

Actes du colloque annuel



Colloque annuel, La Rochelle, 29 Octobre 2025



Groupement de Recherche — Micropesanteur Fondamentale et Appliquée (CNES / CNRS 2799)

Editeurs:

Catherine Colin Directrice (catherine.colin@toulouse-inp.fr)
Guillaume Legros Directeur adjoint (guillaume.legros@sorbonne-universite.fr)

Sommaire

Session 1 Solidification et croissance cristalline, nucléation, dissolution	1
1.1 Dynamique des défauts au cours de la croissance facettée du salol A. Raad, N. Bergeon , N. Mangelinck-Noël, F.L. Mota	2
1.2 Expériences de solidification dirigée d'alliages Al-20%pdsCu affinés effectuées pendant la préparation du dispositif XRF – EU1 G. Reinhart , H. Nguyen-Thi	5
1.3 Structures hybrides en solidification eutectique S. Akamatsu , S. Bottin-Rousseau	8
1.4 Théorie et modélisation des fronts de croissance couplée dans les alliages péritectiques M. Plapp	11
1.5 Caractérisation des pointes de dendrites en solidification directionnelle d'alliage succinonitrile- camphre en condition de microgravité M. Medjkoune, T. Lyons, F. L. Mota, J. Tian, K. Ji, L. Littles, A. Karma, N. Bergeon . . .	14
1.6 Préparation de l'expérience en fusée sonde XRMON-CETSOL G. Reinhart, H. Nguyen-Thi, D. Olmos-Vicente, N. Bergeon	17
Session 2 Instabilité, Turbulence, convection Bénard - Marangoni	21
2.1 Thermomagnetic convection in ferrofluids zero-gravity environment A. Meyer, A. Hiremath, C. Kang, I. Mutabazi	22
2.2 Thermo-electric convective flow with oval geometry in microgravity, simulations vs. experi- ments Y. Sliavin, O. Crumeyrolle, V. Motuz, M. H. Hamede, M. Strangfeld, A. Meyer, C. Egbers, I. Mutabazi	25
2.3 Effets dynamiques de champ électriques AC sur des bulles en croissance : Préparation de l'expérience AEBIO S. Siedel , T. Gu	28
2.4 Compressible phase-field model for the bubble rise near the liquid-vapor critical point D. Sharma, S. Amiroudine	31
2.5 The ESA project Giant Fluctuations H. Bataller, F. Croccolo	34

2.6	Instabilités doubles diffusives lors de la superposition de deux couches salées de chlorure de sodium et de sulfate de sodium	
	H. Bataller , C. Oko, A. Mialdun, M. M. Bou-Ali, V. Shevstova, B. Seta, A. Lassin	37
2.7	Transfert thermique en microgravité par instabilité de Faraday	
	N. Brosuis, F. Zoueshtiagh , R. Narayanan	40
2.8	Aérodynamique du vol de papillons en gravité altérée	
	F. Schweitzer, A. Gayout, M. Bourgoïn , N. Plihon	43
2.9	Transport de chaleur au voisinage du point critique liquide-vapeur	
	V. Mouet, F. Pétrélis, S. Fauve	46
2.10	Turbulence characterization in swirled sprays	
	S.K. Sahoo, N. Machicoane	49
2.11	Kelvin-Helmholtz instability in binary fluids with miscibility gap	
	A. Dubey, S. Amiroudine	52
2.12	Stokes number effects on inertial particles in turbulence under microgravity	
	J. Auzoux, F. Cabrera-Booman, K. Cardin, R. Pedurand, C. Wang, N. Plihon, M. Bourgoïn, R. Bayoàn Cal	55
Session 3 Combustion, Milieux réactifs		59
3.1	DECLIC results with ALI-R onboard ISS : the quest for a true asymptotic behavior	
	Y. Garrabos, C. Lecoutre, S. Marre , I. Hahn	60
3.2	Effects of gravity and pressure on soot production in opposed flame flow along an idealized polyethylene wire	
	J.-L. Consalvi , Y. Li, J.-M. Citerne, A. Guibaud, G. Legros	63
3.3	Far-field signature of flame spreading in microgravity over cylindrical samples	
	Y. Li, J.-M. Citerne, A. Guibaud, J.-B. Renard, G. Legros	66
3.4	Understanding flame-retarded materials for space-like environments	
	J. Sarazin, S. Bourbigot	69
3.5	Flammes pauvres d'ammoniac/hydrogène en microgravité : étude expérimentale et théorique	
	S. Zitouni, R. Glaznev, J. Beeckman, C. Rousselle, C. Chauveau, F. Halter	72
3.6	Flow driven precipitation reaction fronts in radial geometry under microgravity	
	V. Pimienta , C. Roux, G. Schusztter, D. Horvath, A. Toth, K. Schwarzenberger, K. Eckert, A. De Wit	75
Session 4 Interfaces fluides, interfaces fluide-solide, ébullition, condensation, bulles, gouttes		79
4.1	Modélisation de la capillarité	
	O. Millet , A. Logerot	80
4.2	Influence du volume sur l'angle de mouillage macroscopique	
	R. Issa, H. Benabdelhalim, M. Medale, D. Brutin	83

4.3	Ebullition nucléée en microgravité : expérience, modélisation et simulation de l'expérience RUBI	
	L. Favre, P. Ayegba, M/ Mbaye, L. Torres, J. Sebilliau, A. Urbano, S. Tanguy, C. Colin	86
4.4	Etudes de caloduc oscillant : analyse paramétrique	
	V. Nikolayev, V. Padilla, P. Forget, M. Abela, M Mameli, S. Filippeschi, G. Boudier, S. Bajić, E. Blondé, T. Coquard	89
4.5	Etude de mélanges gazeux et de gouttes en micropesanteur	
	C. Graziani, M. Nespoulous, R. Denoyel, N. Martin, S. Fauve, C. Chauveau, M. Antoni	92
4.6	Solidification d'un alliage en lévitation électromagnétique avec un champ magnétique DC horizontal	
	A. El Bakali, P. Choleton, G. Guggilla, D. Chaussende, O. Budenkova	95
4.7	Evaporation de goutte sur substrat soluble	
	C. Pirat, J. Colombani	98
4.8	etude de la cavitation de bulles de fluides cryogéniques en microgravité	
	M. Defferrez, S. Tanguy, C. Colin, A. Urbano	101
4.9	Floating smectic bubbles under electric fields	
	C. Tosarelli, S. Royer, T. Trittel, C. Klopp, K. Harp, R. Stannarius, E. Lacaze	104
4.10	Etude des métaux liquides en microgravité par stabilisation aérodynamique : Préparation du dispositif CARMELIDE	
	M. Courtois , C. Bourges, M. Le Mener, W. Berckmans	107
4.11	3D Modeling of airborne Microparticle transport through a microstructure : Ratchet effect	
	P. Beltrame, P. Trontin	110
4.12	Ebullition nucléée : Influence de la gravité sur la nucléation de bulles	
	L. Tadrist , A. Zaite, F. Ronshin, A. Rednikov, I. Martin, H. Combeau	113
Session 5 Mousses, émulsions, suspensions, gels		117
5.1	Dynamics of glassy suspensions of soft colloids : ground and microgravity data	
	A. Martinelli, L. Cipelletti	118
5.2	Arrêt du mûrissement de bulles dans les fluides à seuil	
	S. Cohen-Addad , N. Galvani, B. Saint-Michel, O. Pitois	121
Session 6 Milieu granulaires, objets biomimétiques		125
6.1	Contrôle par un champ magnétique de l'écoulement de suspensions de particules aux fortes fractions volumiques	
	G. Bossis , S.A.E. Boyer, A. Bur, Y. Grasselli, P. Khuzir, O. Volkova	126
6.2	Cinétique de l'agrégation et rhéologie sanguine : premiers résultats de l'expérience KRABS	
	L. Gatineau, M. Puthumana-Melepattu, C. De Loubens, G. Maîtrejean, C. Minetti, T. Podgorski	129

6.3	Circulation du Sang, Motilité et Dysfonction Endothéliale	
	M.Jin, G. Dixit, M. Dynar, M. Bendaoud, A. Ouaid, A. Farutin, L. Bureau, W. Schmidt, D. Tsvirkun, C. Misbah	132
6.4	Phénomènes collectifs en microcirculation	
	M. Abbasi, M. Leonetti	135
6.5	Evaluation of the evaporative flux of a leaf replica during parabolic flight experiments and investigation of a scaling up to a canopy level	
	J. Kuzman, L. Fleischer, L. Poulet, J.-P. Fontaine , C.-G. Dussap	138

Session 1

Solidification et croissance cristalline,
nucléation, dissolution

- 1.1 Dynamique des défauts au cours de la croissance facettée du salol
A. Raad, **N. Bergeon**, N. Mangelinck-Noël, F.L. Mota

Dynamique des défauts au cours de la croissance facettée du salol

Anassya Raad, Nathalie Bergeon, Nathalie Mangelinck-Noël, Fatima L. Mota

Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, Marseille, France

La microstructure qui se forme à l'interface solide-liquide pendant le processus de solidification des matériaux influence fortement les propriétés macroscopiques du matériau. Maîtriser la qualité d'un matériau nécessite une compréhension approfondie des mécanismes physiques qui régissent la formation de ces microstructures. Notre équipe de recherche a contribué au développement de l'instrument DECLIC et de son insert DSI, dédié à l'étude *in situ* de la formation de microstructures colonnaires dans des matériaux organiques transparents, dans le cadre du projet scientifique MISOL3D (Microstructures de SOLidification 3D), sélectionné par le CNES. Ces expériences visent à révéler les mécanismes physiques qui gouvernent la dynamique de formation et de sélection de la microstructure interfaciale, en configuration d'échantillons massifs 3D. Jusqu'à présent ce dispositif a été utilisé avec des alliages transparents analogues des alliages métalliques (interface rugueuse). Toutefois, l'étude de la croissance de matériaux facettés présente également un grand intérêt, tant sur le plan scientifique qu'industriel. Le silicium cristallin, utilisé dans la fabrication de cellules solaires photovoltaïques, constitue un exemple majeur de cette problématique à l'échelle industrielle. Notre objectif est de mener des études systématiques, en configuration de systèmes massifs 3D, afin de mieux comprendre les mécanismes de croissance, ainsi que la formation et le rôle des défauts dans la (micro)structure du matériau final. A cette fin, un matériau organique transparent, analogue aux systèmes facettés, sera étudié à l'aide du dispositif de laboratoire DECLIC-DSI.

Les matériaux sélectionnés sont dans un premier temps caractérisés physico-chimiquement avant d'étudier leur dynamique de croissance en configuration d'échantillons minces. Le travail de caractérisation est réalisé à l'aide d'une platine de thermo-microscopie, tandis que la croissance est étudiée dans l'instrument ECODIS (Experimental setup for CONfined DIrectional Solidification), un four de solidification conçu pour les géométries d'échantillons minces, équipé d'un microscope optique permettant d'observer *in situ* et en temps réel la dynamique de l'interface solide-liquide. Dans ce résumé, nous présentons les résultats obtenus lors de la solidification dirigée du salol.

Résultats

Le salol est un matériau transparent à la lumière visible, de faible température de fusion ($\approx 42^\circ\text{C}$), qui cristallise à partir du liquide avec une interface macroscopiquement facettée en raison de son fort degré d'anisotropie. Les expériences de solidification dirigée, réalisées avec deux gradients thermiques et trois vitesses de tirage, sont comparées en termes de caractéristiques et dynamique des facettes. Il apparaît que la vitesse de tirage influence la stabilité des facettes : la dynamique de leur élimination est très intense à faible vitesse et ralentit quand la vitesse augmente. Par ailleurs, lorsque le gradient est faible, les pointes des facettes croissent dans une direction quasiment alignée avec celui-ci.

L'évolution dynamique et complexe de l'interface facettée révèle plusieurs types de défauts, tels que des bulles, des stries de croissance, des divisions de facettes, des distorsions cristallines, ainsi que des formations de macles. Ces différents défauts sont illustrés à la Figure 1.

Les bulles, présentes dans toutes les expériences, sont des défauts volumiques. Leur formation est attribuée à la présence d'impuretés, probablement de l'azote, introduites lors du remplissage des échantillons. Bien qu'elles influencent localement la croissance des facettes, aucune corrélation directe n'a été établie entre l'apparition des bulles et les variations de vitesse de croissance des facettes.

Le mouvement des dislocations est l'un des mécanismes les plus courants de formation de défauts dans les cristaux organiques. Il engendre des effets macroscopiques visibles, tels que la formation de stries de croissance et de distorsions cristallines. Les stries, systématiquement observées dans les structures cristallines, sont probablement le signe du passage de dislocations dans leurs plans de glissement, phénomène typique de la relaxation des contraintes pendant la croissance. Les analyses montrent que ces stries apparaissent parallèles (ou presque) aux facettes indexées suivant les plans $\{111\}$, identifiés comme étant les plus denses dans le cristal de salol.

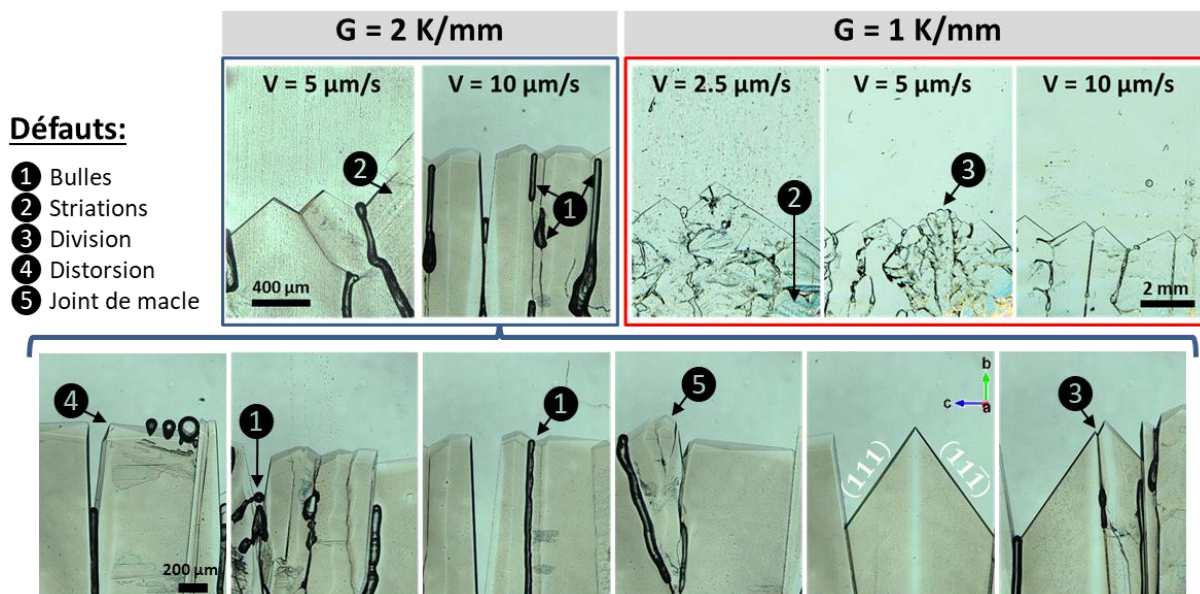


Figure 1 : Images de l'interface solide-liquide du salol mettant en évidence différents types de défauts observés lors de la solidification dirigée du salol à différentes vitesses de tirage (V) et gradients thermiques (G).

La division des facettes se produit lorsque la taille d'une facette devient instable, lorsqu'une bulle entre en contact avec elle, ou encore lorsqu'un autre défaut favorise cette scission. Ce phénomène est observé plus fréquemment sur les facettes $\{111\}$, probablement en raison d'une forte accumulation de contraintes le long de ces plans dans le salol. L'augmentation de la taille des facettes favorise cette instabilité de division.

Le dernier type de défaut majeur observé est la formation de joints de macles, défauts cristallographiques plans (Fig. 2). Ces macles peuvent être induites par des instabilités thermiques, la présence d'impuretés ou encore des dislocations. L'analyse des macles apparues lors de nos expériences a permis d'identifier le plan de maillage comme étant du type $\{111\}$, avec des macles type $\Sigma 3$, caractéristiques d'une rotation cristallographique de 180° .

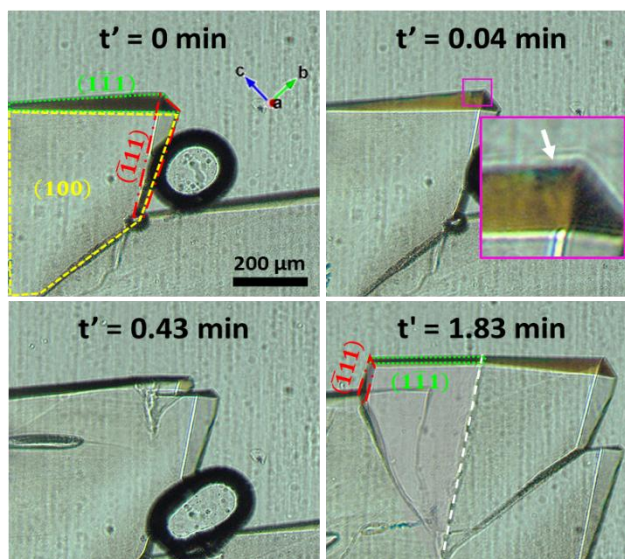


Figure 2 : Séquence d'images montrant l'apparition d'un cristal maillé. ($V_p = 5 \mu\text{m/s}$, $G = 2,0 \text{ K/mm}$)

Perspectives

La caractérisation de la dynamique des facettes du salol et de leur compétition se poursuit, notamment par des études quantitatives et par la réalisation d'expériences à des vitesses de tirage plus élevées. Dans le but d'établir des lois de croissance cinétique, des travaux sont en cours pour caractériser la surfusion des facettes. Les études se poursuivent également pour caractériser d'autres systèmes, notamment à base succinonitrile, qui pourraient présenter une interface moins facettée.

Références 2025

- Raad A., Bergeon N., Mangelinck-Noel N., Mota F.L. *Materialia*. 40 (2025) 102405.

Remerciements : Les auteurs expriment leur gratitude au CNES pour son soutien dans le projet MISOL3D.

- 1.2 Expériences de solidification dirigée d'alliages Al-20%_{pds}Cu affinés effectuées pendant la préparation du dispositif XRF – EU1
G. Reinhart, H. Nguyen-Thi

Expériences de solidification dirigée d'alliages Al-20% pdsCu affinés effectuées pendant la préparation du dispositif XRF – EU1

G. Reinhart¹, H. Nguyen-Thi¹

¹ Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, Marseille, France

Les sources et détecteurs de rayons X modernes permettent désormais d'utiliser la radiographie X pour étudier en laboratoire et de manière *in situ* et en temps réel la solidification d'alliages métalliques. L'adaptation de ces dispositifs à des plateformes de microgravité est l'objectif principal du projet XRMON (*In-situ X-Ray MONitoring of advanced metallurgical processes under microgravity and terrestrial conditions*) initié dans le cadre des programmes MAP (*Microgravity Application Promotion*) de l'ESA (*European Space Agency*). Plusieurs expériences ont été réalisées avec succès à bord de vols paraboliques et de fusées sondes au cours des dernières années¹, ce qui a permis par exemple d'approfondir les connaissances sur la croissance des cristaux dendritiques colonnaires, équiaxes ainsi que la transition entre ces deux structures de grain dans des alliages à base aluminium². Cependant, la durée limitée de la période de microgravité avec ces plateformes n'est pas suffisante pour atteindre des régimes stationnaires en solidification dirigée. De plus, seul un petit nombre de conditions expérimentales ont été étudiées jusqu'à présent à cause des rares opportunités pour effectuer ce type d'expériences en microgravité.

Une façon de surmonter ces limitations est l'utilisation d'un dispositif embarqué sur la station spatiale internationale ISS. Le dispositif XRF (*X-ray Facility*) conçu à cet effet est dans la phase finale de son développement par l'ESA, sous la responsabilité scientifique de l'IM2NP et le soutien technique d'AIRBUS et SSC (*Swedish Space Corporation*). L'objectif est de rendre possible la réalisation de plusieurs expériences successives sur le même échantillon afin d'effectuer des études systématiques en fonction des paramètres expérimentaux. Le premier dispositif expérimental (*experiment unit EU-1*) développé est dédié à l'étude de la solidification dirigée d'alliages à base aluminium. Plusieurs campagnes d'expériences réalisées au sol ont validé les performances techniques du dispositif, et des résultats préliminaires ont été obtenus à partir de la caractérisation du champ de température.

Résultats

Le dispositif XRF / EU-1 est composé d'un four de solidification dirigée et d'un système de radiographie X (Figure 1a). L'ensemble sera inséré dans le rack EPM du laboratoire européen Columbus sur ISS. Le four est constitué de deux éléments chauffants imposant un gradient de température G , similaire au four XRMON-GF (*Gradient Furnace*) utilisé à bord des fusées sondes MASER et de vols paraboliques. La fusion/solidification d'un échantillon en forme de lamelle parallélépipédiques d'épaisseur $\approx 200\ \mu\text{m}$, inséré dans un creuset en carbone vitreux, peut être provoquée soit par l'ajustement des températures des éléments chauffants à une vitesse de chauffe/refroidissement R , soit par déplacement de l'échantillon à une vitesse V . La source de rayons X est une source micro-focus de marque HAMAMATSU avec une taille de point focal de $2\ \mu\text{m}$ et une cible en tungstène fournissant un rayonnement divergent polychromatique. Les photons sont collectés après avoir traversé l'échantillon par un détecteur sCMOS produit par PHOTONICS SCIENCE permettant d'enregistrer des radiographies avec un excellent contraste pour des alliages à base aluminium et une fréquence d'acquisition de 2 à 3 images par secondes pour une résolution spatiale de $8\ \mu\text{m}$.

La figure 1b présente un exemple de radiographie enregistrée au cours de la solidification d'un alliage Al-20% pdsCu affiné. La structure en nid d'abeille du détecteur est visible et peut être retirée en appliquant un traitement d'image qui consiste à diviser l'image contenant la microstructure en cours de solidification par une image enregistrée quand l'échantillon était entièrement liquide dans le champ de vue. Les grains dendritiques sont alors clairement visibles en gris clair et sont entourés de liquide enrichi en soluté apparaissant en gris foncé (Figure 1c).

¹ G. Reinhart et al. npj Microgravity 9, 70 (2023)

² F. Ngomesse, et al. Acta Materialia 221 117401 (2021)

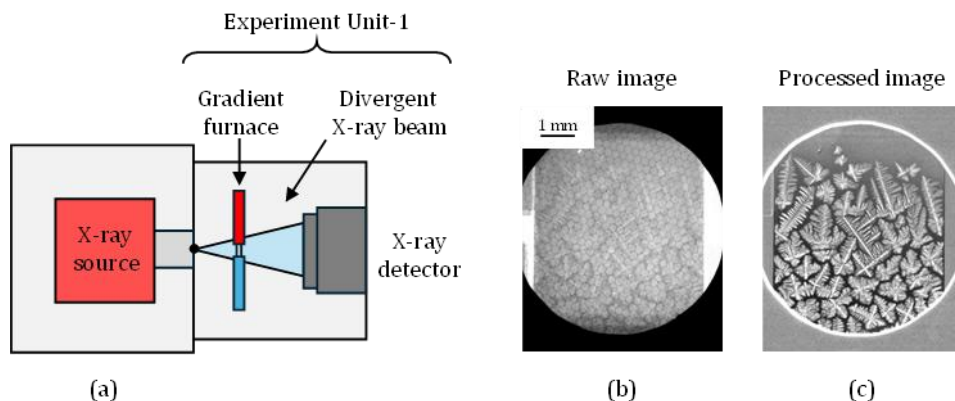


Figure 1 : (a) Schéma du dispositif XRF et de l'Experiment Unit-1 dédiée à l'étude de la solidification par radiographie X sur ISS. (b) Exemple de radiographie et (c) image obtenue après traitement.

Un autre traitement d'image permet d'obtenir des informations sur le champ de température directement à partir des radiographies pendant la solidification de la phase eutectique qui se forme à partir du liquide résiduel entre les dendrites. La propagation du front eutectique a été révélée par *frame-differencing*. Ce traitement consiste à diviser chaque image par une autre image enregistrée précédemment avec un intervalle de temps adapté. La distance parcourue par le front eutectique pendant cet intervalle apparaît alors comme une bande gris foncé (Figure 2b). La mesure de profils d'intensité effectués le long de la largeur de l'échantillon (Figure 2b et 2c) est ensuite utilisée pour déterminer la forme et la position de l'isotherme eutectique. Enfin, la superposition des différentes mesures fournit une image représentant l'évolution de la forme et de la position de l'isotherme eutectique au cours de l'expérience. Les résultats obtenus ont mis en évidence une augmentation graduelle du gradient de température du bas vers le haut du champ de vue. De plus, il a été observé que les isothermes sont planes pour des valeurs du gradient de température appliqué de 3 et de 10 °C/mm, mais sont significativement courbées quand le gradient de température est faible, de 1°C/mm.

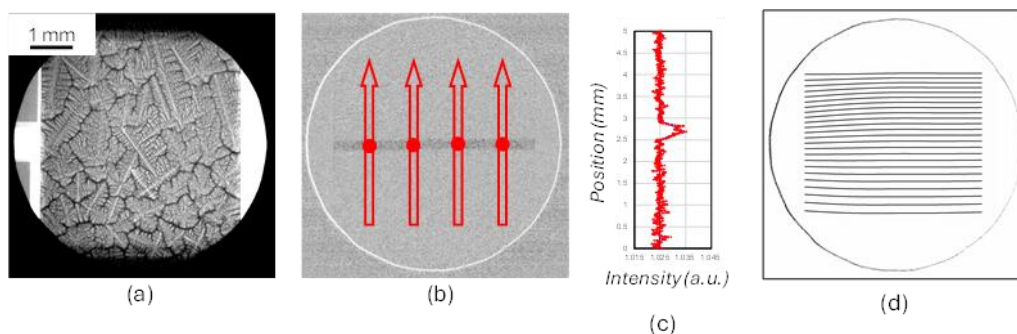


Figure 2 : Traitement d'image pour la détection de la position du front (Al-20%pdCu, $R = -0.15$ °C/s, $G = 3$ °C/mm). (a) Radiographie, (b) position du front eutectique révélée par *frame differencing*, (c) profil d'intensité et (d) position et forme de l'isotherme eutectique dans le champ de vue.

Perspectives

La prochaine étape est la préparation et la validation de l'*Engineering Model* qui servira également de *Ground Test Model*. L'analyse des données obtenues pendant les tests se poursuit. L'évaluation de l'avancement du développement du dispositif aura lieu au cours du CDR (*Critical Design Review*) fin 2025, et l'envoi sur la station spatiale ISS est prévu pour le premier trimestre de 2027.

Publications

G. Reinhart, F. Kargl, M. Becker, L. Sturz, D. J. Browne, H. Nguyen-Thi, A. Frutos Pastor, A. Sgambati and W. Sillekens, Analysis of preparatory directional solidification experiments for a new X-ray facility for the International Space Station, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1335 (2025) 012003.

1.3 Structures hybrides en solidification eutectique
S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau

Structures hybrides en solidification eutectique

Silvère Akamatsu¹, Sabine Bottin-Rousseau¹

¹Institut des Nanosciences de Paris (INSP), Sorbonne Université, CNRS UMR 7588, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France

Entre janvier 2018 et décembre 2023, en collaboration avec l'équipe d'U. Hecht (Access e.V., Aachen, Allemagne), nous avons mené trois campagnes d'expérimentation in situ en micropesanteur (μg) ayant pour but d'étudier la solidification eutectique (programmes SETA et SEBA de l'ESA) dans l'instrument Transparent Alloys (TA), à bord de la Station Spatiale Internationale (ISS). La méthodologie s'appuie sur (i) la visualisation in situ (méthode DIRSOL¹) du front de croissance dans un alliage modèle transparent (SCN-DC²), (ii) la suppression, en μg , de la convection thermosolutale dans le liquide, et (iii) les simulations numériques en champ de phase pour l'analyse théorique – coll. M. Plapp (Ec. Polytechnique, Palaiseau). Le point focal est la transition morphologique dite « lamelles-fibres » des microstructures eutectiques biphasées. On considère pour cela la solidification directionnelle d'un alliage binaire de concentration proche d'un point eutectique du diagramme de phase, à vitesse imposée V_s dans un gradient de température fixe. Les microstructures que l'on trouve figées dans le solide biphasé, lamellaires, en fibres, ou de forme plus complexe, résultent d'une croissance couplée, suivant un processus d'auto-organisation des deux phases solides en des motifs planaires en bandes, en hexagones ou hybrides à l'interface solid-liquide. L'espacement interphase λ peut varier à l'intérieur d'un intervalle fini, dont les deux bornes sont approximativement proportionnelle à $V_s^{-1/2}$. A l'extérieur de ces bornes, les structures périodiques sont morphologiquement instables, ce qui donne lieu à des phénomènes spatio-temporels complexes. Une des questions ouvertes est celle de la stabilité relative des microstructures en lamelles et en fibres. Au voisinage de l'instabilité, on comprend encore très mal comment la croissance couplée réagit, dans un système donné, aux différents paramètres de contrôle : la concentration moyenne de l'alliage C_0 , la vitesse de solidification V_s , le gradient de température G , et l'espacement interphase λ .

Resultats

Lors de la campagne SEBA1 (2018), on a pu établir l'existence d'un domaine de bistabilité lamelles-fibres^{3,4}. La campagne SEBA3 visait à mettre en évidence la sensibilité de cette bistabilité à la concentration de l'alliage. Pour cela, nous avons imaginé une configuration inédite, inspirée d'une simulation numérique de Parisi et Plapp [EPL **90** (2010) 26010] consistant à utiliser un échantillon présentant un gradient de concentration le long de l'axe long de la cartouche, parallèle à l'axe de solidification. Un échantillon « à gradient » a été fabriqué, puis utilisé dans l'appareil TA. Après des étapes préliminaires, une solidification à faible vitesse ($V_s=7 \text{ nms}^{-1}$) a été effectuée sur une longue durée d'environ 600 heures, pendant laquelle l'évolution d'un motif hybride a été observée (Fig. 1).

Ce résultat est, en soi, une réussite, mais deux points sont à noter :

1-L'analyse de ces images est complexe, tant sur le plan technique que sur le point de savoir quelles caractéristiques morphologiques on doit extraire pour obtenir une caractérisation de la phénoménologie en jeu.

2-Par prudence, nous avons choisi des conditions expérimentales bien calibrées pour garantir le succès de l'expérience, mais manifestement trop « bridées » pour observer une transition franche entre fibres et lamelles.

¹ S. Bottin-Rousseau et al, J. Cryst. Growth **306**, 465-472 (2007).

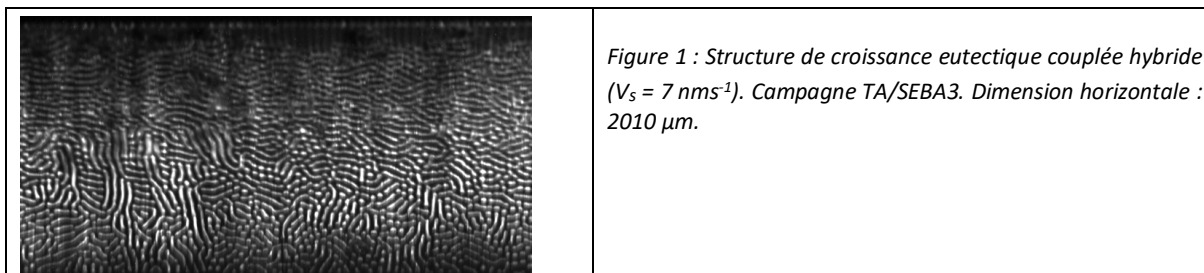
² Succinonitrile-d, camphre

³ S. Bottin-Rousseau et al, Scri. Mater. **207** (2022) 114314.

⁴ S. Akamatsu et al, *Compte Rendus Mécanique* **351** (2023) 1.

Perspectives

Nous avons répondu en 2025 à un appel à opportunité de l'ESA de type « ready to fly » pour des campagnes TA supplémentaires avant le démantèlement de l'ISS. Le projet, en deux volets, repose sur une collaboration avec J. Zollinger (IJL, Nancy), L. Sturz et G. Boussinot (Access e.V., Aix-la Chapelle, Allemagne), et M. Plapp (Ec. Polytechnique, Palaiseau). L'appel est, officiellement, en cours d'évaluation, mais le retour officieux du comité est excellent. Nous utiliserons deux éprouvettes SCN-DC à gradient. La conduite des expériences sera comparable à SEBA3, mais la différence de concentration sera plus importante. La définition des concentrations des deux alliages sources se fera à l'aide de simulations numériques « à gros grains » pour obtenir des champs de diffusion réalistes à grande échelle (M. Plapp).



De cette campagne nous attendons des résultats déterminants, avec des observations nettes de la transition entre fibres et lamelles (probablement en labyrinthe), via des morphologies hybrides dans la zone du gradient de concentration. M. Plapp et moi-même envisageons de proposer un nouveau sujet de thèse en co-direction (pour octobre 2026) sur trois volets complémentaires : 1- Analyse des expériences SEBA3 ; 2-Préparation des expériences en micropesanteur SEBA4 ; 3-Simulations numériques en champ de phase. La partie analyse d'images est d'utilité à la fois pour les observations expérimentales et pour les structures simulées. Nous nous ferons aider par un expert en analyse d'images (A. Leclaire, Télécom ParisTech). La partie expérimentale sera motivante, mais limitée dans le temps, ce qui rend le programme de thèse réaliste.

Le deuxième volet concerne la fusion eutectique. La fusion des alliages (l'opération inverse de la solidification) est largement inexplorée, alors que le processus en lui-même soulève des questions de fond. Un point clé est que la fusion est extrêmement sensible aux microstructures préexistantes et figées dans le solide. Ce sujet a récemment commencé à susciter l'intérêt en raison du développement de procédés de fabrication additive, lors desquels le matériau est soumis à une fusion partielle répétée. Les solides eutectiques sont de ce point de vue particulièrement attractifs. A notre connaissance, seules deux études de fond ont été publiées : un travail expérimental par observation in situ en échantillons minces d'alliages transparents [C.A. Norlund, R. Trivedi, Metal. Mater. Trans. A, 31A (2000) 1261], et un travail numérique [T. Pusztai et al, Acta Mater. 227 (2022) 117678]. Une des questions couramment posée est celle de l'importance, en fusion, de la diffusion dans le solide, beaucoup plus lente que dans le liquide, et d'écarts substantiels par rapport à l'équilibre local à l'interface. Il est possible néanmoins que cette question soit de moindre importance dans les alliages multiphasés, où la fusion se produit d'abord aux jonctions triphasées, le long des joints interphases. Comme en solidification, les phénomènes sont alors régis par la diffusion du soluté dans le liquide, ce qui incite à réaliser des expériences de référence sans convection et à les comparer aux simulations numériques. Seule l'observation en temps réel, en fusion directionnelle, de microstructures régulières soigneusement préparées permet de répondre à des questions centrales telles que la fusion différenciée des cristaux de phases distinctes, la fragmentation du solide et la continuité des microstructures lors de la resolidification. L'appareil TA se positionne comme l'installation la plus adaptée dans ce contexte. Nous proposons d'utiliser une seconde éprouvette à gradient. Cela permettra des observations en temps réel lors de la fusion (à faibles vitesses) de microstructures pré-solidifiées (en bâtonnets, lamellaires et hybrides). Le programme expérimental sera conçu et analysé à l'aide de simulations en champ de phase (G. Boussinot, Access e.V.).

1.4 Théorie et modélisation des fronts de croissance couplée dans les alliages péritectiques
M. Plapp

Théorie et modélisation des fronts de croissance couplée dans les alliages péritectiques

Mathis Plapp

Laboratoire de Physique de la matière condensée, CNRS, Ecole polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau

Depuis de nombreuses années, je travaille ensemble avec l'équipe de l'INSP (Silvère Akamatsu et Sabine Bottin-Rousseau) sur la solidification en croissance couplée des alliages eutectiques. Dans ce mode de croissance, deux phases solides distinctes avec des compositions différentes se forment simultanément à partir du liquide à un front de solidification commun, et l'agencement spatial des phases à l'interface détermine la géométrie des microstructures dans le solide. Depuis quelques temps j'ai fait un travail supplémentaire sur un problème étroitement lié, la croissance couplée dans des alliages péritectiques. Une nouvelle actualité de ce sujet dans le contexte de la microgravité vient des expériences récentes de l'équipe d'Andreas Ludwig conduites à la station spatiale internationale¹. Ces expériences avec un alliage transparent modèle, TRIS-NPG, montrent que la croissance couplée péritectique existe bien dans cet alliage, mais qu'elle émerge seulement sous certaines conditions et après un transitoire complexe. Simulations et théorie pourraient contribuer à une meilleure interprétation de ces résultats. Des simulations par champ de phase du système TRIS-NPG ont été publiées récemment par l'équipe de T. Pusztai², mais une théorie précise de la croissance couplée péritectique fait toujours défaut.

Comme pour un eutectique, dans un diagramme de phase d'un alliage péritectique il existe un point triple où deux phases solides coexistent avec le même liquide. Pour un eutectique, les deux lignes de liquidus au point triple ont des pentes de signe opposé, et la composition du liquide se situe entre celles des deux solides ; pour un péritectique, les pentes ont le même signe, et le liquide a une teneur en soluté plus grande que les deux solides. Pour un eutectique, la croissance couplée peut être bien décrite par la célèbre théorie de Jackson et Hunt (JH)³. Dans cette théorie, une approximation pour le champ de diffusion est calculée sous l'hypothèse que le front de croissance est parfaitement plan ; ensuite, la température de croissance de chaque phase est calculée en prenant en compte l'effet de Gibbs-Thomson et la courbure de l'interface. Finalement, on fait l'hypothèse que les deux phases croissent à la même température pour déterminer la température globale du front. La théorie de JH a été adaptée aux péritectiques par Boettinger⁴; mais plusieurs études utilisant des méthodes d'intégrale de frontière ou de champ de phase ont révélé que ses prédictions ne sont pas satisfaisantes. Le problème se trouve dans le dernier pas : dans un péritectique, les deux phases ne croissent pas strictement à la même température (voir figure 1). Une théorie JH « améliorée » qui prend ce décalage en compte avait été développée par G. Faivre pour les eutectiques, mais a été publiée seulement partiellement⁵. J'ai repris cette théorie et je l'ai adaptée aux péritectiques ensemble avec S. Akamatsu.

Resultats

Le calcul procède d'abord comme pour les eutectiques : une approximation du champ de diffusion est calculée pour une structure lamellaire périodique avec un front plan. Ensuite, la forme de l'interface doit être déterminée pour chaque phase. Pour cela, on fait l'hypothèse que la concentration à l'interface est toujours donnée par la solution pour un front plan, même si en réalité le front est courbe. Jackson et Hunt ont déjà utilisé cette méthode pour calculer la forme de l'interface et ont obtenu un excellent accord avec leurs expériences. On obtient une équation différentielle ordinaire pour la forme de l'interface, qu'il faut résoudre numériquement. La condition que les profils des deux phases doivent se rejoindre à la ligne triple fixe la différence de position (et donc de température) entre les deux phases, qui dépend des paramètres thermodynamiques des deux solides, des deux énergies de surface, et de l'espacement entre les lamelles. Les données ainsi obtenues remplacent la

¹ A. Ludwig, J. Mogeritsch, Scripta Materialia 239, 115802 (2024)

² L. Rátaki, T. Pusztai, Acta Materialia 281, 120438 (2024)

³ K. Jackson, J. Hunt, Trans Metal Soc AIME 236, 1129 (1966).

⁴ W. Boettinger, Metall Mater. Trans. 5, 2023 (1974).

⁵ J. Mergy, G. Faivre, C. Guthmann, R. Mellet, J. Cryst. Growth 134, 353 (1993).

condition de surfusion égale dans le calcul de Jackson-Hunt. La théorie résultante n'est pas complètement analytique, mais le calcul d'une intégrale ordinaire est beaucoup plus simple que des simulations complètes en champ de phase.

Pour tester cette nouvelle théorie, nous avons effectué des simulations par champ de phase et par intégrale de frontière du système Cu-Sn, que j'avais déjà étudié il y a quelques années⁶. La figure 1 montre la comparaison entre les résultats des simulations (température du front en fonction de l'espacement lamellaire), la théorie JH et la théorie améliorée pour le champ de phase. Pour obtenir ce bon accord entre théorie et simulations, nous avons dû prendre en compte la modification des angles de contact induite par une rotation des trijonctions⁷, qu'on peut quantifier mais dont l'origine physique n'est pas encore clarifié.

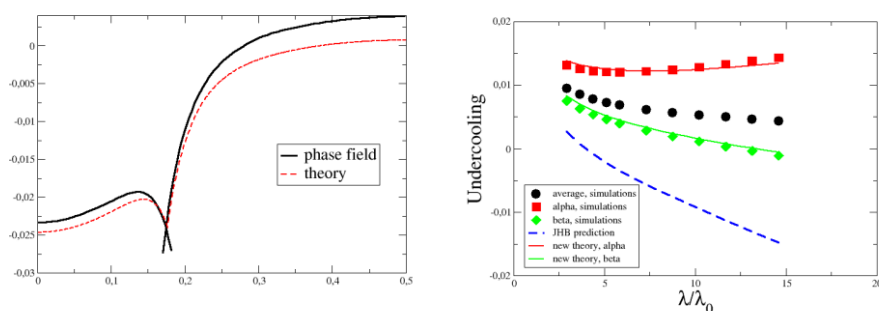


Figure 1 : Simulation par champ de phase de croissance couplée péritectique dans l'alliage Cu-Sn et comparaison à la nouvelle théorie. A gauche : profil d'un front lamellaire (entre le milieu d'une lamelle α et le milieu d'une lamelle β). On voit que la position moyenne des deux interfaces est légèrement différente, et que la théorie reproduit bien cette différence. A droite : surfusion du front en fonction de l'espacement λ . Ici, λ_0 est un espacement de référence.

Perspectives

La nouvelle méthodologie sera appliquée au système TRIS-NPG, en collaboration avec les équipes de T. Pusztai et A. Ludwig. Une étude plus systématique permettra de mieux établir sous quelles conditions la croissance couplée peut être observée. Par ailleurs, il y a actuellement un regain d'intérêt pour la solidification des alliages péritectiques, et nous sommes en contact avec d'autres équipes d'expérimentateurs (M. Şerefoğlu, Istanbul) et théoriciens (D. Tourret, Madrid) sur ce sujet.

Publications

S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau, M. Serefoğlu, V. T. Witusiewicz, U. Hecht, M. Plapp: In situ experiments in microgravity and phase-field simulations of the lamellar-to-rod transition during eutectic growth, *Comptes Rendus Mécanique* 142 (2023).

S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau, V. T. Witusiewicz, U. Hecht, M. Plapp, A. Ludwig, J. Mogeritsch, M. Şerefoğlu, N. Bergeon, F. L. Mota, L. Sturz, G. Zimmermann, S. McFadden, W. Sillekens: Microgravity studies of solidification patterns in model transparent alloys onboard the International Space Station, *npj microgravity* 9, 83 (2023).

ICASP7, Madrid, juin 2025: *Phase-field simulations and theoretical description of peritectic coupled growth*.

⁶ J. Vallotton, J.A. Dantzig, M. Plapp, M. Rappaz, *Acta Materialia* 61, 5549 (2013).

⁷ R. Folch, M. Plapp, *Phys. Rev. E* 72, 011602 (2005).

- 1.5 Caractérisation des pointes de dendrites en solidification directionnelle d'alliage succinonitrile-camphre en condition de microgravité
M. Medjkoune, T. Lyons, F. L. Mota, J. Tian, K. Ji, L. Littles, A. Karma, N. Bergeon

Caractérisation des pointes de dendrites en solidification directionnelle d'alliage succinonitrile-camphre en condition de microgravité

Mehdi Medjkoune¹, Trevor Lyons², Fatima L. Mota¹, Jiefu Tian², Kaihua Ji², Louise Littles³, Alain Karma², Nathalie Bergeon¹

¹ Aix-Marseille Université – IM2NP UMR 7334 – Marseille, France

² Physics Department, Northeastern University, Boston, USA

³ Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL 35812, USA

L'exploration des microstructures de solidification revêt un double intérêt : d'une part, elle contribue à une meilleure compréhension fondamentale des dynamiques non-linéaires d'auto-organisation dans des systèmes hors d'équilibre, et d'autre part, elle présente un intérêt industriel en vue de contrôler et de maîtriser les microstructures de solidification, lesquelles influencent directement les propriétés macroscopiques des matériaux. Le projet scientifique MISOL3D (Microstructures de Solidification en 3D), mené en collaboration entre notre laboratoire IM2NP, le CNES et la NASA, a pour objectif de mener des expériences de solidification directionnelle d'échantillons massifs (cylindres de 1 cm de diamètre) en conditions de microgravité, à bord de la Station spatiale internationale (ISS). L'objectif est de réduire les effets des mouvements convectifs dans le liquide afin d'étudier plus finement les mécanismes de croissance. Ces recherches portent sur des alliages organiques transparents, analogues aux alliages métalliques, permettant ainsi l'observation en temps réel de l'interface solide-liquide. Les résultats présentés ici ont été obtenus grâce à l'analyse des expériences de la campagne spatiale DECLIC DSI-R, sur un alliage de succinonitrile-0,46%pds camphre, dédiée à la croissance dendritique.

