après l'imposition du flux thermique. Il a été donc démontré pour la première fois qu'aux conditions de compensation magnétique de la gravité, la valeur de CHF (flux critique de la crise d'ébullition) serait zéro en accord avec les prédictions théorique pour zéro g.

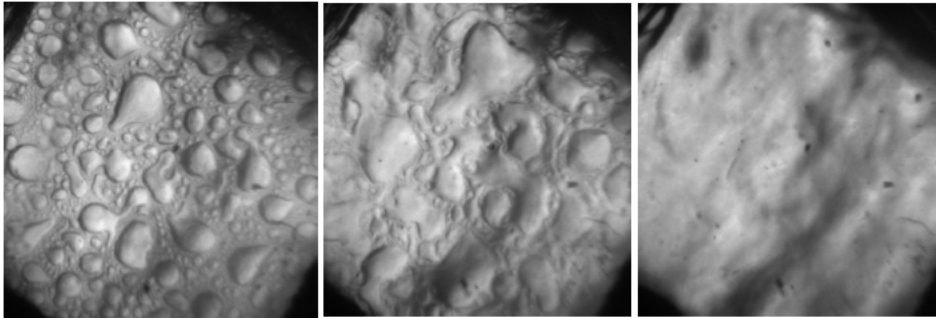


Fig. 5 : Visualisation du flux critique à 0g au niveau du plan chauffant (Image 1 : Ebullition nucléée, Image 2 : Transition et Image 3 : Ebullition en film) : $T_c - T = 10\text{mK}$.

Le deuxième type d'expériences dont un des objectifs principaux est l'étude de l'ébullition utilise l'appareil DECLIC du CNES avec l'insert ALI. Les cellules sont remplies de SF₆ à la densité très proche de la densité critique. Les images obtenues avec la cellule d'observation directe sont semblables à celles issues des installations terrestres de compensation magnétique de gravité mais beaucoup plus propres car il n'y a pas de champ résiduel qui entraîne la déformation et/ou mouvement des bulles observés par exemple dans HYLDE. Les expériences terrestres sont cependant extrêmement utiles car dans HYLDE on peut observer l'ébullition dans la même

4. La combustion

La plupart des expériences de base en combustion ont lieu à des vitesses d'écoulement, ou de propagation, suffisamment faibles pour que les effets de flottabilité y jouent des rôles importants. Si ces effets peuvent avoir un rôle moteur dans la combustion, par exemple, d'un tas de bois, ou d'un immeuble, la convection naturelle apparaît, la plupart du temps, comme un parasite de l'expérience, dont il est bon de s'abstraire.

Ainsi, les expériences en micropesanteur ont pour objectif de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes que la convection naturelle masque au sol, tels les ballons de flamme (prévus théoriquement plusieurs décennies plus tôt), la combustion individuelle de gouttes, la combustion des brouillards, etc. Parallèlement, les problèmes d'incendie en station orbitale se sont avérés représenter une menace particulièrement sérieuse, notamment à cause de l'accroissement de la puissance électrique installée.

Ce rapport comporte ces deux aspects à propos de la combustion. La première thématique s'intéresse à des problèmes fondamentaux liés à la combustion des brouillards et autres aérosols. La seconde concerne des études fondamentales à propos du développement d'un incendie en absence de pesanteur.

Tout d'abord, il convient de rappeler que la combustion expérimentale en micropesanteur «revient de loin». En effet, les perspectives de la période précédente (2006-2009) avaient été obscurcies par des soucis de sécurité qui avaient purement et simplement conduit à l'interdiction d'expériences en micropesanteur. Aussi, dans la période récemment écoulée, les expérimentateurs en combustion ont eu à cœur de lever cet interdit en proposant des configurations expérimentales originales qui satisfassent des critères de sécurité beaucoup plus drastiques. A ce sujet, il est important de remarquer les efforts considérables consentis par l'équipe de Christian Chauveau pour imaginer, développer, tester et faire valider une configuration expérimentale novatrice qui satisfait des consignes de sécurité extrêmement sévères.

Deux des équipes de combustion soutenues par le CNES s'intéressent à la propagation des flammes dans un brouillard. L'une est composée d'expérimentateurs, la seconde regroupe des théoriciens/numériciens. Les deux équipes ont déposé des projets conjoints et mènent des recherches coordonnées sur les régimes de propagation des flammes dans les brouillards. La combustion des brouillards est un thème de recherche en microgravité qui a émergé à la fin des années 90. Il est la suite logique de différentes contributions sur la combustion individuelle des gouttes. En effet, les effets collectifs se sont vite avérés primordiaux en ce qui concerne les régimes de combustion de groupes gouttes, puis des brouillards. L'apport de la microgravité a non seulement supprimé les effets de flottabilité sur la combustion, mais a permis de mieux contrôler les caractéristiques du brouillard (en supprimant la sédimentation) et donc de mieux maîtriser les conditions initiales.

L'aspect expérimental de la combustion des brouillards a été mené par l'équipe de Christian Chauveau du laboratoire ICARE (CNRS Orléans). Cette étude consiste à engendrer un brouillard de gouttes de combustible dans une chambre de combustion remplie d'air et d'initier l'inflammation de ce mélange hétérogène par une étincelle au centre de la chambre. Une flamme va ainsi se développer et se propager sphériquement en consommant progressivement le mélange combustible. Cette propagation est très rapide, de l'ordre d'une dizaine de millisecondes, et va nécessiter l'utilisation d'un dispositif optique non intrusif d'ombroscopie à haute cadence d'imagerie pour suivre l'évolution temporelle du front de flamme. La vitesse de propagation de la flamme est déterminée grâce à cette évolution temporelle. Cette étude fait intervenir de nombreux paramètres influant sur cette vitesse de propagation, comme la pression, la température, la richesse, le combustible, le nombre et la taille des gouttes.

Dans le cadre de cette étude fondamentale, l'éthanol a été choisi comme carburant d'étude. Les objectifs principaux de cette recherche expérimentale sont dans un premier temps de classer les différents régimes de combustion rencontrés en fonction de la granulométrie du mélange et dans une deuxième étape d'étudier l'impact physique de la goutte sur le passage du front de flamme. La goutte liquide est alors vue comme une hétérogénéité (liquide/gazeuse) qui va alors perturber et déformer la flamme. Cette caractérisation passe par la détermination expérimentale de la vitesse de propagation de la flamme et le calcul de l'épaisseur de flamme (propriétés de la flamme) ainsi que par l'étude de sa topologie (cellules et plissement).

Les expériences sont réalisées en microgravité en utilisant les vols paraboliques de l'Airbus A300 Zéro-G du CNES. Cet environnement de gravité réduite permet d'abord de s'affranchir des problèmes de sédimentation des gouttes dans la phase préparatoire du mélange, ensuite il permet de réduire considérablement les phénomènes de convection naturelle. Des études

comparatives sont conduites au laboratoire, en conditions de gravité normale. Celles-ci permettent de mettre en évidence les avantages procurés par l'expérimentation en gravité réduite dans cette étude. Les premières campagnes de vols (2010-2012) ont été dédiées à l'étude granulométrique du brouillard formé dans l'expérience pour les différentes conditions de pression et température. Ensuite à partir d'octobre 2012, trois campagnes de vols paraboliques ont été consacrées à la combustion de ces mélanges.

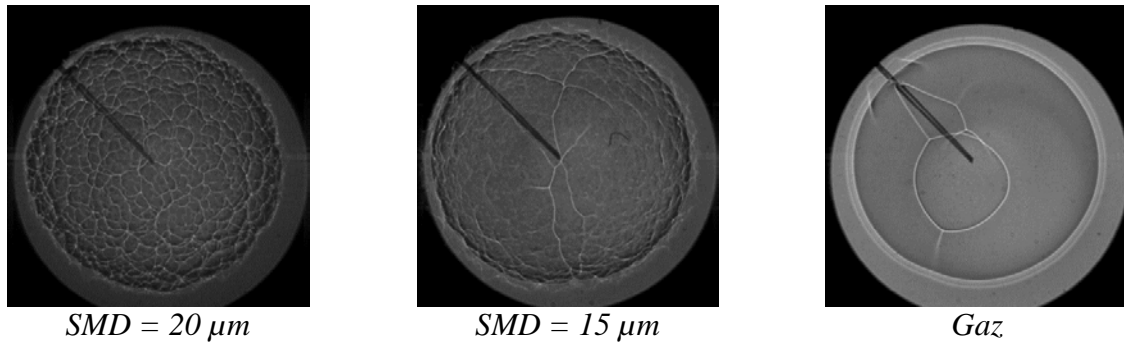


Figure 1 : Exemple de déformation de flamme pour des conditions identiques (pression, température et richesse globale) à différentes tailles de gouttes. (Images présentées en 0g à 2 bars, 334 K et $\varphi = 1,4$).