Très près de la pointe, la forme d'une dendrite peut être approximée par un paraboloïde de révolution, dont l'axisymétrie est altérée par le développement d'ailettes le long du tronc primaire, du fait de l'anisotropie de tension de surface. Des branchements secondaires se développent ensuite le long de ces ailettes. Un des paramètres fondamentaux caractérisant la croissance dendritique est le rayon de courbure de pointe ρ . La sélection unique de ce rayon est régie par le paramètre de sélection σ^* , qui relie la vitesse de croissance au rayon de courbure. Ce paramètre ne dépend que de l'anisotropie de la tension de surface¹.

Dans nos expériences, la forme des pointes de dendrites se fait par la reconstruction de leur forme 3D par analyse interférométrique². Un exemple est donné en figure 1. L'image interférométrique du réseau dendritique (fig. 1a) révèle des ensembles de franges concentriques pour chaque dendrite. La forme 3D de la pointe de la dendrite encerclée en fig. 1a est reconstruite en fig. 1b ; cette image est utilisée pour mesurer, à chaque hauteur z , la surface de la dendrite $S(z)$. La variation de $S(z) = 2\pi\rho z$ permet d'accéder au rayon de courbure ρ . En définissant (r, θ, z) , coordonnées d'un point du contour dans un repère cylindrique, la forme de la pointe peut être décrite par la relation suivante³ : $\frac{z}{\rho} = -\frac{r^2}{2\rho^2} + A_4 \cos(4\theta) \frac{r^4}{\rho^4}$. Cette expression intègre un terme d'anisotropie d'ordre 4, via le paramètre A_4 . Le tracé des profils $z(r)$ pour différentes valeurs de θ , variant tous les 5°, permet de mesurer expérimentalement la valeur de A_4 .

La figure 2 rassemble les mesures réalisées en fonction de la vitesse de tirage. Comme attendu, le rayon de courbure moyen diminue avec l'augmentation de la vitesse de tirage. Toutefois, pour chaque vitesse, une gamme significative de rayons de pointe est observée. Cette dispersion est en contradiction avec la théorie classique de la microsolubilité, qui prévoit un rayon de pointe unique, déterminé uniquement par les paramètres expérimentaux. Cette dispersion suggère que d'autres

¹ R. Trivedi, W. Kurz, International Materials Reviews 39 (1994) 49

² J. Pereda et al., Phys. Rev. E 95 (2017) 012803 ; N. Bergeon et al., Trans. IIM 62 (2009) 455

³ M. Benamar, E. Brener, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 589

facteurs peuvent contribuer à la sélection morphologique des pointes dendritiques. Les mesures de ρ précédentes ont permis d'évaluer σ^* , entre 0,025 et 0,065, avec une moyenne globale de 0,055.

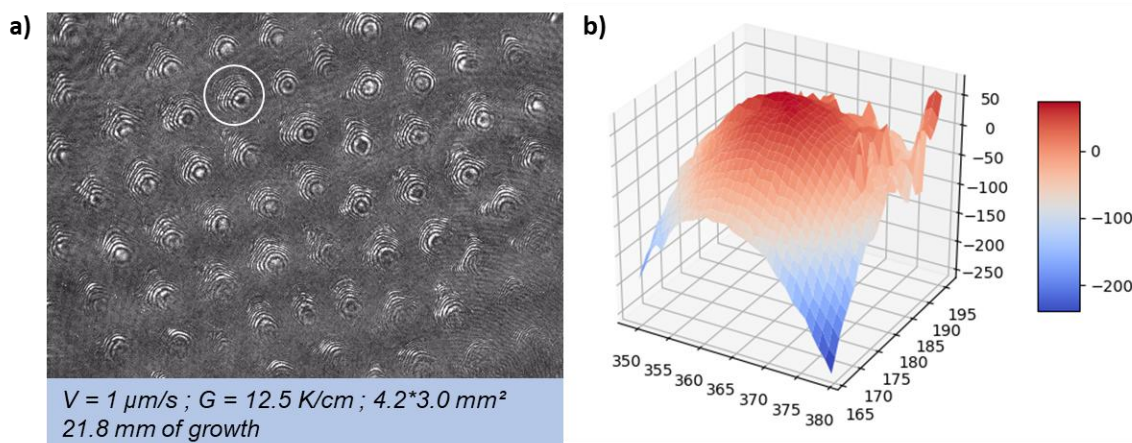


Figure 1. Exemple d'analyse interférométrique d'une pointe de dendrite. Sur l'image interférométrique donnée en a), la dendrite encadrée est analysée pour reconstruire sa forme 3D (en b). On trouve $\rho = 44,2 \mu\text{m}$ (SCN - 0,46% pds camphre, campagne DSI-R, $V = 1 \mu\text{m/s}$, $G = 12 \text{ K/cm}$)

Le coefficient d'anisotropie A_4 a été déterminé pour une dizaine de dendrites. Les valeurs varient entre 0,004 et 0,007. Cette gamme est nettement inférieure à la prédiction de la théorie de la solvabilité microscopique, qui estime A_4 à 0,0104, mais un tel écart est régulièrement signalé dans la littérature. Les expériences donnent systématiquement des valeurs plus basses, typiquement entre 0,004 et 0,005⁴. Ces résultats sont en bon accord avec les simulations de champ de phase réalisées par Karma et al.⁵ qui ont prédit un $A_4 \approx 0.004\text{-}0.005$.

Une publication est actuellement en cours de finalisation sur ces résultats. Les résultats expérimentaux issus de la campagne spatiale seront présentés, et comparés à des expériences réalisées en lames minces, ainsi qu'à des simulations numériques 3D en champ de phase.

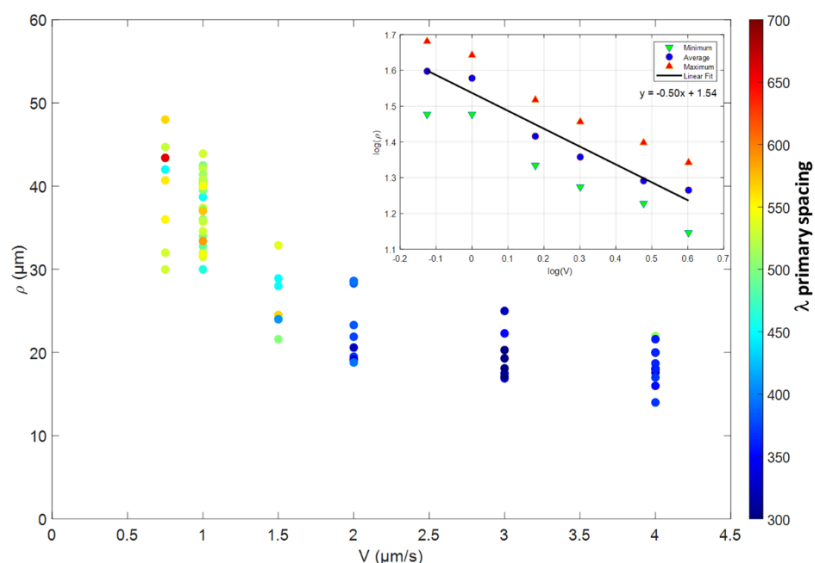


Figure 2. Synthèse de l'ensemble des mesures de rayon de courbure de pointe en fonction de la vitesse de tirage (1 point = 1 dendrite). (SCN-0.46 %pds camphre; $G=12 \text{ K/cm}$)

Remerciements : Les auteurs expriment leur gratitude au CNES et à l'équipe du CADMOS-Toulouse, pour sa disponibilité, son efficacité et sa réactivité dans la préparation, la réalisation et le suivi des expériences en μg .

⁴ J. C. Lacombe et al. Physical Review E 52 (1995) 2778 ; A. Dougherty and M. Lahiri, Journal of Crystal Growth 274 (2005) 233 ; H. Neumann-Heyme et al., Physical Review Materials 63 (2022) 063401

⁵ A. Karma et al, Phys. Rev. E 61 (2000) 3996

- 1.6 Préparation de l'expérience en fusée sonde XRMON-CETSOL
G. Reinhart, H. Nguyen-Thi, D. Olmos-Vicente, N. Bergeon

Préparation de l'expérience en fusée sonde XRMON-CETSOL

G. Reinhart¹, H. Nguyen-Thi¹, D. Olmos-Vicente¹, N. Bergeon¹

¹ Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, Marseille, France

Durant la solidification dirigée d'alliages avec un coefficient de partage inférieur à l'unité, la différence de solubilité du soluté entre la phase liquide et la phase solide induit un rejet de soluté dans le bain fondu devant l'interface solide-liquide. La couche de soluté ainsi créée dans le liquide est à l'origine d'une zone de liquide surfondu. A basse vitesse de solidification, l'intensité de cette surfusion dite de constitution est faible, et une structure colonnaire composée de grains très allongés se développe. Une augmentation de la vitesse de solidification entraîne une augmentation de l'intensité de la surfusion de constitution qui peut être suffisante pour activer la germination de grains devant le front colonnaire. La germination hétérogène de ces grains peut se faire sur des impuretés ou des particules affinantes ajoutées volontairement dans l'alliage initial. Une transition colonnaire-équiaxe (CET : Columnar to Equiaxed Transition) se produira alors si le nombre de nouveaux grains équiaxes est suffisant pour bloquer la croissance des grains colonnaires.

Sur Terre, la structure de grain finale est fortement impactée par l'effet de la gravité sur le mouvement des grains équiaxes (sédimentation, flottaison) ou le transport de fragments de dendrites. Grâce aux expériences spatiales, il est possible d'aboutir à une amélioration significative de la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors de transition colonnaire-équiaxe. Le transport de chaleur et de soluté dans le bain fondu devient essentiellement diffusif et les effets de sédimentation ou flottaison négligeables, ce qui permet de s'affranchir d'une partie des mécanismes complexes et donc une comparaison expérience - théorie plus directe.

Au cours du projet ESA intitulé XRMON, l'équipe a développé un dispositif de solidification avec une observation *in situ* par radiographie X utilisable à bord de fusée-sonde et lors de vols paraboliques. En juin 2019, l'équipe a réalisé une expérience en fusée-sonde (MASER-14) dédiée à la transition colonnaire-équiaxe lors de la solidification d'un alliage Al-20%pdsCu affiné en absence de gravité et avec une caractérisation *in situ* et en temps réel¹. Dans la continuité de ce travail, une nouvelle expérience en fusée sonde intitulée XRMON-CETSOL a été validée par l'ESA, avec un lancement prévu en 2027. L'objectif de cette expérience est l'observation *in situ* de la CET dans un alliage de composition plus faible que précédemment, Al-10%pdsCu affiné, pour lequel les effets de la gravité attendus seront différents, en particulier en ce qui concerne la poussée d'Archimède. Pour cette expérience en fusée-sonde, le four de solidification de MASER-14 sera réutilisé avec un nouveau modèle de détecteur de rayons X. La validation du système de détection X a été réalisée en juillet 2025 dans les locaux de la SSC (Swedish Space Corporation).

Résultats

Des expériences de solidification ont été effectuées avec le dispositif XRMON-GF (Gradient Furnace) qui se compose d'un four de type Bridgman et d'un système de radiographie X (Figure 1). Le four est constitué de deux éléments chauffants imposant un gradient de température G . La fusion/solidification de l'échantillon en forme de lamelle d'épaisseur $\approx 230 \mu\text{m}$ est provoquée par l'application de profils de température sur les deux éléments chauffants.

Le système de radiographie X utilise une source de rayons X divergente avec une cible en molybdène et une nouvelle caméra CMOS fabriquée par PHOTONIC SCIENCE². La taille des pixels de la caméra est de $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ et le grandissement dû à la divergence de la source et la distance entre les différents éléments du dispositif donne une taille effective des pixels dans les images enregistrées de $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$. La fréquence d'acquisition est de 2 images par secondes ce qui est suffisant pour suivre le développement des microstructures de solidification.

¹ F. Ngomesso et al., Acta Materialia 221 (2021) 117401

² <https://photonicscience.com/products/x-ray-cameras/x-ray-scmos-16mp-detector/>

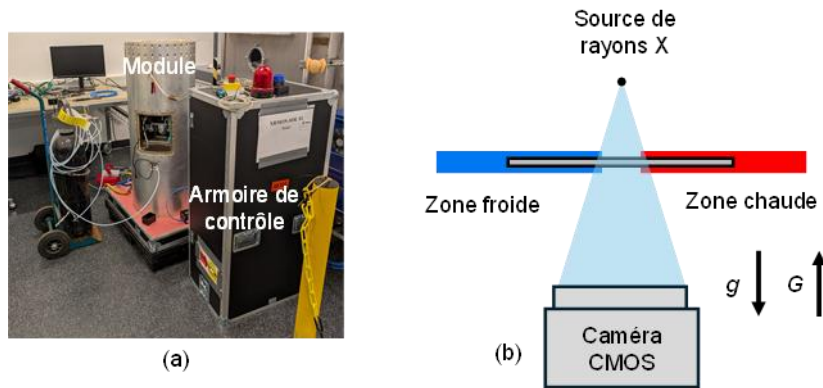


Figure 1 : (a) Photographie du module XRMON-GF et (b) schéma du dispositif expérimental.

Plusieurs séries de fusions/solidifications ont été effectuée sur deux échantillons d'alliages Al-10%pdsCu affinés et pour un gradient de température $G = 3 \text{ °C/mm}$. La qualité des images est excellente et la transition colonnaire-équiaxe a été clairement observée comme illustré sur la figure 2. A basse vitesse de refroidissement (Figure 2a) des grains colonnaires se développent dans la zone froide de l'échantillon, formant une zone mi-solide/mi-liquide. On peut voir la germination de deux grains équiaxes devant le front de solidification (indiqués par des cercles jaunes) malgré la basse vitesse de refroidissement. L'augmentation brusque de la vitesse de refroidissement induit la germination d'un grand nombre de grains équiaxes qui bloque le développement des grains colonnaires (Figure 2b). La propagation du front de solidification continue ensuite par une succession de germinations de nouveaux grains jusqu'à atteindre le haut du champ de vue de la caméra (Figure 2c).

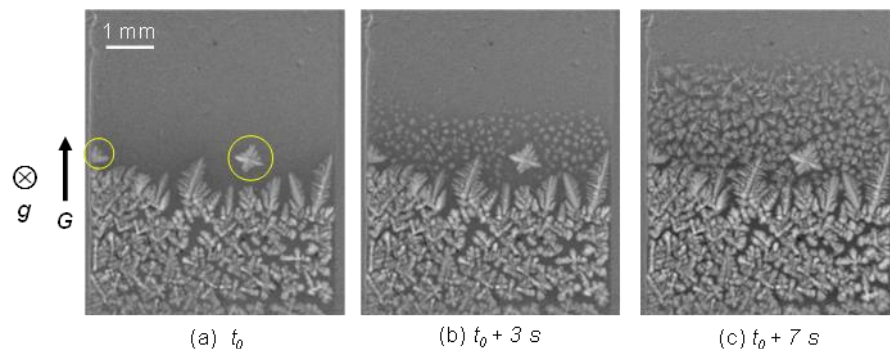


Figure 2 : Séquence de radiographies montrant la transition colonnaire équiaxe induite par un changement de la vitesse de refroidissement de $R_1 = -0.032 \text{ °C/s}$ à $R_2 = -2 \text{ °C/s}$ dans un alliage Al-10%pdsCu affiné et pour un gradient de température $G = 3 \text{ °C/mm}$.

Perspectives

La prochaine étape de préparation de l'expérience XRMON-CETSOL consistera à définir précisément un profil de température incluant à la fois les étapes de fusion et de solidification et approprié aux 6 minutes de microgravité accessibles avec une fusée-sonde de type MASER. Les résultats serviront de référence pour des comparaisons avec des modèles et pourront être confrontés aux études menées dans le cadre du projet ESA intitulé CETSOL. Ces travaux se feront dans le cadre de la thèse de D. Olmos Vicente qui a débuté en octobre 2025 avec un financement du Ministère.

Publications

Le dispositif étant en phase de développement, aucun article n'a encore été publié.

Session 2

Instabilité, Turbulence, convection Bénard - Marangoni

- 2.1 Thermomagnetic convection in ferrofluids zero-gravity environment
A. Meyer, A. Hiremath, C. Kang, **I. Mutabazi**

Thermomagnetic convection in ferrofluids zero-gravity environment

Antoine Meyer, Anupam Hiremath, Changwoo Kang & Innocent Mutabazi¹

¹Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC), UMR 6294, CNRS-Université du Havre, Normandie Université, 53, rue de Prony, 76058 Le Havre Cedex, France

Ferrofluids are colloidal suspension of ferric or ferro-magnetic particles which tend to orient themselves in the direction of applied magnetic field $\vec{B}$. The carrier liquid can be either water or oil. Their viscosity depends on the volume fraction and on the magnetic field¹. Besides their different technical and medical applications, they are good candidates for investigation of heat transfer under microgravity². The interaction between the magnetization $\vec{M}$ of a ferrofluid and an external magnetic field $\vec{B}$ yields the Kelvin force $\vec{F}_K = (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{B}$, which can be split into two terms: $\vec{F}_K = \vec{\nabla} P_m - \rho \alpha \theta \vec{g}_m$ where P_m is the magnetic pressure and $\vec{g}_m = -g_m \vec{e}_r$ is a centripetal acceleration that can be considered as magnetic gravity. The term $\vec{F}_{mb} = -\rho \alpha \theta \vec{g}_m$ represents the magnetic buoyancy force susceptible for inducing thermal convection called *thermomagnetic convection*³. The magnetic gravity depends on the ferrofluid properties and on the magnitude of the applied magnetic field through the relation $g_m = \frac{KB}{\alpha \rho} k K_1(kr)$ where $K = \alpha_m M$ is the pyromagnetic coefficient of the ferrofluid and $K_1(x)$ is the modified Bessel function of the second kind of order 1.

The present work focuses on thermal convection in ferrofluid contained inside a cylindrical annulus in microgravity. The inner cylinder of radius R_1 is maintained at temperature T_1 and can rotate with angular frequency Ω_1 . The outer cylinder of radius $R_2 = R_1 + d$ at temperature T_2 can rotate with angular frequency Ω_2 . Inside the inner cylinder, a stack of magnets with axial spacing $\lambda_b \approx 3.54 d$ produces the magnetic field $\vec{B}$ [3].

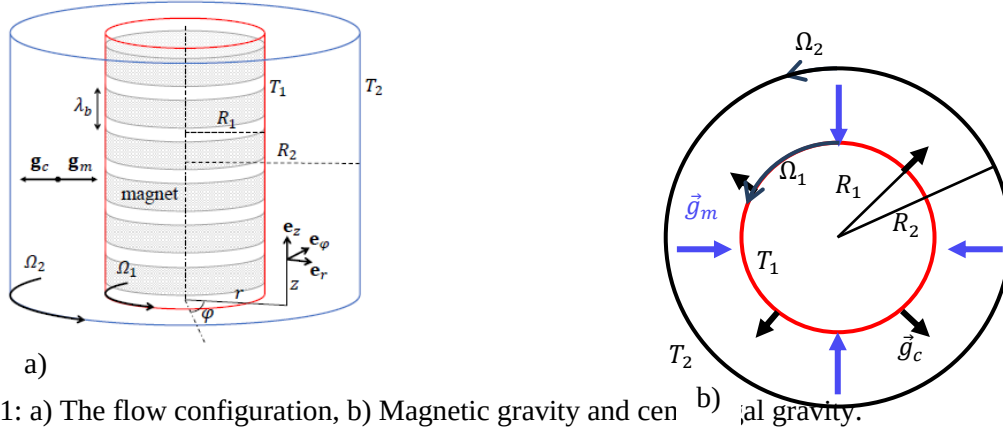


Figure 1: a) The flow configuration, b) Magnetic gravity and centripetal gravity.

The ferrofluid in a rotating cylindrical annulus is subject to three accelerations: the gravitational acceleration $\vec{g}$, the centrifugal acceleration $\vec{g}_c = v^2/r \vec{e}_r$ and the centripetal magnetic gravity $\vec{g}_m = -g_m \vec{e}_r$. The control parameters are the radius ratio $\eta = R_1/R_2$, the Prandtl number $Pr = \nu/\kappa$, the Taylor number $Ta = \frac{\bar{R} \Omega d}{\nu} \sqrt{\frac{d}{\bar{R}}}$ which is the measure of the rotation rate and the magnetic Rayleigh number $Ra_m = \alpha \Delta T g_m d^3 / \nu^2 \kappa$ with $\bar{R} = (R_1 + R_2)/2$, $\Delta T = T_1 - T_2$ and where α , ν and κ represent the thermal expansion coefficient, the kinematic viscosity and thermal diffusivity of the ferrofluid respectively. We consider two types of ferrofluids: water-based ferrofluid with $Pr = 15$ and oil-based ferrofluid with $Pr = 350$.

The governing equations are linearized around the conduction state. Both the cylinders are assumed of infinite length, this allows to expand the perturbations in normal modes of the form $\exp[st + i(kz + n\phi)]$, where $s = \sigma + i\omega$ is the complex growth rate, k is the axial wavenumber and n is the

¹ R.E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press (1985).

² S. Odenbach, *Microgravity Sci. Technol.* **4**, 161 (1993).

³ R. Tagg and P.D. Weidman, *Z. Angew. Math. Phys.*, **58**, 431-456 (2007)

azimuthal wavenumber of the perturbations. We determine the threshold of the thermal convection from the minimum of the marginal hypersurface $\sigma(Ta, Ra, Pr; k, n) = 0$.

Results

We present linear stability results of the thermal convection in a ferrofluid under microgravity with solid body-rotation i.e. when $\Omega_1 = \Omega_2 \equiv \Omega$. The solid body rotation is described by the centrifugal Rayleigh number⁴ $Ra = \alpha \Delta T Pr Ta^2$. The critical modes are due to magnetic buoyancy, hence they are called *thermal magnetic modes*; they are stationary helical modes when the cylinders do not rotate ($Ra=0$). At low rotation ($Ra > 0$), the critical modes are oscillatory non axisymmetric (ONA) and for large rotation rate ($Ra \geq Ra^*$), the modes become oscillatory columnar vortices (OC).

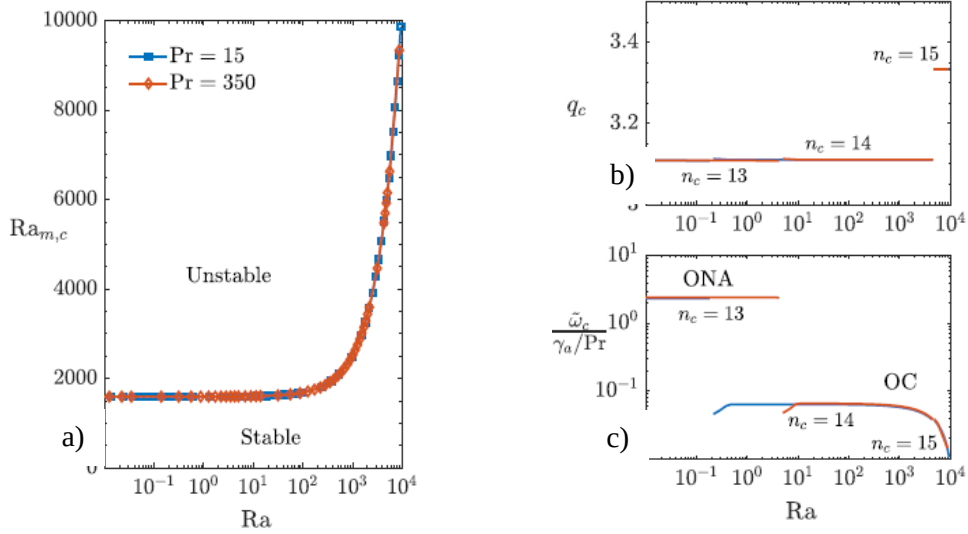


Figure 2: Variation of the critical parameters of thermomagnetic convection with the rotation ratio in a cylindrical annulus with radius = 0.9 : a) threshold, b) critical wavenumber, c) critical frequency ($\tilde{\omega} = \frac{\omega}{\tau} + n$; $\tau = \frac{\Omega d^2}{\nu}$; $\gamma_a = \alpha \Delta T$).

In terrestrial conditions for low applied magnetic field and stationary cylinders the critical modes are thermal and oscillatory⁵. The solid body rotation delays the threshold of convection. As the magnetic field is increased, the critical modes are magnetic modes in form of stationary columns for zero rotation and oscillatory columns for solid body rotation.

Perspectives

Besides the exploration of different rotation regimes, the next step is the development of a DNS code compute the kinetic energy of perturbation and the Nusselt number which yields the heat exchange coefficient.

Publications

1. A. Meyer, A. M. Hiremath, C. Kang & I. Mutabazi, Thermomagnetic convection in a stable circular Couette ferrofluid flow with a radial temperature gradient, *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-025-01908-1>.
2. A. Meyer, A. M. Hiremath & I. Mutabazi, Thermomagnetic instability of a ferrofluid in a differentially heated Taylor-Couette system, *Phy. Rev. Fluids*, **7**, 023901 (2022).

Acknowledgement

The present project has benefited from ANR/LABEX EMC³ (project INFEMA) and a support from CNES through the GdR MFA2799. A.M.H. was supported by the LABEX EMC³ and Region Normandie.

⁴ C. Kang, A. Meyer, H.N. Yoshikawa & I. Mutabazi, *Phys. Rev. Fluids* **4**, 093502 (2019).

⁵ A. Bahloul, A. Ambari & I. Mutabazi, *Eur. Phys. J. AP* **9**, 253-264(2000).

- 2.2 Thermo-electric convective flow with oval geometry in microgravity, simulations vs. experiments
Y. Sliavin, O. Crumeyrolle, V. Motuz, M. H. Hamede, M. Strangfeld, A. Meyer, C. Egbers, I. Mutabazi

DEPIK,

Thermo-electric convective flow with oval geometry in microgravity, simulations vs. experiments

Yaraslaw Sliavin¹, Olivier Crumeyrolle², Vasyl Motuz¹, Mohammed Hussein Hamede¹, Mathias Strangfeld¹, Antoine Meyer², Christoph Egbers¹, Innocent Mutabazi²

¹ LAS, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Cottbus, Germany

² Normandie Université, UNIHAVRE, CNRS, LOMC, Le Havre, France

Heat exchangers are common devices in industrial processes, building equipment, aircraft, cars, etc. Forced convection is often chosen as a solution to control and/or provide guarantees on the achieved performances. However, the use of pumps, fans or other moving parts simultaneously causes failure points and maintenance requirements. These aspects can be prohibitive in space applications. As natural convection is suppressed in microgravity, alternative volume forces are considered. Indeed, when a high voltage is applied to a dielectric liquid, an inhomogeneous polarization appears and gives rise to such a volume force, the dielectrophoretic force (DEP). The resulting convective flows lead to controllable heat transfer without moving parts [1]. We study devices featuring gaps filled of dielectric liquids, such as silicon oils, in parabolic flight conditions (PFC), with enhanced heat transfer, but complex behaviour due either to the PFC and/or the requirements imposed by visualisation, on the experiment design. During VP183 (CNES campaign), new designs with modulated shapes were investigated in planar and cylindrical geometries.

Results

The cylindrical cell with inner oval shape is of particular interest for comparisons between experimental results and numerical simulations (fig 1). Simulations are conducted with COMSOL 5.6.

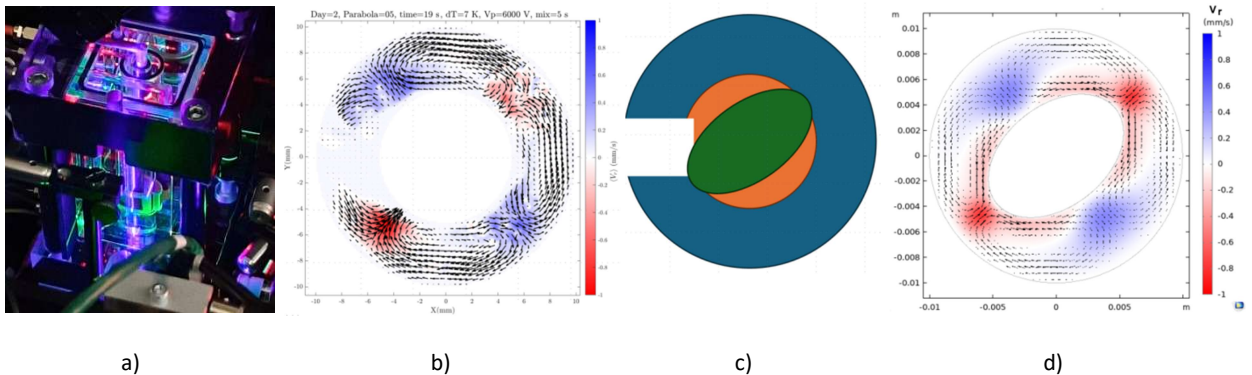


Figure 1: a) photo of experimental cell with coloured laser sheets for PIV; b) experimental PIV flow pattern; c) planform depicting orientation in all 2d figures, oval (green) includes the heating device, orange is invisible part of liquid domain (hidden by top and bottom caps), white notch is connector shadow, blue is the experimentally visible part of the liquid domain; d) four rolls flow pattern predicted in 2d simulations with plain boundary conditions: oval at T_{hot} , circle at T_{cold} . Color scale for b) and d): radial velocity component (red: inward, blue: outward). High voltage V_p is applied across the liquid domain.

The inner oval shape is made of aluminium and hot temperature T_{hot} is maintained therein. The outer cylinder that surrounds the liquid domain however, is made of glass (not displayed on fig. 1c), and maintained, at its outermost surface ($r=r_{ext}$), at temperature T_{cold} . A heat flux sensor, visible on fig. 1a as the green circular collar, not far from the bottom of the cell, covers the surface at $r=r_{ext}$ across part of the vertical axis of fig 1a (z axis). The convective structures observed experimentally (fig. 1b) resemble to four rolls ("4-rolls"), oriented along the z axis, and are sufficiently homogenous in this direction so that the heat flux sensor results can be extrapolated on the complete system height. However a delay is observed (fig. 2) between heat flux sensor response and microgravity phase: the dielectrophoretic force is applied only during 0g, hence increase of heat transfer by DEP force through the created rolls occurs during 0g, but is not sensed immediately.

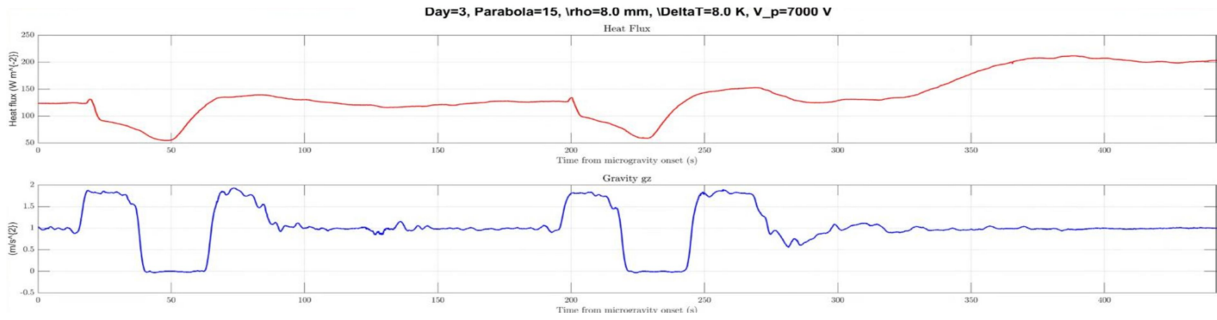


Figure 2: Heat flux (top) vs. gravity (bottom). Heat flux measured at $r=r_{ext}$: heat shall pass through the liquid domain and 2 mm glass. Heat flux decreases then increases during 0g phase, and stabilises after 0g.

Simulations must therefore include the glass cylinder, that extends up to r_{ext} , and the results (fig. 3) show that the number of rolls depends on the initial temperature of the liquid in the gap: non axisymmetric temperature variations in the glass cylinder favours 8-rolls pattern when the liquid is initially cold or even at mean temperature $T_{mean} = 0.5 \times (T_{hot} + T_{cold})$, while 4-rolls pattern is favoured by an initially hot liquid. As the initial experimental condition before parabola manoeuvre now includes liquid mixing, as devised for a previous sounding rocket experiment [2], the deviations of the experimentally observed pattern from simulated 4-rolls could be explained by a modulation of 4-rolls by 8-rolls in an initially warmer liquid (efficient T_{hot} control). Indeed we verified that both 4-rolls and 8-rolls flow patterns are, in such 2d simulations, steady state solutions of the problem (fig. 3 c', e').

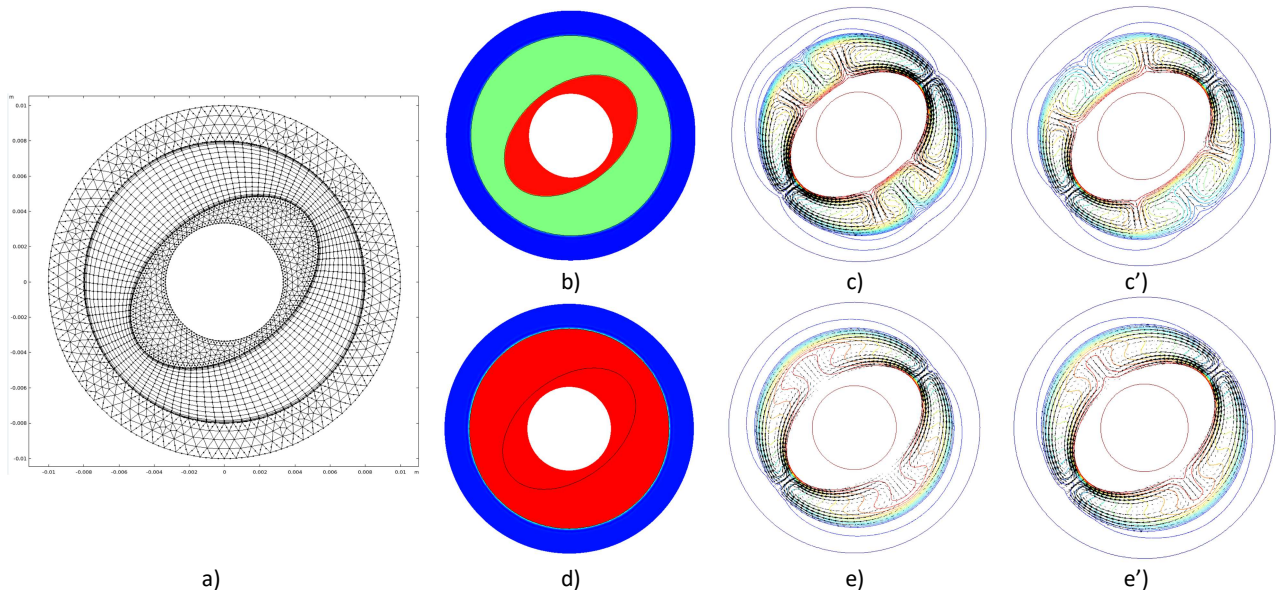


Figure 3: a) Mesh for simulations; Innermost radius at T_{hot} , outermost radius (r_{ext}) at T_{cold} ; $T_{hot} - T_{cold} = 7K$; $V_p = 7kV$. Temperature or isotherms and velocity field for: b) initial condition with liquid at T_{mean} , c) resulting 8-rolls after 19s, d) initial condition with liquid at T_{hot} , e) resulting 4-rolls after 19s. c') and e') steady state solution computed from c) and e'), respectively. Isotherms are spaced apart by 0.5 K.

Forthcomings

Simulated heat flux still increases earlier than experimentally observed. Assessment of the performance of the cooling loop (see ref. [3]) shall result in more accurate modelling of the boundary condition at r_{ext} . Independently, replacing the oval shape, which features two edges, by a triangular-like modulated shape, with three edges, may help to elicit a more robust flow pattern. Finally, inclusion of the initial mixing phase is the next challenge for such simulations.

References

- [1] A Meyer, O Crumeyrolle, I Mutabazi, M Meier, et al., *Microgravity Sci. Technol.* **30**, 653–662 (2018)
- [2] A Meyer, M Meier, V Motuz and C Egbers, *J. Fluid Mech.* **972**, A26, 1-23 (2023)
- [3] M H Hamede, J Roller, A Meyer, V Heuveline, *Physics of Fluids* **36**, 124106 (2024)

- 2.3 Effets dynamiques de champ électriques AC sur des bulles en croissance : Préparation de l'expérience AEBIO
S. Siedel, T. Gu

Effets dynamiques de champ électriques AC sur des bulles en croissance : Préparation de l'expérience AEBIO

Samuel Siedel¹, Tianle Gu¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, SIMaP, F-38000 Grenoble, France

Les écoulements diphasiques, et en particulier ceux avec changement de phase (ébullition) sont présents dans de nombreuses applications terrestres et spatiales. L'application de champs électriques imposés par des électrodes externes (électrohydrodynamique ou EHD) a été identifiée depuis plusieurs décennies comme un candidat potentiel afin d'agir activement sur des écoulements diphasiques par l'introduction de nouvelles forces volumiques et aux interfaces d'origine électrique. Ces modifications de l'écoulement peuvent alors avoir pour objet d'intensifier des transferts thermiques diphasiques, d'apporter un moyen de contrôle sur les écoulements ou encore de palier à l'absence de forces de flottabilité pour les applications microgravitaires.

Plusieurs études ont eu pour objet lors des 20 dernières années d'évaluer la possibilité pour des champs électriques continus d'impacter la croissance et surtout le détachement de bulles en apesanteur. Parmi les études récentes d'envergure, on peut notamment citer l'expérience RUBI (Reference mUltiscale Boiling Investigation) qui a été lancée sur l'ISS en juillet 2019 et opérée jusqu'à début 2021. Un des objectifs de cette expérience concernait précisément de caractériser l'impact de tels champs sur des bulles croissant par ébullition dans un fluide diélectrique (FC 72) sur une paroi normale au champ électrique, avec ou sans écoulement cisailé. Dans la continuité des études précitées, le projet présenté vise à tirer parti de champs électriques non pas continu mais présentant différentes fréquences et formes d'ondes. Les objectifs visés par cette évolution sont d'une part de favoriser des réponses dynamiques de l'écoulement diphasique à ces sollicitations et d'autre part de bénéficier d'effets liés aux transitoires électriques. Le premier axe permettra par exemple de rechercher à solliciter les interfaces à des fréquences mécaniques particulières pouvant amplifier des oscillations par résonance, à l'échelle d'une bulle entière ou par exemple à l'échelle d'une ligne de contact. Le second axe mettra en valeur les effets transitoires liés aux charges électriques libres lors des transitoires de champ qui s'ajouteront aux effets plus classiques liés à la polarisation du fluide diélectrique.

Ce projet s'articule en plusieurs étapes. Une expérience développée depuis 2023 en conditions terrestres en laboratoire a déjà apporté de nombreux résultats originaux encourageant quant aux objectifs visés. Une nouvelle expérience appelée AEBIO (AC Electrohydrodynamic Bubble Interface Oscillation) destinée à l'expérimentation en vols paraboliques a été développée en 2024-25. Une première campagne de vol en avril 2025 a eu pour but l'expérimentation sur des bulles d'azote injectées, et le dispositif AEBIO v2 est en cours de développement afin d'expérimenter la production de bulles par ébullition en site unique au cours de la campagne VP190 en mars 2026.

Résultats

De nombreux résultats ont pu être obtenus grâce au nouveau dispositif AEBIO, aussi bien lors de la campagne de vols paraboliques VP183 que pendant la campagne au sol subséquente. En effet, par rapport au dispositif précédent dont les résultats ont été présentés en 2024 (voir publications référencées ci-dessous), deux modifications majeures ont été apportées : un meilleur contrôle de l'injection des bulles d'azote et une mesure synchronisée à la caméra de la tension et du courant imposés aux électrodes. Un exemple de résultat est présenté en Figure 1 où l'évolution du rapport d'aspect pendant la croissance de 9 bulles successives est tracé, en microgravité et en étant soumis à un champ électrique périodique. La tension entre les électrodes varie de manière sinusoïdale entre 0 et 12 kV et la fréquence est de 75 Hz. De nombreuses observations encourageantes quant à l'utilisation de champs électriques pour le contrôle de telles bulles en microgravité, et celle-ci sont cohérentes avec les observations en conditions de laboratoire. L'aspect le plus marquant est la synchronisation du cycle de croissance de la bulle avec une période électrique, la naissance et le détachement ayant tous deux lieu exactement à la même phase du signal électrique. De la même manière, les oscillations

verticales sont intimement liées à l'amplitude du signal, les 9 bulles présentant des évolutions remarquablement comparables.

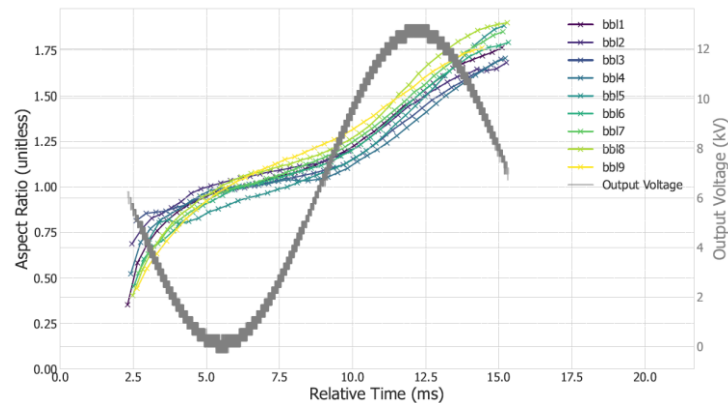


Figure 1: The aspect ratio of 9 successive bubbles with synchronized voltage output data, in microgravity, sine wave 75 Hz, U varies from 0 to 12 kV

Des observations similaires peuvent être faites avec une polarité négative sur l'électrode, mais celle-ci provoque un détachement précoce des bulles à un volume moindre. Ainsi, une alternance de 2 motifs de croissance de bulle peut être observé sur chaque période électrique, comme illustré en Figure 2.

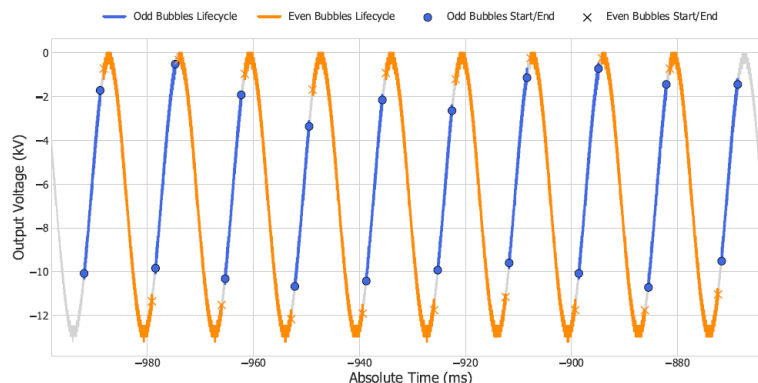


Figure 2: The bubble lifecycles on voltage waveform, in microgravity, sine wave 75 Hz, with U varying from -12 to 0 kV

Perspectives

L'expérience AEBIO est en cours de modification afin de remplacer le dispositif d'injection d'azote par une génération thermique d'ébullition en site unique. La métrologie associée, le contrôle de la température de saturation du bain ainsi que les dispositifs de sécurité associés au chauffage sont en développement. La seconde campagne d'essai en vol parabolique de l'expérience est prévue en mars 2026.