Les premières observations ont indiqué que la granulométrie des gouttes composant le brouillard a une influence directe sur l'aspect cellulaire (instabilités) de la flamme diphasique. En effet, plus la taille des gouttes est conséquente plus les cellules sont marquées et vont plisser le front de flamme.

En ce qui concerne la vitesse de propagation de la flamme, des expériences de combustion en phase gazeuse ont été réalisées dans les mêmes conditions que celles réalisées en diphasique (température, richesse globale et pression). Les résultats mettent en évidence une vitesse accrue de la propagation de la flamme en diphasique pour les hautes richesses. L'explication tient principalement dans le fait que la vitesse de propagation de la flamme est pilotée principalement par la quantité de combustible resté sous forme gazeuse au sein du brouillard. Ainsi, la richesse réelle est moindre, et ceci se traduit par un décalage de richesse. Une conséquence très importante de ce résultat est que des mélanges non inflammables en phase gazeuse peuvent le devenir en diphasique.

L'approche théorique d'accompagnement a été menée par un groupe de combustionnistes de Marseille, animé par Colette Nicoli (CNRS), avec Bruno Denet et Pierre Haldenwang (Université d'Aix-Marseille). Ce groupe a développé une modélisation adaptée aux brouillards (à pression modérée et haute) pour lesquels la distance moyenne inter-goutte n'est pas petite devant l'épaisseur de flamme. Cette étude fait suite à des études antérieures où les gouttes étaient considérées comme beaucoup plus petites (brouillards à basse pression) et les modèles de combustion faisaient alors appel à des considérations d'homogénéisation. Rappelons qu'au cours de ces études antérieures un certain nombre de régimes de propagation à travers les brouillards (à petites gouttes) avaient été prédits. Certains se sont avérés en bon accord avec les observations expérimentales, tels que la propagation oscillatoire ou la propagation contrôlée par l'évaporation.

La période récente s'est intéressée à des brouillards non-homogénéisables (i.e. à grosses gouttes). L'approche s'est appuyée sur un modèle numérique traitant d'une flamme se

propageant dans un milieu de composition variable, constitué à partir de la donnée initiale d'un brouillard schématisé par des gouttes disposées sur les nœuds d'un réseau à face centrée. Pour traiter de la composition variable en richesse (milieu dit «stratifié en richesse»), une cinétique réduite appropriée a été développée.

Dans un premier temps, cette cinétique a été appliquée aux brouillards globalement pauvres. Les résultats rendent compte d'une réalité expérimentale selon laquelle une flamme de brouillard peut se propager dans un milieu où la tension de vapeur est faible; en d'autres termes, la flamme assure elle-même l'évaporation nécessaire à sa propagation. Ainsi, un régime à deux temps caractéristiques a pu être mis en évidence: un temps d'évaporation suivi d'un temps de combustion. Une loi d'échelle a ensuite été déduite, prédisant une vitesse de flamme de brouillard ne dépendant que du produit «charge liquide multipliée par la distance inter-goutte».

En ce qui concerne une étude plus récente sur les brouillards globalement riches, ce modèle de propagation hétérogène prédit que, dès que la richesse dépasse la richesse unité, la vitesse de la flamme de brouillard est une fonction faiblement dépendante de la richesse globale. Cette prédiction sur l'existence d'un «plateau» correspond à des observations expérimentales mal expliquées jusqu'à présent.

Dans la période antérieure (2006-2009), l'étude de flammes représentatives d'incendies en station orbitale avait été poursuivie à Poitiers (CNRS, P. Joulain, H.Y. Wang, H. El-Rabii) où le rôle des suies dans la propagation avait été mis en évidence. Cela a conduit à développer des modèles de génération de suies, afin que la modélisation puisse rendre compte des observations expérimentales. La période actuelle s'oriente vers des expériences en situation quasi-orbitale car il s'agit de brûler des surfaces solides lors du retour d'un véhicule cargo. Ces développements sont réalisés par l'Equipe de Guillaume Legros à l'UPMC

Depuis plusieurs décennies, de nombreux travaux traitant de la propagation d'incendie et de l'écoulement des fumées ont permis des avancées certaines dans le domaine de la détection et de la prévention des incendies. Pour autant, du fait des conditions très particulières régnant au sein des véhicules spatiaux, les outils déployés pour le dimensionnement à gravité terrestre des systèmes de détection se doivent d'être pour le moins validés en conditions spatiales réelles, voire -plus probablement- modifiés afin prendre en compte la sensibilité de la détectivité des incendies au niveau de pesanteur. La pertinence des procédures de maîtrise des incendies en configuration spatiale dépend à coup sûr de ces efforts à produire.

Au cours des prochains travaux, l'équipe de l'UPMC étudiera la propagation de flamme établie en micropesanteur sur des échantillons de taille réduite. Les expérimentations seront essentiellement réalisées à bord de l'Airbus zéro-G de la société Novespace. Un nouveau banc expérimental, financé par le CNES et actuellement développé à l'UPMC, permettra ces expériences. L'équipe s'intéressera tout particulièrement au développement d'outils de détection produisant des informations pertinentes aux systèmes de maîtrise de l'incendie. Des leviers de contrôle pourront ainsi être dégagés, notamment par le biais des conditions ambiantes. La composition chimique ambiante ainsi que la vitesse de ventilation sont en effet des paramètres de premier ordre dans la production de suie au sein de la flamme. Or les transferts radiatifs auxquels contribuent fortement ces particules de suie pilotent la propagation de flamme en l'absence de pesanteur.

L'analyse des résultats expérimentaux sera complétée par une étude numérique réalisée en étroite collaboration avec Jean-Louis Consalvi (IUSTI, Marseille). Le code développé par ce dernier est notoirement conçu pour modéliser la production de suie et les transferts radiatifs au sein des flammes non-prémélangées. Il résout le jeu d'équation aux dérivées partielles elliptiques par une formulation faible nombre de Mach à partir d'une discrétisation par volumes finis. Le code intègre une chimie en phase gazeuse détaillée ainsi que des modèles de transport élaborés. L'équation du transfert radiatif est résolue par la méthode des volumes finis couplée à un modèle complexe de propriétés radiatives. Une telle approche prédictive est nécessaire à la mise en place d'algorithmes de réponse adaptative à la propagation d'incendie.

L'ensemble de ces travaux doit plus largement contribuer au projet international *Spacecraft Fire Safety Demonstration*, mené par la NASA, en étroite collaboration avec les partenaires européens, japonais et russes. Dans le cadre de ce projet, des incendies se propageront sur des échantillons de taille réelle (~1m) pendant une échelle de temps réaliste (~20 minutes), et ce au sein de trois véhicules Cygnus de ravitaillement de la Station Spatiale Internationale. Ces expériences extraordinaires sont une première mondiale en la matière et représentent un pas substantiel pour la sécurité des vols de très longue durée.

5. Mousses, émulsions et milieux granulaires (Véronique Schmitt, Eric Falcon)

5.1. Mousses, émulsions

5.1.1. Génération et vieillissement des mousses

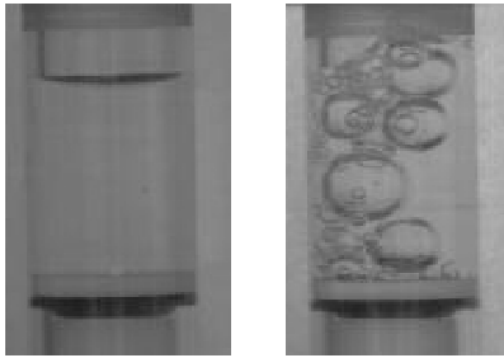
Les mousses sont utilisées dans de nombreuses applications (alimentaire, cosmétique, revêtement, protection contre le feu, isolation, matériaux de faible densité ...) et il est donc important de contrôler leurs paramètres caractéristiques lors de la formation (taille des bulles et fraction liquide) et de comprendre ce qui gouverne leur destruction par mûrissement (disparition des petites bulles par diffusion à travers la phase liquide vers les bulles plus grandes) ou coalescence (fusion de bulles adjacentes par rupture du film les séparant). Cependant, sur terre, il est très difficile de découpler leur formation de leur évolution cinétique due au drainage qui est l'écoulement du liquide et donc l'assèchement des mousses. Ce phénomène empêche de caractériser les mousses immédiatement après fabrication alors que la connaissance de la mousse à ce stade précoce pourrait être très utile pour comprendre les paramètres qui régissent leur fabrication et les instabilités conduisant à leur destruction ultérieure.