Publications

- T. Gu and S. Siedel, Combined polarization and electrophoretic influence on bubble dynamics in leaky dielectric fluids, *Experimental Thermal and Fluid Science* 170, 111601, 2026.
- T. Gu and S. Siedel, Adiabatic bubble growth and detachment under AC/periodic electric fields, International Symposium on ElectroHydroDynamics, Seville, Spain, 2025.
- S. Siedel and T. Gu, Toward a complete understanding of quasi-static bubble growth and departure, *Proceedings of the National Academy of Science* 121 (16), e2317202121, 2024.
- T. Gu and S. Siedel, DC electric field impact on bubble dynamics, European Two-Phase Flow Group Meeting, Dublin, Ireland, 2024.
- T. Gu and S. Siedel, AC electric field impact on bubble dynamics, European Two-Phase Flow Group Meeting, Dublin, Ireland, 2024.

2.4 Compressible phase-field model for the bubble rise near the liquid-vapor critical point
D. Sharma, **S. Amiroudine**

Compressible phase-field model for the bubble rise near the liquid-vapor critical pointDeewakar Sharma, Sakir Amiroudine*Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, Arts et Métiers Paris Tech, I2M UMR 5295, Talence F-33400, France.*

In recent years, there has been a surge in the utility of high pressure and/or temperature fluid systems primarily driven by their ability to address diverse global challenges currently in hand such as, efficient energy processes for climate change, search for alternate fuels etc. The operating conditions in these technologies is closer to the liquid-vapor critical point of the fluid under consideration and in some cases the fluid transitions from sub-critical to supercritical conditions and vice-versa. The peculiarity of the critical point lies in the behavior of various thermophysical properties showing singularity at the critical point [1] such as high isothermal compressibility, χ_T , even in the liquid phase. This renders the simulation of these processes challenging especially when one needs to capture the appearance/disappearance of the interface in a single model. As a first step towards this direction, we address this gap in the literature by proposing a two-phase model based on the phase-field modeling approach. The literature is abundant with studies using phase-field method for incompressible fluids while for compressible fluids, several studies have used diffuse interface method using density as a parameter to distinguish between the two phases. The compressible model [2] proposed in this work is based on using a scalar phase field parameter ϕ denoting mass fraction of phase 2 to distinguish between the two phases, the advantage here is to define the interface thickness which is computationally realistic.

Some previous works [3] have demonstrated these models, primarily from mathematical aspects, and no attempt has been proposed to make practical demonstration of the physical test cases. In addition to the proposed model, we derive the appropriate mobility for a compressible phase-field model using asymptotic expansions. The model is first validated with stratified density profile in compressible fluid and then using various canonical cases –rise of lighter fluid bubble in a heavier fluid for density ratio of 10 and present a comparison with the experimental studies for the rise of oxygen bubbles in the liquid oxygen at the thermodynamic conditions where the compressibility of both the phases cannot be neglected.

Results

A single phase for a stratified density profile in a 1D case is shown in fig. 1(a) and we compare the results with the analytical expression given by $\rho = \frac{1}{gY\chi_T + C_0}$, where $C_0 = \frac{gY\chi_T}{e^{\rho_0 g L \chi_T} - 1}$, all variables have their usual meaning. The oscillations observed at the initial time in figure 1(b) are due to pressure waves propagation due to non-equilibrium condition. The small numerical inaccuracies may lead to non-equilibrium and hence the propagation of pressure waves. Thus, the simulation was run for some time with only the liquid phase and once the pressure was stabilized, a vapor bubble was introduced in the domain.

Further, we make a comparison for the rise of an oxygen bubble in the liquid oxygen at a temperature of 90.1 K and a pressure of 1 bar with gravity being $0.4g$ as described in the experiment [4] corresponding to a proximity to the critical point $\varepsilon = (T - T_c)/T_c = 0.04$. A good agreement is observed in figure 2(a). We also compare the results obtained with the current model with those obtained from fully incompressible model [5], see figure 2(b). To account for incompressibility of both the phases, their compressibility was set to be very small ($\chi_T = 10^{-14} \text{ Pa}^{-1}$) rendering their behavior to be incompressible to the numerical precision.

Lastly, a comparison between the bubble rise velocity for two different proximities to the critical point ($\varepsilon = 10^{-4}$, $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-2}$) and the incompressible case is also shown in figure 2(c). We notice a lower velocity of the bubble on approaching the critical point and this is attributed to a smaller difference in densities of both the phases and thus a lower buoyancy force.

Conclusions and perspectives

The present work highlights a new model which permits to account for fluid compressibility of each

phase separately. This permits to analyse the bubble rise dynamics near the liquid-vapor critical point and is currently being investigated for various parameters – proximity to the critical point, bubble radius, and varying gravity conditions. The model thus serves as a stepping stone for a more intricate analysis of fundamental problems, for instance hydrodynamic instabilities in real physical systems such as two-phase dynamics in cryogenic refuelling in space. Furthermore, the model needs to be extended to include more pragmatic problems encountered in physical systems such as to include the effects of phase change and/or thermo-capillary phenomena in the presence as well as the absence of gravity.

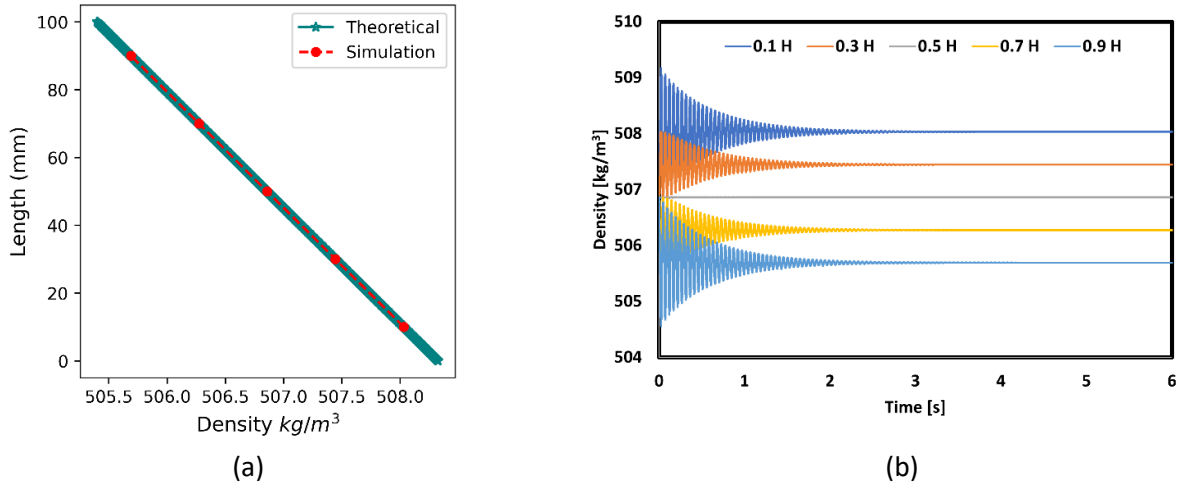


Figure 1: a) Stratified density profile in 1D case and b) Time evolution of stratified density

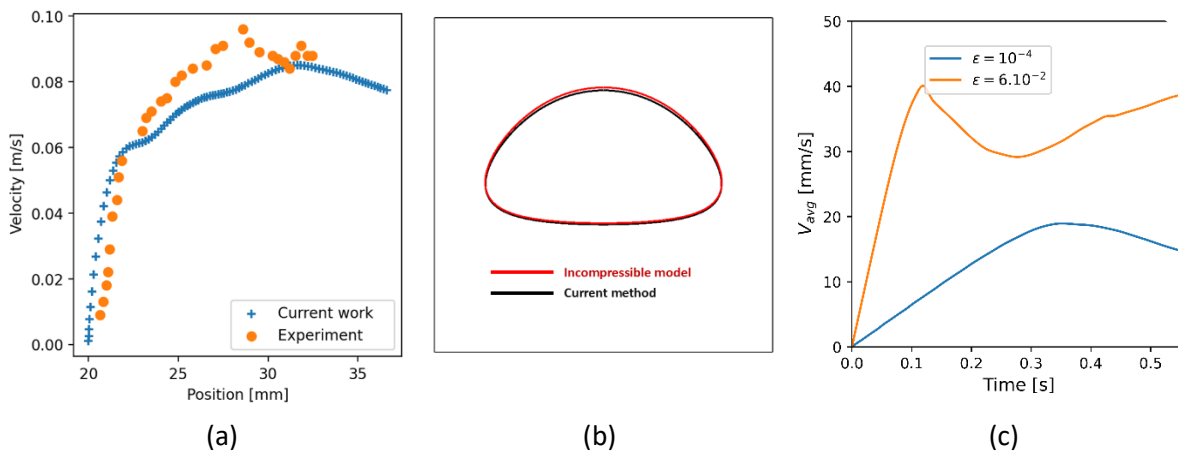


Figure 2: a) Comparison with experimental work [4] for the rise of oxygen bubble in liquid oxygen at $\varepsilon = 0.04$, b) Bubble rise dynamics for density ratio 10 at $t = 3\text{s}$ in the case of incompressible fluid c) Bubble rise for different proximities to the critical point.

References

- [1] B. Zappoli, D. Beysens, Y. Garrabos, Heat Transfers and Related Effects in Supercritical Fluids, 1st ed., Springer Netherlands, 2014.
- [2] S. Amiroudine, J.P. Caltagirone, A. Erriguible, A Lagrangian–Eulerian compressible model for the trans-critical path of near-critical fluids, *Int. J. Multiph. Flow* 59 (2AD) 15–23.
- [3] Z. Guo, P. Lin, A thermodynamically consistent phase-field model for two-phase flows with thermocapillary effects, *J. Fluid Mech.* 766 (2015) 226–271.
- [4] A. Mongruel, G. Gandikota, D. Chatain, A. Mailfert, P. Andriamananjaona, and D. Beysens, Transient Rising of Oxygen Bubbles in a Fast Varying Gravity, *International Journal of Multiphase Flow* 168, 104560 (2023).
- [5] D. Sharma, M. Coquerelle, A. Erriguible, S. Amiroudine, Adaptive interface thickness based mobility—Phase-field method for incompressible fluids, *Int. J. Multiph. Flow* 142 (2021) 103687.

2.5 The ESA project Giant Fluctuations
H. Bataller, **F. Croccolo**

The ESA project Giant Fluctuations

Henri Bataller¹, Fabrizio Croccolo¹

¹Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, LFCR UMR5150, Anglet, France

Le projet ESA international **Giant Fluctuations** (précédemment NEUF-DIX) vise à étudier les fluctuations de non équilibre en absence de la force de pesanteur qui limite les fluctuations de plus grande taille, connues sous le nom de fluctuations géantes. L'étude des fluctuations s'est faite historiquement avec des méthodes optiques et plus spécifiquement par shadowgraphie. Nous avons contribué au développement de cette technique avec la mise en place notamment d'un algorithme dynamique différentiel qui permet d'obtenir la fonction de structure des fluctuations en fonction du temps et pour chaque vecteur d'onde, en passant par un calcul statistique sur les séries d'images enregistrées. Ce calcul demande des ressources informatiques de plus en plus importantes au fur et à mesure que le nombre des images et leur nombre de pixels augmentent, avec l'évolution technologique des caméras. C'est pour cela que le développement des logiciels pour effectuer ce calcul rapidement devient crucial pour l'applicabilité de la technique. Le projet Giant Fluctuations étant focalisé sur des systèmes liquides ternaires, le nombre des concentrations indépendantes est de deux. Il est donc nécessaire de passer à une version bi-chromatique de la shadowgraphie, ce qui n'était pas encore disponible au début du projet. Nous avons donc développé cette version à deux longueurs d'onde, en écrivant d'abord le cadre théorique pour analyser les fonctions de structure obtenues aux deux longueurs d'onde et remonter aux propriétés de transport d'intérêt. Puis nous avons équipé un dispositif de shadowgraphie à deux longueurs d'onde. En tant que calibration et preuve de faisabilité de la méthode, nous avons d'abord étudié un mélange binaire en séparant le signal des fluctuations thermiques du signal des fluctuations de la concentration. Le projet Giant Fluctuations, devrait voir son **premier vol sur l'ISS en début 2027 pour un totale de 4 vols jusqu'au démantèlement de l'ISS**, actuellement prévu fin 2029/début 2030. Le but du projet est d'investiguer plusieurs échantillons, représentatifs de différentes thématiques : 1) des mélanges ternaires incluant un polymère dilué ; 2) des mélanges ternaires à base de polymère proche de la transition vitreuse ; 3) les forces de type Casimir de non-équilibre ; 4) la diffusion transitoire ; 5) des suspensions colloïdales très concentrées ; 6) l'agrégation des protéines biologiques. Notre implication dans ce projet est liée soit à la codirection du projet, soit à la responsabilité directe de l'expérience 1). Néanmoins nous envisageons de faire plusieurs expériences sur terre en collaboration avec les équipes qui ont la responsabilité d'autres parties du projet. Ces activités sont aussi en relation avec la Chaire Industrielle CO2ES portée par F. Croccolo, qui a débuté fin 2018 sur le thème du stockage du CO₂ dans les aquifères salins profonds. La Chaire a été clôturée en mars 2025.

Résultats

L'année 2025 a été marquée par l'exploitation des données issues d'une **campagne de calibration de la fonction de transfert du Shadowgraph** effectuée en 2024 dans les locaux de la société RedWire à Anverse (BE) sur l'Engineering Model de l'expérience. L'analyse des données a permis l'évaluation de la fonction de calibration pour les quatre instruments montés en parallèle. Un exemple de fonction de transfert obtenue en appliquant une différence de température de 20 K à une couche de toluène de 1 mm, chauffant par le haut est représenté en Fig. 1. La qualité des mesures a également permis de valider les choix techniques effectué par la société RedWire, aussi en relation à la similarité des fonctions de transfert des quatre instruments.

Nous avons participé à nombreuses réunion de pilotage du projet et de préparation à la campagne de Ground Reference Test qui devrait se tenir à l'EUSOC en début 2026 pour tester les procédure qui seront utilisées pendant le premier vol sur l'ISS. Cela a nécessité nombre de réunions et beaucoup de travail de coordination entre les partenaires, inclus un nombre de déplacements de F. Croccolo à Milano (IT) pour discuter avec l'autre coordinateur du projet A. Vailati.

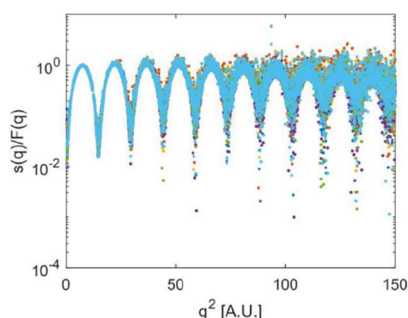


Fig. 1 Fonctions de transfert Shadowgraph obtenues après avoir analysé le signal des fluctuations thermiques de non-équilibre pour un échantillon de toluène pur soumis à un gradient thermique de 10 K sous 1 mm et l'avoir divisé par la courbe du résultat théorique attendu.

D'avantage des tests de remplissage des cellules ont été effectués en 2025, notamment les quatre cellules de l'Engineering Model ont été remplies courant l'été 2025 par la société RedWire, avant livraison chez l'EUSOC pour exécution des tests de fonctionnement. Les échantillons fournis en 2024 ont été testés pendant la campagne de compatibilité chimique des échantillons des vols 2-5, cette année. Aucune incompatibilité a été détectée.

Perspectives

Les perspectives pour l'année prochaine sont liées à la finalisation des tests de terre en vue du vol 1. Nous attendons la date définitive du lancement de l'instrument, aussi bien que du carrousel du vol 1, contenant les 4 premiers échantillons. Cela devrait se faire finalement en 2026, mais nous sommes convoqués pour une réunion d'information sur la situation de l'ISS la semaine du 27/10/2025 et nous en saurons plus à cette date. Malheureusement, les événements récents côté USA/NASA ont un impact négatif direct sur le planning de toutes activités sur l'ISS. Une campagne de test des procédures de vol sera effectuée chez le centre ESA-EUSOC à proximité de Madrid (ES) début 2026.

M. Carpineti, *et al.*, Eur. J. Phys. **45**, 045803 (2024)
S. Castellini, *et al.*, Eur. Phys. J. E **47**, 25 (2024)
S. Castellini, *et al.*, J. Chem. Phys. **158**, 244201 (2023)
A. Vailati, *et al.*, npj Microgravity **9**, 1 (2023)

Remerciements : Les auteurs expriment leur gratitude au CNES pour son soutien financier ainsi qu'aux partenaires de la Chaire Industrielle CO2ES : E2S-UPPA, TotalEnergies, le CNES et le BRGM.

- 2.6 Instabilités doubles diffusives lors de la superposition de deux couches salées de chlorure de sodium et de sulfate de sodium
H. Bataller, C. Oko, A. Mialdun, M. M. Bou-Ali, V. Shevstova, B. Seta, A. Lassin

Instabilités doubles diffusives lors de la superposition de deux couches salées de chlorure de sodium et de sulfate de sodium

H. Bataller¹, C. Oko¹, A. Mialdun², M. M. Bou-Ali², V. Shevstova², B. Seta³, A. Lassin⁴

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, LFCR UMR5150, Anglet, France

² Fluid Mechanics Group, Faculty of Engineering, Mondragon University, 20500 Mondragon, Spain

³ Dept. Civil and Mechanical Engineering, Technical University of Denmark

⁴ BRGM, F-45060 Orleans, France

Dans l'étude des propriétés de transport de fluides complexes, l'utilisation de la microgravité est nécessaire afin de supprimer les effets de sédimentation dans les dispersions, mais aussi de convection dans les mélanges fluides purs et multi-constituants en conditions non-homogènes. Dans ce dernier cas, la diffusion et la thermodiffusion peuvent être étudiées en l'absence d'effets perturbateurs. Le comportement des mélanges binaires est bien compris de nos jours, mais la plupart des mélanges réels, et dans des applications naturelles et industrielles, sont multi-constituants. L'étape suivante dans la complexité sont les mélanges ternaires. Ils montrent déjà les caractéristiques des systèmes véritablement multi-constituants (telles que diffusion croisée, barrière ou osmotique). Les résultats restent rares et parfois contradictoires. Malgré que les difficultés expérimentales et théoriques augmentent considérablement avec le nombre de constituants, les ternaires restent accessibles dans des expériences bien conçues, et le nombre de coefficients de diffusion indépendants reste gérable, bien qu'il augmente de un à quatre par rapport aux binaires. Notre laboratoire, en collaboration avec l'Université de Mondragon en particulier, a pris part depuis plus de 10 ans au projet DCMIX de l'ESA. Initié en 2009, il vise à établir des données de références sur la diffusion et la thermodiffusion de mélanges liquides ternaires, grâce à des expériences à bord de l'ISS, et le développement des techniques d'analyse associées. La conception modulaire de l'instrument dédié au projet (SODI) permet d'étudier cinq compositions ternaires et une composition binaire, par mission. SODI est un interféromètre du type Mach-Zehnder bi-chromatique (670 nm et 935 nm). La dernière campagne à bord de l'ISS, DCMIX4, s'est déroulée du 13 décembre 2018 au 4 mars 2019. A caractère exploratoire, 3 compositions du mélange toluène/méthanol/cyclohexane, ciblant au plus près la zone de démixtion, ont été étudiées. Avec comme idée de faire le lien entre la thermodiffusion et la thermophorèse, un mélange ternaire à base de nanofluide et une solution de polystyrène/toluène/cyclohexane complètent les 5 cellules dédiées aux ternaires. Le mélange binaire de référence était une solution de polystyrène dans du toluène. L'expérience DCMIX4 a comme particularité de ne pas étudier un mais plusieurs mélanges ternaires à la fois, sous la direction de plusieurs équipes scientifiques, responsable chacune d'un mélange. Notre équipe a proposé l'exploration d'un système composé de molécules de poids moléculaires très différents afin de permettre une détermination précise des valeurs propres de la matrice de diffusion. Nous avons donc eu la responsabilité des cellules n°5 et n°6 remplies respectivement avec le mélange ternaire de polystyrène/toluène/cyclohexane et le mélange binaire de polystyrène/toluène.^{1,2} Aussi, dès notre implication dans ce projet, notre équipe avait proposé pour les mesures au sol le développement de la technique de shadowgraphie bi-chromatique pour l'étude des mélanges ternaires par analyse de la diffusion de la lumière par les fluctuations de non-équilibre, avec le soutien du CNES.³ En relation avec la Chaire Industrielle CO2ES portée par F. Croccolo, l'objectif de la thèse de C. O. Oko était d'étudier le comportement diffusif multi-espèces des sels, afin d'illustrer un certain nombre de points se déroulant lors du stockage de fluides d'intérêt géologique dans les aquifères salins.⁴ Un interféromètre du type Mach-Zehnder a été réalisé avec une source laser à 543

¹ A. Mialdun et al., *Preliminary analysis of Diffusion Coefficient Measurements in ternary mIXtures 4 (DCMIX4) experiment on-board the International Space Station*, Eur. Phys. J. E, **42** (2019) 87.

² A. Mialdun et al., *Data quality assessment of Diffusion Coefficient Measurements in ternary mIXtures 4 (DCMIX4) experiment*, Acta Astronautica, **176** (2020) 204-215.

³ D.E. Bouyou Bouyou, *Ombroscopie à deux longueurs d'onde : développement théorique et validation expérimentale sur un mélange binaire*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, thèse soutenue le 6/12/2023.

⁴ C.O. Oko, *Experimental and Theoretical Study of Double-Diffusive Instabilities during the Superposition of two Saline Layers of Sodium Chloride and Sodium Sulphate*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, thèse soutenue le 10/7/2025.

nm. En réutilisant les procédures utilisées dans le cadre de DCMIX, les algorithmes d'analyse des images ont été établis. Les facteurs de contraste optique des solutions de sels mesurés. Dans ce travail nous illustrons nos mesures et analyses des instabilités doubles-diffusives observées au laboratoire lors de la superposition de deux couches salées de NaCl de Na_2SO_4 .

Résultats

L'étude combine modélisation thermodynamique, expériences d'interférométrie optique et simulations numériques non linéaires pour explorer les instabilités convectives dans un système ternaire. Nos résultats révèlent une grande variété de scénarios convectifs selon la configuration des deux couches salées et les rapports de concentration des sels. Lorsque le NaCl, à diffusion plus rapide, est placé au-dessus du Na_2SO_4 , des instabilités diffusives stratifiées (Diffusion-Layer Convection en anglais) se produisent. Bien que déjà prédites théoriquement, nous reportons expérimentalement et pour la première fois un décalage dans le temps et une asymétrie des instabilités dans les deux couches. Lorsque la position des sels est inversée, des instabilités double diffusives du type « fingering » se forment, avec une évolution lente liée au faible rapport de densités. Ces doigts présentent une morphologie inhabituelle, constituée de structures extrêmement fines, à texture verticale, qui fusionnent progressivement à partir de l'interface. Les critères de stabilité classiques ne permettaient pas de prédire complètement le début et la nature des instabilités. Nous montrons également dans ce travail que la position initiale du système dans le diagramme de stabilité, déterminé par la matrice de diffusion du système, est un facteur critique pour expliquer les instabilités.

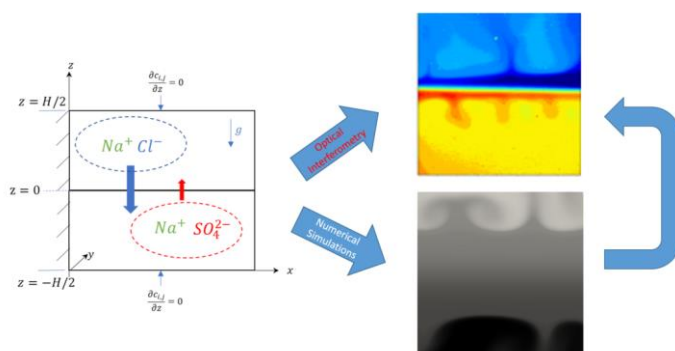


Figure 1 : Graphical abstract pour l'article soumis à Industrial & Engineering Chemistry Research

Perspectives

Récemment nous avons lancé la construction d'un interféromètre à trois longueurs d'ondes, et qui serait une version améliorée de l'équipement SODI de DCMIX, afin de mettre à profit toutes les compétences acquises lors des 10 dernières années et développer l'interférométrie optique. En plus de mesurer des coefficients de transports de mélange ternaires, l'appareil servirait pour l'étude de phénomènes de transport complexes, comme la cristallisation de sel induite par évaporation en milieu confiné, et qui se passent dans des processus naturels ou industriels exploitant le sous-sol géologique.

Publications

C.O. Oko, B. Šeta, A. Mialdun, M.M. Bou-Ali, V. Shevtsova, A. Lassin, H. Bataller, *Salinity-Driven Convection Mechanisms in Stratified Brines*, soumis à Industrial & Engineering Chemistry Research

A. Sanjuan, D. Sommermann, W. Köhler, H. Bataller, F. Croccolo, A. Mialdun, V. Shevtsova, M.M. Bou-Ali, *Analysis of the mass transport properties of the binary polymeric mixture in microgravity conditions during the DCMIX4 campaign onboard the ISS. Comparison with gravity-based experiments*, Acta Astronaut. **236** (2025) 627-635

C.O. Oko, A.T. Ndjaka, R. Minhas, AL Lassin, M. Azaroual, F. Croccolo, H. Bataller, *Study of salt free-diffusion by 1D transport numerical simulations and shadowgraph experiments*, J. Hydrol. **639** (2024) 131643

- 2.7 Transfert thermique en microgravité par instabilité de Faraday
N. Brosuis, **F. Zoueshtiagh**, R. Narayanan

Transfert thermique en microgravité par instabilité de Faraday

Nevin Brosuis¹, Farzam Zoueshtiagh², Ranga Narayanan¹

¹ Université de Floride, ² IEMN UMR 8520 Université de Lille

En microgravité, la convection naturelle devient inefficace et les écoulements diphasiques sont difficiles à contrôler en raison de l'absence de flottabilité, contrairement aux conditions terrestres. Dans ce contexte, l'instabilité interfaciale de Faraday apparaît comme une approche prometteuse pour renforcer le transfert de chaleur. Nous avons ainsi mené une étude visant à évaluer la capacité des ondes interfaciales générées par cette instabilité à induire et à soutenir des échanges thermiques. Une analyse théorique couplée à une investigation expérimentale a été conduite afin de quantifier l'efficacité de ce mécanisme. Dans ce cadre, le transfert de chaleur et l'instabilité du fluide sont modélisés dans le régime où la profondeur du fluide est inférieure à la longueur d'onde caractéristique de l'instabilité, en appliquant les principes de la *Long Wave Approximation*¹. La théorie s'inspire des premiers travaux sur les films liquides tombants, qui associent une méthode résiduelle pondérée à un modèle intégral de couche limite^{2,3,4,5}. L'objectif de cette modélisation est d'analyser l'influence des paramètres environnementaux (propriétés fluidiques et géométrique, fréquences d'oscillation, intensité de la gravité) sur les conditions permettant de maintenir un flux thermique significatif et durable.

Résultats

Les résultats issus de l'analyse de stabilité linéaire et des simulations numériques montrent que la gravité joue un rôle déterminant sur la stabilité interfaciale. En microgravité, l'instabilité de Faraday est plus facilement excitée, ce qui accroît considérablement le flux thermique. Les simulations confirment que la réduction de la gravité abaisse la fréquence naturelle des ondes, facilitant ainsi leur amplification résonante. Ce résultat est particulièrement intéressant, car il suggère qu'un système en faible gravité nécessite moins d'énergie d'excitation que sur Terre, tout en générant des flux plus intenses et des transferts de chaleur plus élevés (figure 1).

Parallèlement, des expériences ont été menées à l'Université de Floride et à l'Université de Lille. La figure 2 présente un schéma et une photographie du dispositif expérimental. Les résultats obtenus en gravité terrestre (figure 1(bas)) confirment que l'instabilité de Faraday augmente de façon significative le transfert de chaleur à travers une interface fluide. Il a notamment été observé que,

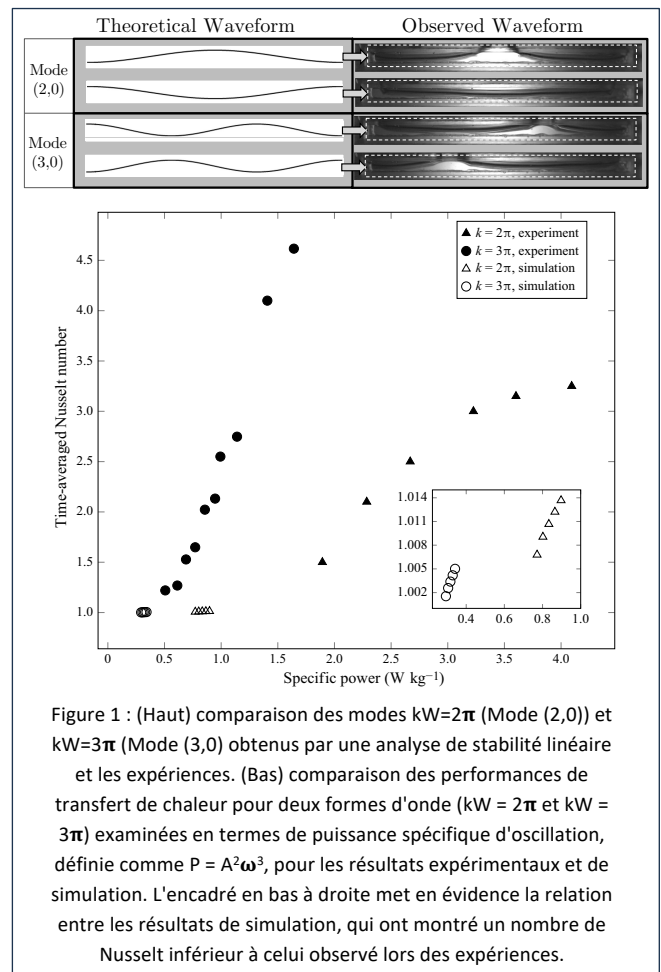


Figure 1 : (Haut) comparaison des modes $k\omega=2\pi$ (Mode (2,0)) et $k\omega=3\pi$ (Mode (3,0)) obtenus par une analyse de stabilité linéaire et les expériences. (Bas) comparaison des performances de transfert de chaleur pour deux formes d'onde ($k\omega = 2\pi$ et $k\omega = 3\pi$) examinées en termes de puissance spécifique d'oscillation, définie comme $P = A^2\omega^3$, pour les résultats expérimentaux et de simulation. L'encadré en bas à droite met en évidence la relation entre les résultats de simulation, qui ont montré un nombre de Nusselt inférieur à celui observé lors des expériences.

¹ Kalliadasis, S., Ruyer-Quil, C., Scheid, B. & Velarde, M. G. 2011 Falling liquid films. Springer Science & Business Media.

² Dietze, G. F. & Ruyer-Quil, C. 2015 Films in narrow tubes. Journal of Fluid Mechanics 762, 68–109.

³ Ruyer-Quil, Christian & Manneville, Paul 1998 Modeling film flows down inclined planes. The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems 6 (2), 277– 292.

⁴ Bestehorn, Michael 2013 Laterally extended thin liquid films with inertia under external vibrations. Physics of Fluids 25 (11), 114106.

⁵ Rojas, NO, Argentina, Mederic, Cerda, Enrique & Tirapegui, Enrique 2010 Inertial lubrication theory. Physical review letters 104 (18), 187801.

pour une même amplitude relative au-dessus du seuil critique, le nombre de Nusselt moyen croît avec la longueur d'onde excitée.

Ces expériences en gravité terrestre ont également permis une comparaison directe avec les prédictions théoriques. Les résultats expérimentaux indiquent que le transfert de chaleur peut être amplifié d'un facteur pouvant atteindre 4,5 par rapport au régime de conduction pure, ce qui correspond à un nombre de Nusselt $Nu \approx 4,5$. De plus, l'efficacité de ce transfert s'est révélée fortement corrélée à la morphologie de l'onde interfaciale : le nombre de demi-longueurs d'onde présentes sur l'interface influence directement l'intensité de la convection induite et, par conséquent, le coefficient global d'échange thermique.

Le modèle théorique reproduit correctement les tendances qualitatives observées, mais sous-estime quantitativement le flux de chaleur. Cet écart s'explique par plusieurs hypothèses simplificatrices : négligence des termes inertiels d'ordre supérieur, conditions idéalisées imposées aux parois, et description approchée de la dynamique interfaciale. En pratique, les déformations de l'interface observées expérimentalement étaient bien plus marquées que celles prévues par le modèle, ce qui conduisait à des transferts de chaleur accrus.

Conclusion

L'instabilité de Faraday s'affirme comme un mécanisme pertinent pour intensifier le transfert thermique en environnement de faible gravité, avec des perspectives d'application directe pour la gestion thermique dans un contexte spatial. L'étude présentée, fondée sur une démarche conjointe de modélisation, de simulations numériques et de validations expérimentales, met en évidence le potentiel de ce mécanisme tout en soulignant les limites associées aux approches théoriques simplificatrices. Les résultats montrent que la diminution de l'accélération gravitationnelle favorise l'apparition de l'instabilité interfaciale : le seuil énergétique requis pour déstabiliser l'interface est significativement réduit, conduisant à une intensification du transfert de chaleur. Ces conclusions ouvrent des perspectives pour la conception et l'optimisation de systèmes de gestion thermique performants et adaptés aux environnements spatiaux.

Publications

N. Brosius, F. Zoueshtiagh, R. Narayanan "Enhancement of Heat Transfer Using Faraday Instability" (2025), J. Fluid Mechanics, vol. 1016, A35, doi:10.1017/jfm.2025.10415

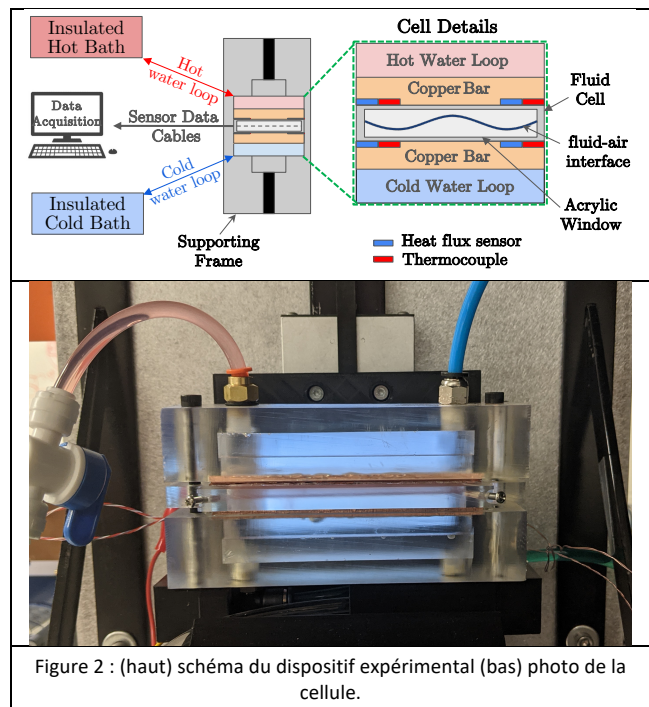


Figure 2 : (haut) schéma du dispositif expérimental (bas) photo de la cellule.

2.8 Aérodynamique du vol de papillons en gravité altérée
F. Schweitzer, A. Gayout, **M. Bourgoïn**, N. Plihon

Aérodynamique du vol de papillons en pesanteur altérée

François Schweitzer¹, Ariane Gayout², Mickaël Bourgoin¹, Nicolas Plihon¹

¹ Univ Lyon, ENS de Lyon, CNRS, Laboratoire de Physique, Lyon, France

² Groningen Institute for Evolutionary Life Sciences, University of Groningen, Groningen, Netherlands

Le vol des papillons illustre une remarquable maîtrise aérienne : en battant des ailes, ils génèrent des vortex qui produisent la portance et la poussée nécessaires à leur déplacement. Cette performance résulte d'un équilibre subtil entre la pesanteur et les forces aérodynamiques qu'ils engendrent. Lorsque cet équilibre est perturbé, par exemple dans des conditions de pesanteur modifiée, le vol devient plus difficile à stabiliser, offrant un cadre unique pour étudier les mécanismes de contrôle du mouvement.

Dans ce contexte, le projet PHOEBUS analyse comment des papillons néotropicaux s'adaptent à des régimes de micro- et d'hyper-pesanteur (0 g et 2 g), afin de relier physiologie, contrôle du vol et efficacité aérodynamique à la pesanteur.

Ces travaux approfondissent la compréhension du vol des insectes et ouvrent la voie à des applications biomimétiques dans les domaines dronastique et spatial.

Dispositif expérimental et chaîne de reconstruction 3D

Le dispositif expérimental (Fig. 1) repose sur une enceinte cubique de 60 cm, équipée de panneaux LED et d'un système d'essuie-glaces motorisés déclenchant le vol. Neuf caméras neuromorphiques enregistrent les variations de luminosité, assurant un suivi à très haute résolution spatiale et temporelle des battements d'ailes.

L'étude s'appuie sur une chaîne de traitement complète : les points caractéristiques du papillon (Fig. 1) sont suivis en 2D par apprentissage automatique (DeepLabCut), puis reconstruits en 3D au cours du temps à partir du croisement des rayons issus de plusieurs caméras. L'analyse permet ensuite de reconstituer le mouvement du papillon avec une résolution suffisante pour décomposer finement la cinématique de chaque battement (vitesses, accélérations et angles).

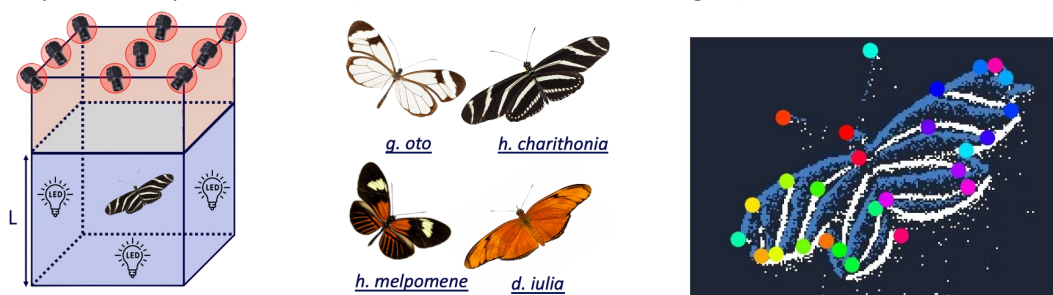


Fig. 1 : Dispositif expérimental, espèces étudiées et suivi 2D des points caractéristiques.

Cette approche constitue une avancée majeure : elle décrit finement les stratégies de contrôle adoptées par les papillons, offre aux entomologistes une vision précise de la coordination corps-ailes, et fournit aux aérodynamiciens des données exploitables pour les simulations numériques d'écoulements (CFD), bien plus détaillées (Fig. 2) que les cinématiques moyennes habituelles (Fig. 3).

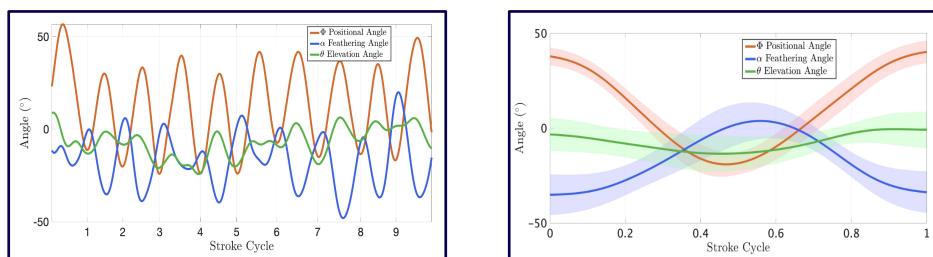


Fig. 2-3 : Cinématique du battement d'aile : gauche, instantanée ; droite, moyenne sur un cycle.

Résultats en pesanteur altérée

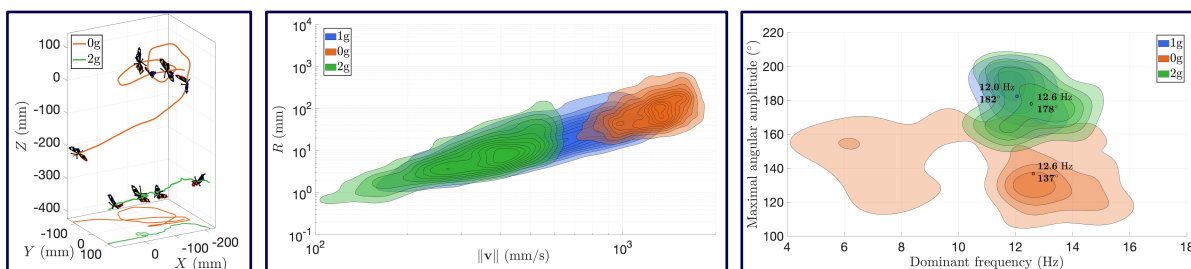
Deux campagnes de vols paraboliques ont été menées à bord de l'Airbus A310 Zero-G, opéré par Novespace, lors des 68^e et 69^e campagnes du CNES (avril et octobre 2025), afin de comparer le vol des papillons en micro-pesanteur (0 g) et en hyper-pesanteur (2 g) à leur vol terrestre (1 g).

Les trajectoires 3D (Fig. 4) révèlent des comportements contrastés : en 0 g, les papillons explorent librement le volume par des trajectoires courbes et variées, tandis qu'en 2 g, leurs trajectoires restent plus basses et contraintes, conséquence du poids apparent accru, traduisant un vol plus lent mais plus stable.

Ces différences de trajectoire se reflètent dans la dynamique du mouvement. L'analyse du vol (Fig. 5) met en évidence une relation robuste entre rayon de courbure et vitesse ($R^{-1} \propto \|v\|^2$), conservée à tous les niveaux de pesanteur : les papillons maintiennent une accélération centripète quasi constante, signe d'un contrôle actif robuste plutôt qu'une adaptation purement mécanique. Ce maintien de l'accélération centripète s'accompagne d'une modulation des vitesses selon la pesanteur : plus élevées en 0 g, plus faibles en 2 g.

Au niveau du battement d'aile, cette modulation se traduit par des ajustements cinématiques spécifiques. La distribution conjointe de l'amplitude angulaire maximale et de la fréquence dominante (Fig. 6) révèle deux stratégies distinctes : en 0 g, des amplitudes réduites et une dispersion accrue des fréquences, traduisant un battement intermittent et économe ; en 2 g, des valeurs proches de 1 g mais une variabilité plus forte, indiquant une instabilité neuromusculaire sous surcharge.

Enfin, la puissance inertielle rotationnelle, bien que non illustrée ici, diminue en 0 g et ne croît pas significativement en 2 g : les papillons privilégient une adaptation motrice fine plutôt qu'une compensation mécanique directe de la pesanteur.



Figs. 4–6 : De gauche à droite : trajectoires 3D, relation vitesse-courbure et distribution amplitude–fréquence du vol de *h. charithonia* selon le niveau de pesanteur (0 g, 1 g, 2 g).

Ces résultats révèlent une asymétrie de stratégie selon le niveau de pesanteur :

- En 0 g : vol rapide, intermittent et économe ;
- En 2 g : vol lent, stable et régulé.

La pesanteur influence avant tout le mode de pilotage, et non la seule intensité des forces générées.

Perspectives

L'étude se poursuit selon trois axes.

Elle sera d'abord étendue à d'autres espèces (*g. oto*, *h. melpomene* et *d. iulia*) afin de relier morphologie, cinématique et adaptation à la pesanteur.

Une modélisation 3D complète aile-corps, menée avec le LIRIS (Lyon) et le MNHN (Paris), permettra de reconstituer la dynamique intégrale du vol.

Enfin, des simulations d'écoulements numériques avec l'ISM (Marseille) serviront à quantifier les forces aérodynamiques et évaluer l'efficacité des battements selon le niveau de pesanteur.

2.9 Transport de chaleur au voisinage du point critique liquide-vapeur
V. Mouet, F. Pétrélis, **S. Fauve**

Réduction de trainée dans un écoulement diphasique turbulent

Valentin Mouet¹, François Pétrélis, Stephan Fauve¹

¹ Laboratoire de physique de l'Ecole normale supérieure, ENS, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université de Paris-Cité, F75005, Paris

Nous avons poursuivi nos travaux sur les écoulements diphasiques turbulents, d'une part concernant les écoulements de convection thermique de mélanges liquide-vapeur au voisinage du point critique (Mouet et al. 2025) et d'autre part les écoulements tourbillonnaires turbulents liquide-gaz (Mouet 2024) que nous présentons ci-dessous.

La puissance nécessaire pour maintenir un écoulement turbulent en régime statistiquement stationnaire est à la fois essentielle pour les applications et du point de vue fondamental. Pour un écoulement monophasique, l'analyse dimensionnelle indique que la puissance P_{est} égale à $\rho V^3 L^2 f(Re)$, pour un fluide de densité ρ et de viscosité cinématique ν , avec une vitesse caractéristique V et une longueur caractéristique L , de sorte que le nombre de Reynolds est $Re = VL/\nu$. Dans la limite des grands nombres de Reynolds, il est souvent observé que $f(Re)$ tend vers une constante ; cela est considéré comme une propriété fondamentale des écoulements turbulents.

Ce problème a beaucoup moins été étudié dans le cas d'un écoulement diphasique. Pour l'écoulement de Couette-Taylor, une réduction du couple, et donc de la puissance nécessaire pour engendrer l'écoulement, a été observée lorsque le fluide est un mélange air-eau, comparé au cas de l'eau pure. Il a été montré que de grandes bulles déformables sont responsables de cet effet. Les écoulements de Taylor-Couette sont entraînés par les contraintes tangentielles visqueuses exercées à la paroi ; cela diffère du cas plus courant d'un écoulement entraîné inertielllement, où le mouvement d'une turbine met le fluide en mouvement.

Dispositif expérimental

Un écoulement turbulent est engendré dans une cuve cylindrique en cuivre, de 260 mm de diamètre et 340 mm de longueur par la rotation de deux disques co-axiaux de rayon $R = 80$ mm se faisant face, séparés d'une distance $H = 200$ mm. Ces disques comportent chacun 8 pales de 10 mm de hauteur et 8 mm d'épaisseur. Des déflecteurs de 30 mm de haut et 5 cm d'épaisseur sont fixés derrière les disques afin d'éviter l'accumulation de bulles. Les disques sont entraînés par deux moteurs à courant continu Parvex RX630, d'une puissance maximale de 2,1 kW et d'un couple maximal de 7,8 Nm chacun. La température est régulée par circulation d'eau via un thermorégulateur Lauda RPE250E connecté à une gaine en cuivre soudée à la cuve. La température reste stable à mieux que 2 °C. On contrôle le volume d'air V_a contenu dans l'expérience, pour un volume total $V_t = 17,58 \pm 0,02$ l. On note $\alpha_v = V_a/V_t$ la fraction volumique globale d'air, et les expériences sont menées à volume total constant.

On mesure les vitesses angulaires des moteurs et les couples nécessaires à leur entraînement. On mesure également localement la quantité d'air à l'aide d'une sonde optique à effet Doppler (A2Photonic Sensors), basée sur la réflexion de la lumière dans une fibre optique très fine. Quand la pointe de la sonde pénètre dans une bulle d'air, la réflexion lumineuse augmente ; le traitement du signal permet ainsi de mesurer la fraction locale d'air, ainsi que la taille et la vitesse des bulles.

Des mesures par « Phase Doppler Anemometry » sont également effectuées (DualPDA, Dantec Dynamics). Cela donne accès à la taille et à la vitesse des bulles d'air dans une direction donnée. Contrairement à la sonde optique, cette méthode est non intrusive, mais elle ne permet de mesurer que près des parois, car la diffusion lumineuse par les bulles réduit fortement le signal au cœur du fluide.

Resultats

Par analyse dimensionnelle, le couple moyen Γ nécessaire pour entraîner l'écoulement à vitesse angulaire fixée s'écrit :

$$\Gamma = \rho R^5 \Omega^2 C(\alpha, Re, \theta, Fr, We, \frac{\rho_g}{\rho_l}, \frac{\nu_g}{\nu_l})$$

où Ω est la vitesse angulaire du disque le plus rapide, $\rho = (1 - \alpha_v)\rho_l + \alpha_v\rho_g$ la densité moyenne du mélange air-eau, $Re = R^2(\Omega_1 + \Omega_2)/(2\nu_l)$ le nombre de Reynolds, $\theta = \Omega_2/\Omega_1$ le rapport des vitesses angulaires, We le nombre de Weber et $Fr = \Omega^2 R/g$ le nombre de Froude.

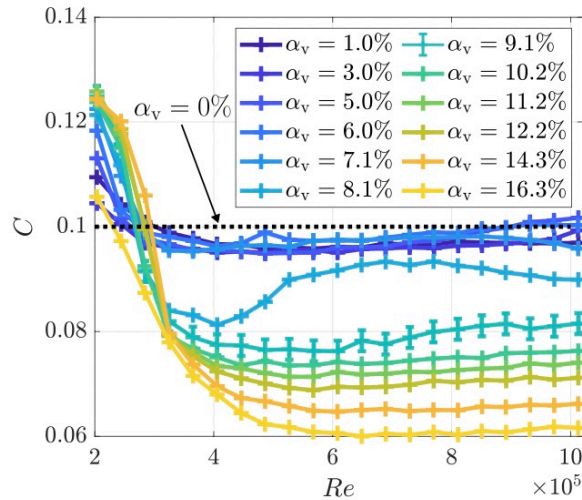


Figure 1 : Evolution du couple adimensionné par $\rho R^5 \Omega^2$ en fonction du nombre de Reynolds pour différentes concentrations volumiques de bulles d'air avec des disques en contra-rotation ($\theta = 1$).

La figure 1 présente l'évolution du couple adimensionné par $\rho R^5 \Omega^2$, c'est-à-dire tel que la réduction de densité en raison de l'augmentation de la concentration volumique d'air est prise en compte par ρ . C reste approximativement constant pour des concentrations volumiques inférieures à 6% puis diminue continûment lorsque la concentration volumique augmente. Il devient indépendant de Re à grand Re comme dans le cas monophasique. Lorsque les disques tournent à des vitesses différentes, la réduction du couple peut évoluer de manière discontinue lorsque α_v augmente et présenter une hystérésis. Cette transition correspond à une bifurcation sous critique et conduit à l'existence de bistabilité. Une réduction de couple atteignant 60% est observée pour $\alpha_v = 8\%$ et $\theta = 3$.

Conclusion

Le couple nécessaire à engendrer un écoulement turbulent diphasique croît comme le carré de la vitesse angulaire de rotation comme dans le cas monophasique mais dépend fortement de la concentration volumique d'air même lorsque l'effet de changement de densité a été pris en compte. Lors des transitions qui induisent une réduction de couple, on observe une concentration volumique d'air fortement inhomogène avec une forte augmentation au voisinage des disques en rotation. L'ajout de tensioactif qui conduit à des bulles plus petites et moins déformables supprime la réduction de couple de même que le remplacement des bulles d'air par des particules solides de taille comparables. Ceci montre l'importance de la déformabilité des bulles sur la réduction de trainée.

Publications

- Valentin Mouet, Thèse: "Dynamique et transferts dans les écoulements turbulents liquide-gaz", Ecole normale supérieure – PSL (03/10/2024).
- V. Mouet, G. Michel, F. Pétrélis, S. Fauve, "Rayleigh-Bénard convection with phase change close to the critical point", Phys. Rev. Lett. **134** 104001 (2025).

2.10 Turbulence characterization in swirled sprays
S.K. Sahoo, N. Machicoane

Turbulence characterization in swirled sprays

Santanu Kumar Sahoo¹, Nathanaël Machicoane¹

¹ Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels, Université Grenoble Alpes, CNRS

Sprays are ubiquitous in many natural and industrial situations. Among the spray formation methods, coaxial two-fluid atomization, where a liquid jet is destabilized and broken into small droplets by a high-speed gas jet, offers high-quality sprays and is typically used, for instance, in processes in additive manufacturing, pharmaceutical, food, agricultural, and propulsion sectors. A canonical atomizer has been used in LEGI over the years to study spray formation mechanisms, as well as the droplet populations and their dispersions in the turbulent gas jet. After thorough characterizations of the gas jet, the liquid jet in the absence of gas, and later of the effect of atomizer inclination with respect to gravity on spray formation, we turn to studying the turbulence formed in the spray, especially in the presence of swirl (angular momentum) in the gas jet.

Resultats

The study of the droplet populations conducted when characterizing the effect of gravity's direction on the spray led to a detailed measurement session using a Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA, Figure 1). While this was not possible for the “angled spray” setup, as it would require many realignments of the system, and the optical accesses are limited by the heavy frame used to tilt the atomizer and collect the resulting spray. The PDPA measurement session was the opportunity to focus on the small droplets that cannot be captured using imaging, in particular, very small droplets produced by the bursting of thin films (at low gas Weber numbers) and the peeling of small ligaments from the side of the liquid jet (at high gas Weber numbers).

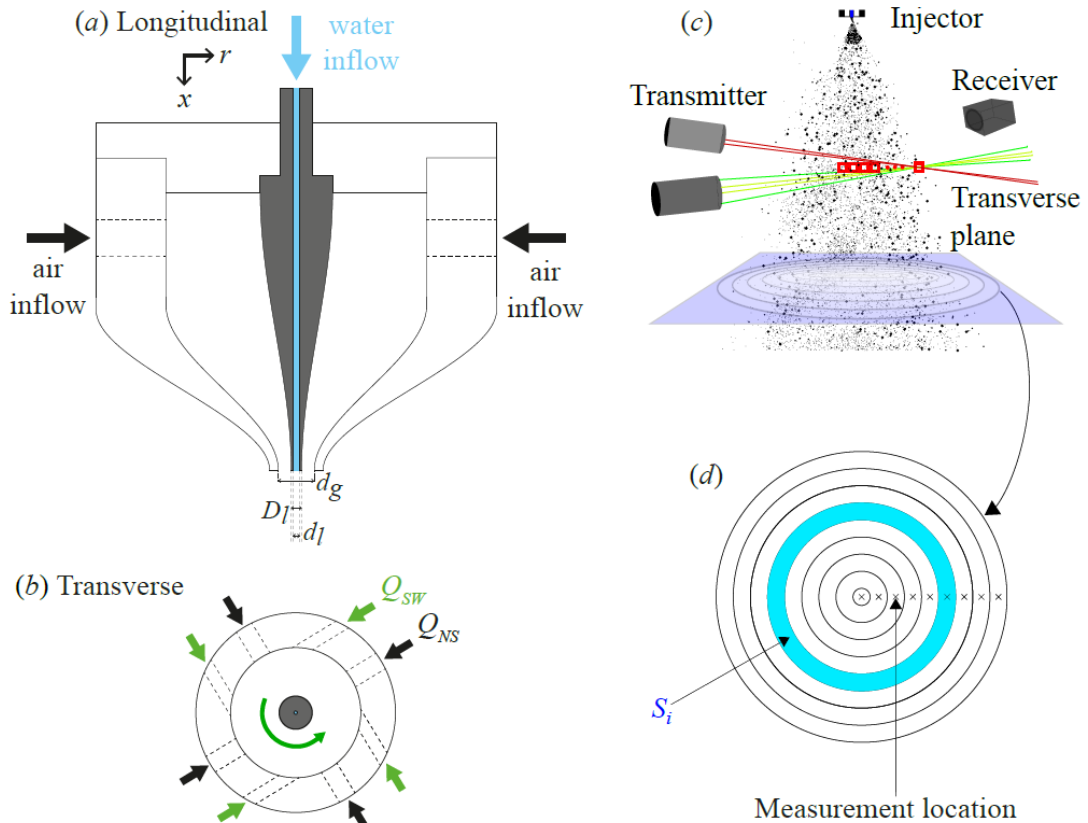


Figure 1: Schematics of the two-fluid coaxial atomizer in a longitudinal (a) and transverse cut (b). The droplet size and 3 components of the velocity are measured using a Phase Doppler Particle Analyzer along radial location for a fixed longitudinal distance $x = 25 d_g$ (c). Each measurement location is attributed a weight corresponding to the surface that this point represents in a spray plane.

The small droplets are used to infer the gas phase velocities, assuming they are flow tracers when their size is lower than 5 μm . The results based on this analysis, as well as the comparison to the drop velocity statistics, are detailed in a publication submitted recently. Here, we show how turbulence phenomenology arguments can be used to estimate a small-scale droplet Stokes number, based on its true definition as the ratio of the droplet response time to the local Kolmogorov time scale (Figure 2). Despite inherent biases, this analysis shows that at high gas Weber number, liquid droplets can faithfully be considered as flow tracers only if their size is below the micrometer, which is beyond the experimental capabilities in terms of tracer generation and measurements. For moderate to low Weber number values, droplets of the order of 5 μm can be used faithfully.

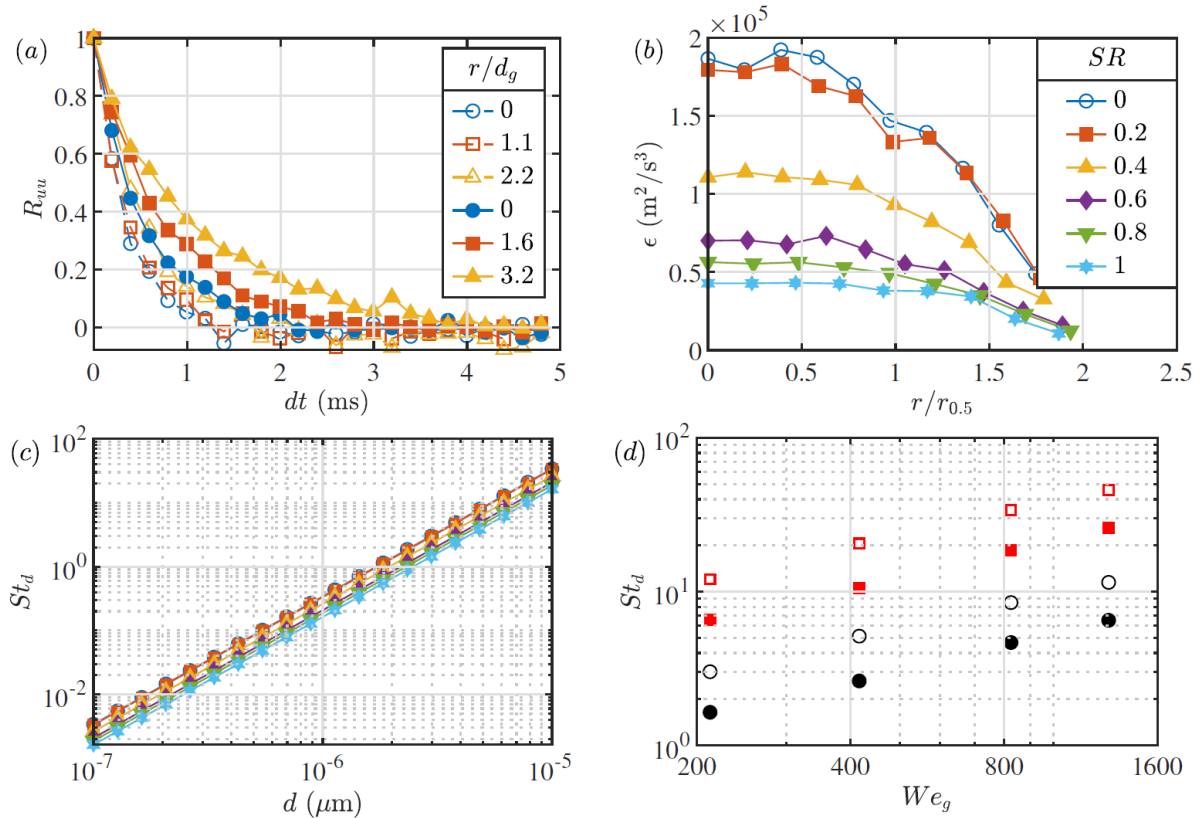


Figure 2: a) Auto-correlation function of the small droplets' longitudinal velocity at various radial distances. Open (resp. filled) symbols are for non-swirled (resp. swirled) sprays. b) Turbulent dissipation rate radial profiles for various swirl intensities. Computing a Kolmogorov time scale, the droplet Stokes number is plotted against the droplet size (c), and against the gas Weber number (d) for 5 μm (circles) and 10 μm (squares) drops.

Perspectives

The spray characterization is thorough, including the role of swirl, which drastically changes the turbulence features in the gas jet, in addition to changes in the liquid jet's morphology, dynamics, and in the fragmentation mechanisms and droplet dispersion. The turbulence study was submitted to a special issue (see below) as it received partial support from CNES under GdR MFA. The next step in that regard is to finalize the setup to embark the spray on parabolic flights to study the effect of gravity magnitude on the spray formation mechanisms (especially the wetting dynamics and flapping).

Publications

S. Sahoo & N. Machicoane, Two-phase flow turbulence in swirling sprays from a coaxial atomizer, submitted to *Acta Mechanica: Special Issue Turbulence & Interaction*

- 2.11 Kelvin-Helmholtz instability in binary fluids with miscibility gap
A. Dubey, S. Amiroudine

Kelvin-Helmholtz instability in binary fluids with miscibility gap

Anubhav Dubey and Sakir Amiroudine

Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

A pair of fluids can constitute an immiscible fluid pair, a miscible fluid pair or a fluid pair exhibiting a miscibility gap. The miscibility gap evolves as a response of the system to an external stimulus. This external stimulus may be the temperature or the pH of the system. A natural consequence of the directional evolution of the degree of miscibility between the two fluids is the dynamic nature of the ratio of the thermophysical properties and the interfacial tension. Thus, such fluid pairs find application in a wide variety of industrial and medical problems like protein extraction¹ and targeted drug delivery² to name a few. Further, the stimulus-based control over interfacial tension offers the possibility of flow pattern tuning to enhance the heat and mass transfer rates³. Therefore, a thorough understanding of the fundamental flow behavior is required for efficient utilization of binary fluid pairs. To this end, we consider a fluid pair exhibiting an upper-critical solution temperature (UCST) to investigate the effect of miscibility on the Kelvin-Helmholtz (KH) instability. The KH instability emanates owing to the presence of shearing velocity profile at the interface segregating the bulk regions of the fluid pair. The Cahn-Hilliard-Navier-Stokes equations are solved through numerical route to capture the spatio-temporal evolution of the interface with the base flow. A modified phase-field approach is deployed to track the continuous evolution of the smearing interface from an initially immiscible state to a miscible state⁴. The numerical methodology employed accurately captures the Korteweg stress above the UCST. The proximity to the UCST (T_c) is characterized by a parameter r , where $r = f(\frac{T-T_c}{T_c})$. This parameter is incorporated while defining the free energy functional as a function of the temperature. The interface between the two fluids is disturbed with a finite amplitude perturbation to provoke KH instability. The fluid pair is considered in two distinct configurations based on the thermodynamic state of the system. In the first configuration, the fluid pair is considered at a state of equilibrium corresponding to three distinct values of the degree of partial miscibility. The second configuration, on the other hand, pertains to a fluid pair at non-equilibrium undergoing the transition from an immiscible state to a miscible state. The study entails a nuanced energy budget and variance analysis to elucidate the evolution of the interface⁵.

Results

To begin with, the fluid pair is considered at the state of thermodynamic equilibrium to investigate the effect of the surface tension controlled through the Weber number (We), the degree of stratification controlled through the Froude number (Fr) and the relative thickness of the velocity profile as compared to the interface profile. Fig. 1 depicts the interface topology for three distinct values of the miscibility parameter r at the dimensionless time $t = 8$ for a fluid pair with $We = 1000$, $Re = 1000$, $\rho_r = 0.8$ and $Fr = 1$, where ρ_r is the density ratio. Our analysis reveals that the surface tension, in unison with the miscibility parameter, plays a key role in determining the threshold system temperature that allows the manifestation of the KH instability. A similar analysis, for a fluid pair considered very close to the

¹ Y. Kohno, S. Saita, K. Murata, N. Nakamura and H. Ohno, "Extraction of protein with temperature sensitive and reversible phase change of IL/Water mixture", Polym. Chem., 2, 862, (2011).

² D. Schmaljohann, "Thermo- and pH- responsive polymers in drug delivery" Adv. Drug Delivery Rev., 58, 1655-1670 (2006).

³ M.J. Fornerod, E. Amstad and S. Guldin, "Microfluidics of binary liquid mixtures with temperature dependent miscibility", Mol. Syst. Des. Engg., 5, 358, (2020).

⁴ A. Dubey, C. Habes, H. Marschall and S. Amiroudine, "Rayleigh-Taylor instability in binary fluids with miscibility gap", Phys. Rev. Fluids, 10, 084004, (2025).

⁵ A. Dubey and S. Amiroudine, "Kelvin-Helmholtz instability in binary fluids with miscibility gap", arxiv:2509.02400, (2025).

UCST, conducted by varying the external gravitational acceleration g demonstrated the independence of the KH instability on the Froude number. Further, a change in the degree of partial miscibility also impacts the nature of the vortex formation. A low degree of partial miscibility corresponds to a traveling vortex, i.e., the Holmboe instability. On the other hand, a higher degree of partial miscibility results in a stationary vortex, i.e., KH instability. Finally, we considered the fluid pair in a non-equilibrium configuration characterized by the simultaneous development of the hydrodynamic instability and the transition from an initially immiscible/partially miscible state to a completely miscible state. Consequently, two different time scales, namely the advection time scale and the diffusion time scale are involved. A parametric analysis revealed the competition between the advection induced sharpening of the interface and the diffusion induced broadening of the interface.

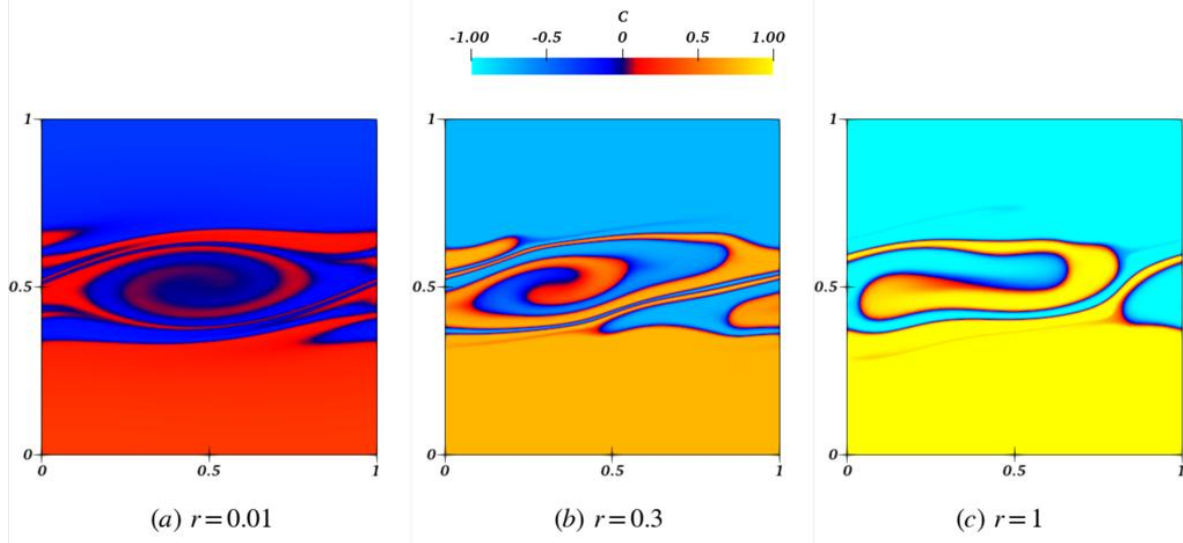


Fig. 1. Interface topology at $t = 8$ for three distinct values of the miscibility parameter : (a) $r = 0.01$, (b) $r = 0.3$ and (c) $r = 1$. The pertinent dimensionless numbers are $Re = 1000$, $We = 1000$, $Fr = 1$, $\rho_r = 0.8$.

The process of transition from the immiscible state to the miscible state is governed by the gradient of the chemical potential. Since the chemical potential is directly proportional to the surface tension of the fluid pair, we found the Weber number and the initial value of the miscibility parameter r to determine the stages involved in the transition process. For low initial surface tension, the advection effects dominate whereas for relatively higher surface tension, the diffusion effect dominates.

Conclusion and Perspective

The KH instability underpins the mixing in a variety of chemical processes thereby necessitating a thorough understanding specifically in case of diffuse interfaces. The numerical analysis is performed in a parametric space consisting of the Weber number, the Froude number and the Reynolds number. The results demonstrate the spatio-temporal evolution of the interface and the corresponding energy budget analysis and therefore form the first step towards efficient flow pattern tuning applications. Further investigations could be conducted by considering the effect of Marangoni flow arising due to local surface tension variation because of temperature variations in the non-equilibrium configurations.

- 2.12 Stokes number effects on inertial particles in turbulence under microgravity
J. Auzoux, F. Cabrera-Booman, K. Cardin, R. Pedurand, C. Wang, N. Plihon, M. Bourgoin, R.
Bayoàn Cal

Stokes number effects on inertial particles in turbulence under microgravity.

*Jérémie Auzoux^{1,2}, Facundo Cabrera-Booman^{1,2,3}, Karl Cardin^{1,4}, Richard Pedurand², Cheng Wang²,
Nicolas Plihon², Mickaël Bourgoïn², Raúl Bayoán Cal¹*

¹ Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland State University, Oregon, USA.

² Univ Lyon, ENS de Lyon, Univ Lyon 1, CNRS, Laboratoire de Physique, F-69342 Lyon, France.

³ Department of Mechanical Engineering, University of Nevada, Reno, NV 89557, USA.

⁴ Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Méditerranée, IRPHE, Marseille, France.

Abstract:

Volcanic ash transport, atmospheric pollution, and dust transport are examples of turbulent flows laden with particles. With the goal of advancing our understanding of these phenomena, we investigate experimentally the coupling of inertial and gravitational effects in the dynamics of heavy spherical particles in turbulence. To this end, several particle-to-fluid density ratios and particle diameters (i.e., different Stokes numbers) are explored in microgravity. Microgravity allows for the investigation of inertial effects by mitigating the competition with effects due to gravity (e.g., settling). A dedicated experiment was designed, built and is mounted in the Dryden Drop Tower at Portland State University which provides 2.1 seconds of microgravity. Particle Tracking Velocimetry is performed to access inertial and tracer particle trajectories simultaneously, allowing direct measurement of the slip velocity.

Introduction

The non-dimensional numbers that parametrize the particle-fluid coupling are the Stokes number $St = \tau_p / \tau_\eta$ (with $\tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2}$) and the Rouse number, or the settling parameter, $Ro = \tau_p g / u_{RMS}$. These two numbers are entangled, prohibiting a deep analysis of the dynamics of inertial particles in turbulent flows. The only way to decouple them is to modify gravity. To study the turbulent transport of inertial particles without gravitational influence, several numerical and theoretical works have considered the case of microgravity; however, only two experimental studies^{1,2} have been reported. This work presents experiments conducted in the Dryden Drop Tower at Portland State University in Oregon, which generates 2.1 seconds of microgravity. A custom experimental setup enables simultaneous Particle Tracking Velocimetry (PTV) of inertial and tracer particles, allowing direct measurement of slip velocity. The apparatus consists of a black aluminum frame, three high-speed cameras, six mirrors, three backlights, two water pumps, a cylindrical water tank within a hexagonal enclosure, 12 V batteries, and an electronic control system. This compact design fits the drop tower's rig. We explore the following Stokes numbers and Rouse numbers: $St = \{12, 23, 28, 52, 60\}$ and $Ro = \{6, 10, 16, 30, 35\}$, alongside tracer particles with $St = 0.1$ and $Ro = 0.19$. The experimental setup and preliminary findings will be discussed.

Results and discussion

Figure 1 shows a raw single-camera image with both inertial (large) and tracer (small) particles. The images are separated into two sets: one containing only inertial particles (b) and the other only tracers (c). The separation uses a morphological closing operation on the raw frames, which removes the small tracers while retaining the larger inertial particles (b). Subtracting this image from the raw frames yields the tracer-only images (c). In cases where tracers and inertial particles have similar size, alternative approaches may be required, such as monochromatic illumination, fluorescent tracers, and optical filtering. The 3D trajectories of both types of particles are then matched in time and space, and the slip velocity is computed with the tracers located inside the sphere depicted in sub-panel (d) in two dimensions and (e) in three dimensions.

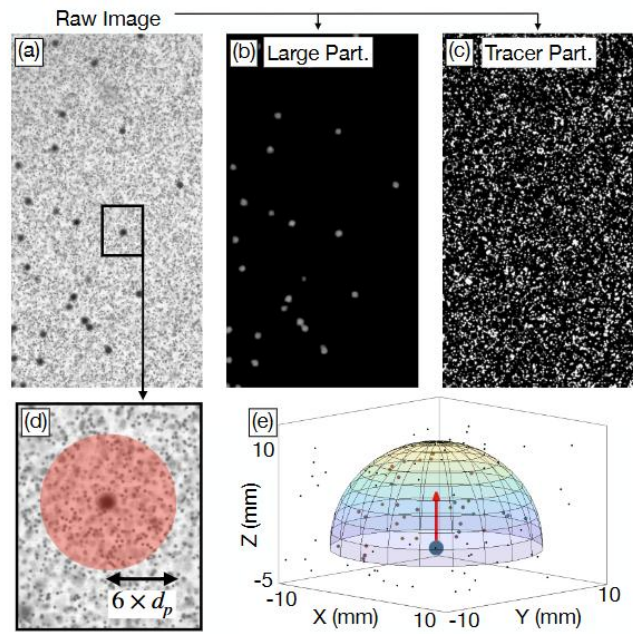


Figure 1: Protocol to obtain slip velocity.

Figure 2 shows the 3D trajectories of inertial and tracer particles under terrestrial and microgravity conditions. In terrestrial gravity, particles exhibit a preference for vertical motion with faster velocities. In microgravity, no clear directional preference is observed, and particle velocities are reduced by 25%. The observations reveal significant differences in Lagrangian correlation times, emphasizing the role of gravity in particle turbulence interactions, which are to be discussed in our talk.

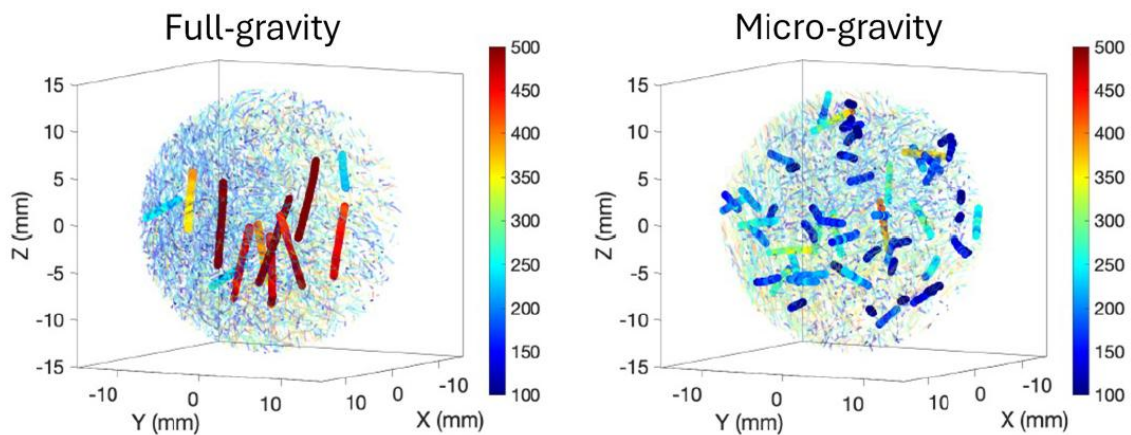


Figure 2: Tracers (small) and inertial particles (big) 3D tracks.

References

- ¹ W. Hwang and J.K. Eaton, International Journal of Multiphase Flow 32 1386-1396 (2006)
- ² Fallon, T and Rogers, C B, Experiments in Fluids 33, 233-241 (2002)

Session 3

Combustion, Milieux réactifs

- 3.1 DECLIC results with ALI-R onboard ISS : the quest for a true asymptotic behavior
Y. Garrabos, C. Lecoutre, **S. Marre**, I. Hahn

DECLIC results with ALI-R onboard ISS: the quest for a true asymptotic behavior

Yves Garrabos¹, Carole Lecoutre¹, Samuel Marre¹, Inseob Hahn²

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, ICMCB, UMR 5026, F-33600 Pessac, France

² Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, CA 91109, USA

The main scientific objectives of the “Heat and Mass transfer in near and supercritical fluids” research program, have been supported by CNES, ESA and NASA since early 2000. The experimental program has relied on the development and utilization of the DECLIC facility onboard the International Space Station (ISS), with more particularly the ALI-R insert, between 2018 and 2024. The fluid chosen for the experimentation is SF₆, considered as a model for these dense, universal, hyperdilatatable and hypercompressible fluids. Indeed, only the use of ALI-R with DECLIC, in such a stable microgravity environment, has allowed to approach the 100μK distance to the gas-liquid critical temperature for the required long duration periods. After completing the initial scientific program with the ALI insert (2011-2014), mainly dedicated to the boiling crisis study, the program has then been extended to the study of the critical universality of pure fluids, in the frame of the collaboration with Inseob Hahn (Caltech-JPL-NASA). A dedicated fluid cell was redesigned and placed in the refurbished ALI insert: ALI-R. In these new experiments, the knowledge of the cell density parameter $\Delta\rho = \rho - \rho_c$ is first precisely determined on ground. It can then be injected into the model equations describing the fluid behavior observed in microgravity, which use critical scaling power laws near the critical point.

Results

The parameter of interest for demonstrating the universal nature of the pure fluid behavior near their critical point is the turbidity. The latter can be measured with the DECLIC instrument by registering the light intensity transmitted through the fluid cell approaching the critical temperature. The behavior of this measured turbidity through the fluid, as a function of temperature, is then compared to theoretical model equations involving critical exponents, and in particular the Green-Fisher exponent η , for which there is still no precise experimental determination in the liquid-gas critical point system. However, as the quality of the measure can be improved by geometrical consideration for the fluid cell, a new one was designed for ALI-R experiments. All the *in-situ* temperature or pressure sensors were suppressed. The thickness of the cylindrical cell was reduced, and special care was given to have a symmetrical geometry for the internal volume occupied by the fluid. During the preparation of the cell on ground, and thanks to the possible access to the ground model of DECLIC located at CADMOS – CNES, it was then possible to optimize the choice of a fluid cell that had the most reduced critical density distance¹, estimated at 0.2%.

The dedicated experiments were run with ALI-R inside DECLIC onboard ISS, during 6 operational sequences, between January 2022 and May 2024. It was indeed possible to obtain 10 complete thermal cycles for the turbidity measurements with the optimized fluid cell. The repetition of the thermal cycles, and the excellent quality of the DECLIC thermal regulation better than 50μK for hours has allowed to obtain some experimental points in the reduced temperature range $(T - T_c) \leq 10^{-4}K$, where T_c is the critical temperature. For each cycle however, it was necessary to go over the critical temperature, and to decrease the temperature by steps, increasing the duration of the step when approaching the critical transition. In the vicinity of the critical point, the thermal diffusivity goes to zero, but thanks to the Piston Effect in such hypercompressible fluids, it was possible to achieve density equilibrium in a long but reasonable time. In addition, the hypercompressibility of the fluid makes it

¹ Y. Garrabos, C. Lecoutre, S. Marre, D. Beysens, and I. Hahn, Liquid-vapor rectilinear diameter revisited, Phys. Rev. E 97, 020101(R), (2018); C. Lecoutre, S. Marre, Y. Garrabos, D. Beysens, and I. Hahn, Near-critical density filling of the SF₆ fluid cell for the ALI-R-DECLIC experiment in weightlessness, Acta Astronautica 146 (2018) 243–248

very sensitive to any perturbation, such as the duration of the LED illumination for the periodic image capture, or movements of the ISS.

Conclusions and Perspectives

Figure 1 compares the turbidity results obtained with the ALI cell, filled with SF₆ at $\Delta\rho \sim 1\%$ (Figure 1a), with the ALI-R fluid cell at $\Delta\rho = 0.2\%$ (Figure 1b).

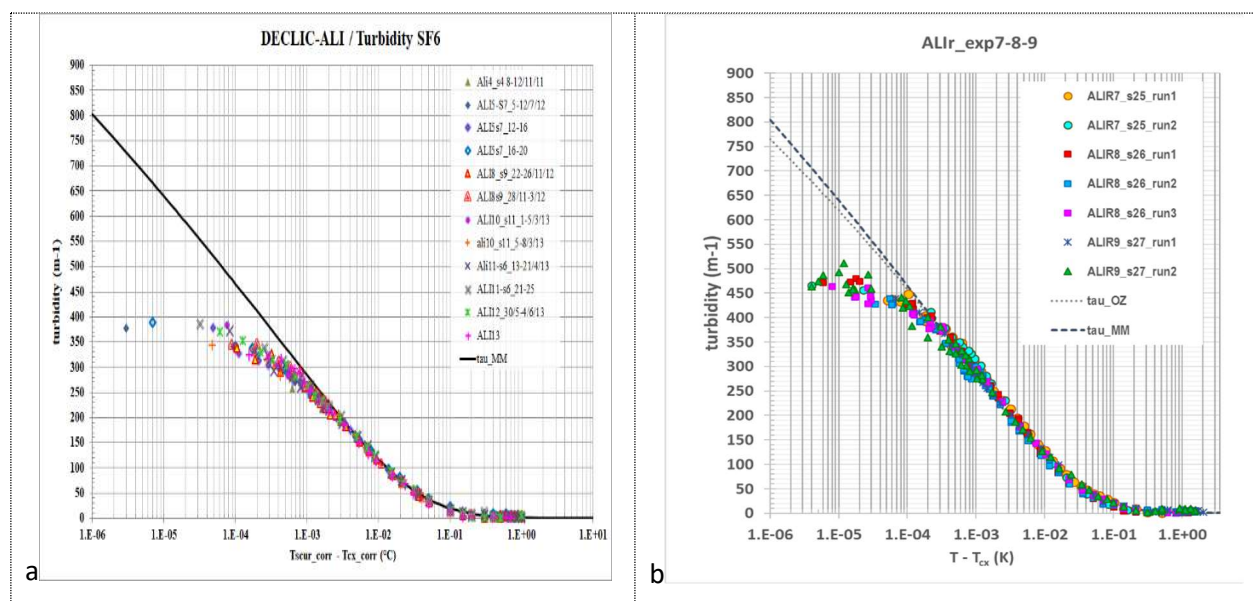


Figure 1: Turbidity measurements (a) in ALI cell (2015), and (b) in ALI-R (2024).

A rapid comparison shows that it was possible to improve the measurements by a decade in temperature, in the range $T - T_c \leq 100\mu K$, which was hardly obtained in the past. This was made possible thanks to the high precision of the DECLIC thermal regulation, the possibility to operate for long duration experiments onboard ISS, and the flexibility of the operational commanding of DECLIC with CADMOS. However, this might not be sufficient to determine with the expected precision the value of the Green Fisher η critical exponent, illustrating the difficulty of experimentations when approaching the critical point in such pure fluids. The total amount of turbidity results is now under analysis. A post-flight ground campaign is also in progress at CADMOS-CNES, to verify that the fluid cell that was operated onboard ISS until 2024, has kept the same density filling as when prepared on ground in 2016, and also to try to determine the origin of some DECLIC temperature measurements drifts.

Publications

- A. Oprisan, S.-A. Oprisan, Y. Garrabos, C. Lecoutre-Chabot, D. Beysens, Identification of liquid–vapor phase transition using the co-occurrence matrix and Haralick features, Measurement 257, 118516 (2026), <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118516>
- D. Lasseux, B. Zappoli, S. Marre, Y. Garrabos, Heat transfer in a near-critical fluid saturated porous medium: Piston effect and viscous slowing down, Physical Review Fluids 9, 124402 (2024), <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.124402>
- D. Sharma, O. Nguyen, F. Palencia, C. Lecoutre, Y. Garrabos, S. Glockner, S. Marre, A. Erriguible - Supercritical water oxidation using hydrothermal flames at microscale as a potential solution for organic waste treatment in space applications – A practical demonstration and numerical study, Chemical Engineering Journal 488 (2024), 150856, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150856>
- Y. Garrabos, C. Lecoutre, S. Marre, I. Hahn - Crossover Master Model of the Equation-of-State for a Simple Fluid: Critical Universality, International Journal of Thermophysics (2024) 45:78, <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03359-7>

3.2 Effects of gravity and pressure on soot production in opposed flame flow along an idealized polyethylene wire

J.-L. Consalvi, Y. Li, J.-M. Citerne, A. Guibaud, G. Legros

Effects of gravity and pressure on soot production in opposed flame flow along an idealized polyethylene wire

Jean-Louis Consalvi¹, Yuato Li², Jean-Marie Citerne³, Augustin Guibaud⁴, Guillaume Legros³

¹ Aix-Marseille Université IUSTI UMR 7343 5 rue E. Fermi 13453 Marseille

² Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London, Gower Street, London, WC1E 6BT, United Kingdom

³ Sorbonne University, CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Paris F-75005, France

⁴ NYU Tandon School of Engineering, Brooklyn, 11201, NY, USA

The global objective of this project is to interpret the experiments of flame spread over solid materials, performed in DIAMONDS at both micro or reduced gravity, in presence or not of fire retardants. A specific objective is to understand how the ambient conditions affect soot production and emission from a flame as smoke emission significantly enhances the fire hazard in confined spacecraft by obstructing the crew's action [1]. Previous works have focused on the effects of pressure, air flow and oxygen content in the oxidizer. The present analysis concerns the effects of gravity as national space agencies ambition future missions to the Moon and to Mars [2], that feature intermediate gravity levels of $0.16g_0$ for the Moon and $0.38g_0$ for Mars, $g_0=9.81\text{m/s}^2$ being the gravitational acceleration observed on Earth.

This work presents a scaling analysis to explain the effects of gravity and pressure on soot production. This analysis will serve to explain the recent results obtained in DIAMONDS. The notations are provided in Fig. 1.

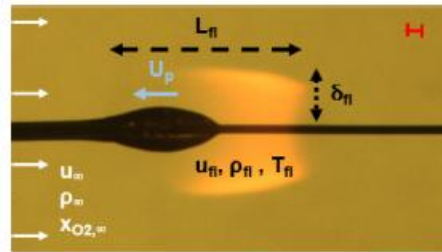


Figure 1. Main features of the flame geometry and subsequent notations adopted, over a backlighting frame imaging a flame spreading in opposed flow conditions in microgravity. A 1 mm scale is displayed in the upper right corner.

The analysis is based on the following assumptions :

- 1 The flow is assumed to be steady and axisymmetric.
- 2 A simple one-step reaction $F + SO_2 \rightarrow (1 + S)Pr$, where S is the oxidizer/fuel mass ratio.
- 3 The combustion is assumed to be complete, i.e. all the fuel is oxidized at the flame tip with L_{fl} denoting the stoichiometric flame length.
- 4 The Schmidt number is assumed to be equal to 1 ($Sc = \mu_{fl}/\rho_{fl}D_{fl} = 1$, where μ_{fl} , ρ_{fl} and D_{fl} are the viscosity, the density and the species diffusivity at the flame tip).
- 5 Gas phase thermal properties, namely gas conductivity, k_{fl} , and, viscosity, μ_f , vary with flame temperature and pressure as: $k_{fl} \sim P^0 T_{fl}^{1/2}$ and $\mu_{fl} \sim P^0 T_{fl}^{1/2}$.
- 6 The flame temperature can be expressed as $T_{fl} = T_\infty + (1 - X_R)\Delta h_c / [(1 + S)c_p]$, where X_R represents the radiative loss and Δh_c the heat of combustion. We assume that the flame temperature is not significantly affected by the levels of gravity and pressure.
- 7 The soot formation reaction rate can be expressed as follows $\dot{\omega}_{SF}''' = \frac{1}{L_{Sp}} g\left(\frac{Z-Z_{st}}{1-Z_{st}}, T_{fl}\right) P^n$ where Z and Z_{st} are the mixture fraction and the stoichiometric mixture fraction, and L_{Sp} is the laminar smoke point height used to characterize the effects of fuel sooting propensity. We

assume that the polyethylene pyrolysis products remain the same for different levels of gravity and pressure, leading to fixed value L_{Sp} and Z_{st} . n was found equal to 3 in microgravity [3].