Pour étudier les mousses en microgravité, un dispositif de caractérisation optique par DWS et de conductivité a été mis au point afin de déterminer la fraction en liquide et la taille des bulles (module Mousse de la Station Spatiale Internationale (FSL) en lien avec un réseau européen de l'ESA). Une grande variété de stabilisants peut être considérée (mélange de tensioactifs charge opposée, polymères, protéines, nanoparticules, gouttes d'émulsions), un mélangeur turbulent donne lieu à des mousses polydisperses et un dispositif microfluidique génère des mousses monodisperses. Des caractérisations physicochimiques des surfaces modèles ont été menées en parallèle (tension superficielle, rhéologie de surface, ellipsométrie et réflectivité de rayons X, balance à film, rhéologie 2D).

En tirant à vitesse constante des films de savons à l'aide d'un cadre, il a été possible de montrer que, dans des conditions de drainage, de façon surprenante, les films ne se cassent pas stochastiquement mais se rompent tous au même moment pour une vitesse donnée. La

grande variété des systèmes étudiés devrait permettre de déterminer les paramètres clés de cette rupture.

Les expériences de fabrication de mousse en vols paraboliques (2007 et 2008) ont permis de montrer qu'en l'absence de drainage, l'utilisation de stabilisant n'est pas nécessaire pour former des mousses humides stables.



Mousse d'eau quelques secondes après formation, à droite sur terre, à gauche, en vol parabolique

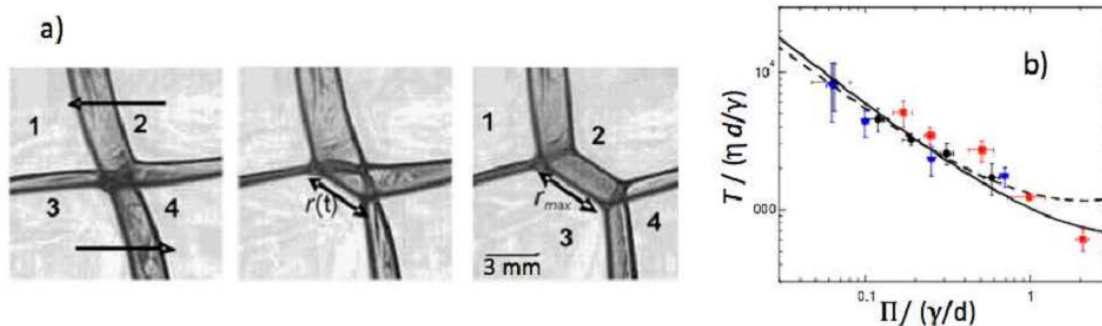
Pour s'affranchir de la gravité et préparer les expériences en microgravité, la mousse a été placée dans des récipients tournants ou dans des cellules planes horizontales (conditions assez différentes cependant de la microgravité). Ces expériences préliminaires ont mis en évidence le rôle important de l'élasticité de surface dans la stabilité des mousses qui devra être comparée à ce qui se passe sur une mousse réelle à 3D dans l'ISS.

Des expériences de stabilité sur des temps plus longs ont été effectuées par un astronaute dans l'ISS en 2009, et 2012.

5.1.2. Mousses de fluides complexes

Les activités menées lors de cette collaboration entre trois équipes portaient sur les mousses humides de fluides complexes. L'objectif des recherches était d'étudier la fabrication et le vieillissement des mousses aqueuses, stabilisées par des tensioactifs ou des particules solides et de comprendre comment le vieillissement et la rhéologie des mousses sont modifiés lorsque le fluide interstitiel entre les bulles est complexe (dispersion de particules ou une émulsion). Dans le régime des mousses humides (à fraction liquide élevée), la gravité accélère considérablement le vieillissement des mousses.

Ces équipes ont déterminé la dynamique de réarrangement d'un ensemble de quatre bulles soumis à un cisaillement. A faible taux de cisaillement, la durée est gouvernée par la compétition entre tension de surface et friction visqueuse de surface. En revanche à taux de cisaillement élevé, la durée du réarrangement augmente (cf figure ci-dessous).



a) Réarrangement d'un cluster de 4 bulles induit par un cisaillement imposé (flèches) : A gauche, jonction à films instable ; au centre, création du nouveau film ; à droite, nouvelle configuration d'équilibre avec 2 jonctions à 3 films chacune. La durée de l'événement varie de quelques ms pour des interfaces mobiles à quelques s pour les interfaces rigides. b) Durée d'un réarrangement (normée par la tension de surface T , la viscosité η de la solution moussante, et le diamètre des bulles d , en fonction de la pression de confinement Π normée. A l'approche du jamming ($\Pi \rightarrow 0$), la durée diverge.