The flame length can be expressed as :

$$L_{fl} \sim \frac{\dot{m}_p}{(1+S)\mu_{fl}} \quad (1)$$

The flow characteristic velocity is estimated as the sum of the forced component, u_∞ and buoyancy-induced component, $u_B = \sqrt{\frac{\Delta T}{T_\infty} g L_{fl}}$:

$$u_f \sim u_\infty + \sqrt{\frac{\Delta T}{T_\infty} g L_{fl}} \quad (2)$$

The flow residence time is then estimated as:

$$t_{res} \sim \frac{L_f}{u_\infty + \sqrt{\frac{\Delta T}{T_\infty} g L_{fl}}} \quad (3)$$

The soot volume fraction, f_s , evolves as:

$$\rho_s \frac{Df_s}{Dt} \sim \frac{\rho_s f_{s,max}}{t_{res}} = \dot{\omega}_{SF}''' = \frac{1}{L_{Sp}} g \left(\frac{Z - Z_{st}}{1 - Z_{st}}, T_{fl} \right) P^n \quad (4)$$

Leading to:

$$f_{s,max} \sim \frac{\dot{m}_p P^n}{u_\infty + \sqrt{\frac{\Delta T}{T_\infty} g L_{fl}}} \quad (5)$$

This analysis shows that increasing g is expected to reduce the soot volume fraction, which is observed experimentally. In addition, increasing g limits the conditions where the transition from a smoking to a non-smoking flame is observed.

References

- [1] A Guibaud, G Legros, JL Consalvi, J Torero, Fire safety in spacecraft: Past incidents and Deep Space challenges, Acta Astronautica vol. 195, pp. 344-354, 2022.
- [2] National Research Council, Recapturing a Future for Space Exploration: Life and Physical Sciences Re-42 search for a New Era, The National Academies Press, 43 Washington, DC, 2011.
- [3] Augustin Guibaud, Jean-Marie Citerne, Jean-Louis Consalvi, Guillaume Legros, On the effects of opposed flow conditions on non-buoyant flames spreading over polyethylene-coated wires – Part I: Spread rate and soot production, Combustion and Flame, vol. 220, pp. 530-543, 2020.

- 3.3 Far-field signature of flame spreading in microgravity over cylindrical samples
Y. Li, J.-M. Citerne, A. Guibaud, J.-B. Renard, **G. Legros**

Electro-acoustic perturbations of flame spread in microgravity - latest results with UNBURNIT

*J.-M. Citerne,¹ A. Bonhoure,^{1,2} A. Guibaud,^{1,2} J.-L. Consalvi,³ Y. Li,⁴ K. Hiraga,⁵ Y. Konno,⁵ O. Fujita,⁵
N. Hashimoto,⁵ A. Matynia,¹ G. Legros¹*

¹ Sorbonne Université, CNRS, Inst. d'Alembert, F-75005 Paris, France

² Dept. of Mechanical Engineering, New York University, New York City, USA

³ Aix-Marseille Université IUSTI UMR 7343 5 rue E. Fermi 13453 Marseille

⁴ University College London, London, UK

⁵ Div. Mechanical and Space Engineering, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan

Context

In this report is outlined our contribution to the international topical team SAFE COSMOS. This group of experts have collaborated for a decade to improve fire safety in manned spacecraft. Among other achievements, the topical team was associated to experiments designed by NASA to investigate fire spread in real conditions (SAFFIRE project).

The experimental rig DIAMONDS (Detection of Ignition and Adaptive Mitigation Onboard for Non-Damaged Spacecrafts) has been developed at Sorbonne Université within this context. DIAMONDS allows for investigations in parabolic flights on the flame spread over solid samples. As a partner of the FLARE project ('Flammability Limits At REDuced gravity') lead by Pr Osamu Fujita and funded by JAXA, DIAMONDS was designed to integrate the configuration that will be investigated in KIBO aboard the ISS at the end of year 2025, i.e. a flame spreading over a cylindrical sample in an oxidizer flow parallel to the sample's axis at reduced gravity [1]. As partners of NASA, we will conduct an ESA parabolic flight campaign at lunar gravity in November to document the flow conditions that allow flame over flat samples to spread.

Within the context of Y. Li's Ph.D. works (2019-2022), some of the efforts have been devoted to the far-field signature of flame spreading in microgravity [2]. These efforts address the issue of detection that is the preliminary step when active mitigation is to be imagined. This active mitigation has been envisioned for a couple of years by J.-M. Citerne and A. Guibaud. This lead to the design and the successful completion of a new rig, called UNBURNIT (UNconventional BURNing Response to Non-Invasive Techniques). UNBURNIT capitalized on DIAMONDS' achievements and allows the flame spread over cylindrical samples to be mitigated by perturbations of the surrounding conditions. While the data obtained with UNBURNIT are currently processed, the analysis of soot far-field detection, i.e. at the exhaust of DIAMONDS, unveiled peculiarities that can be attributed to non-buoyant flame spread [1].

Results

The works with UNBURNIT focused on the study on the perturbations of the flames that DIAMONDS extensively documented earlier. The schematic of UNBURNIT is shown in Fig.1. The starting point of any test is the flame spread over the LDPE coating of the wire in microgravity. The unperturbed flame has been proven to be the one observed with DIAMONDS. Then a perturbation is triggered by the actuation of a speaker and/or an electrode, providing an acoustic and/or an electric perturbation.

As a function of the frequency and the acoustic pressure, the acoustic perturbation can first lead to a surprisingly steady tube shape of the flame, that is stretched as compared to the unperturbed one. In such a case the perturbation acts as an accelerator of the spread due to the locally enhanced mixing between the oxidizer and the fuel. For higher level of acoustic energy, the perturbation leads to a shaky ring shape of the flame. Still the flame may survive the 4s long perturbation. At some point, the perturbation can lead to the extinction of the flame, leaving travelling wisps of smoke. While the data are still processed, microgravity already unveils the domain of the flame's tube shape that burning at normal gravity does not display.

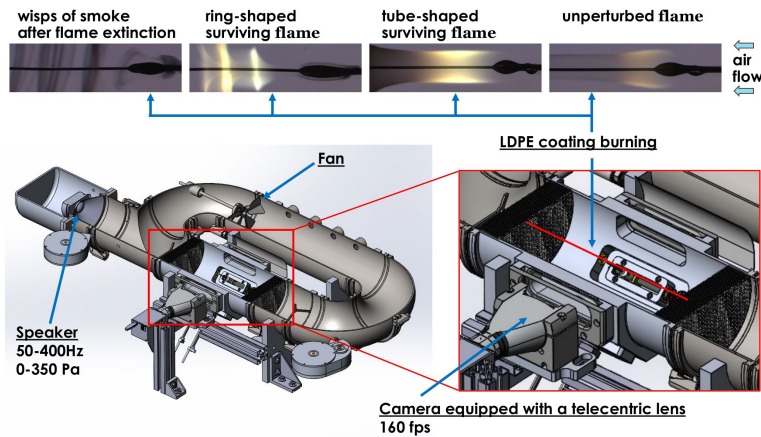


Figure 1: Schematic of the UNBURNIT setup. Following the frequency and the level of acoustic pressure, the acoustic perturbation of the flame spreading in microgravity (unperturbed flame) can lead to a steady tube shape of the flame, a shaky ring shape of the flame, or the extinction of the flame.

Following the above extinction strategy, we combined acoustic and electric perturbations, as displayed in Fig.2. The frequency and the acoustic pressure were selected so that the phenomenology should be that of the so-called « ring-shaped surviving flame » (see Fig.1). Before triggering the acoustic perturbation, we actuated a sudden high electric voltage (2kV) between the metallic core of the sample and a ring whose vertical shadow is seen on the frames shown in Fig.2. The flame is then reversed, especially due to the electropositive feature of the soot particles. This lead to a flame that does not cover the burning polyethylene anymore. The « weak » acoustic perturbation is eventually able to lead to the flame extinction.

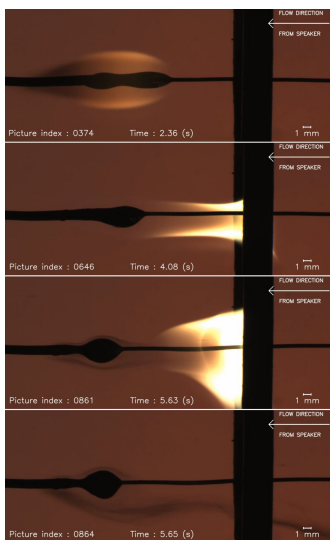


Figure 2: Sequence of frames along an electro-acoustic perturbation of a flame spreading in microgravity over the axisymmetric polyethylene coating a metallic core. From top to bottom: flame spreading at a steady rate; flame reversed by the DC electric voltage; flame reversed by the DC electric voltage and perturbed by the acoustic wave; flame extinction.

Perspectives

Augustin Schmitt will start his Ph.D. co-funded by CNES and the Académie Spatiale d'Ile de France. His investigations in the coming years will focus especially on active mitigations of the flame spread with UNBURNIT.

Publications

- [1] Y. Li, A. Guibaud, J.-M. Citerne, T. Seon, J.-L. Consalvi, G. Legros, Cyclic pattern along the downward flame spread over cylindrical samples in partial gravity, Proc. Combust. Inst. 40, 105255, 2024.
- [2] Y. Li, A. Guibaud, J.-M. Citerne, J.-B. Renard, G. Legros, Far-field signature of fire in low gravity: Influence of ambient oxygen content and pressure on size distribution of smoke particles, Proc. Combust. Inst. 40, 105288, 2024.

3.4 Understanding flame-retarded materials for space-like environments
J. Sarazin, **S. Bourbigot**

Understanding flame-retarded materials for space-like environments

Johan Sarazin¹ and Serge Bourbigot^{1,2}

¹ Univ. Lille, CNRS, INRAE, Centrale Lille Institut, UMR 8207 - UMET - Unité Matériaux et Transformations, F-59000 Lille, France,

²Institut Universitaire de France, Paris, France

Fire safety in the context of space exploration is a critical issue to ensure crew survival and the protection of infrastructures. In confined environments and under microgravity, a fire can have catastrophic consequences, especially since most materials used onboard are organic polymers, which are inherently combustible. Future spacecraft and space habitats are expected to operate with reduced-pressure, oxygen-enriched atmospheres (up to 35% O₂ at around 60 kPa) in order to maintain normoxic conditions [1]. This technological choice serves several objectives: to minimize the risks of decompression accidents, to shorten the preparation time for extravehicular activities (EVA), and to reduce the overall structural weight while limiting the mechanical constraints associated with the pressure differential (ΔP) between the pressurized cabin and the vacuum of space. However, this “low-pressure/high oxygen” combination significantly increases the fire risk: oxygen enrichment drastically enhances the flammability of polymers and accelerates flame propagation. Studies conducted over the past decade have clearly demonstrated the increased flammability of polymers such as PMMA under these conditions [1–4], and similar behavior is expected for other conventional thermoplastics, whose limiting oxygen index (LOI) typically lies between 17 and 20 vol% [5].

In this context, the development and evaluation of flame-retardant (FR) materials suitable for oxygen-enriched atmospheres are essential. Among the solutions investigated, intumescent systems based on polypropylene (PP), ammonium polyphosphate (APP), and pentaerythritol (PER) are of particular interest, especially with the addition of the synergist Zeolite 4A. Results obtained using a dedicated experimental bench developed in the laboratory to study fire behavior under oxygen-enriched atmospheres highlight the importance of understanding the protective mechanisms associated with the formation of the intumescent char layer and the role of the synergist, as well as the direct impact of oxygen on the effectiveness of these formulations. Furthermore, thermogravimetric analyses emphasize the influence of pressure conditions (ΔP) on the thermal decomposition of the systems, showing that variations in atmospheric parameters alone can significantly alter their behavior

Résultats

This study highlighted the effect of the intumescent formulation with and without Zeolite 4A (Z4A) on fire behavior, showing a significant improvement of the limiting oxygen index (LOI), from 17% for neat polypropylene (PP) to 34% for the intumescent system containing the synergist.

The use of an experimental bench simulating fire conditions in oxygen-enriched atmospheres made it possible to evaluate the influence of O₂ concentration on fire behavior. The results show a substantial increase in heat release: for PP, the peak heat release rate (pHRR) increases by +54% and the total heat released (THR) by +25%. For intumescent formulations, these increases reach +100% for pHRR and +50% for THR, and up to +60% with the addition of the synergist. Nevertheless, the effectiveness of Z4A is clearly demonstrated: at 21% [O₂], the reduction in pHRR improves from –58% (intumescent system alone) to –71% with the synergist; at 35% [O₂], this reduction improves from –43% to –62% (Figure 1).

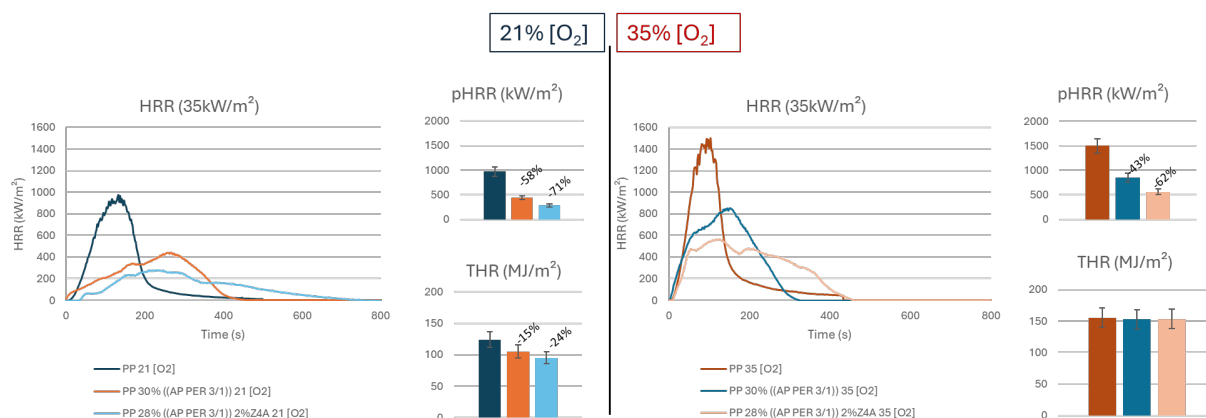


Figure 1. Evaluation of the fire reaction of PP (APP/PER) systems with and without zeolite under two environments: 21% [O₂] and 35% [O₂].

Gas-phase and condensed-phase analyses provide additional insights. In oxygen-enriched atmospheres (35% [O₂]), combustion is more vigorous, characterized by a decrease in the amount of opaque smoke and an increase in CO₂ concentration, indicating a reduction in soot formation. The study of the condensed phase reveals that the morphology of the intumescent layers is strongly influenced by the atmosphere, which alters the development of the protective barrier. Furthermore, spectroscopic analyses (¹³C and ³¹P NMR, Raman) performed at different characteristic times highlight the role of Z4A through the formation of ultraphosphates and the disruption of the carbonaceous structure.

Finally, the study of thermal decomposition under normoxic conditions confirmed the combined influence of oxygen concentration and pressure differential (ΔP) on the degradation mechanisms of the materials, affecting both the decomposition kinetics and the amount of residual char formed.

Perspectives

This work provides deeper insights into the protective mechanisms of intumescent systems under oxygen-enriched atmospheres and explores the effect of reduced-pressure conditions on the thermal stability and decomposition of these materials, within the broader perspective of designing safer materials for space environments.

Publications

- [1] Thomsen M, Fernandez-Pello C, Huang X, Olson SL, Ferkul PV, Opposed flow burning of PMMA cylinders in normoxic atmospheres, *Fire Safety Journal*, 2019;110.
- [2] Thomsen M, Fernandez-Pello C, Huang X, Olson S, Ferkul P, Buoyancy Effect on Downward Flame Spread Over PMMA Cylinders, *Fire Technology*, 2019.
- [3] Thomsen M, Fernandez-Pello C, Urban DL, Ruff GA, Olson SL, On simulating concurrent flame spread in reduced gravity by reducing ambient pressure, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019;37: 3793-800.
- [4] Fereres S, Lautenberger C, Fernandez-Pello C, Urban D, Ruff G, Mass flux at ignition in reduced pressure environments, *Combustion and Flame*, 2011;158: 1301-06.
- [5] Cullis CF, Hirschler MM, Tao QM, Studies of the effects of phosphorus-nitrogen-bromine systems on the combustion of some thermoplastic polymers, *European Polymer Journal*, 1991;27: 281-89.

- 3.5 Flammes pauvres d'ammoniac/hydrogène en microgravité : étude expérimentale et théorique
S. Zitouni, R. Glaznev, J. Beeckman, C. Rousselle, C. Chauveau, **F. Halter**

Flammes pauvres d'ammoniac/hydrogène en microgravité : étude expérimentale et théorique

Seif Zitouni^{1,2}, Roman Glaznev³, Joachim Beeckmann³, Christine Rousselle¹, Christian Chauveau², Fabien Halter^{1,2}

¹Université Orléans, INSA CVL, PRIMSE, UR4229, Orléans, France

²CNRS-INSIS, ICARE, 45071 Orléans, France

³Institute for Combustion Technology, RWTH Aachen University, 52056 Aachen, Allemagne

Dans le cadre de la transition vers des énergies décarbonées, l'ammoniac (NH_3) est considéré comme un vecteur énergétique prometteur en raison de son absence de carbone, de sa facilité de stockage et de son infrastructure de production déjà existante. Néanmoins, sa faible réactivité, sa vitesse de flamme laminaire très basse et son comportement instable en combustion posent de nombreux défis. Pour pallier ces limitations, l'addition d'hydrogène (H_2), plus réactif, est une stratégie étudiée afin d'améliorer la stabilité de la flamme. Une limitation majeure réside dans la faible vitesse de propagation des flammes à base de NH_3 , qui rend ces dernières particulièrement sensibles aux effets de la gravité (convection naturelle, pertes radiatives, instabilités de flamme). En effet, les déformations de la flamme induites par la gravité peuvent altérer significativement la propagation de cette dernière ainsi que sa réponse à l'étirement. Cette étude se concentre sur des mélanges pauvres NH_3/H_2 à une richesse de $\phi = 0,6$, avec des fractions volumiques en H_2 allant jusqu'à 15 %. L'objectif est de caractériser la vitesse de flamme laminaire (S_L^0) et la longueur de Markstein (L_b), deux grandeurs essentielles pour la validation des modèles cinétiques et la conception de systèmes de combustion stable. Pour cette étude, les expériences en microgravité ont été réalisées à ZARM (Center of Applied Space Technology and Microgravity) dans la tour GraviTower Bremen, fournissant une gravité résiduelle inférieure à 10^{-4} g pendant des chutes de 2,4 s. Le dispositif expérimental comprend une chambre de combustion sphérique de 100 mm de diamètre intérieur, avec des fenêtres optiques de 25 mm de rayon¹. La propagation de la flamme a été enregistrée par imagerie Schlieren à haute vitesse (9500 fps) avec une résolution spatiale d'environ 0,05 mm par pixel.

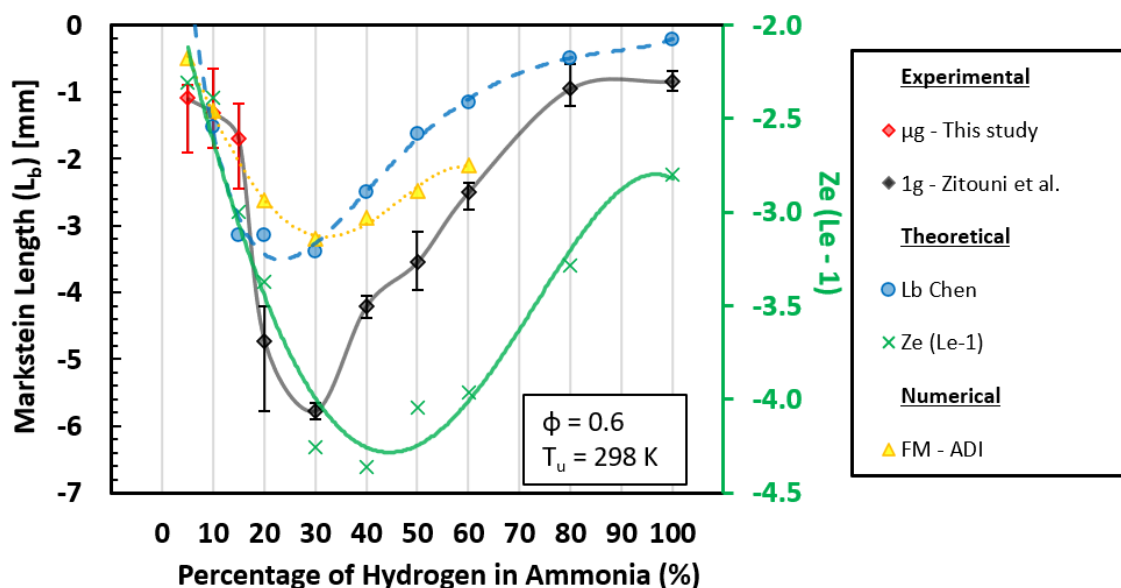
Resultats

Figure 1 : Comparaison des L_b mesurés, théoriques et numériques en fonction de la teneur en H_2 dans NH_3 – comparaison avec $Ze (Le - 1)$

Les données expérimentales montrent une croissance exponentielle de la vitesse de flamme laminaire S_L^0 avec la fraction d'hydrogène. Les résultats obtenus avec le mécanisme POLIMI 2023² reproduisent

¹ Glaznev R. et al., Proc. Combust. Inst., 2024.

² Stagni A. et al., Chem. Eng. J., 2023.

bien les mesures pour des mélanges contenant plus de 10 % H_2 . En revanche, plusieurs mécanismes ont montré des difficultés à converger pour des mélanges riches en ammoniac. La Figure 1 présente les longueurs de Markstein (L_b) mesurées dans cette étude, comparées à celles issues d'une étude précédente³. L'évolution de L_b présente une tendance non monotone marquée : une réduction modérée de la sensibilité à l'étirement est observée jusqu'à 15 % H_2 , atteignant un minimum autour de 30 % H_2 . Notamment, l'ajout de seulement 5 % de H_2 dans NH_3 suffit à induire un comportement à l'étirement similaire à celui de l'hydrogène pur. Cette tendance non linéaire est cohérente avec l'influence combinée du nombre de Zel'dovich (Ze) et du nombre de Lewis (Le), qui caractérisent ensemble l'instabilité thermo-diffusive (axe vert sur la Fig. 1). L'instabilité la plus prononcée apparaît pour une teneur en H_2 de 30 %, en accord avec les résultats obtenus dans des conditions plus riches ($\phi = 0,8$) et pour des mélanges plus concentrés en H_2 (~40 %)⁴. Pour une comparaison qualitative, le modèle analytique de Chen et Ju⁵, qui relie L_b à Le, est également représenté sur la Figure 1. Ce modèle reproduit efficacement le comportement non monotone associé aux effets thermo-diffusifs. En complément, des simulations numériques de flammes sphériques transitoires, réalisées avec le mécanisme NUIG 2024⁶ en utilisant la même procédure d'extrapolation que celle des expériences (courbe FM dans la Fig. 1), montrent une bonne cohérence qualitative. Ces simulations capturent bien la tendance, bien que les valeurs de L_b obtenues soient plus proches de celles du modèle théorique que des données expérimentales. Il est important de noter que les résultats sont sensibles à la définition des paramètres fondamentaux de la flamme (Ze, Le) utilisés dans les modèles analytiques, ce qui justifie des investigations complémentaires.

Perspectives

Les travaux menés conjointement par CNRS-ICARE et ITV-RWTH Aachen University ont permis d'avancer dans la compréhension des flammes lentes, tant pour l'étude de nouveaux vecteurs énergétiques que pour des questions de sécurité en conditions de gravité réduite. Ces recherches sont conduites en tour de chute libre et lors de vols paraboliques à bord de l'Airbus A310 Zero G, en collaboration avec le CNES (VP181-67) et le DLR (VP45). L'équipe française (Fabien Halter, Christian Chauveau) sera prochainement renforcée par une doctorante, Assyl TAHRI (décembre 2025, contrat doctoral ministériel), dont la thèse s'intégrera pleinement au projet soutenu par le CNES.

Les objectifs scientifiques sont de :

- i) caractériser l'allumage et la propagation des flammes lentes en microgravité ;
- ii) étudier l'effet de la gravité (terrestre, réduite, martienne, lunaire) sur leurs régimes de stabilité ;
- iii) établir des modèles cinétiques fiables pour la simulation ;
- iv) décrire le comportement des flammes froides ;
- v) analyser l'influence des effets radiatifs sur la propagation.

Publications

Zitouni S., Glaznev R., Pitsch H., Beeckmann J., Brequigny P., Mounaim-Rousselle C., Halter F., Accounting for buoyancy and ignition influence in the experimental measurement of laminar flame speeds and Markstein lengths from spherical ammonia/air flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2025, in press.

Glaznev R., Schwenzer C., Halter F., Hesse R., Chauveau C., Pitsch H., Beeckmann J., The Effect of Low Temperature Chemistry in Nitrogen-Diluted Mixtures under Microgravity, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2025, in press.

Glaznev R., Schwenzer C., Hesse R., Girhe S., Halter F., Chauveau C., Pitsch H., Beeckmann J., Ultra-slow ammonia flame speeds — A microgravity study on radiation, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024 Vol. 40 Issue 1-4

³ Zitouni S. et al., Combust. Flame, 2023.

⁴ Lehmann T. et al., Combust. Flame, 2024.

⁵ Chen Z. et al., Proc. Combust. Inst., 2009.

⁶ Zhu et al., Combust. Flame, 2023.

- 3.6 Flow driven precipitation reaction fronts in radial geometry under microgravity
V. Pimienta, C. Roux, G. Schusztter, D. Horvath, A. Toth, K. Schwarzenberger, K. Eckert, A. De Wit

Flow driven precipitation reaction fronts in radial geometry under microgravity

V. Pimienta¹, C. Roux¹, G. Schusztar², D. Horvath², A. Toth², K. Schwarzenberg³, K. Eckert³, A. De Wit⁴

¹ Laboratoire Softmat, UMR 5623 CNRS, Université de Toulouse, Toulouse

² Department of Physical Chemistry and materials Science, University of Szeged

³ Institute of Process Engineering and Environmental Technology, Universität Dresden

⁴ Service de Chimie Physique et Biologie Théorique, Université Libre de Bruxelles

Ces travaux sont effectués dans le cadre d'un projet ESA intitulé "Chemo-hydrodynamic pattern formation at interfaces" (CHYPI). Notre objectif est l'étude des instabilités, et de l'organisation spatiale qui en découle, résultant du couplage entre réactions chimiques et écoulements hydrodynamiques. Ces couplages sont complexes, les conditions hydrodynamiques influencent la réaction qui en retour peut modifier les écoulements.

Nous étudions la dynamique de fronts réactifs $A+B \rightarrow C$ dans les écoulements radiaux (fronts de Réaction-Diffusion-Advection). Les études sont menées dans l'espace confiné à deux dimensions d'une cellule de Hele-shaw contenant l'un des deux réactifs, le deuxième est injecté à partir d'un point source au centre de la cellule. Cette géométrie radiale implique, contrairement à une géométrie rectiligne, une diminution du débit et une augmentation de la zone de contact, et donc du front de réaction, avec la distance par rapport au point d'injection.

Les résultats présentés ici concernent les techniques et les résultats obtenus au cours des missions CDIC IV et V (en cours). Pour CDIC IV, les travaux réalisés au cours du vol parabolique CHYPI (73rd ESA PF Campaign) et de la mission Texus 57 mettaient en jeu un système réactif homogène^{1,2}. Pour ce nouveau projet CDIC-V, l'objectif est de mettre en évidence, en utilisant les conditions de microgravité, le rôle relatif des changements de flottabilité, de viscosité et de perméabilité sur les fronts de réaction lors de réactions de précipitation. La réaction choisie est la réaction de précipitation du carbonate de calcium. Les premières expériences en microgravité ont été effectuées en vol parabolique (43rd DLR parabolic flight campaign) en septembre 2024.

La connaissance fondamentale des phénomènes de précipitation en écoulement est essentielle pour diverses applications telles que le transfert de matière induit par précipitation en milieu poreux utilisé dans les technologies de séquestration du CO₂ ou d'assainissement des sols. Une deuxième application est la production sélective de polymorphes minéraux, non accessibles en réacteur fermé³. Ils peuvent présenter un intérêt pharmaceutique ou pour la formation de conduits micro fluidiques auto organisés⁴.

Résultats

L'étude du système homogène, la réaction choisie implique deux solutions réactives incolores qui forment à leur contact une substance rouge. Le front est alors bien visible et peut être caractérisé par sa vitesse et sa largeur. Sur terre, le front de réaction est déformé car la solution A injectée est moins dense que B, cet effet est amplifié en hyper-G et disparaît en microgravité. Cette déformation a pour effet une augmentation de la zone de contact entre les deux fluides et donc du rendement de réaction. Lorsque l'expérience est effectuée sur terre on observe de plus une instabilité qui se développe avec l'avancée du front. Des stries caractéristiques de la formation de rouleaux de convection observés lors d'instabilités de Rayleigh-Taylor. La stratification stable en début d'injection devient instable car la déformation du front entraîne le fluide le plus dense au-dessus.

¹ Vailati, A et al. , npj Microgravity, 9(1), (2022).

² Stergiou, Y. et al., Physical Review Fluids, 7(11), (2022).

³ Adam, R et al. RSC advances 14(53), (2024)

⁴ Cartwright, J et al. Artificial life, 26(3), (2020)

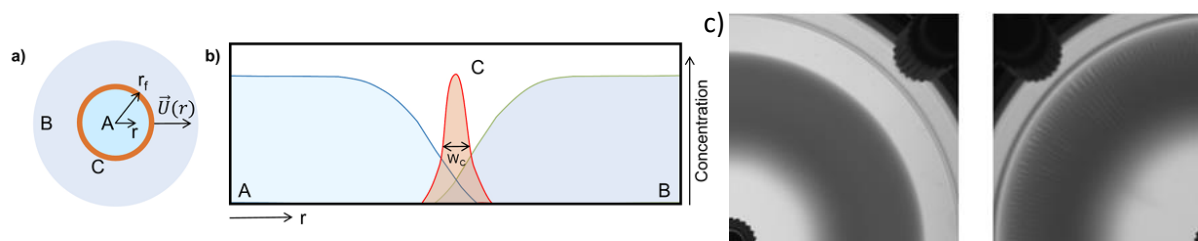


Figure 1 : Représentation schématique d'un front RDA radial : en vue de dessus (a) et profil de concentration en vue transversale (b). (c) Front de réaction observé en vol parabolique (gauche) et sur terre (droite) on observe la formation de stries.

Pour la mission CDIC-V, la réaction choisie est la précipitation du carbonate de calcium. Pour cela, le réactif A injecté dans la cellule est le carbonate de sodium (Na_2CO_3) et le composé B, initialement présent dans la cellule est le chlorure de calcium (CaCl_2). Le dispositif utilisé pour le vol parabolique est une version modifiée de celui utilisé pour le vol parabolique CDIC-IV : un carrousel muni de 3 cellules de Hele-Shaw et de 3 réacteurs capillaires rectangulaires. Ces capillaires permettent une vue de profil du front mais également d'analyser la formation de polymorphes d'intérêts par spectroscopie RAMAN.

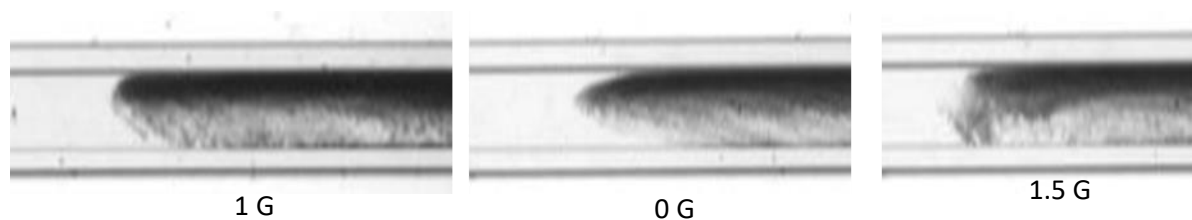


Figure 2 : profil du front de réaction en tube capillaire obtenu au cours du vol parabolique.

On observe une déformation du front similaire à celle obtenue en milieu homogène, dissymétrique en conditions terrestres et symétrique en microgravité. Une forte sédimentation est observée lors de la transition en hyper-G. Le travail préparatoire en vol parabolique est indispensable afin de tester les phases de remplissage des deux types de réacteurs. De plus, la répétition des phases micro-g nous permettent de tester un nombre important de situations et de sélectionner les débits et les dimensions du système pour une réponse optimale lors de la mission en fusée-sonde.

Perspectives

Notre consortium a répondu à l'AO-2022-Sounding Rocket de l'ESA pour lequel nous avons reçu une réponse positive et l'engagement d'une possibilité de vol en fusée sonde courant 2026 (sur MASER ou TEXUS). Les résultats obtenus lors du vol parabolique orienteront nos choix pour les conditions expérimentales.

Publications

Y. Stergiou, M.J.B. Hauser, A. Comolli, F. Brau, A. De Wit, G. Schuszter, P.Papp, D. Horváth, C. Roux, V. Pimienta, K. Eckert, K. Schwarzenberger, Effects of gravity modulation on the dynamics of a radial $\text{A}+\text{B}\rightarrow\text{C}$ reaction front, Chemical Engineering Science, Volume 257, 2022.

Bere K.V., Nez E., Balog E., Janovák L., Sebok D., Kukovecz Á., Roux C., Pimienta V., Schuszter G., Enhancing the yield of calcium carbonate precipitation by obstacles in laminar flow in a confined geometry, PCCP, 23, 2021.

Session 4

Interfaces fluides, interfaces fluide-solide,
ébullition, condensation, bulles, gouttes

4.1 Modélisation de la capillarité

O. Millet, A. Logerot

Modélisation de la capillarité

Olivier Millet, Antoine Logerot

LaSIE, UMR-CNRS 7356, Université de La Rochelle, France

1. Equations de Young et de Young Laplace

Un travail théorique récent a consisté à proposer un cadre mathématique général pour retrouver les équations de Young-Laplace et de Young à partir de la minimisation de l'énergie d'un système eau/air de géométrie quelconque, pour un pont capillaire axisymétrique de révolution. On peut montrer de façon intrinsèque très générale que l'équation de Young constitue une condition aux limites associée au problème de minimisation, qui conduit à l'équation générale de Young-Laplace. La prise en compte d'une énergie de ligne, en général négligée, conduit à une équation de Young généralisée, où les angles de contact ne sont plus constants pour un même couple matériau/liquide. Cette équation de Young généralisée permet de modéliser l'hystérésis généralement rencontré sur les angles de contacts (advancing/receding).

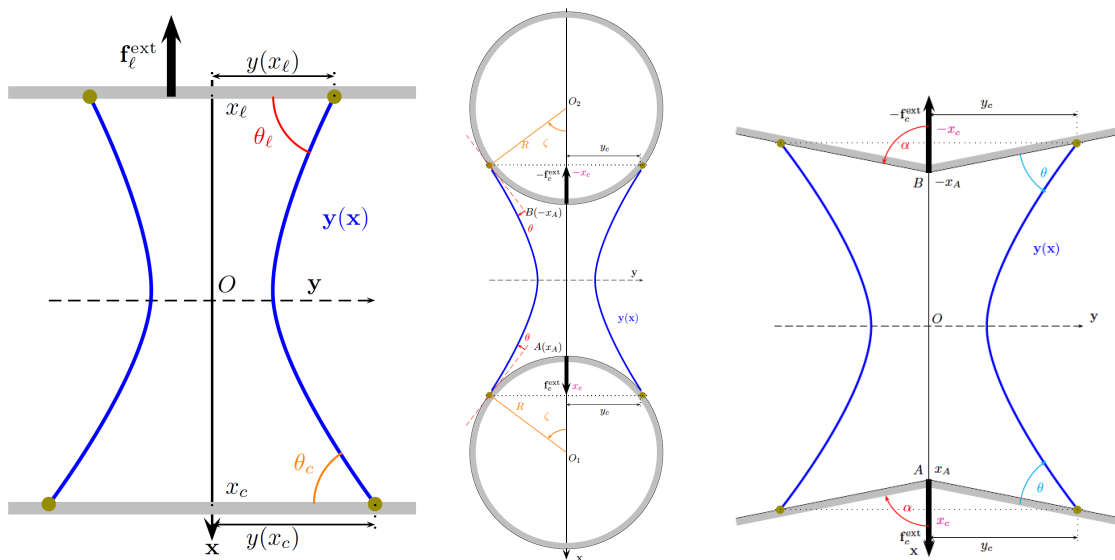


Figure 3: Représentation cartésienne d'un pont capillaire axisymétrique entre deux substrats solides plans ou de forme sphérique/conique.

L'expression de la force capillaire obtenue permet de réinterpréter les résultats classiques existant dans la littérature. On montre en particulier l'importance des forces de frottement tangentielles dont la résultante engendre une composante suivant l'axe de symétrie du pont capillaire, lorsque celui-ci en possède un. Enfin, l'effet de la rugosité des substrats solides sur la force capillaire associée a été étudié.

2. Identification de lois de comportement pour les sols partiellement saturés

Dans le cas général, il n'existe pas de modèle théorique qui permet d'expliquer la diminution de la cohésion globale d'un échantillon granulaire partiellement saturé quand on s'approche d'un état quasiment saturé. Pour essayer de répondre à cette question, nous avons développé une approche basée sur la Méthode Lattice Boltzmann (LBM) diphasique par champ de phase en GPU qui permet de simuler numériquement la coalescence des ponts capillaires lors d'une augmentation de la teneur en eau au sein d'un échantillon granulaire partiellement saturé. Cette approche est basée sur l'équation de Navier-Stokes pour le fluide en écoulement avec un terme source pour modéliser les interfaces capillaires. Cette équation est couplée à l'équation d'Allen-Cahn pour modéliser le déplacement des interfaces capillaires entre le liquide et le gaz. À l'équilibre, nous avons pu montrer que les profils des ponts capillaires obtenus coïncident parfaitement avec les solutions de l'équation de Young-Laplace. Les simulations LBM ont permis de retrouver l'inversion de signe de la courbure moyenne observée expérimentalement, correspondant au changement de géométrie nodoïde/onduloïde lorsque la distance de séparation entre les particules augmente. La méthode proposée permet également de calculer très précisément les forces capillaires résultantes et de retrouver l'augmentation soudaine de la force capillaire à la coalescence des doublets, ainsi que de calculer les forces capillaires pour n'importe quelle géométrie de ponts coalescés.

Cette approche, développée en GPU, a ensuite été couplée à un code de simulation basé sur la Méthode des Éléments Discrets (DEM) qui permet de simuler le comportement mécanique d'un VER constitué de plusieurs dizaines de milliers de particules en 3D sous l'effet d'un cycle de saturation/désaturation (Fig. 1). Les résultats obtenus permettent d'expliquer physiquement l'augmentation, puis la chute à partir d'une valeur limite du degré de saturation S_r , de la cohésion globale d'un milieu granulaire partiellement saturé (Fig. 1c). L'optimisation du couplage entre les deux codes LBM et DEM permet de simuler des essais triaxiaux d'assemblages granulaires partiellement saturés en moins d'une minute en GPU, en allant jusqu'à des déformations de 20%. Les résultats obtenus mettent clairement en évidence les effets de la capillarité sur la contrainte déviatorique pour de faibles contraintes de confinement de 5kPa. Pour des contraintes de confinement plus importantes (de 100 kPa), les effets de la capillarité sont très faibles.

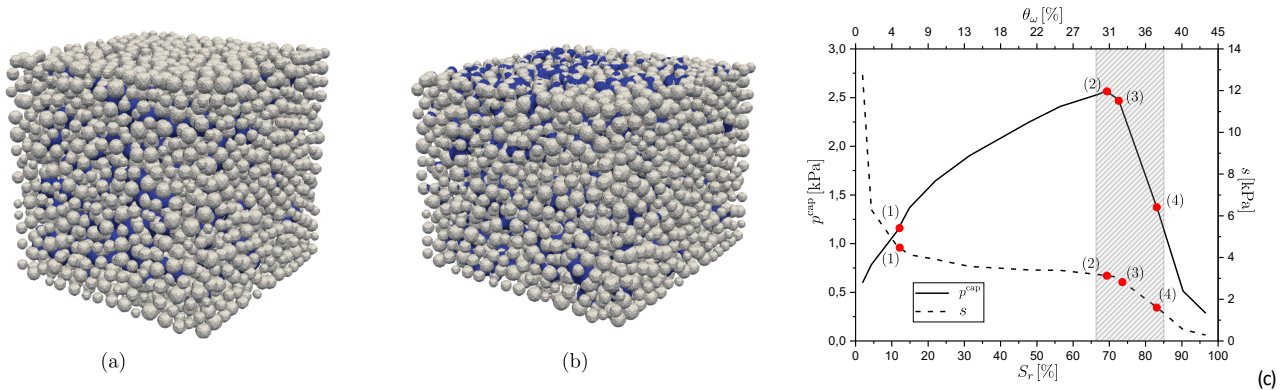


Figure 1: État initial (a) et final (b) d'un échantillon lors d'un essai triaxial. c) Contrainte capillaire moyenne $Pcap$ [kPa] et succion s [kPa] en fonction du degré de saturation S_r [%] et de la teneur en eau volumétrique q_w [%] en bas et en haut de l'axe des x, respectivement.

3. Perspectives

Le travail en cours consiste à optimiser le code LBM en GPU et à redévelopper un code DEM en GPU pour optimiser les transferts de données entre la LBM et la DEM et à diminuer considérablement les temps de calculs. Cela permettra de construire une base de données consistante qui servira à identifier une loi de comportement pour les sols granulaires partiellement saturés en utilisant des approches de type Machine Learning ou Deep Learning. L'objectif final est de pouvoir effectuer des calculs de stabilité d'un sol granulaire partiellement saturé à l'échelle d'un ouvrage. D'autre part, il est également prévu de continuer à développer l'approche théorique de minimisation qui permet de discuter le domaine de validité de l'équation de Young pour un fluide en contact avec un substrat solide de n'importe quelle géométrie. Des expériences en microgravité sont prévues, en collaboration avec l'équipe de l'IUSTI du GDR MFA, pour tester la validité des modèles théoriques en l'absence de gravité.

Publications

O. Millet et M. Médale : Brevet Européen n° 23315444.2 du 29 novembre 2023. Titre: Device and Method for identifying wetting properties via a liquid capillary bridge. Cl. Réf : 27040-01. N. Réf : B05003 EP- 27040-01

O. Millet, M. Médale, A. Moreau : Brevet Européen n° 25315054.4 du 17 février 2025. Titre : Device and Method for identifying wetting properties via a liquid capillary bridge. HIP Réf. B05367 EP - 28133-01

N. Younes, A. Wautier, R. Wan, O. Millet, F. Nicot, R. Bouchard (2023): DEM-LBM Coupling for partially saturated granular assemblies, Computers and Geotechnics, Volume 162, 105677.

G. Gagneux, O. Millet (2023): A direct relation between bending energy and contact angles for capillary bridges, Comptes Rendus de Mécanique, Special issue of 30 years of the GDR MFA. Online first (2023), pp. 1-13. DOI : 10.5802/crmeca.200

G. Gagneux, O. Millet (2023): Bending effects distorting axisymmetric capillary bridges. Generalized Young-Laplace equation and associated capillary forces, Comptes Rendus de Mécanique, Special issue of 30 years of the GDR MFA. Online first, pp. 1-9. DOI: 10.5802/crmeca.196.

R. Bouchard, N. Younes, O. Millet, A. Wautier (2024): Parameter optimization of phase-field-based LBM model for calculating capillary forces, Computers and Geotechnics, Volume 172, August 2024, 106391

4.2 Influence du volume sur l'angle de mouillage macroscopique
R. Issa, H. Benabdelhalim, M. Medale, **D. Brutin**

Influence du volume sur l'angle de mouillage macroscopique

Roudy ISSA, Houssine BENABDELHALIM, Marc MEDALE, David BRUTIN
Aix-Marseille University CNRS IUSTI Marseille France

Nous étudions le mouillage partiel de gouttes sessiles sur un substrat solide horizontal pour des nombres de Bond élevés, en considérant l'eau sur des substrats en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et en aluminium, ainsi que le glycérol sur PMMA. L'orientation horizontale du substrat, ainsi que les méthodes utilisées pour créer des gouttes sessiles, ont facilité la symétrie de rotation des gouttes afin de réaliser des expériences contrôlées et reproductibles. En particulier, nous explorons la manière dont l'angle de contact macroscopique (MCA) dépend du volume de la goutte sessile, que celle-ci soit injectée à l'aide d'une seringue positionnée au-dessus du substrat (équipement DSA30 Krüss) ou par le dessous du substrat à travers un petit trou percé dans celui-ci. Dans les deux cas, les résultats expérimentaux montrent que lorsque le volume de la goutte augmente, la ligne de contact avance sur le substrat et le MCA diminue considérablement jusqu'à une valeur asymptotique.

Résultats

Nous avons effectué quatre répétitions dans les mêmes conditions expérimentales (eau liquide, avec la méthode d'injection par le dessous du substrat à un débit de $1 \mu\text{l.s}^{-1}$), mais sur deux substrats en aluminium avec différents revêtements. Sept répétitions ont été effectuées à l'aide de substrats en PMMA dans les mêmes conditions d'injection. Les valeurs moyennes et les écarts types du MCA, du diamètre mouillé et de la hauteur de goutte sont indiqués respectivement dans les figures 1a et 1b. L'aluminium à 123° et l'aluminium à 133° représentent le MCA initial de chaque surface revêtue (deux répétitions chacune et une seule répétition pour l'expérience sur l'aluminium sans revêtement). Les barres d'erreur ont été calculées à l'aide de la méthode de l'écart type. On observe une bonne répétabilité des résultats et une légère augmentation de l'écart type par rapport au volume des gouttes. Cela peut s'expliquer par les deux raisons suivantes : i) l'hétérogénéité de la rugosité et les impuretés chimiques sur chaque substrat et ii) la variabilité de ces quantités précédentes d'un substrat à l'autre. Plus le nombre d'échantillons est élevé, plus l'écart type résultant est élevé. Cependant, pour le MCA, l'écart type pour les volumes de gouttes les plus élevés ne dépasse pas $\pm 1 \%$ (cf. Fig. 1a), tandis que pour le diamètre mouillé et la hauteur de goutte, il ne dépasse pas $\pm 2,3$ et $2,1 \%$ respectivement (cf. Fig. 1b).

En plus d'évaluer la répétabilité, nous avons délibérément modifié les propriétés de mouillage du système (liquide + substrat) afin de démontrer que le phénomène observé persiste quelles que soient les propriétés du système. En ce qui concerne la hauteur de la goutte, elle augmente d'abord par rapport au diamètre de la goutte, puis atteint une valeur asymptotique, cf. Fig. 1. Cette valeur asymptotique est en très bon accord avec la valeur théorique dérivée du modèle de flaque, pour lequel le rapport entre le rayon mouillé et la hauteur de la goutte est supposé être très grand ($r/h \gg 1$). Dans ce cas, la hauteur de la flaque ne dépend plus du volume de liquide. Dans ces expériences, les valeurs des hauteurs asymptotiques pour l'eau liquide sont respectivement de $h_\infty = 2,87$ sur le PMMA, $4,1$ et $4,26$ mm sur l'aluminium revêtu. La figure 2 montre une série d'expériences avec des gouttes d'eau, où chaque essai a commencé à un MCA différent en raison du changement de revêtement de surface. On observe que plus le MCA initial est élevé, plus sa plage de variation par rapport au volume de la goutte est sensible à la gravité.

Nous avons ainsi mis en évidence la dépendance volumique de MCA pour les gouttes sessiles jusqu'à des nombres de Bond élevés. Dans les configurations de mouillage partiel, MCA dépend de la manière dont le liquide est mis en contact avec le substrat solide. En conséquence, nous avons opté pour deux méthodes très différentes pour créer des gouttes sessiles.

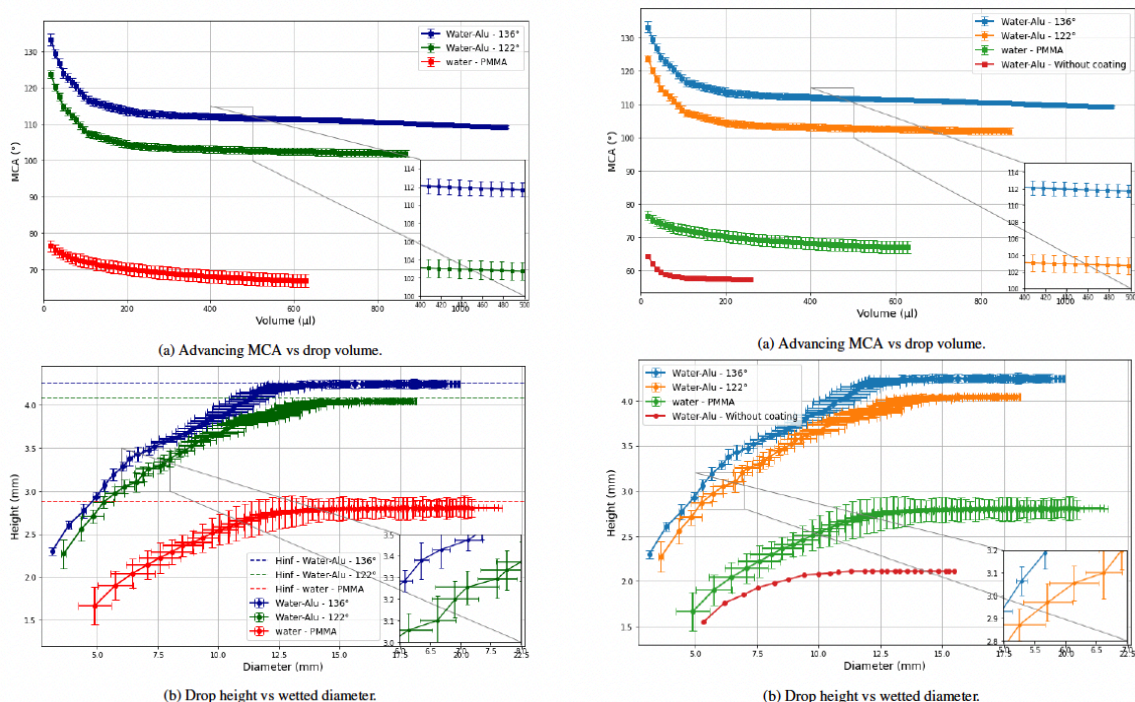


Fig. 1a et 1b (gauche) 2a et 2b (droite) : Gouttes d'eau injectées par le dessous du substrat. (a) MCA croissant par rapport au volume de la goutte (b) Hauteur de la goutte par rapport au diamètre mouillé.

La première méthode consiste à faire tomber des microgouttelettes à partir de la pointe d'une aiguille de seringue située immédiatement au-dessus du sommet de la goutte sessile à créer, qui a ensuite été alimentée de cette manière. La deuxième méthode consiste à injecter du liquide par le dessous à travers un minuscule trou percé dans le substrat. De plus, nous avons pris en compte deux liquides (eau distillée et glycérol) et plusieurs substrats (PMMA, aluminium avec et sans revêtement). Indépendamment de la méthode d'injection ou des propriétés de mouillage considérées, dans toutes nos expériences, l'angle de contact macroscopique (MCA) avancé diminue toujours de manière monotone jusqu'à une valeur asymptotique par rapport au volume de la goutte (ou au nombre de Bond correspondant). Ce comportement asymptotique a été observé pour des volumes de gouttes sessiles de 300 à 1200 μl, pour lesquels la variation du MCA atteint de 10° pour l'eau sur PMMA à 26° pour l'eau sur aluminium revêtu. En effet, plus le MCA est élevé pour un petit volume de goutte (nombre de Bo), plus sa plage de variation par rapport au volume de goutte (nombre de Bo) est sensible à la gravité. Par conséquent, dans les configurations de cette étude où la gravité n'est plus négligeable ($Bo \gg 0,1$), l'équation de Young-Dupré, qui prédit une valeur unique du MCA, ne parvient pas à reproduire cette dépendance particulière au volume de goutte (ou au nombre de Bond).

Perspectives

Dans le cadre de nos travaux futurs, nous prévoyons de comparer les résultats expérimentaux présentés avec un modèle théorique afin de mieux comprendre les comportements observés. De plus, nous souhaitons étendre nos recherches à l'étude des gouttes en hypergravité, ce qui nous permettra d'élargir la portée de nos conclusions.

Publications

R. ISSA, H. BENHABDELHALIM, M. MEDALE, D. BRUTIN, Drop Volume Effect on the Advancing Macroscopic Contact Angle, Under revision in European Physical Journal E.

- 4.3 Ebullition nucléée en microgravité : expérience, modélisation et simulation de l'expérience RUBI
L. Favre, P. Ayegba, M/ Mbaye, L. Torres, J. Sebilliau, A. Urbano, S. Tanguy, **C. Colin**

Ébullition nucléée en microgravité : expérience, modélisation et simulation de l'expérience RUBI

L. Favre¹, P. Ayegba¹, M. Mbaye¹, L. Torres¹, J. Sebilliau¹, A. Urbano², S. Tanguy¹, C. Colin¹

¹ Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Université de Toulouse, CNRS

² Fédération ENAC ISAE-SUPAERO ONERA, Université de Toulouse, Toulouse, France

L'ébullition constitue un phénomène prépondérant dans diverses applications industrielles telles que les voyages spatiaux (boil-off) ou encore l'énergie nucléaire (crise d'ébullition), ou plus généralement tout système impliquant un transfert de chaleur avec changement de phase (évaporateurs, refroidissement d'électronique embarquée, etc.). Au sein du GDR MFA et du programme MAP (Multiscale Analysis of Boiling) de l'ESA, l'IMFT étudie la physique de l'ébullition et des écoulements multiphasiques associés à la fois par des approches expérimentales et numériques.

Ebullition sur site isolé

La compréhension de la physique locale à l'échelle d'une bulle isolée reste à ce jour un défi scientifique clé pour le développement de modèles à plus grande échelle. L'expérience RUBI (Reference mUltiscale Boiling Investigation) [1], opérée sur l'ISS entre 2019 et 2021, a permis d'obtenir des résultats expérimentaux précieux et novateurs pour l'étude de la nucléation et croissance d'une bulle de vapeur de fluide réfrigérant (FC-72) sur une paroi chauffée. Des mesures synchronisées par caméra rapide (HSV) et thermographie infrarouge (IR) donnent simultanément accès à la dynamique des bulles et au champ de température en paroi. L'IMFT s'intéresse plus particulièrement aux cas où la bulle fait face à un écoulement cisailé (à l'aide d'une pompe), sur diverses valeurs de sous-refroidissement liquide ΔT_l , flux de chaleur q_w , temps de chauffe t_w (avant ébullition), pression P et débit liquide Q_l . Les travaux consécutifs des post-doctorants Qaisar Raza, Modou Mbaye et Luc Favre ont permis le post-traitement complet des images HSV [2]. Récemment, une convergence a eu lieu avec les partenaires internationaux sur le traitement et le calibrage images IR, ce qui devrait permettre l'obtention de résultats plus fiables vis-à-vis de la thermique paroi et des régimes de croissance de bulle. Une publication est prévue d'être soumise sur ces résultats. En parallèle, des approches numériques au sein du solveur DNS diphasique DIVA ont été mises en œuvre (thèse de Loric Torres) pour la modélisation de l'ébullition au niveau du point triple de la ligne de contact (modèle de nano-région) et son influence sur la croissance de la bulle. Deux publications ont été réalisées sur le sujet [3, 4].

Résultats

La Fig. 1 présente un exemple de visualisation obtenue en synchronisant images HSV et IR ainsi qu'un résultat de traitement des images HSV pour une série de bulles d'un essai en conditions proches.

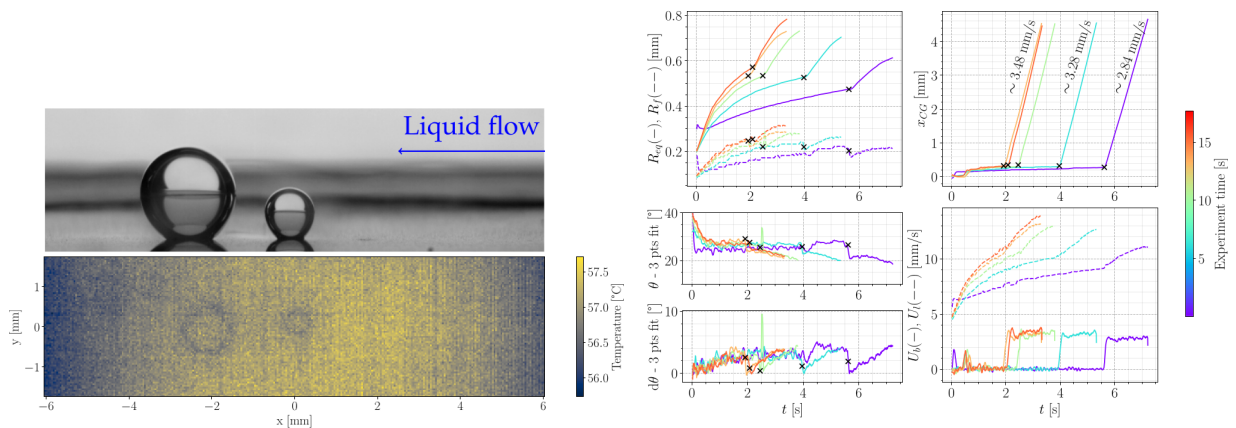


Fig. 1 : Gauche $\Delta T_l = 3^\circ\text{C}$, $q_w = 1 \text{ W/cm}^2$, $t_w = 2\text{s}$, $P = 1\text{atm}$, $Q_l = 300 \text{ mL/min}$ - Droite idem q_w , P , Q_l et $\Delta T_l = 10^\circ\text{C}$, $t_w = 10\text{s}$

Le visualisation HSV + IR permet de visualiser clairement l'impact de la forte évaporation au niveau de la ligne triple sur la température paroi, localement abaissée. Le traitement des images HSV donne accès aux propriétés géométriques des bulles (rayons, angles de contact). La chauffe constante au cours de

l'essai accélère la croissance des bulles et augmente leur rayon de détachement par glissement (croix noires, Fig.1 droite).

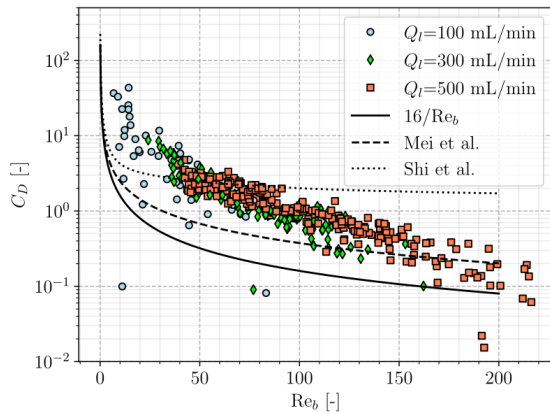


Fig. 2 : Estimation des coefficients de traînée sur RUBI

La vitesse de glissement reste globalement constante et inférieure à la vitesse liquide tandis que la demie-hystérésis d'angle de contact $d\theta$ augmente, indiquant que la force capillaire a tendance à croître pour compenser la force de traînée augmentant avec la taille de la bulle. Une estimation des coefficients de traînée sur de nombreux essais (Fig. 2) montre que des formulations de la littérature échouent à reproduire ces valeurs à bas Reynolds de bulle, indiquant un effet marqué du fort cisaillement adimensionnel ($S_r > 0.5$) vu par les bulles.

Perspectives

L'évaluation des températures et flux de chaleur au niveau de pied de la bulle permettront de valider des modèles de nano-région et simulations DNS ainsi qu'étudier les modèles de croissance de bulle. Des bilans de force seront utilisés pour prédire les diamètres de détachement.

Ebullition convective

Les travaux sur l'ébullition convective en tube en microgravité, réalisés dans la thèse de Paul Ayegba ont fait l'objet d'une publication sur la caractérisation des vagues de grande amplitude à l'interface dans les écoulements annulaires. Il a été montré notamment que le frottement à l'interface liquide vapeur était proportionnel au produit de la fréquence et de la vitesse des vagues [5].

Publications

- [1] Sielaff et al., The Multiscale Boiling Investigation on-board the International Space Station: An overview , *Applied thermal Engineering*, 205 ATE 117932, (2022)
- [2] Mbaye M., Raza Md Q., Sebilleau J. and Colin C., Flow Boiling in Microgravity, *Journal of Physics – Conference Series* 2766, (2024), 012124
- [3] Torres L., Urbano A., Colin C., Tanguy S., On the coupling between direct numerical simulation of nucleate boiling and a micro-region model at the contact line, *Journal of Computational Physics* 497 (2024) 112602,
- [4] Torres L., Tanguy S., Colin C., Urbano A., On the effect of substrate thermal conductivity and nano-region on subcooled nucleate boiling in zero-gravity conditions, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 254 (2026) 127594,
- [5] Ayegba P. O. , Sebilleau J., Colin C. , Modelling of wave velocity, wave frequency and interfacial friction factor in vertical upward and downward annular flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 247(2025) 127157

- 4.4 Etudes de caloduc oscillant : analyse paramétrique
V. Nikolayev, V. Padilla, P. Forget, M. Abela, M Mameli, S. Filippeschi, G. Boudier, S. Bajić, E. Blondé, T. Coquard

Etudes de caloduc oscillant : analyse paramétrique

Vadim Nikolayev¹, Vincent Padilla¹, Philippe Forget¹, Mauro Abela^{1,2}, Mauro Mameli², Sauro Filippeschi², Guillaume Boudier³, Slaven Bajić³, Eric Blondé⁴, Typhaine Coquard⁴

¹Service de Physique de l'Etat Condensé, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay

²Department of Energy, Systems, Land and Construction Engineering, Université de Pise, Italie

³Service de thermique, CNES, Toulouse

⁴Airbus Defence and Space SAS, Toulouse

Le code CASCO (Code Avancé de Simulation de Caloduc Oscillant) développé au CEA peut être à présent utilisé pour les études du fonctionnement du caloduc oscillant (pulsating heat pipe, PHP). Ces études se sont articulées en plusieurs volets. Tout d'abord, il s'agit de la collaboration avec le CNES et ADS. Il s'agit à la fois des tests expérimentaux d'un caloduc (Fig. 1a) produit par ADS et sa simulation numérique avec CASCO afin de le valider [1]. En ce qui concerne la simulation, on s'intéresse, en particulier, à l'effet de la barrière de nucléation, la surchauffe de la paroi nécessaire

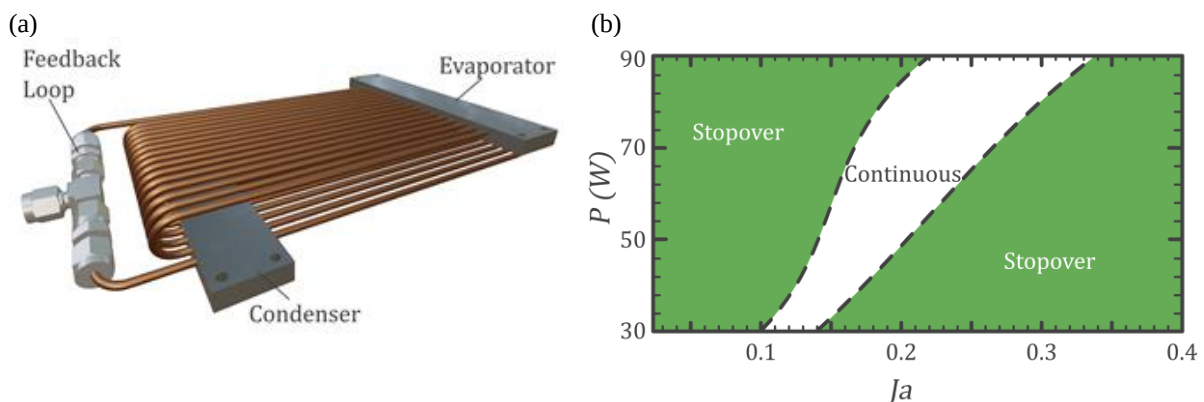


Fig. 1 Simulations CASCO d'un caloduc oscillant : (a) sa géométrie et (b) diagramme des régimes d'oscillation (dans les coordonnées puissance—nombre de Jacob).

pour créer des bulles de vapeur ΔT_{nucl} (appelé autrement surchauffe de l'ONB, onset of nucleate boiling) qui est définie par l'état de la paroi interne (mouillabilité, rugosité) dans la zone évaporateur. On caractérise la vitesse de croissance des bulles par le nombre de Jacob correspondant $Ja =$

$\frac{c_{p,l}}{h_{f,g}} \Delta T_{nucl}$, ou $c_{p,l}$ est la capacité thermique du liquide et $h_{f,g}$ est la chaleur latente. En définissant

un critère, nous avons établi une carte de régimes d'oscillation (Fig. 1b) définissant des zones du fonctionnement extrêmement efficace (celui des oscillations continues) et moins efficaces (oscillations intermittentes), un régime dit stopover. Un article est en cours de rédaction.

Un grand volume de travail [2] a été réalisé sur le traitement des résultats expérimentaux et de simulation concernant l'expérience réalisée à l'Université de Pise. Il s'agit d'une boucle carrée simulant le méandre de caloduc oscillant grâce aux sections chauffées avec un film ITO et refroidissantes périodiquement posées tout le long du tube en verre entièrement transparent. Nous avons étudié le régime le plus répandu des oscillations intermittentes. L'analyse détaillée montre que l'évolution de pression est constituée des montées brusques lors du redémarrage des oscillations et la relaxation lente lors des périodes d'arrêt. La comparaison de l'expérience avec des simulations montre un bon accord entre la vitesse de relaxation expérimentale et théorique. Grâce aux données de simulation, une analyse approfondie des périodes d'arrêt a été réalisée. Il a été constaté que, lors des arrêts, les bulles de vapeur sont longues et recouvrent plusieurs évaporateurs, ce qui entraîne le dépôt de films liquides à l'intérieur de ceux-ci. L'accélération du séchage du film à fortes charges thermiques entraîne une augmentation de la vitesse de chute de pression et une réduction du temps d'arrêt, ce qui produit une diminution de la résistance thermique du PHP à fortes charges. Le redémarrage des oscillations s'effectue par la nucléation et la croissance de bulles à l'intérieur de

longs bouchons. La découverte du mécanisme physique de la diminution de la résistance thermique du PHP avec la puissance est une avancée majeure. Ces résultats doivent maintenant être vérifiés expérimentalement par observation visuelle directe.

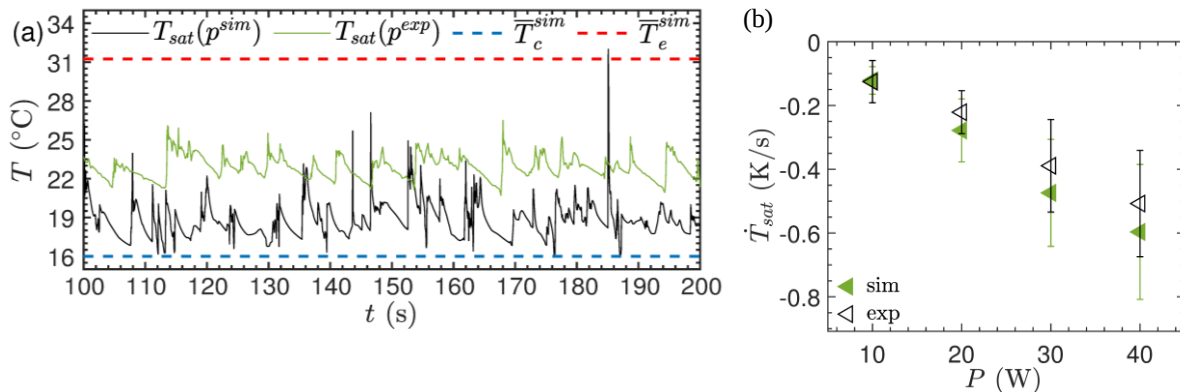


Fig. 2 Dynamique de variation de la pression (présentée au travers de la température de saturation). Comparaison de l'expérience de l'U. Pise et la simulation avec CASCO. (a) L'évolution temporelle de la pression. (b) Vitesse de relaxation.

Le troisième axe de travail concerne le dimensionnement de caloduc oscillant dans le cadre d'un projet ESA (AO/1-12129/24/NL/KML, Advanced structure with embedded Pulsating Heat Pipes for planar active antenna), en collaboration avec ADS (à la fois en France et en Grande Bretagne) et toujours en utilisant CASCO comme outil. Il s'agit de l'application des caloducs oscillants pour le refroidissement de l'électronique de puissance à bord des satellites. Des simulations multiples ont été réalisées pour vérifier la faisabilité de la conception proposée par ADS qui se confirme maintenant par les essais des prototypes.

Le quatrième axe est l'expérience SpacePHP de l'ESA (un caloduc oscillant plat avec des canaux de grand diamètre, plus grand que la longueur capillaire terrestre) pour l'appareil HTH-1 de l'ESA qui sera implémenté à bord de Space Rider. Cette étude est réalisée dans le cadre de Topical Team sur le caloduc oscillant. Le prototype a été fabriqué par la société Redwire. On est en train d'organiser ses essais.

Le dernier volet de travail concerne le développement au CEA de l'expérience de caloduc oscillant dont la partie adiabatique est entièrement transparente. Comme il s'agit de 20 tubes en verre connectées des deux côtés aux tubes métalliques, il nous fallait trouver une solution de connexion étanche résistante aux forts gradients de température et des sauts de pression apparaissant lors des oscillations. Une solution de liaison chimique verre-métal a été sélectionnée. Durant cette année, et en collaboration avec un industriel, nous avons finalisé à la fois la conception des embouts en alliage et la technologie de sa soudure aux tubes métalliques permettant de garder intact le liaison verre-métal. L'assemblage est en cours et s'avère difficile à cause de la fragilité de l'endroit où la liaison chimique est effectuée.

La nouvelle version 5 du code CASCO intégrant les modèles développés dans le cadre de la thèse de X. Zhang cofinancée par le CNES est toujours en stade de débogage.

References

1. S. Bajić, G. Boudier, E. Blondé, T. Coquard, V. Nikolayev, Nucleation barrier effect on pulsating heat pipe performance, paper 285, 12th Int. Conf. Multiph. Flow, Toulouse, France, **2025**.
2. Abela, M., Mameli, M., Filippeschi, S. & Nikolayev, V. S. *Experimental and numerical studies of the pulsating heat pipe stopover regime*, [Int. J. Heat Mass Transf.](#), **2025** vol. 247, 127102.

4.5 Etude de mélanges gazeux et de gouttes en micropesanteur

C. Graziani, M. Nespoulous, R. Denoyel, N. Martin, S. Fauve, C. Chauveau, **M. Antoni**

Etude de mélanges gazeux et de gouttes en micropesanteur

C. Graziani¹, M. Nespoulous¹, R. Denoyel¹, N. Martin¹, S. Fauve², C. Chauveau³, M. Antoni¹

¹MADIREL Aix-Marseille Université, ²LP ENS-Paris, ³ICARE Université Orléans

Les aérosols sont présents dans de nombreux domaines recouvrant la médecine (médication par inhalation), l'environnement (polluants dans l'air), la physique (transferts thermiques), la chimie (agents extincteurs) ou encore la climatologie (effet d'albedo des nuages). Leur étude en micropesanteur permet d'isoler les phénomènes de transport et de coalescence, en éliminant les effets de la sédimentation gravitationnelle. Ces conditions expérimentales idéales fournissent des données de référence pouvant aider à valider et à affiner les modèles théoriques et numériques décrivant leur évolution.

Une expérience innovante a été développée pour caractériser l'évolution de populations de microgouttes, générées à partir d'un mélange air humide/HFE7100. Le HFE7100 est très utilisé dans les procédés industriels, notamment en électronique. Il a l'inconvénient majeur de contribuer positivement à l'effet serre et donc au réchauffement global. L'objectif principal est d'aider à la compréhension des propriétés fondamentales de tels aérosols, qui représentent un enjeu majeur en climatologie pour la microphysique des nuages. Cette expérience combine les capacités analytiques de la micro-tomographie optique et de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR). Le dispositif de micro-tomographie optique fonctionne en transmission et permet de suivre plusieurs centaines de microgouttes (dans un volume de travail de 2 mm³) et de mesurer l'évolution de leur rayon ainsi que de leur vitesse. Il utilise une caméra rapide montée sur une platine de translation motorisée. Le spectrophotomètre FT-IR est utilisé pour les analyses chimiques de la phase gaz, avec une cadence d'acquisition de 1 Hz dans la gamme spectrale 700 à 5000 cm⁻¹.

Le protocole suivi pour générer l'aérosol, s'appuyant sur un jeu de pompe et d'électrovannes, consiste en une compression suivie d'une détente ne prenant, au total, que quelques secondes [1,2]. Il permet de générer des populations de microgouttes uniformément réparties dans le volume expérimental (environ 43 cm³) tout en limitant les zones de condensation. Il permet aussi de produire des distributions de microgouttes monodisperses (rayon moyen de quelques micromètres) et un contrôle satisfaisant de l'humidité relative et de la concentration en HFE7100 [2].

Résultats

Les spectres FT-IR obtenus présentent un excellent rapport signal sur bruit et permettent une bonne identification des bandes fonctionnelles du HFE 7100. La ligne de base est obtenue, avant chaque décollage, à partir d'un spectre de référence d'air supposé propre. La référence en temps, t_0 , est prise au moment précis de la détente utilisée pour créer l'aérosol. Ce temps est également celui du début de la phase de micropesanteur.

L'évolution de l'absorbance (A) de quatre bandes typiques du HFE7100 ainsi qu'une bande du CO₂ présent dans l'air est illustrée dans la Figure 1. Les phases de compression, d'expansion et de retour à la gravité normale apparaissent clairement. La croissance de A lors de la phase de compression traduit la pression plus grande dans le volume expérimental. Ensuite, la valeur de A reste constante pour toutes les bandes fonctionnelles jusqu'à la détente où une chute brutale survient.

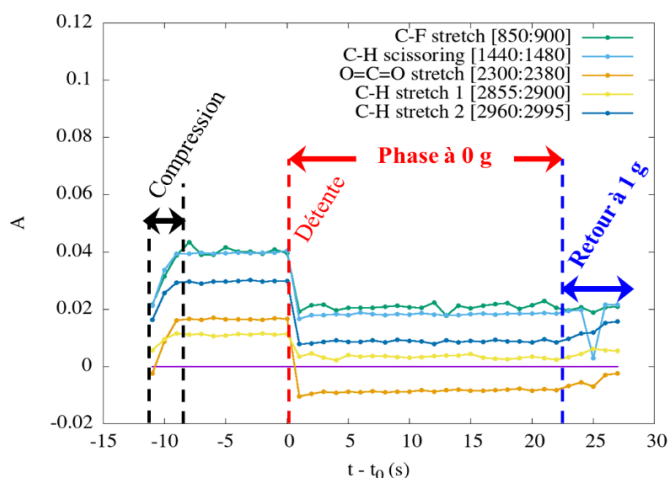


Figure 1 : Évolution de l'absorbance définie à partir de la surface de quatre pics associés à quatre bandes fonctionnelles du HFE7100. t_0 est le temps auquel est réalisée la détente pour générer l'aérosol. Les fonctions et les gammes spectrales sont présentées dans le graphe. La bande fonctionnelle du CO₂ contenu dans l'air est aussi montrée. (parabole P26 campagne 67, octobre 2024 : 50 μ L de HFE injecté).

Une inspection détaillée de cette figure indique que A atteint une valeur inférieure à sa valeur initiale (celle avant la compression). Cela est bien visible pour la bande CH stretch 2 et traduit une raréfaction de la quantité de HFE en phase gaz et donc l'apparition de HFE en phase liquide. Cette observation est confirmée par la croissance importante de la ligne de base (non présentée ici) de chacun des pics étudiés dans la Figure 1 qui démontre, par ailleurs, une importante atténuation du faisceau IR. Elle est interprétée comme une conséquence de la diffusion créée par la présence des microgouttes.

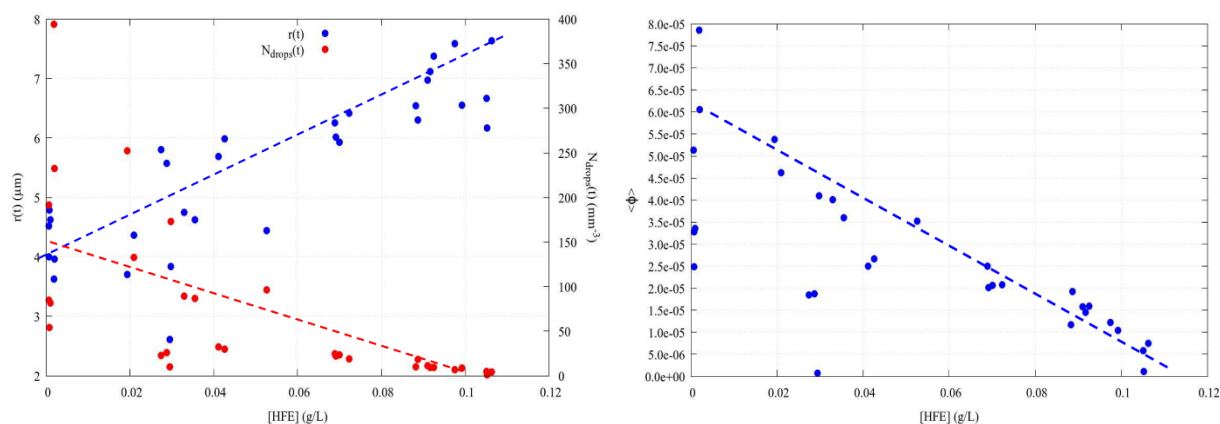


Figure 2 : Gauche (resp. Droite) : rayon moyen et nombre de gouttes (resp. fraction liquide) en fonction de la concentration en HFE7100 7 s après la détente. A ce temps, l'aérosol est stabilisé et se trouve dans des conditions de μ -gravité. Les lignes sur ces graphes visent à mieux visualiser les tendances.

Les expériences en vols paraboliques ont démontré qu'en micropesanteur l'évolution des microgouttes est suffisamment lente pour garder une cohérence entre les images tomographiques successives pour une reconstruction 3D précise de leur évolution temporelle. Cela rend possible l'estimation du nombre de gouttes, $N_{drops}(t)$, et du rayon moyen des gouttes, $r(t)$, dans le volume de travail à tout temps t (Figure 2).

Les mesures montrent une importante dispersion notamment pour les valeurs de $r(t)$ pour lesquelles une incertitude de ± 1 μm doit être prise en compte. Il est malgré tout possible de dégager une tendance à la croissance pour $N_{drops}(t)$ et à la décroissance pour $r(t)$. Ces données permettent l'évaluation de la fraction liquide, $\phi(t)$, à tout temps. La Figure 2 montre une tendance à la décroissance de $\phi(t)$ ce qui est surprenant. Ces données demandent à être affinées mais une première analyse suggère ici une modification du taux de nucléation des gouttes dans le sens d'une inhibition.

Conclusions et perspectives

Ce travail démontre la possibilité d'une analyse des aérosols dans des conditions de micropesanteur couplant la tomographie optique et l'analyse FT-IR. L'association de ces deux techniques permet une évaluation du nombre de gouttes, de leur rayon moyen ainsi que de la concentration en HFE dans la phase gaz au cours du temps. Une conséquence de la croissance de la concentration en HFE est une réduction du nombre de gouttes et une croissance du rayon moyen. La fraction liquide montre un comportement global décroissant. Une perspective importante de ce travail est d'expliquer ces résultats sur la base de modèles de nucléation.

Publications

- [1] Graziani, C., Thèse de Doctorat 2025, <https://theses.fr/s376760>
- [2] Graziani, C., Nespoulous, M., Denoyel, R., Fauve, S., Chauveau, C., Deike, L., Antoni, M. (2023). Comptes Rendus de Mécanique, 351(S2), 1-15.

- 4.6 Solidification d'un alliage en lévitation électromagnétique avec un champ magnétique DC horizontal
A. El Bakali, P. Choleton, G. Guggilla, D. Chaussende, **O. Budenkova**

Solidification d'un alliage en lévitation électromagnétique avec un champ magnétique DC horizontal

Abdalmagid El Bakali¹, Paul Chometon², Ganesh Guggilla¹, Didier Chaussende¹, Olga Budenkova¹

¹ SIMAP, Université Grenoble-Alpes, Grenoble INP, CNRS

² Institut Néel, Université Grenoble-Alpes, Grenoble INP, CNRS

Les matériaux métalliques — tels que les aciers, les alliages ou les verres métalliques — demeurent les matériaux de structure principaux dans de nombreux domaines. Leur fabrication repose majoritairement sur des procédés d'élaboration par voie liquide, nécessitant une connaissance précise de la transition de phase liquide/solide. Les différentes techniques de lévitation -- électromagnétique (EM), acoustique, aérodynamique, etc -- permettent de manipuler un échantillon, solide ou liquide, sans contact afin de s'affranchir d'une éventuelle pollution par contact (creuset). En particulier, la lévitation EM est utilisée pour la synthèse de matériaux, pour les mesures des propriétés thermophysiques/chimiques ou dans des études de transitions de phases réalisées *en microgravité ou dans les conditions terrestres*. Or, dans les conditions terrestres, la force de Lorentz, responsable de la lévitation, génère aussi un écoulement assez intense au sein de l'échantillon liquide. Ainsi, les conditions diffusives, qui sont souvent souhaitées pour réaliser certaines études, ne sont pas atteintes à cause de ce brassage EM. Cependant, l'application d'un deuxième champ magnétique, un champ continu (DC), peut amortir l'écoulement du liquide à l'intérieur de l'échantillon. Cette idée a été appliquée dans une configuration de la lévitation EM couplée avec un champ magnétique DC dirigé verticalement¹ ; elle est depuis utilisée pour des applications de mesures de propriétés et de synthèse de matériaux². Dans un dispositif développé au sein du laboratoire SIMaP, la lévitation EM a été couplée avec un champ magnétique DC dirigé horizontalement produit par une bobine d'Helmholtz. La construction de cette dernière permet une instrumentation du dispositif plus flexible ; la visualisation simultanée de l'échantillon au niveau latéral et par le haut est ainsi possible. Les expériences réalisées dans le cadre de la thèse de R. Pons³ ont démontré qu'à partir d'un champ DC d'une intensité de 3.5 T, les échantillons liquides de Cu et Ni ont été complètement stabilisés pendant la lévitation. Cependant, le déplacement de petites particules visibles sur la surface des gouttes métalliques indique qu'un écoulement du liquide persiste toujours dans les échantillons. Afin de comparer l'effet de l'écoulement sur la microstructure des échantillons solidifiés en lévitation sans et avec l'application de champ magnétique DC, des expériences de solidification avec un alliage de Cu-Ni ont été réalisées.

Résultats

Le diagramme de phases de l'alliage Cu-Ni montre la solubilité totale entre les deux métaux, avec une zone de démixtion en état solide à basse température. Afin d'éviter les propriétés ferromagnétiques des échantillons, qui seraient néfastes pour la bobine de Helmholtz, la composition de Cu-30wt%Ni (Cu-30wt%Ni-1wt%Mn) a été choisie, pour laquelle la température de fusion est 1246,8 K. Dans chaque expérience, un échantillon en état solide a été placé sur un support dans l'inducteur AC (lévitateur) à l'intérieur de la chambre de la lévitation ; la chambre a été soumise à un vide primaire (4.10^{-2} mBar), puis inertée avec de l'Ar. Le lévitateur est ensuite alimenté par un courant électrique alternatif (AC), ce qui entraîne la mise en lévitation de l'échantillon et son chauffage par effet Joule, dû aux courants induits. L'état liquide de l'échantillon a été atteint avec une certaine surchauffe ; à cette étape, une quantité de He a été injectée dans l'enceinte afin de stabiliser la température de l'échantillon en dessous du point d'évaporation. Pour les essais réalisés sans champs magnétique DC, l'échantillon a été solidifié avec un flux de He intense envoyé dans la chambre de la lévitation. Pour les expériences réalisées avec l'application d'un champ DC, ce dernier a été activé dès que l'échantillon passe à l'état liquide avec une montée progressive – pendant 1 heure – de 0 T à 4.75 T. L'échantillon a été solidifié

¹ H. Yasuda et al, J. Cryst. Gr. 260 (2004), 475-485

² M. Watanabe, J. Mol. Liquids, 324 (2021), 115138, M. Watanabe et al., Thermoch. Acta, 708 (2022), 179119

³ R. Pons, Thèse de Doctorat Université Grenoble Alpes, 2023, <https://theses.hal.science/tel-05290157>

avec un flux de He à une intensité du champ DC de 4.75 T. La variation de température enregistrée avec un pyromètre bichromatique sur la surface des échantillons dans trois expériences est présentée sur la fig.1 (gauche). Il est à noter qu'avec une vitesse de refroidissement de l'ordre de 5,5 K/s, les courbes de refroidissement enregistrées ne montrent pas la recalescence ou plateau lié au dégagement de chaleur latente, qui pourraient indiquer le processus de solidification. Cependant, le passage de l'échantillon de l'état liquide à l'état solide a été observé grâce à une caméra optique.

Après la solidification, les échantillons ont été découpés sur des plans perpendiculaires et soumis à différentes analyses. La microstructure de l'échantillon solidifié en lévitation AC sans l'utilisation d'un champ magnétique DC (fig.1, droite) montre une structure équiaxe ; la structure des échantillons solidifiés avec l'utilisation d'un champ DC est quant à elle constituée majoritairement des grains colonnaires. Des observations similaires sur l'effet d'un champ magnétique DC de 10 T dirigé verticalement ont été fait ailleurs⁴. Généralement, la structure équiaxe est soit attribuée à un gradient de température très faible, à la conséquence d'un écoulement intense du liquide, ou à la combinaison de ces deux facteurs. La structure colonnaire est une indication de la présence d'un gradient de température prononcé dont la raison peut être l'absence de transport convectif de la chaleur.

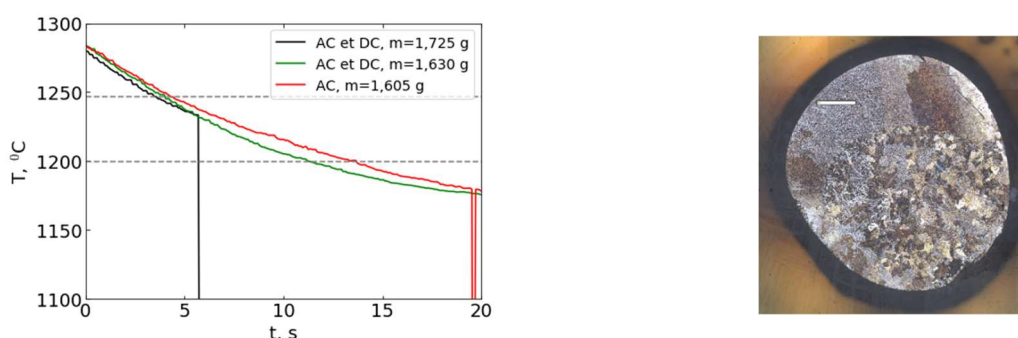


Figure 1 : courbes de refroidissement pour les échantillons solidifiés (gauche) et l'image issue de la microscopie optique de l'échantillon solidifié en lévitation sans l'application d'un champ DC, le trait blanc correspond à 1 mm (droite).

L'analyse des échantillons sur différents plans de coupe avec la spectrométrie de fluorescence des rayons X n'a pas révélé de ségrégation des composantes en moyenne, mais indiqué une évaporation de Cu dans les échantillons solidifiés sous champ DC. On suppose que cela est lié à une longue durée des expériences.

Perspectives

L'analyse de la microstructure des échantillons est en cours. On cherche notamment à comprendre si une convection magnéto-thermoélectrique a eu lieu à l'échelle des bras dendritiques secondaires. Dans les expériences, une intégration dans l'instrumentation du dispositif de débitmètres pilotables permettra un meilleur contrôle des flux de deux gaz, Ar et He. Des modélisations numériques seront mises en place afin de comprendre le processus de transport de chaleur lors de la solidification de l'échantillon.

Publications

R. Pons et al, Electromagnetic levitation of liquid metal droplets under a horizontal DC magnetic field, to Journal of Physics D: Applied Physics, sous revision

R. Pons, A. Gagnoud, D. Chaussende, O. Budenkova, Experimental study of the heat transfer in an electromagnetically levitated liquid metal droplet under a superposed horizontal magnetic DC field, Magnetohydrodynamics, 2025, 61 (1/2), 157–164, doi: 10.22364/mhd.58.4.12

Communications: A. El Bakali, G. Guggilla, P. Chometon, D. Chaussende, O. Budenkova, Solidification process in electromagnetic levitation with a superposed horizontal DC magnetic field, Keynote at 7th Int. Conf. on Advances in Solidification Processes - ICASSP7, 10-13 June, 2025, Madrid, Spain.

⁴ H.Yasuda et al., ISIJ Int., 45 (2005), 991-996

4.7 Evaporation de goutte sur substrat soluble
C. Pirat, **J. Colombani**

Evaporation de goutte sur substrat soluble

Christophe Pirat et Jean Colombani

Institut Lumière Matière, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS UMR 5306,
Campus de la Doua, 69622 Villeurbanne

Cette étude se situe à l'interface de l'étude de l'évaporation de gouttes, et de l'étude de la dissolution/précipitation des minéraux. Nous souhaitons comprendre à la fois la façon dont une goutte voit les mécanismes de son évaporation modifiés quand elle s'évapore sur un substrat soluble plutôt qu'inerte, et la façon dont la surface du solide est modifiée par cette évaporation.