Afin d'étudier comment le mûrissement, par l'échange de gaz entre bulles voisines conduisant à des configurations instables, induit des réarrangements de manière intermittente, un dispositif de DWS a été mis au point (MAP AO 99-108 «Hydrodynamics of Wet Foams», contract 14914/02/NL/SH, pour l'équipe de l'INSP et actuellement en phase (B) de développement par Astrium). Au sol, pour des interfaces liquide-gaz rigides, la durée des réarrangements dans une mousse 3D est indépendante de la pression de confinement, dans le cas d'interfaces mobiles, la durée des réarrangements diverge à l'approche du jamming (Figure b).

Une dispersion ou une émulsion présentant une contrainte seuil permettent de stabiliser une mousse au repos lorsqu'elles sont utilisées comme fluide interstitiel. Au repos, le mûrissement provoque des réarrangements de bulles et mettent localement le système en écoulement conduisant à du drainage par intermittence malgré la contrainte seuil. Sous cisaillement, le drainage s'active et conduit au crémage des bulles, d'autant plus rapide que le cisaillement est élevé.

La perspective de ce travail est d'étudier le vieillissement des mousses humides chargées en particules solides et la dynamique des réarrangements de bulles. Dans l'ISS, les données de DWS seront collectées. Au sol, l'étude sur des mousses plus sèches, permettra de comprendre l'effet des attractions capillaires entre particules au sein d'une mousse sur la dynamique de vieillissement et permettra d'interpréter les données de vieillissement des mousses humides en microgravité recueillies dans la station ISS. Au sol, la dynamique des réarrangements dans une mousse en écoulement le long d'un plan incliné sera aussi étudiée afin de préparer les développements ultérieurs des expériences de rhéologie en microgravité. Sur ces travaux sur les mousses humides, une revue vient d'être acceptée dans European Journal of Physics E (Microgravity studies of aqueous wet Foams by D. Langevin and M. Adler).

5.2. Les milieux granulaires (Eric Falcon)

L'étude des propriétés des milieux granulaires en impesanteur est primordiale pour mieux comprendre leur rhéologie, leur écoulement ou leur dynamique lorsqu'ils sont soumis à des

vibrations mécaniques. Au-delà de l'intérêt spatial (gestion d'un granulaire dans l'espace, d'un combustible solide de fusées, et d'une meilleure compréhension de la dynamique des anneaux planétaires), la motivation pour la microgravité est d'atteindre une situation expérimentale où les collisions inélastiques entre particules sont le seul mécanisme d'interaction dans le cas dilué, ou de s'affranchir, dans le cas dense, de la pression de confinement des grains due à leur propre poids. La seule échelle de temps pour un tel système granulaire en microgravité est alors la période de vibrations qui simplifie fortement la modélisation du système en utilisant l'analyse dimensionnelle.

Un milieu granulaire en régime dilué et fortement vibré mécaniquement ne se comporte pas comme un gaz usuel du fait de la dissipation d'énergie lors des collisions inélastiques. Les concepts de la théorie cinétique des sphères dures ne peuvent alors pas s'appliquer directement. La formation d'amas de particules et la distribution des vitesses des particules qui diffère de la distribution de Maxwell-Boltzmann est la manifestation la plus surprenante d'un tel «gaz» granulaire dissipatif. Lorsque le libre parcours moyen des particules n'est pas négligeable devant les dimensions de la cellule, il a été montré que le milieu granulaire vibré s'écarte significativement des prédictions relatives aux gaz raréfiés (P. Evesque et al.). Dès que l'énergie injectée dans le milieu granulaire est arrêtée, le suivi des particules a permis d'étudier la relaxation ou "refroidissement" de ce gaz granulaire lors de vols paraboliques (G. Bossis et al.). L'absence d'équipartition de l'énergie cinétique de translation et de rotation a été notamment mise en évidence tout au long du déclin.