Lorsqu'une goutte de solution colloïdale s'évapore, le dépôt de colloïdes à la périphérie de la goutte provoque un ancrage de la ligne triple, qui lui-même induit un flux centrifuge de colloïdes dans la goutte. Ce dernier conduit à la formation d'un dépôt en bord de goutte en fin d'évaporation, de type 'tâche de café'. Si l'évaporation concerne un liquide pur, mais que celle-ci a lieu sur un substrat soluble au lieu d'un substrat inerte comme habituellement, les espèces dissoutes migrent du centre vers le pourtour de la goutte, pour les mêmes raisons qu'expliqué ci-dessus, conduisant aussi à un dépôt de type 'tâche de café'. Celui-ci est la conséquence de l'interaction entre la réaction chimique à l'interface solide-liquide, l'évaporation du solvant à l'interface liquide-gaz, la diffusion-convection de ses molécules loin de la goutte, le transport des ions dissous à l'intérieur de la goutte et la précipitation du soluté formant dépôt en bordure de goutte.

Nous avons donc d'abord observé l'évaporation de gouttes d'eau pure de moins de 1 μl sur un monocristal de chlorure de sodium clivé et poli en nous concentrant sur deux aspects.

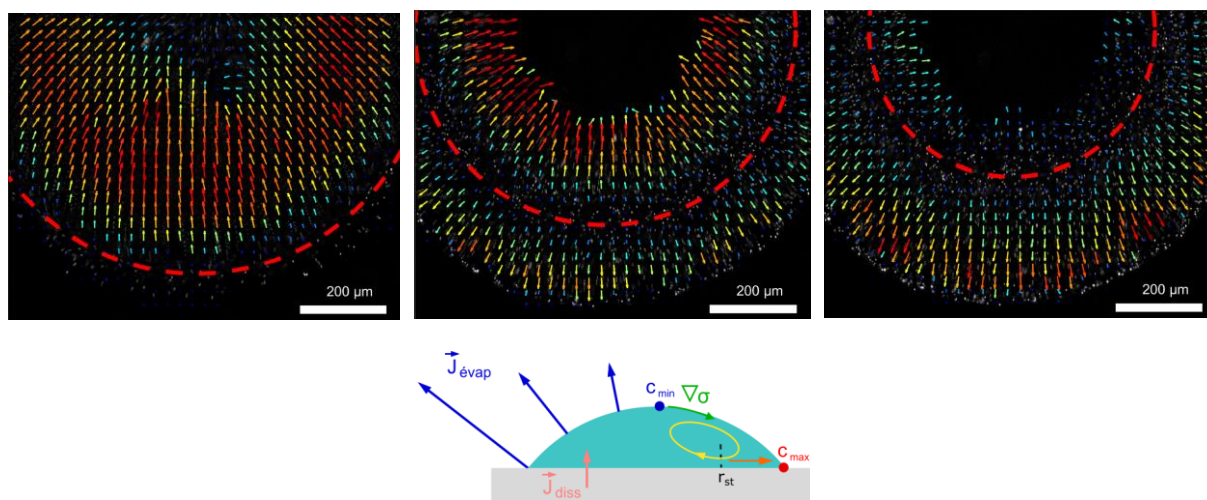


Fig. 1 : Haut : Profil d'écoulement dans le plan du substrat, de gauche à droite à $t=0.5, 0.15$ et $0.20 t_f$. Les pointillés rouges montrent la ligne de stagnation. Bas : Interprétation partielle du profil de vitesse.

1- L'étude du champ de vitesse dans la goutte

Le premier objectif de cette étude a été d'identifier les mécanismes qui pilotent la cinétique d'évaporation de la goutte. Pour cela, nous avons mesuré les écoulements à l'intérieur de la goutte par une série d'expériences de microscopie confocale couplée à une analyse μ -PIV. Nous avons obtenu des champs de vitesse résolus en espace et en temps dans le plan de l'interface solide-liquide (figure 1, haut). Le champ de vitesse présente un comportement tout-à-fait original, puisqu'il s'inverse après moins d' $1/4$ du temps total d'évaporation t_f . En effet, l'écoulement est d'abord dirigé radialement du bord vers le centre, avant d'être dirigé du centre vers le bord. Nous attribuons cette inversion à la présence d'un gradient de concentration dû à la dissolution du substrat qui, par effet Marangoni

solutal, conduit initialement à un transport de fluide centripète au niveau de l'interface solide-liquide. Une fois la concentration homogénéisée, cet écoulement Marangoni disparaît et on observe un écoulement centrifuge classique de type 'tâche de café'. Une interprétation partielle en terme de profil d'écoulement, validée par des simulations numériques, est schématiquement donnée figure 1, bas¹.

2- La morphologie du dépôt

Cette étude hydrodynamique montre que les écoulements dans la goutte sont dominés par un transfert de soluté du centre vers la périphérie conduisant à l'apparition d'un dépôt périphérique, systématiquement présent après évaporation. A la différence de ce qui est observé lors de l'évaporation de solutions salines sur substrat inerte, le dépôt se forme par précipitation d'une coque qui suit le profil de la goutte au niveau de la ligne triple². Deux morphologies finales sont observées : ouverte (dépôt incliné vers l'intérieur) ou fermée (structure creuse héli-toroïdale). Un modèle analytique incluant tous les paramètres des expériences (évaporation, dissolution diffusion, précipitation) permet de comprendre pourquoi les paramètres de contrôle de la morphologie sont le rayon initial de la goutte déposé et l'angle de contact de celle-ci³. Les expériences sur terre et en vols 0g (campagnes Novespace VP 115-118-123-125) nous ont amené à retrouver les mêmes tendances morphologiques, conduisant à penser que les mécanismes à l'œuvre lors de la cristallisation du dépôt sont peu influencés par la gravité. Nous avons aussi montré récemment l'universalité de ces morphologies, observées dans une large gamme de de température et d'humidité (figure 2 gauche)⁴. Récemment, nous avons enrichi notre configuration en étudiant l'évaporation d'une goutte de suspension colloïdale de silice, et non plus d'eau pure, sur un substrat de sel, les particules en suspension étant de bonnes candidates au mécanisme de diffusiophorèse, induits par les gradients de concentration en sel dissous, susceptible de modifier la dynamique du dépôt. Les premiers résultats montrent que le dépôt périphérique est maintenant plein, et que le dépôt central présente un double phénomène de gélification et de fracturation.

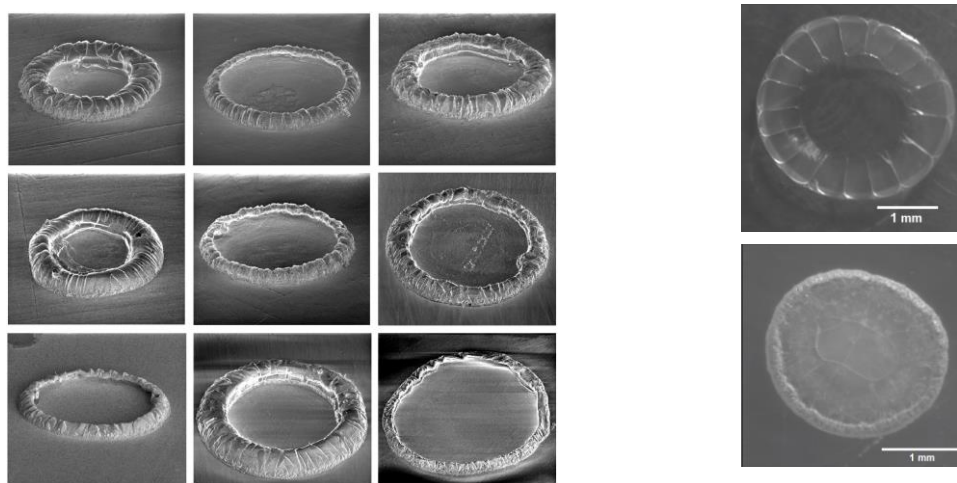


Fig. 2 : Gauche : dépôts après évaporation d'une goutte d'eau pure sur un monocristal de NaCl de types soit « ouvert », soit « fermé », pour des rayons de 1,25 à 3,2 mm, des angles de contact de 27 à 58°, des températures de 41 à 72°C et des humidités de 11 à 36%. Droite : dépôts après évaporation d'une goutte de suspension colloïdale de silice sur substrat inerte (haut) et sur substrat de NaCl (bas).

Remerciements : Les auteurs remercient le CNES pour son soutien et le CADMOS pour son aide expérimentale.

¹ Mailleur, Colombani, Pirat, Rivière and Vodolazskaya, *Phys. Rev. Fluids*, **7**, 093605 (2022).

² Mailleur, Pirat, Simon, Fulcrand and Colombani, *Colloids Surf. A*, **651**, 129724 (2022).

³ Mailleur, Pirat, Pierre-Louis and Colombani, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 214501 (2018). En couverture de la revue.

⁴ Mailleur, Pirat, Rivière, Vodolazskaya and Colombani, *Eur. Phys. J. Special Topic*, **233**, 1551-1559 (2024).

4.8 etude de la cavitation de bulles de fluides cryogéniques en microgravité
M. Defferrez, S. Tanguy, C. Colin, A. Urbano

Étude de la cavitation de bulles de fluides cryogéniques en microgravité

Maxence Deferrez¹, Sébastien Tanguy², Catherine Colin² et Annafederica Urbano¹

¹ ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse

² Institut de mécanique des fluides de Toulouse

Lors de longues phases en vol balistique pour les étages supérieurs des lanceurs, ou dans le cas de futur stockage d'ergols cryogéniques dans des dépôts de carburant en orbite, des conditions de saturation sont atteintes dans les réservoirs¹. Pour refroidir l'ergol avant allumage ou transfert d'ergols, des cycles de pression peuvent être utilisés ce qui engendre de la cavitation de bulles en proche paroi. C'est une des motivations de l'étude du phénomène de cavitation induit par dépressurisation dans un fluide cryogénique statique en microgravité. Par ailleurs la caractérisation de la cavitation au niveau d'une bulle est d'intérêt pour un grand nombre d'applications, allant de la conception de pompes pour les sous-marins, aux applications nucléaires, au biomédical.

Le cas d'étude auquel on s'intéresse est celui d'une dépressurisation dans un réservoir contenant un liquide en équilibre avec sa vapeur saturante. La pression diminue de Δp en un temps Δt puis est maintenue constante et cela entraîne le liquide à se retrouver surchauffé. Nous nous intéressons à plusieurs questions scientifiques concernant ce problème. La première est de comprendre l'impact de l'amplitude et dynamique de la dépressurisation sur la croissance de ces bulles. La deuxième est de comprendre quels sont les paramètres physiques qui impactent la croissance des bulles et leur impact sur la thermique de paroi. Ces questions motivent le développement de l'expérience SCREAMH2 pour la cavitation de bulles en fusée sonde (actuellement en phase A). En parallèle, le développement d'un solveur diphasique compressible avec changement de phase est développé et validé et permet d'effectuer des études numériques notamment dans le cadre de la thèse de Maxence Deferrez.

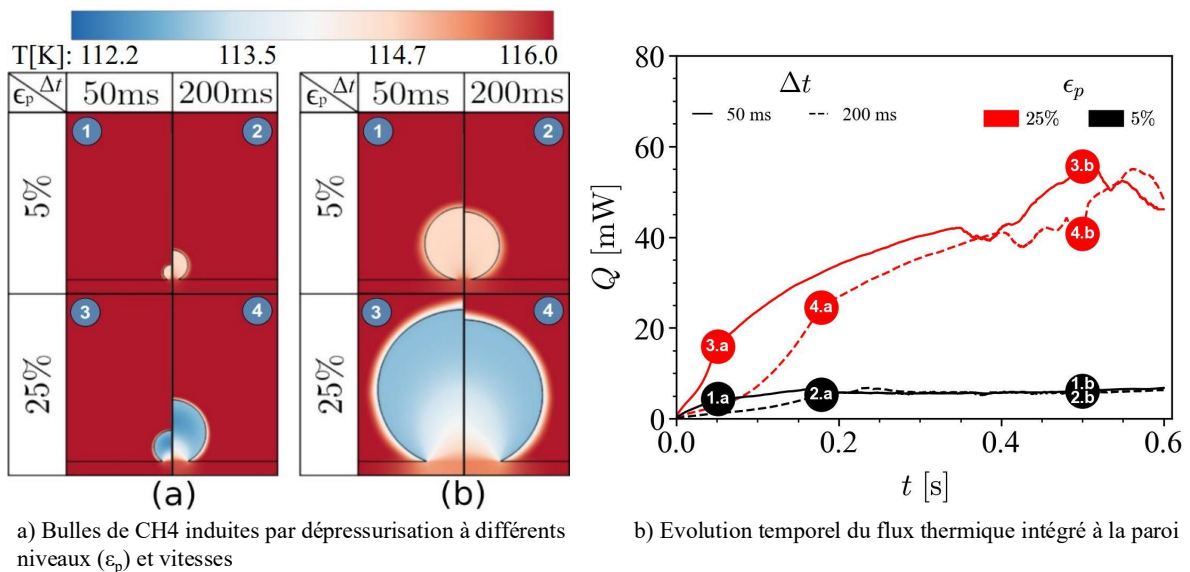


Figure 1: Résultats de l'étude paramétrique présentée en 2 sur la croissance de bulles induites par dépressurisation en 0 g.

Résultats

Le solveur pour la simulation d'écoulements diphasiques compressibles avec changement de phase du code DIVA², a été développé afin de pouvoir traiter des problèmes avec lignes de contact et transfert

¹ A. Simonini, M. Dreyer, A. Urbano, F. Sanfedino, T. Himeno, P. Behruzi, M. Avila, J. Pinho, L.

Peveroni and J.-B. Gouriet, "Cryogenic propellant management in space : open challenges and perspectives", NPJ microgravity - Nature, 10 :34 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41526-024-00377-5>

² M. Bibal, M. Deferrez, S. Tanguy and A. Urbano, "A compressible solver for two phase-flows with phase change for bubble cavitation." Journal of computational physics 500 (2024), 112750, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2023.112750>

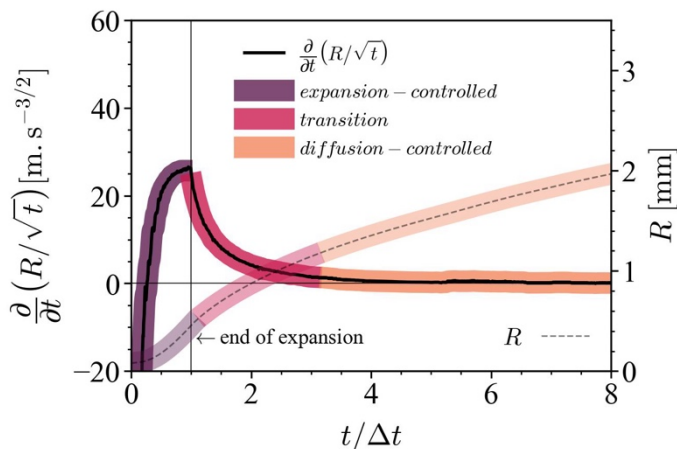


Figure 2 : Évolution di diamètre de bulle et de sa dérivée temporelle en fonction du temps pour une détente de durée Δt (depuis ²)

thermique conjugué. Le solveur a été validé pour la simulation de cavitation de bulles à la paroi en micro-gravité avec la simulation des données expérimentales issues de l'expérience menée au ZARM avec du méthane en tour de chute³. L'analyse des résultats a mis en valeur que la nano-région⁴ peut jouer un rôle important, notamment au niveau de la thermique de paroi, dans le contexte de la cavitation. Le solveur validé a permis de réaliser une large étude paramétrique. Les résultats principaux issues de cette étude² sont : 1) la croissance des bulles est caractérisée par une phase d'expansion suivie par une phase de transition vers une

phase de diffusion pure dans laquelle les bulles rejoignent une croissance en racine du temps (voir figure 2) 2) les effets compressibles impactent la phase d'expansion avec des contributions allant jusqu'à 30 % de la croissance de la bulle (pour de nombres de Jakob Ja allant de 2 à 6) 3) les effets dus à la phase d'expansion sont oubliés après un certain temps et seul persiste l'effet de l'amplitude de la phase de la détente 4) l'impact de la thermique de paroi sur la croissance de la bulle est non négligeable en particulier pour des petites variations de pression (petits Ja).

L'étude a donc été étendue à d'autres fluides cryogéniques, hydrogène H₂ et oxygène O₂, et d'autres pressions (de 1.4 à 14 bar). L'analyse des résultats a permis d'identifier quelles sont les propriétés thermo-physiques et les groupes sans dimension qui mieux représentent le phénomène : nombres de Jakob et de Prandtl, le rapport des effusivités du liquide et de la vapeur ainsi que la masse volumique de la vapeur (et sa variation avec la pression).

Perspectives

Sur la base des résultats de l'étude paramétrique, des modèles pour le débit de changement de phase, le diamètre de la bulle et le flux thermique à la paroi seront dérivés. Ces modèles permettront d'une part d'illustrer le phénomène de cavitation en vase à la paroi dans des fluides cryogéniques et d'autre part de remplacer le calcul du débit de changement de phase dans la simulation par un modèle intégré. Des travaux sont en cours pour simuler ainsi, à un coût computationnel abordable, la cavitation de plusieurs bulles et d'étudier leur interaction. En parallèle, grâce au modèle, pourront être effectuées à moindre coût des simulations de cavitation de H₂ en microgravité afin de proposer une matrice de tests pour l'expérience SCREAMH₂.

Publications

- M. Defferrez, S. Tanguy, C. Colin and A. Urbano, "Direct Numerical Simulation of Bubble Cavitation at a Wall in Micro-Gravity". Int. J of Heat and Mass Trans.. 254, p127612 (2026)
- M. Bibal, M. Defferrez, S. Tanguy and A. Urbano, "A compressible solver for two phase-flows with phase change for bubble cavitation." Journal of computational physics 500 (2024), 112750,

³ N. H. Weber and M. E. Dreyer Depressurization induced vapor bubble growth in liquid methane during microgravity, Cryogenics 134 (2023) 103716

⁴ L. Torres, A. Urbano, S. Tanguy and C. Colin, "On the coupling between Direct Numerical Simulation of Nucleate boiling and a Micro-Region model at the contact line". Journal of computational physics, 497 (2024), 112602, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2023.112602>

4.9 Floating smectic bubbles under electric fields

C. Tosarelli, S. Royer, T. Trittel, C. Klopp, K. Harp, R. Stannarius, **E. Lacaze**

Floating SMECTIC BUBBLES UNDER ELECTRIC FIELDS

Caterina Tosarelli¹, Sébastien Royer¹, Torsten Trittel², Christoph Klopp³, Kirsten Harp², Ralf Stannarius², Emmanuelle Lacaze¹,

¹ Sorbonne Université, CNRS, Institut des Nanosciences de Paris (INSP), Paris, France.

² Fachbereich Technik, Technische Hochschule Brandenburg, Germany.

³ Otto von Guericke University Magdeburg, Inst. of Physics, ANP, Magdeburg, Germany.

Smectic liquid crystals have been extensively investigated since several decades, by means of electro-optical, magneto-optical, and other methods, with focus on electro-magnetically induced switching of orientation [1]. Most of these experiments were performed in sandwich cells with transparent electrodes at the cell plates. Few years ago, a technique has been developed to prepare closed smectic films (smectic bubbles) that float freely in the surrounding air, allowing to avoid any influence of enclosing plates [2,3]. Experiments with freely floating bubbles must be mostly performed under microgravity conditions, so that the bubbles can be kept in the field of view of the microscope camera. Such bubbles are characterized by novel properties, much different from cells or from films that are suspended in a support frame. One of the most important consequences is that the films cannot easily

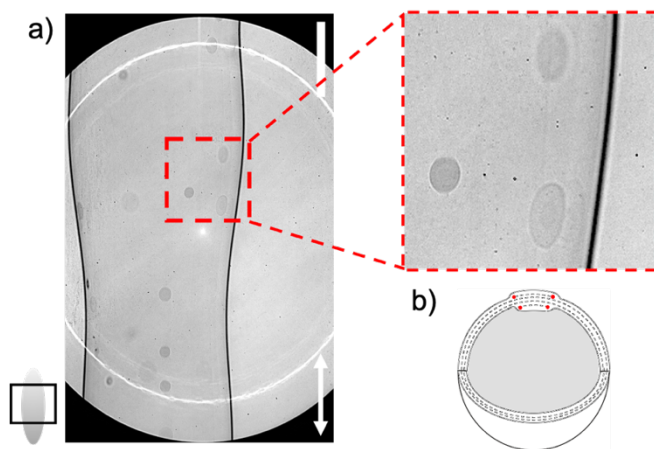


Figure 1 : (a) Islands (dark regions) on a freely floating smectic bubble. The equilibrium radius of the bubble is $R = 2.7\text{mm}$. The black square on the sketch of the bubble in the bottom-left corner indicates the field of view of the camera. The white bar represents 1 mm. (b) Sketch of a cut through a smectic bubble. The smectic layers are indicated by dashed lines. In the upper part, the cut through an island is shown, with the layer dislocations marked by red dots.

change their surface area. Any change of the surface area is connected to the formation or extinction of islands (regions with excess smectic layers – see figure 1) or holes (regions with a reduced number of molecular layers). Islands and holes are surrounded by a topological defect, a dislocation (underlined but the two red dots on figure 1b). Changes of the surface area are slow, and for all shape changes that occur on shorter time scales the film behaves very similar to an elastic solid sheet. In the two CNES-parabolic flight experiments that we have performed in October 2019 and in October 2020 we have studied freely floating bubbles with a focus on the islands that grow during out-of equilibrium bubble oscillations [4].

Here, we are interested in using electric fields to influence bubble dynamics, to direct or trap bubbles in space, and to manipulate islands on the bubble surfaces. The interactions of

liquid crystalline materials with electric fields are among the most extensively investigated characteristics of these materials. These interactions form the basis of almost all contemporary applications of liquid crystals in display devices. The local orientation of the optical axis, and thereby the optical transmission and reflection properties of thin liquid-crystal layers can be controlled with external electric fields. However, the complexity of electric field effects in LC phases is by far not restricted to these electro-optical phenomena. The conductivity of liquid crystalline phases is an anisotropic quantity, based upon the anisotropy of charge carrier mobilities in these materials. In addition, positive and negative charges in liquid-crystalline phases themselves may have very different mobilities. These features are only superficially investigated, for example by time-of-flight experiments in cells.

So far, the influence of electric fields on smectic free-standing films has been mainly studied with extended electrodes in direct contact with the film, where among other applications the induction of spontaneous dissipative patterns was one of the focuses [5]. Novel unexpected effects have been observed in the past when electric field is created by plate electrodes that are not in contact with the

smectic material. Smectic islands move in the electric field, they are attracted by the anode [6]. The reason for the effective negative charging of islands after sudden application of an electric field has been explained by different charge carrier mobilities. These observations were made in sessile bubbles supported by a capillary at the bottom and in the Earth gravitational field. A balance between electric and gravitational forces in large islands was thus occurring [6]. However, this balance shifted after some time because the islands lose their effective charges. While these observations were made already some time ago, these phenomena have not been explored further in the past. Recent simulations in nematic phase have studied the interaction between ions and topological defects that might be relevant in this context [7].

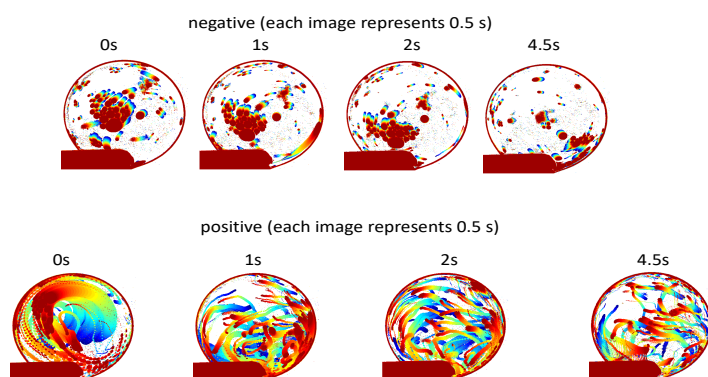


Figure 2: Evolution over 0.5 s (shown in colour) of the islands present on the floating smectic bubble after activation of an electric field presented over time (a) for a negative electric field. (b) for a positive electric field.

In October 2022, we have performed a first experiment on smectic C bubbles during CNES parabolic flights. Using flat electrodes without contact to the bubble with maximum electric field of 1000V, we did not observe any specific feature. This may be connected with the different nature of our smectic C material with respect to the one of ref [6]. However, using needle electrodes in contact with the smectic bubbles, a number of unexpected features have been observed for both salted and unsalted smectic C bubbles. Strong differences in the dynamics of the islands have been revealed in particular as a function of the polarity of the experiment (Figure 2). A slow dynamics of the islands with a negative polarity has been demonstrated that leads to a localization of the majority of the islands close to the needle electrode. A fast dynamics, similar to a fast convection, has been shown in contrast for positive polarity. This suggests a given charge of the smectic islands on the surrounding of the bubbles in the presence of salt in agreement with simulations that show that ions are preferentially localized at the topological defects [7], thus conditioning their dynamics in the presence of an electric field (Figure 2).

It will thus be particularly interesting now to study this electric field induced dynamics in detail. This requires a detailed systematic study of the influence of the two crucial parameters that are the salt concentration and the electric field polarity. We will gain a reliable statistics on the induced phenomena by varying the electric control parameters as well as the salt concentration from 0.5 to 5 wt%. While the electric field parameters can be varied during one flight, the exchange of the materials with different conductivities can only occur between the flights on ground. Three flight days offer the opportunity to fly with three different salt concentrations. We have thus decided to build an entirely new set-up in INSP to allow for a full independency of the Paris group with respect to the set-up of the german collaborators. It has been successfully tested at the last campaign of parabolic flight of October 2025. We will thus apply for new parabolic flight measurements in 2026 that might allow us to perform the necessary statistics and to build theoretical models of the observed features.

References

- [1] Oswald, Pieranski, *Smectic and Columnar Liquid Crystals Concepts and Physical Properties* 2005
- [2] May et al., *EPL*, **100** 16003 (2012).
- [3] May et al., *ChemPhysChem*, **15**, 1508 (2014).
- [4] Missaoui et al., *Soft Matter*, (2022).
- [5] Langer and Stannarius, *Phys. Rev. E* **58**, 650 (1998).
- [6] Stannarius, Cramer, *EPL* **42** 43 (1998)
- [7] Everts and Ravnik, *Phys. Rev. X*, **11** 011054 (2021)

- 4.10 Etude des métaux liquides en microgravité par stabilisation aérodynamique : Préparation du dispositif CARMELIDE
M. Courtois, C. Bourges, M. Le Mener, W. Berckmans

Etude des métaux liquides en microgravité par stabilisation aérodynamique : Préparation du dispositif CARMELIDE

Mickael Courtois¹, Coline Bourges¹, Maelenn Le Mener, William Berckmans

¹ IRDL, UMR CNRS 6027, Université Bretagne Sud

Contexte et Objectifs

L'industrie utilise depuis de nombreuses années des métaux à haut point de fusion comme le fer, le titane, le nickel ou le zirconium qui passent généralement au-delà de leur point de fusion pour leur mise en œuvre. De nouveaux types de procédés d'ingénierie des métaux sont en cours de développement comme la fabrication additive métallique ou la fusion nucléaire qui nécessitent une meilleure connaissance des propriétés thermophysiques des liquides à très haute température (>2000°C). Par ailleurs, de nombreux chercheurs (dont ceux de l'IRDL) développent des modèles numériques magnéto-thermo-hydrodynamiques (CFD - MHD) de procédés de fusion des métaux (soudure, fabrication additive, découpe, ingénierie des matériaux...) et rencontrent un problème majeur de manque de données thermophysiques à l'état liquide pour les alliages.

L'expérience CarMélide pour Caractérisation des Métaux Liquides par stabilisation aérodynamique vise à réaliser des mesures de viscosité, densité et tension de surface des métaux (et autres) à l'état liquide à des niveaux de température compris entre 1500°C et 3000°C. Pour réaliser ceci, il faut les fondre avec un laser de puissance afin d'obtenir des gouttes en sustentation que nous pouvons étudier et analyser avec des outils de mesure sans contact spécialisés (caméra haute vitesse, pyromètres). A ces niveaux de température, même sur Terre, la lévitation est nécessaire et déjà employée pour éviter tout contact avec un support qui ne tiendrait pas la température. Mais la gravité perturbe grandement la précision des mesures. C'est pour atteindre une grande précision (pour la densité et la tension de surface) ou simplement être capable de faire la mesure (pour la viscosité) que la microgravité est requise. En effet, sur Terre, la gravité ajoute des forces parasites à tous dispositifs expérimentaux qui dégradent nos mesures et donc, jusqu'à aujourd'hui, nos connaissances.

Méthodologie envisagée

Le dispositif en cours de conception et montage est prévu pour voler lors de la campagne de vols paraboliques du CNES VP190. L'expérience reprend le savoir-faire du laboratoire en lévitation aérodynamique terrestre et l'adapte aux conditions particulières de la microgravité. Ainsi, le cœur du système repose sur une buse en cuivre divergente à 60° permettant un centrage de l'échantillon (comme dans les dispositifs terrestres) et complétée de son symétrique opposé permettant une stabilisation centrale de l'échantillon dans le champ de mesure (Figure 1). La goutte sera « coincée » entre deux flux haute pression dans une zone de basse pression (principe relativement proche de l'effet Coanda). La vitesse du gaz sera équilibrée pour être suffisamment puissante pour stabiliser la goutte tout en étant la plus faible possible afin de ne pas générer des effets de friction.

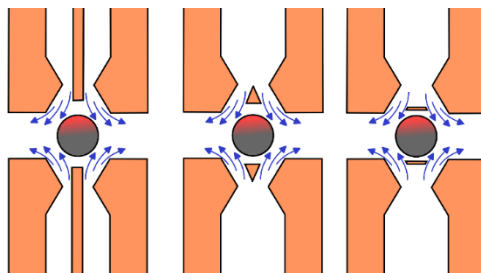


Figure 1 : Principe de la stabilisation aérodynamique et géométries envisagées (en cours d'usinage).

La forme particulière de la buse a été pré-optimisée pour une meilleure stabilité via une démarche numérique reposant sur des modèles CFD à maillage mobile. Afin de contrôler les débits de gaz, des débitmètres numériques seront pilotés par ordinateur. Le cuivre est choisi pour sa très bonne conductivité thermique qui autorise des contacts ponctuels avec le métal en fusion sans pour autant

se détériorer (solution déjà éprouvée sur Terre). La première campagne de vols sera dédiée au test de plusieurs types de buses. Autour de cet élément central, une enceinte d'inertage est prévue pour maîtriser l'atmosphère et ainsi travailler sous argon pur. Une fois la bille stabilisée dans un environnement contrôlé, elle sera observée par plusieurs équipements utiles à la mesure. D'abord, la bille sera chauffée au moyen d'un laser fibre IPG 200W @1070nm piloté en régulation de température. La température sera contrôlée par un pyromètre bi-chromatique (Optris CT Ratio 2MH1) filtré sur la longueur d'onde du laser. La forme sera observée par trois caméras rapides. Deux caméras rapides IDT 4K et fullHD avec des objectifs macros permettront d'observer les oscillations de la goutte sous deux angles et une Phantom VEO-310L permettra d'avoir une vue d'ensemble de la zone de réaction.

Comme sur Terre, des haut-parleurs pilotés par Matlab seront présents pour exciter acoustiquement les échantillons et ainsi permettre la mesure. Une LED sera positionnée pour rétro-éclairer l'échantillon et améliorer la netteté des images (ombroscopie). Tous ces éléments seront répartis autour du cube *via* les quatre hublots en borosilicate transparents à tous les rayonnements mis en jeu (Figure 2).

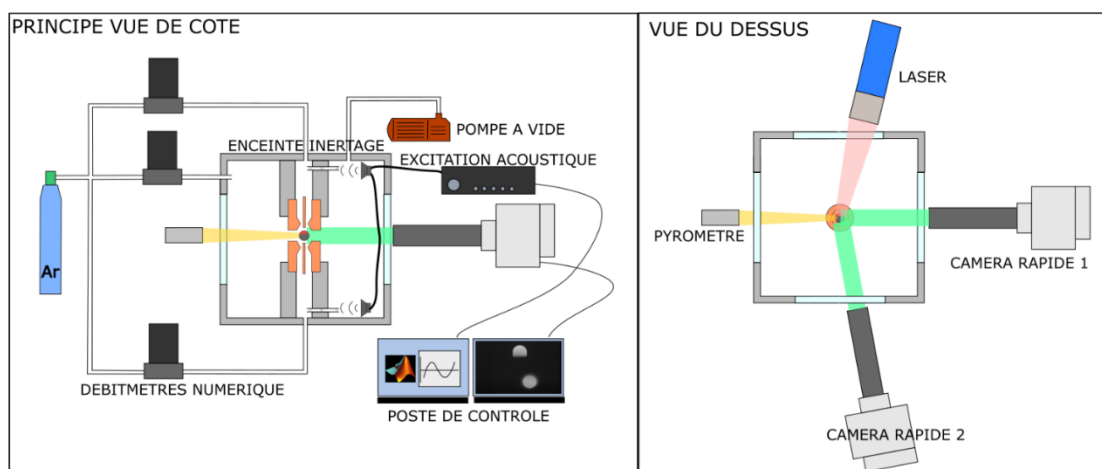


Figure 2 : Schéma de principe de la configuration envisagée. Vue de côté et vue de dessus.

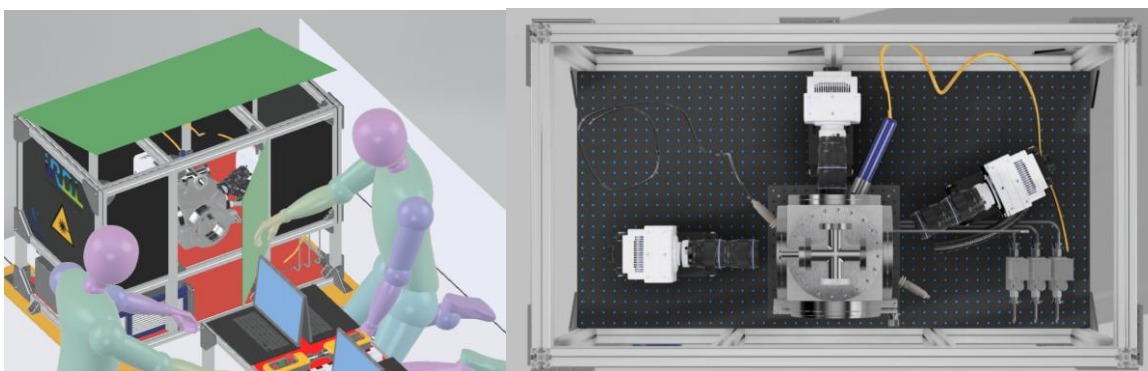


Figure 3 : Vue numérique générale de l'expérience envisagée.

Perspectives

L'expérience est en cours de conception et de montage. Le gros du travail consiste transposer le savoir-faire terrestre aux exigences de sécurité de l'avion pour les vols paraboliques.

En cas de succès, ce nouveau dispositif imaginé pour voler plusieurs fois permettra d'accéder à la tension de surface, la masse volumique et la viscosité de matériaux liquides entre 1500 °C et 3000 °C. Le choix de la stabilisation aérodynamique permettra d'étudier tous les types de matériaux, magnétiques ou non, et sera très complémentaire aux dispositifs existants (TEMPUS-DLR, ISSEML-ESA...)

- 4.11 3D Modeling of airborne Microparticle transport through a microstructure : Ratchet effect
P. Beltrame, P. Trontin

3D Modeling of airborne Microparticle transport through a microstructure: Ratchet effect

Philippe Beltrame¹, Pierre Trontin²

¹ EMMAH - INRAE - Avignon Université

² LMFA – Université Claude Bernard Lyon 1

Le tri des particules en suspension dans les fluides représente un enjeu majeur pour des domaines aussi variés que l'industrie alimentaire, les diagnostics médicaux ou encore le traitement des eaux usées. Cette problématique prend une dimension critique en microgravité, où l'absence de sédimentation maintient les microparticules en suspension, où des résidus métalliques issus d'opérations de découpe peuvent persister dans l'environnement, générant des risques potentiels. Les procédés traditionnels de microfiltration par membrane sont peu sélectifs, laissant passer toutes les particules sous une certaine taille, et leur efficacité diminue rapidement à cause de l'accumulation de résidus sur la membrane¹.

Depuis deux décennies, des méthodes alternatives fondées sur des microstructures se sont développées. Ces dispositifs exploitent des forces oscillantes pour induire un effet dit « ratchet » (ou cliquet), qui permet aux particules de migrer de manière irréversible depuis leur position initiale. Des travaux théoriques et numériques prédisent un effet ratchet soit par un mécanisme déterministe lié à l'inertie de la particule (*ratchet flow*²) soit par un mécanisme stochastique lié aux mouvements brownien (*drift ratchet*³). Néanmoins, ces effets restent non prouvés en laboratoire, et leur mise en évidence se heurte aux difficultés posées par la viscosité élevée des fluides et la faible inertie des microparticules. Une étude numérique⁴ a montré que l'effet ratchet est particulièrement marqué lorsque la particule est bien plus dense que le fluide suggérant l'emploi d'un fluide tel que l'air. La microgravité devient nécessaire pour éviter la sédimentation pendant l'expérience.

C'est dans ce cadre que se place cette étude préparatoire, visant à terme la mise en œuvre expérimentale d'un tel dispositif : le transport sélectif de particules en suspension dans l'air en microgravité, d'un bassin à un autre, à travers une microstructure sous l'action des seules oscillations de l'air. Cette expérience sera conduite lors de vols paraboliques afin de simuler l'absence de gravité. Nous avons retenu une microstructure constituée d'un réseau périodique de piliers (Fig. 1), plutôt que les micro-canaux décrits dans la littérature, afin d'éviter la formation de clusters obstruant les canaux.

Résultats et perspective

L'objectif principal de la première année était de réaliser des simulations numériques basées sur les hypothèses d'un écoulement quasi-statique de l'air au sein d'une microstructure composée de piliers. La première étape, consiste à calculer les champs de force par éléments finis qui s'exercent sur la particule. Des calculs ont été menés l'année dernière en utilisant le logiciel FreeFEM++. Le stage de M2 de Dunia Campagna a montré que ces précédents résultats n'étaient physiquement acceptables car ils n'étaient pas consistants avec le principe d'Onsager. Ainsi, le calcul des champs de force a révélé des défis numériques notamment en termes de temps CPU (lié à la finesse du maillage) et de convergence. Le mailleur intégré à FreeFEM++ et **gmsh** se sont avérés insuffisants pour le raffinement requis. Pour y remédier, nous avons utilisé le mailleur du logiciel **Fidelity Pointwise**, ce qui a permis d'obtenir le niveau de raffinement nécessaire (Fig. 2). Par ailleurs, l'utilisation d'éléments du second ordre pour le champ de vitesse s'est imposée pour garantir une précision suffisante et des résultats cohérents avec la physique du problème, comme la symétrie de la matrice de friction (Fig. 3).

¹ Kulrattanak et al. (2008), "Classification and evaluation of microfluidic devices for continuous suspension fractionation," *Adv. Colloid Interface Sci.* **142**(1).

² Beltrame et al. (2016), "Deterministic particle transport in a ratchet flow," *Phys. Rev. E* **93**:12208 ; Beltrame (2016), "Absolute Negative Mobility in a Ratchet Flow," *Understanding Complex Systems*, Springer, pp 249–261.

³ Kettner et al. (2000), "Drift ratchet," *Phys. Rev. E* **61**, 312

⁴ Makhoul and Beltrame (2021), "Selective Transport of Airborne Microparticles Through Micro-channels Under Microgravity," *Microgravity Sci. Tech.* **33**:4.

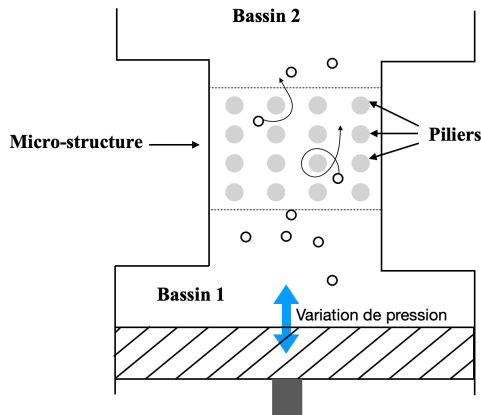


Fig. 1 : Schéma du dispositif expérimental.

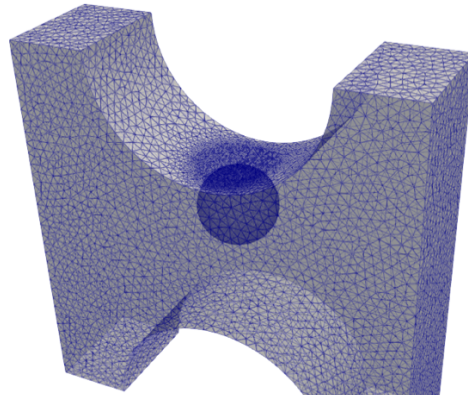


Figure 2 : Exemple de maillage tri-dimensionnel pour le calcul des contraintes. Rayons du pilier $R=0,3$ et de la particule $r=0,1$.

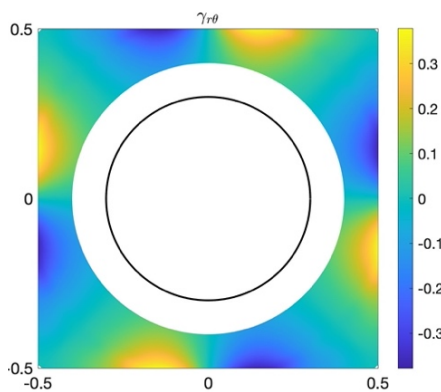


Figure 3 : Champ de friction $\gamma_{r\theta}$. La zone blanche indique la zone inaccessible à la particule à cause du pilier (cercle noir).

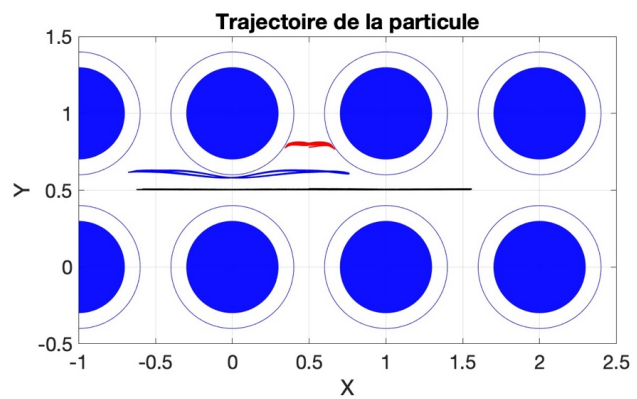


Fig. 4 : Trois types d'attracteur périodique observé pour trois conditions initiales différentes

Les premiers calculs de trajectoire ont mis en évidence l'importance de prendre en compte la rotation de la particule, même si la particule n'est pas très proche des parois. Étant donné que ces calculs 3D doivent être répétés pour différentes positions de la particule, le code a été parallélisé afin de réduire les temps de calcul. À ce jour, le temps nécessaire pour une géométrie et une taille de particule données a été ramené à quelques heures.

La connaissance du champ du torseur agissant sur la particule nous fournit un Système d'EDO gouvernant la trajectoire bidimensionnelle de la particule en incluant la rotation de la particule. La simulation des dynamiques périodiques révèle trois types d'attracteurs (Figure 4) : i) **Un attracteur le long de l'axe longitudinal** (trajectoire en noir) : les particules initialement proches de cet axe tendent asymptotiquement vers une dynamique unidimensionnelle ; ii) **Un attracteur modulé par les piliers** (trajectoire en bleu) : les déplacements de la particule restent principalement longitudinaux, mais sa trajectoire est influencée par la présence des piliers ; lii) **Un attracteur confiné** (trajectoire en rouge) : la particule est piégée entre deux piliers, empêchant toute dérive longitudinale. Il existe donc un risque que certaines particules soient bloquées dans cette configuration.