La collaboration internationale «Space Grains» de l'ESA, impliquant plusieurs scientifiques français, est très active sur le sujet autour du futur instrument «Vipgran» (*Vibration induced phenomena in granular matter*) prévu au sein de la Station Internationale vers 2019. Des mesures relatives à la convection, la ségrégation, les gaz granulaires, et le phénomène de blocage dans les milieux granulaires soumis à vibrations seront entreprises avec le prototype au sein de vols paraboliques début 2016. Le projet «Dynagran» (*Dynamiques des milieux granulaires*) entre le CNES et la Chine (M. Hou, Chinese Academy of Sciences) s'intéresse, quant à lui, au transport de la matière granulaire diluée en microgravité. Il est regrettable que les calendriers Chinois et Français n'aient pu trouver à la fois le budget et la date de vol pour réaliser ces expériences en vol.

Dans le régime dense, des études relatives à la transition de blocage ou «jamming» d'un écoulement granulaire sous faibles vibrations ont été réalisées en vols paraboliques, en collaboration avec la DLR, afin de s'affranchir de la pression de confinement des grains due à leur propre poids (E. Clément et al.). En mesurant la diffusivité des particules, il a été montré que la dynamique de blocage est plus rapide qu'en gravité terrestre, et qu'elle dépend significativement de l'amplitude de cette pression de confinement.

6. Ecoulement à deux phases, évaporation, ébullition (Hervé Combeau)

La réalisation d'expériences en microgravité permet de réduire classiquement l'effet d'un phénomène pour permettre une analyse dans des conditions simplifiées. Pour le thème des écoulements diphasiques, il s'agit également de fournir des données expérimentales et des modèles pour le dimensionnement des réservoirs du lanceur Ariane 5 et d'autres systèmes spatiaux : boucles fluides à pompage capillaire ou mécanique, lignes d'alimentation des moteurs fusée, ... Pour le thème "sustentation magnétique", un des objectifs concerne la détermination des propriétés thermophysiques dans les métaux liquides à haute température.

La plupart de ces travaux sont en lien avec l'industrie avec des partenaires industriels comme : Air Liquide, Astrium, Snecma moteurs, Thalès Aliena Space, Battery Global System, RBC44 (Régénération Industrielle de Batteries), BATSCAP (Bolloré). Les applications visées couvrent de façon large le domaine de l'énergie : intensification des transferts de chaleur, batteries ...

Concernant les études sur les écoulements diphasiques, l'équipe de l'IMFT travaille sur trois thèmes : l'ébullition en vase sur site isolé ou en multisites ; l'ébullition convective et les écoulements adiabatiques diphasiques. Les résultats expérimentaux en ébullition en vase ont permis de développer une corrélation permettant de prédire le flux de chaleur en microgravité pour des réfrigérants mais également pour l'oxygène liquide. Des expériences modèles sur les fusées sondes Maser 11 et Maser 12 ont été conduites pour analyser le comportement des ergols dans les réservoirs d'Ariane 5 en micropesanteur. Une première partie de ces expériences a été consacrée à l'étude de la dynamique et des échanges thermiques au voisinage de la ligne de contact triple (solide-liquide-gaz). La deuxième partie a permis de quantifier l'évolution du coefficient d'échange thermique en paroi du réservoir en fonction de la pression du réservoir et du flux de chaleur en paroi. En parallèle des approches expérimentales, un modèle numérique fin permettant de simuler la croissance et le détachement d'une bulle a été développé.

La deuxième équipe du LIMATB travaille sur la convection naturelle diphasique électrochimique. Ce sujet s'inscrit dans le cadre de l'étude expérimentale des procédés d'électrolyse diphasique. Plus précisément, l'objectif est d'obtenir une description quantitative réaliste de la nucléation-croissance de bulles lors des électrolyses diphasiques liquide-gaz. Les expériences en microgravité lors de campagnes de vols paraboliques ont permis de caractériser la distribution des bulles et leur effet sur l'écrantage de l'électrode. Le champ de vitesse de l'électrolyte a été mesuré par PIV Photo Induced Velocimetry). L'équipe de l'IUSTI a travaillé sur l'évaporation et plus particulièrement elle visait de préciser les mécanismes de l'évaporation du ménisque d'une goutte placée dans une phase gazeuse. La comparaison de gouttes d'éthanol s'évaporant sur un substrat chauffé à deux niveaux de gravité ont permis de montrer que le développement d'ondes à la surface de la goutte est dû aux forces purement thermo-capillaires et que leur évolution temporelle était similaire pour des conditions de gravité différentes. Ces instabilités de surface peuvent conduire au décrochage de la goutte et leur caractérisation était donc une étape importante.