Nous n'avons mis en évidence un transport de particules qu'en réduisant la hauteur des piliers à une valeur égale de 50% supérieur au diamètre des particules. Notre interprétation est que si les piliers sont trop hauts, le fluide peut contourner la particule par le dessus ou par le dessous, et le contraste des forces de friction devient insuffisant pour produire un effet cliquet. Par ailleurs, seule une dérive lente et intermittente a été observée numériquement, alors que la théorie prédit également un mécanisme plus rapide lorsque le contraste de contraintes est suffisamment élevé. Cela suggère que la géométrie en piliers n'est peut-être pas la plus adaptée. Les prochaines études porteront donc sur d'autres microstructures plus favorables à l'effet cliquet.

- 4.12 Ebullition nucléée : Influence de la gravité sur la nucléation de bulles
L. Tadr*ist, A. Zaite, F. Ronshin, A. Rednikov, I. Martin, H. Combeau*

Ebullition nucléée : Influence de la gravité sur la nucléation de bulles

Lounès Tadrist¹, A. Zaite¹, Fedor Ronshin², Alexey Rednikov³, Irina Martin¹, Hervé Combeau⁴

¹Aix-Marseille Université – IUSTI UMR 7343 – Marseille, France, ²Kutateladze Institute Thermophysics, 630090 Novosibirsk, Russia, ³Université libre de Bruxelles, TIPS, CP 165/67, Av. F.D. Roosevelt 50, 1050 Brussels, Belgium, ⁴Université de Lorraine, CNRS, Institut Jean Lamour, Nancy Cedex, France

La présente étude vise à faire progresser les connaissances sur les mécanismes d'ébullition et les transferts de chaleur avec changement de phase liquide-vapeur. Ces phénomènes s'avèrent particulièrement importants et parfois critiques dans certaines applications. Les lois de transfert de chaleur associées à la grande diversité des situations restent encore inaccessibles pour le dimensionnement des appareils. L'IUSTI mène des travaux sur l'ébullition nucléée dans le cadre du projet ERAMEN® avec l'étude de l'ébullition sur site isolé et en multisites. Dans ce contexte l'expérience de référence® a pour objectif le développement d'expériences d'ébullition dans des conditions bien contrôlées. Il s'agit de partir de la situation la plus élémentaire correspondant à l'ébullition sur un site isolé et de l'étendre à des investigations de l'ébullition multisites. Dans cette situation les interactions entre bulles jouent un rôle important sur les écoulements et les transferts de chaleur induits. Il est donc important de comprendre l'impact des interactions bulle-bulle.

Résultats

1. Expérience de référence – Etat d'avancement

Au cours de l'année 2024-2025, des travaux ont été réalisés sur l'expérience de référence. La cellule de mesure conçue est entièrement transparente. Elle permet une visualisation de la nucléation croissance bulles et des écoulements de convection naturelle. Des résultats préliminaires ont permis de tester la faisabilité de l'expérience dans le cas d'un site unique et de plusieurs sites. Cependant la nécessité de réaliser des expériences bien contrôlées et d'assurer la fiabilité des mesures, nous avons focalisé notre attention sur la calibration de l'expérience en menant des approches couplées expérience-simulation numérique afin d'évaluer avec précision les transferts de chaleur fluide-paroi.

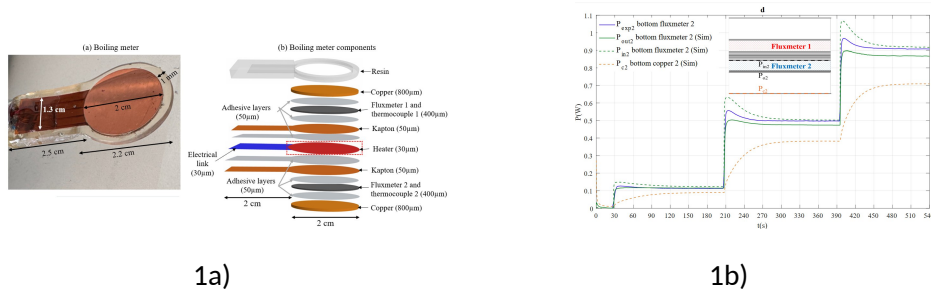


Fig. 1. 1a) Vue d'ensemble (a) de l'ébulliomètre et (b) de ses composants (l'élément chauffant au centre avec la connexion électrique, les deux couches de Kapton, les deux fluxmètres thermiques, les deux disques en cuivre, la bande en résine et les couches adhésives). 1b) Évolution dans le temps des flux de chaleur calculés sur les faces interne et externe des fluxmètres thermiques et sur les faces des disques en cuivre.

Il s'est avéré que la connaissance précise des conditions de fonctionnement et des phénomènes induits dans la cellule de mesure (conduction, convection naturelle, ébullition, etc.) (figure 1) sont déterminants pour une quantification précise de lois de transfert de chaleur fluide paroi¹. Ces travaux nous ont amené à poursuivre l'approche combinée utilisée pour déterminer les lois de transfert thermique entre un fluide et une paroi. L'approche permet également de concevoir un ébulliomètre approprié pour mesurer les transferts thermiques au niveau d'une paroi en contact avec un fluide.

2. Ebullition en microgravité – Analyse de l'ébullition en vase de RUBI et modélisation

L'expérience RUBI intègre l'ébullition en vase, l'ébullition convective et l'ébullition en présence d'un champ électrique. Ces expériences visent à élucider les mécanismes de nucléation et de croissance des bulles pendant l'ébullition dans des conditions de microgravité. Cet environnement unique permet aux bulles d'atteindre des tailles impossibles à obtenir dans des conditions terrestres.

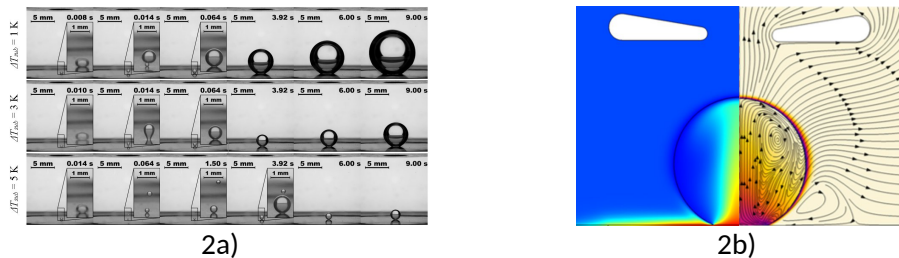


Fig. 2. a) Evolution de la taille des bulles pour différents niveaux de sous refroidissement (Fluide FC72). b) Lignes de courant calculées avec les champs de concentration et de température à l'instant final $t = 9\text{ s}$ dans le cas de simulation $\Delta T_{sub} = 1\text{ K}$ et teneur en non condensables dissous $\zeta = 13\%$

Pour ce qui nous concerne, nous concentrons notre attention sur l'analyse des résultats de l'expérience d'ébullition en piscine à bulle unique, avec une attention particulière portée à l'influence des différents niveaux de sous-refroidissement du liquide. Les résultats expérimentaux sont étayés par des simulations numériques basées sur un modèle développé précédemment¹. Certains phénomènes observés, tels qu'une bulle évitant l'effondrement puis reprenant sa croissance, se sont avérés difficilement explicables sans présumer la présence de résidus non condensables, malgré un dégazage minutieux du liquide FC-72 utilisé. Le modèle a été modifié en conséquence pour tester une telle image du phénomène. Il inclut la convection thermique Marangoni comme conséquence des non-condensables.

Nous avons montré que prise en compte de ces facteurs permet de résoudre les divergences entre les cas de sous-refroidissement³. La présence de gaz non condensables à l'intérieur de la bulle influence considérablement sa durée de vie et sa dynamique de croissance. Ces gaz réduisent la condensation à l'interface de la bulle, ce qui permet à celle-ci de persister même dans des conditions de sous-refroidissement relativement élevées ($\Delta T_{sub} = 5\text{ K}$).

Perspectives

- Les travaux sur l'expérience de référence en cours consistent à réaliser des états de surface dénués de sites parasites plusieurs techniques sont en cours de tests.
- L'analyse des résultats expérimentaux de RUBI se poursuivent actuellement sur le rôle des incondensables sur la croissance des bulles en régime d'ébullition nucléée. L'analyse d'autres données est envisagée avec d'autres équipes de RUBI.

Publications

¹Zaite, A., Kharkwal, H., Combeau, H., & Tadrist, L. (2025). Fluid-solid heat transfer analysis: In situ validation and calibration of a boiling meter using a combined experimental-numerical heat transfer approach. *Flow Measurement and Instrumentation*, 104, 102905.

²Ronshin, F., Rednikov, A., Zorkina, A., Jambert, J., Graur, I., Kabov, O., Tadrist, L. (2025). Bubble growth on a single artificial nucleation site near saturation conditions in microgravity. *Physics of Fluids*, 37(8).

³Ronshin, F., Rednikov, A., Zorkina, A., Kabov, O., Colinet, P., & Tadrist, L. (2025). Presumed role of non-condensable residuals in vapor bubble growth at an artificial site in subcooled boiling under microgravity. *Applied Thermal Engineering*, 279, 127333.

Session 5

Mousses, émulsions, suspensions, gels

- 5.1 Dynamics of glassy suspensions of soft colloids : ground and microgravity data
A. Martinelli, **L. Cipelletti**

Dynamics of glassy suspensions of soft colloids: ground and microgravity dataA. Martinelli¹, L. Cipelletti^{1,2}¹ L2C, U. Montpellier, CNRS, Montpellier, France² Institut Universitaire de France, Paris, France

Despite gravitational forces are rarely relevant at the single colloidal particle scale, they do play a crucial role when colloids assemble to form large structures. In fact, gravitational stresses may be transmitted and accumulated over macroscopic distances, strongly changing the spontaneous dynamical properties of the system at study. Here, we discuss results obtained with Colloidal Solids (COLIS) [1] – a state-of-the-art light scattering setup flying on the International Space Station (ISS) – on suspensions of ultra-low cross-linked (ULC) PNIPAM microgels, in which glass transition can be induced with temperature variations as well as number density variations. We will show how these soft systems can be driven in the glassy state and how they respond to external stimuli, leading to non-diffusive microscopic relaxations. Finally, we will report the progress of the experimental campaign in microgravity for the PNIPAM microgel glasses.

Introduction

Colloidal suspensions are dispersions of sub-micron solid particles in a background solvent. When the colloidal particles occupy a fraction ϕ of the total volume that is sufficiently high, the system forms a colloidal glass. Here we use ultra-low crosslinked (ULC) ‘microgels’ nanoparticles ($R = 130$ nm @ 25°C) based on PNIPAM, a thermo-sensitive polymer: the radius of the microgels decreases with temperature T due to a change in the affinity of the polymer chains with water. This process can be exploited for varying the volume fraction ϕ and inducing the glass transition, all of this with a single sample: a not negligible advantage for experiments in space.

Results

The data discussed hereafter have been collected using an advanced scattering technique known as Photon Correlation Imaging (PCI). PCI blends dynamic light scattering (DLS) with imaging, allowing for both spatially and temporally-resolved characterization of complex microscopic dynamics. These are routinely captured by the $g_2(t)$ function (intensity-intensity correlation function), modelled experimentally with the Kohlrausch–Williams–Watts (KWW) equation, $g_2(t) - 1 = e^{-2(t/\tau)^\beta}$, with τ the relaxation time and β the shape parameter. Fig. 1 shows the results obtained for two different syntheses of PNIPAM microgels at high volume fraction (red and blue data, hereafter indicated by ULC1 and ULC2, respectively) measured on Earth [2]. Approaching $\phi \approx 1$, the relaxation time (normalized for the dilute-limit diffusion time τ_0) increases by 8 orders of magnitude. This increase can be modelled with a VFT

equation, $\tau \propto e^{\left[\frac{B}{\phi_g - \phi}\right]}$, typical of fragile glass formers. The result of the fit leads to $\phi_g = 1.00$ and $\phi_g = 1.13$ for ULC1 and ULC2, respectively, where ϕ_g is the glass transition volume fraction.

On approaching ϕ_g , we observe a change in the shape parameter β , inset of Fig.1. At low volume fractions, $\beta \approx 1$, as expected for simple Brownian diffusion. As the volume fraction increases, β becomes less than 1, a feature typically observed in glasses and associated with the inherently heterogeneous nature of the glass transition. It should be noted that, in this particular system, the volume fraction can be varied in two ways: either by changing the number density (c) or by tuning the

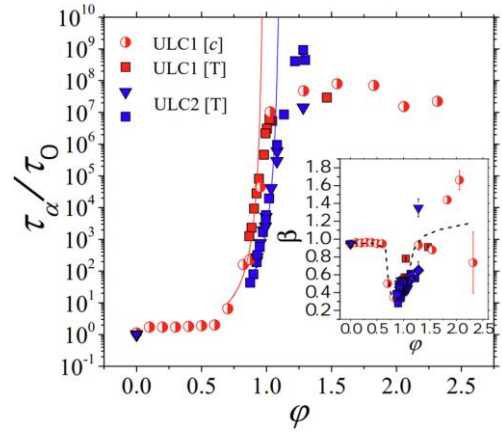


Fig.1: Normalized relaxation time τ/τ_0 and stretching exponent β (inset) as a function of volume fraction ϕ for two samples (ULC1 and ULC2, respectively). The labels indicate how ϕ was changed (by varying either c or T). Solid lines in main panel are VFT fits. Adapted from [2]

individual particle volume through temperature (T). In Fig. 1 we present both approaches to control the volume fraction (red squares and red half-filled dots): the two methods yield equivalent results. Interestingly, when the volume fraction is increased further beyond ϕ_g , we observe a pronounced change in the dynamical behavior: the relaxation time deviates from the VFT trend and reaches a roughly constant, yet very large, value. At the same time, the shape parameter shifts from stretched to compressed ($\beta > 1$). This transition is usually attributed to stress relaxation processes that alter the microscopic dynamics, a phenomenon observed in a variety of systems, from soft gels to hard metallic glasses. In colloidal glasses, it remains debated whether these microscopic relaxations can be triggered by gravity. Once a colloidal suspension enters the glassy state, it becomes solid with a finite elastic modulus. Under these conditions, the weight of the colloidal glass itself compresses the material, potentially inducing microscopic anomalous relaxations.

This is one of the scientific challenges we explored during the first experimental campaign on ISS with the COLIS setup, that has been performed in May 2025. In this first campaign, we studied the dynamics of an ULC colloidal glass for different volume fractions (controlled changing the sample temperature), different preparation protocols as well as subjected to external perturbations (induced by temperature oscillations and infrared laser local heating). In Fig. 2, we show some of the very preliminary results from the ongoing data analysis. Blue crosses are the relaxation times measured for the sample ULC2 on Earth (ground reference tests of 2023), while the yellow points are the data in microgravity for the new batch ULC3 that was shipped to the ISS.

Two features are clearly visible here. On one hand, the glass transition volume fraction (roughly, the value at which $\tau \sim 100$ s) differs between the two glasses. This is not entirely surprising, due to unavoidable uncertainties when preparing samples from different batches. What is truly surprising, however, is that the slope of the two curves differs markedly, resulting in a very different “fragility index” $m \propto \left. \frac{d \log \tau}{d \phi} \right|_{\phi_g}$. Here, the preliminary data suggest that the colloidal glass in microgravity is much “stronger” (lower m) than on Earth.

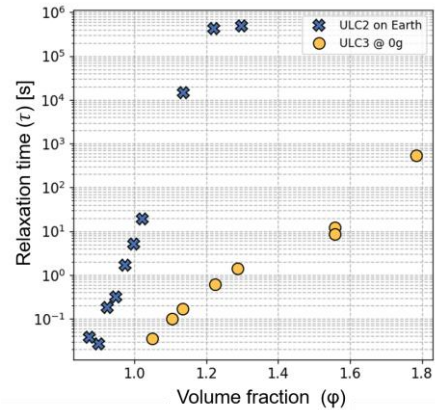


Fig.2: Microgel suspension relaxation time as a function of ϕ on Earth (blue crosses) and in microgravity conditions (yellow points). Unpublished data.

Perspectives

The experimental campaign of May 2025 faced some hardware and technical issues and forced us to perform only a preliminary and limited data analysis onboard the ISS, as a check for data quality. In the next months, we will i) continue the partial data analysis of the flight data; ii) complete the data analysis as soon as the raw data will be physically recovered from the ISS, expected in spring 2026; iii) perform the ground reference tests on the very same samples that flight on the ISS (expected at beginning 2026) ;iv) prepare publications with the microgravity data.

Acknowledgements. We thank CNES and ESA (project “COLLOID: Solidification of colloids in space: structure and dynamics of crystal, gel, and glassy phases”) for support. AM acknowledges CNES for a postdoctoral grant. LC gratefully acknowledges support from the Institut Universitaire de France.

References

- [1] A. Martinelli et al., *An advanced light scattering apparatus for investigating soft matter onboard the International Space Station*, npj Microgravity, 10(1), 115 (2024).
- [2] A. Martinelli et al., *Glass transition of ultra-low crosslinked microgels*, in preparation.

5.2 Arrêt du mûrissement de bulles dans les fluides à seuil
S. Cohen-Addad, N. Galvani, B. Saint-Michel, **O. Pitois**

Arrêt du mûrissement de bulles dans les fluides à seuil

S. Cohen-Addad¹, N. Galvani^{1,2}, B. Saint-Michel^{2,*}, O. Pitois²

¹Sorbonne Université – Institut des Nanosciences de Paris, UMR 7588 – Paris

²Université Gustave Eiffel, Laboratoire Navier, UMR 8205 – Champs-sur-Marne

Contexte

L'un des objectifs de notre projet CNES « mousses de fluides complexes » est d'étudier le mûrissement d'assemblées de bulles d'air en suspension dans une émulsion concentrée afin de comprendre comment cette dernière peut ralentir, voire bloquer, ce processus. Nos travaux se fondent sur un ensemble d'expériences réalisées au sol et dans l'ISS [1,2] dans le cadre du projet MAP de l'ESA « Hydrodynamics of wet foams »^{**}. Nous présentons ici des résultats issus des travaux réalisés au sol dans le cadre de la thèse (CNES/ESA) de N. Galvani [3], en collaboration avec Brice Saint-Michel au laboratoire Navier. En utilisant une cellule osmotique développée spécialement pour cette étude nous avons pu identifier les conditions permettant de stopper le mûrissement de bulles en suspension dans un fluide à seuil. Ce travail vient d'être publié [4].

Expérience

L'étude est réalisée à l'aide d'un clinostat associé à une cellule osmotique, représentée sur la Figure 1. Le système étudié est une émulsion transparente huile / solution eau-glycérol contenant du TTAB (18 g/L). La fraction volumique d'huile dans l'émulsion est initialement de 70 %, ce qui correspond à une contrainte seuil d'environ 4 Pa. Au cours du mûrissement, la cellule osmotique permet d'évacuer une partie de la phase aqueuse, ce qui a pour effet de concentrer les gouttelettes jusqu'à des valeurs atteignant 96 %, correspondant à une contrainte seuil d'environ 120 Pa. La fraction d'émulsion ϕ dans le système vaut initialement entre 30 et 95%. Les bulles sont observées à la paroi (voir figure 2), leur taille moyenne $R(t)$ est mesurée à chaque instant et mise en correspondance avec la contrainte seuil $\tau_y(t)$ qui est déduite d'une simulation numérique du drainage imposé dans la cellule. Le nombre capillaire de Bingham $Bi = \tau_y R / \gamma$ associé est déterminé, où γ est la tension de l'interface des bulles.

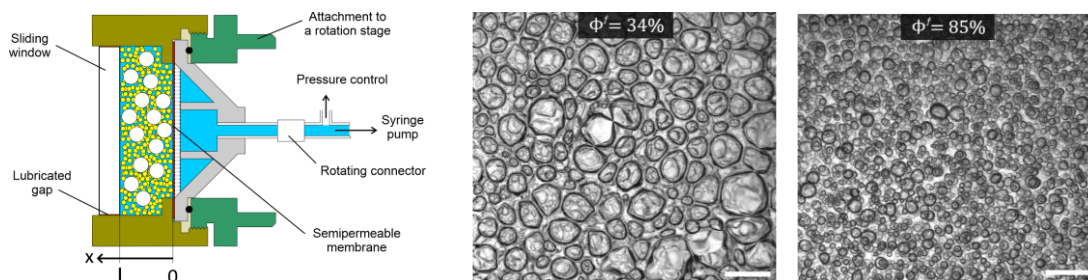


Figure 1 : Cellule osmotique utilisée pour les expériences au sol (les gouttelettes d'huile sont en jaune, la solution aqueuse en bleu, les bulles en blanc : la membrane laisse passer la solution aqueuse mais ni les gouttelettes ni les bulles). Images des émulsions moussées observées pendant l'étude : Une mousse (34% d'émulsion – 66% d'air) et une dispersion diluée de bulles (85% d'émulsion – 15% d'air). Echelle = 2 mm.

Résultats

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 2. On observe dans un premier temps une augmentation du rayon moyen des bulles, liée au mûrissement. Parallèlement, la contrainte seuil de l'émulsion croît en raison du drainage de la phase aqueuse, induit par la dépression appliquée à travers la membrane. Il en résulte un arrêt du mûrissement, se traduisant par le plateau observé sur la courbe d'évolution de la taille moyenne des bulles.

* adresse actuelle : Telespazio Belgium S.R.L for the European Space Agency

** coordonné par D. Langevin

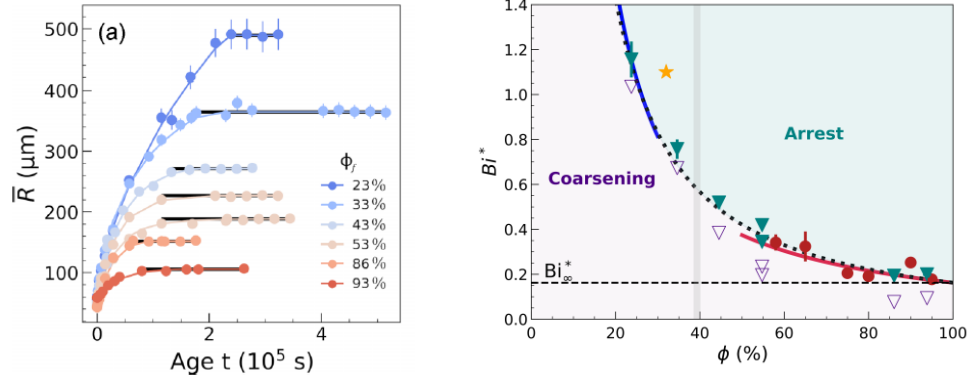


Figure 2 : (Gauche) Evolution temporelle du rayon moyen des bulles observées. On remarque qu'à partir d'un âge donné, la taille moyenne n'évolue plus, ce qui marque l'arrêt du mûrissement. Nombres capillaires de Bingham critiques Bi^* pour lesquels le mûrissement de bulles est arrêté, en fonction de la fraction volumique en fluide à seuil. Les différents symboles correspondent à différents types d'expérience. Les courbes rouge et bleue correspondent respectivement aux équations 1 et 2. Le paramètre $Bi_\infty^* = 0.162$ correspond au cas limite d'une dilution infinie des bulles. Le symbole étoile correspond à des données publiées dans Deleurence et al., *Colloids Surf.*, A 534, 2 (2017).

Les valeurs de Bi pour lesquelles l'arrêt du mûrissement est observé, Bi^* , sont présentées sur la Figure 2 en fonction de ϕ . On observe une valeur plancher $Bi_\infty^* = 0.162$ pour le cas de bulles infiniment diluées. Ceci signifie que la contrainte seuil de l'émulsion située autour de chaque bulle parvient à empêcher les changements de volume de bulles associés au mûrissement. Lorsque la fraction volumique en fluide à seuil diminue, Bi^* augmente pour attendre des valeurs supérieures à l'unité pour $\phi \lesssim 25\%$. Pour comprendre quantitativement cette variation, on peut continuer à raisonner sur le cas limite précédent, mais en remplaçant l'émulsion pure par un milieu effectif constitué de l'émulsion contenant une fraction volumique $(1 - \phi)$ de bulles. La présence de bulles dans l'émulsion adoucit sa réponse mécanique, réduisant ainsi la contrainte seuil effective. Pour compenser cette diminution et maintenir un nombre capillaire de Bingham effectif égal à Bi_∞^* , la contrainte seuil de l'émulsion pure doit augmenter, ce qui conduit à une augmentation de $Bi^*(\phi)$. La modélisation de cet effet conduit aux deux équations suivantes, chacune étant valable dans sa propre gamme de fractions liquides :

$$Bi^*(\phi) = Bi_\infty^* \left(\frac{5-2\phi}{3\phi^2} \right)^{1/2} \quad \text{pour } \phi \gtrsim 50\% \quad (\text{éq. 1})$$

$$Bi^*(\phi) = Bi_\infty^* \left(\frac{2}{3\phi^3} \right)^{1/2} \quad \text{pour } \phi \lesssim 30\% \quad (\text{éq. 2})$$

Ces deux prédictions, tracées sur la Figure 2, présentent un très bon accord avec nos données, constituant ainsi un ensemble cohérent pour comprendre l'arrêt du mûrissement dans les fluides à seuil.

Publications

- [1] N. Galvani, M. Pasquet, A. Mukherjee, A. Requier, S. Cohen-Addad, O. Pitois, R. Höhler, E. Rio, A. Salonen, D. J. Durian, and D. Langevin, "Hierarchical bubble size distributions in coarsening wet liquid foams", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **120** (38) e2306551120 (2023).
- [2] M. Pasquet, N. Galvani, A. Requier, S. Cohen-Addad, R. Höhler, O. Pitois, E. Rio, A. Salonen, and D. Langevin, "Coarsening transitions of wet liquid foams under microgravity conditions", *Soft Matter* **19**, 6267-6279 (2023).
- [3] Thèse de Nicolo Galvani, Université Gustave Eiffel, 2024.
- [4] N. Galvani, S. Cohen-Addad, B. Saint-Michel, O. Pitois, "Plasticity effects in coarsening bubbly yield-stress fluids: From damped growth to arrest", *Phys. Rev. Fluids* **10**, 073604 (2025)

Session 6

Milieu granulaires, objets biomimétiques

- 6.1 Contrôle par un champ magnétique de l'écoulement de suspensions de particules aux fortes fractions volumiques
G. Bossis, S.A.E. Boyer, A. Bur, Y. Grasselli, P. Khuzir, O. Volkova

Contrôle par un champ magnétique de l'écoulement de suspensions de particules aux fortes fractions volumiques

Georges Bossis¹, Séverine A.E. Boyer³, Alain Bur³, Yan Grasselli², Pavel Khuzir¹, Olga Volkova¹

¹InPhyNi, UMR 7010, CNRS, Université Côte d'Azur, France

²SKEMA Bachelor 60 rue Dostoïevski, BP085, 06902 Sophia Antipolis, France

³MINES Paris, CEMEF-Centre de Mise en Forme des Matériaux, PSL Research University, Sophia Antipolis Cedex, France

De nombreux travaux sur la rhéologie des suspensions concentrées de particules minérales ont contribué à définir les conditions dans lesquelles il a été observé un blocage de l'écoulement en termes de contrainte critique et de fraction volumique de particules. Néanmoins la dispersion des valeurs obtenues dénote la difficulté d'obtenir des résultats reproductibles, notamment à cause de la sédimentation des particules dont la densité est très supérieure à celle du fluide suspendant. Nous avons observé, avec des expériences en vol parabolique, que des résultats reproductibles pouvaient être obtenus dans une configuration horizontale de type Couette cylindrique avec des rotors spéciaux empêchant le glissement aux parois. Par ailleurs en utilisant des suspensions de particules magnétiques nous avons réussi à moduler les taux de cisaillement critique de blocage par application d'un champ magnétique (G. Bossis *et al.*, *Applied Physics. Letters*, 2016). De plus il suffit d'une petite proportion de particules magnétiques, au sein de particules non magnétiques, pour déclencher le blocage à l'aide d'un faible champ magnétique. Il faut néanmoins s'assurer de l'absence de ségrégation des particules magnétiques sous l'effet du cisaillement et de la gravité, ce que nous avons entrepris à l'aide de mesures de perméabilité magnétique conjointes aux mesures rhéologiques.

En ce qui concerne l'application de ces suspensions concentrées de particules magnétiques, outre leur utilisation dans le domaine des amortisseurs adaptatifs (par exemple pour le bridage/débridage de satellites lors des lancements), il est aussi possible à l'aide d'un jet en sortie de capillaire, de fabriquer, par une méthode voisine de l'impression 3D, des fibres ou des structures plus complexes présentant des propriétés à la fois magnétiques et piézoélectriques. Nous avons récemment initié une recherche théorique et expérimentale sur la stabilité de ces jets de suspensions de particules magnétiques en ayant en vue la fabrication de matrices piézoélectriques activables par champ magnétique. Cette recherche, est menée en collaboration avec le CEMEF (école des Mines de Paris PSL de Sophia-Antipolis) qui possède les compétences dans les polymères piézoélectriques et également dans les techniques d'impression 3D.

Résultats

1^o) Mesure de concentration sous écoulement

Pour contrôler l'homogénéité de la suspension nous développons une méthode de mesure de la concentration d'une suspension de particules magnétiques soumise à un cisaillement. En effet, comme la perméabilité magnétique dépend de la concentration en particules magnétiques, on peut, en utilisant une bobine de faible épaisseur, faire un relevé de l'inductance en fonction de sa position et en déduire le profil de concentration. Ce dispositif est installé sur un rhéomètre Anton Paar en configuration Couette cylindrique (Figure. 1). La suspension est contenue entre les cylindres externes et internes qui sont en polyéthylène pour ne pas modifier la mesure de la perméabilité magnétique. Les résultats préliminaires montrent que la précision des mesures d'inductance est suffisante pour pouvoir en déduire les variations de concentration de la suspension après étalonnage.

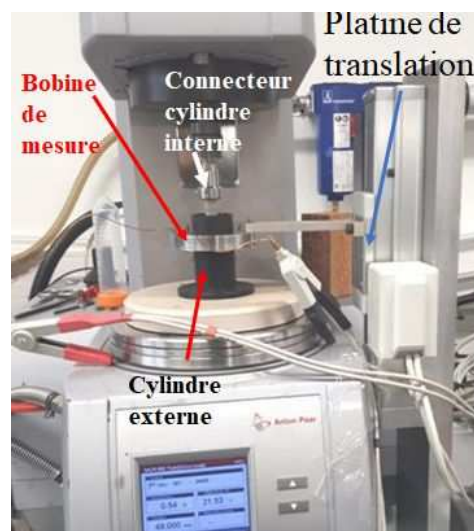


Fig.1 : Mesure de profil d'inductance

2) Réalisation d'une imprimante 3D pour la production de microfibres magnétiques et piézoélectriques

Cette application spécifique de l'étude des jets de suspensions magnétiques concentrées est menée avec la collaboration CNRS 7635-CEMEF MINES Paris PSL, A. Bur et S.A.E. Boyer. Elle concerne l'extrusion par électrofilage de polymères piézoélectriques contenant des particules magnétiques qui peuvent être utilisés comme microgénérateurs ou comme matrice extracellulaire pour la régénération de tissus osseux par sollicitation électrique. La partie technique a été réalisée à partir d'une imprimante 3D commerciale adaptée par l'équipe du CEMEF pour notre application. Cette adaptation a fait l'objet d'un stage de 4 mois de Kevin Colas, étudiant ingénieur en électronique (Polytech Nice Université). Elle a consisté à développer le matériel électronique permettant de contrôler à la fois les 3 moteurs X,Y,Z de l'imprimante, la pression nécessaire à l'extrusion de la suspension et le champ électrique haute tension qui permet d'étirer le jet en sortie de la buse. La seringue en inox est entourée d'un tube de céramique sur lequel s'enroule une résistance chauffante pour fondre le polymère piézoélectrique qui constitue le liquide suspendant des particules magnétiques. Une photo du montage en cours est présentée sur la Figure 2. La tête d'impression est solidaire de la barre transversale qui se déplace suivant la verticale. Le plateau qui est connecté à la masse de l'alimentation HT se déplace en X et Y.

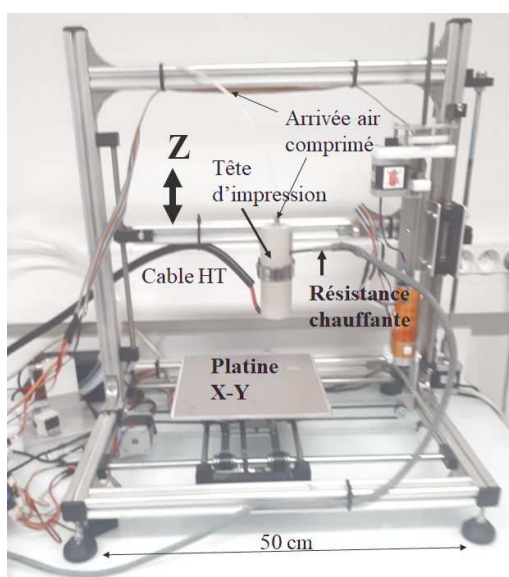


Fig.2 : Réalisation en cours de l'imprimante 3D pour l'impression par électrofilage de structures magnétiques piézoélectriques

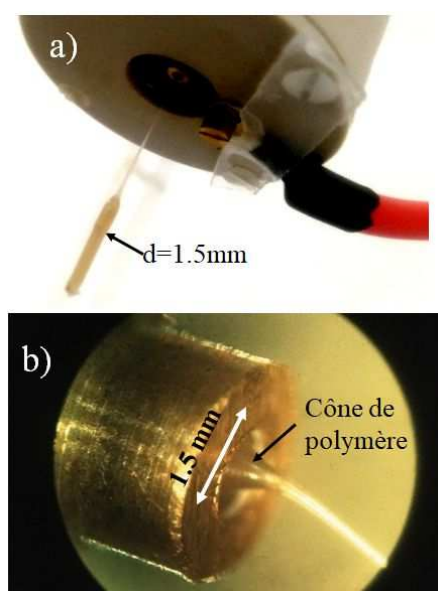


Fig.3 : a) Filament de polymère en sortie de buse, avant ($d=1.5\text{mm}$) et après application du champ électrique. b) Focus sur la sortie de buse après application du champ

Un résultat préliminaire de filament obtenu avec du PVDF (polymère piézoélectrique usuel) fondu à plus de 200°C est présenté sur la Figure. 3 . On voit (Fig.3a) l'extrudat de diamètre 1.5mm correspondant au diamètre interne de la buse et au-dessus un filament beaucoup plus fin qui s'est formé lorsque le champ électrique a été appliqué. Le cône de polymère -qui s'est rétracté après refroidissement- est bien visible sur la sortie de buse (Fig.3b). Ce cône, caractéristique du processus d'électrofilage, est formé sous l'effet de la répulsion électrostatique entre les charges électriques situées sur la surface du filament.

Publications

Bossis G., Grasselli Y., Volkova O. Enhancement of the magnetorheological effect using discontinuous shear thickening with a mixture of magnetic and non magnetic particles. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2025 - sous presse.

- 6.2 Cinétique de l'agrégation et rhéologie sanguine : premiers résultats de l'expérience KRABS
L. Gatineau, M. Puthumana-Melepattu, C. De Loubens, G. Maîtrejean, C. Minetti, **T. Podgorski**

Cinétique de l'agrégation et rhéologie sanguine: expérience KRABS

L. Gatineau¹, M. Puthumana-Melepattu¹, C. De Loubens¹, G. Maîtrejean¹, C. Minetti² et T. Podgorski¹

¹ Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LRP, F-38000 Grenoble, France

² CREST, Université libre de Bruxelles, Brussels, Belgique

Le sang est une suspension complexe, essentiellement constitué de globules rouges déformables en suspension dans le plasma. La mécanique des globules rouges, dépendante des propriétés de leur membrane et du cytosol, ainsi que leur agrégation sous écoulement, reste encore mal comprise, en particulier dans des conditions pathologiques. En vol spatial, des phénomènes de stagnation, voire d'écoulement rétrograde du sang, peuvent se produire, parfois associés à l'apparition de thromboses. Au-delà des mécanismes classiques de la microcirculation sanguine, le LRP s'intéresse aux processus d'agrégation et de désagrégation des globules rouges à différentes échelles, et particulièrement à la cinétique des variations rhéologiques dans le cadre du projet KRABS.

Le projet vise à étudier la cinétique d'agrégation des globules rouges et les propriétés rhéologiques du sang dans des régimes de cisaillement faibles à modérés, transitoires, et en conditions de microgravité. Les expériences reproduisent des séquences d'écoulement variables, caractéristiques des situations de quasi-stagnation observées en vol spatial, et combinent des mesures simultanées de viscosité et de structure de la suspension en agrégation. Ce projet, sélectionné par l'ESA pour une expérience dans la fusée-sonde MASER 17, est mené en partenariat avec le CREST de l'Université Libre de Bruxelles. Le dispositif expérimental pour les vols paraboliques, développé en 2023, a fait l'objet d'une quatrième campagne en 2025 (VP184 ESA). En parallèle, les études au laboratoire se sont poursuivies pour compléter les données et valider les protocoles.

Résultats

Les efforts expérimentaux ont porté à la fois sur les aspects scientifiques et techniques. La campagne VP184 (mai 2025) a permis d'optimiser le circuit microfluidique, notamment le canal en verre principal, la position des capteurs et diverses procédures de gestion des fluides. Parallèlement, sur le plan instrumental, une analyse par vélocimétrie a mis en évidence l'importance de la configuration du circuit et de la position des capteurs pour garantir la fiabilité des mesures dans des situations de transitoires rapide, permettant de fiabiliser le design de l'expérience en vue du développement du module pour MASER 17. Les expériences ont permis une première caractérisation quantitative de la viscosité apparente du sang et de sa dépendance à l'hématocrite et à la composition du milieu, dans des gammes de cisaillement de 1 à 50 s⁻¹. Les résultats montrent un comportement rhéofluidifiant et thixotrope marqué, avec une augmentation de la viscosité lors des phases de décélération du flux, corrélée à la formation d'agrégats érythrocytaires. Cette augmentation peut être très significative sur des temps caractéristiques allant de quelques secondes à une dizaine de secondes, selon l'hématocrite, le niveau d'agrégation et le taux de cisaillement final (Fig. 1). Les mesures combinées de diffusion de lumière et de viscosité ont permis de quantifier la cinétique d'agrégation et de montrer sa dépendance à la concentration cellulaire et à la composition du milieu.

Sur le plan technique, le design final du module KRABS pour MASER 17 a été validé lors des revues de conception préliminaire (février 2025) et critique (juin 2025), intégrant deux circuits microfluidiques pour des échantillons à hématocrites différents, des capteurs calibrés et un système optique complet associant microscope à champ clair, dispositif de diffusion de lumière et microscope holographique numérique. Les protocoles de remplissage / changement d'échantillon et de séquence expérimentale ont été définis à partir des enseignements des vols paraboliques, avec un temps de remplissage optimisé pour exploiter au mieux les six minutes de microgravité disponibles pendant le vol.

En marge, des tests complémentaires au sol avec une solution isodense (OptiPrep) ont montré que cette approche limite fortement l'agrégation des globules rouges, confirmant la nécessité de recourir à la microgravité réelle pour l'étude réaliste des processus d'agrégation à cisaillement faible.

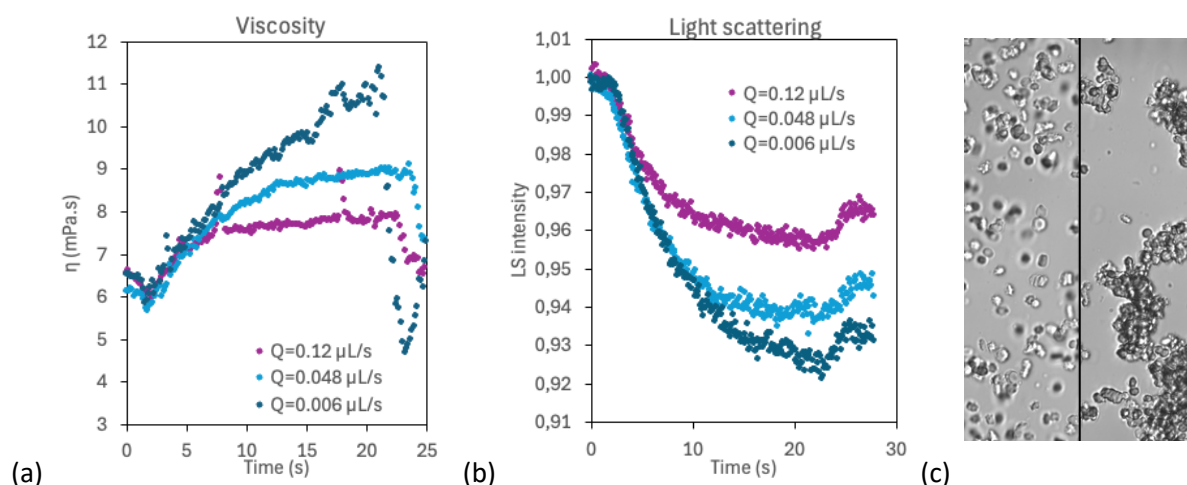


Figure 1 : Évolution de la viscosité (a) et de l'intensité de rétrodiffusion de lumière (b) en vols paraboliques lors de transitoires où le débit passe d'un débit élevé où l'agrégation est négligeable ($Q=0.5 \mu\text{L/s}$, cisaillement 166 s^{-1}) à un débit plus faible où l'agrégation se produit. (c) : comparaison de l'état d'agrégation de globules rouges à taux de cisaillement moyen de 2 s^{-1} dans une solution isodense avec Optiprep (gauche) et dans un tampon classique de PBS (droite), pour la même concentration en Dextran (promoteur d'agrégation).

Perspectives

La campagne KRABS à bord de MASER 17 est prévue en avril 2026. Le module est en cours d'intégration et de qualification par le SSC, avec une phase de validation fonctionnelle programmée entre l'automne 2025 et le printemps 2026. Les protocoles expérimentaux et la timeline de mission ont été définis grâce aux études réalisées en vols paraboliques, garantissant la fiabilité du système et la pertinence des mesures en microgravité prolongée. En parallèle, les travaux se poursuivent au sol, à l'aide d'outils microfluidiques permettant de caractériser finement l'influence de différents paramètres physiques et biochimiques sur l'agrégabilité des globules rouges. Ces études s'appuient notamment sur les protocoles de rigidification contrôlée des globules rouges développés au cours d'un stage en 2025, ouvrant la voie à une exploration systématique des effets de la déformabilité cellulaire sur la dynamique d'agrégation et les propriétés collectives du flux sanguin, notamment dans des cas pathologiques.

Publications

M. Puthumana Melepattu, G. Maîtrejean, C. Wagner, T. Podgorski, Influence of erythrocyte density on aggregability as a marker of cell age: Dissociation dynamics in extensional flow, *Journal of Biomechanics* 183, 112603 (2025).

A. Martinelli, L. Cristofolini, D. Orsi, F. Ravera, L. Liggieri, T. Podgorski, C. Minetti, M. Sperl, L. Cipelletti, N. Murdoch, M. Braibanti, S. Vincent-Bonnieu and B. Saint-Michel, Rheology in Space - A review of ESA experiments, soumis à *Journal of Rheology* (2025)

M. Puthumana Melepattu: « Investigating Hemorheology via Microfluidics: Red Blood Cell Aggregation and Mechanics », Thèse de Doctorat de l'Université Grenoble Alpes (17/03/2025).

M. Puthumana Melepattu, G. Maîtrejean, C. Wagner, T. Podgorski, Dissociation of red blood cell aggregates in extensional flow, Annual European Rheology Conference, 14-17/04/2025, Lyon, France.

T. Podgorski, Blood flow and red blood cell dynamics in Microgravity, ESA-ELGRA Gravity Related Research summer school '25

6.3 Circulation du Sang, Motilité et Dysfonction Endothéliale

M.Jin, G. Dixit, M. Dynar, M. Bendaoud, A. Ouaid, A. Farutin, L. Bureau, W. Schmidt, D. Tsvirkun,
C. Misbah

Circulation du Sang, Motilité et Dysfonction Endothéliale

Min Jin, Gopal Dixit, Mariam Dynar, Mohammed Bendaoud, Asmae Ouaid, Alexander Farutin, Lionel Bureau, Winfried Schmidt, Daria Tsvirkun, Chaouqi Misbah

¹ Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (Liphy), Université Grenoble Alpes et CNRS UMR5588

La circulation du sang et son interaction avec l'endothélium, met en jeu des aspects fluidiques et biochimiques complexes. Nous avons poursuivi nos études sur l'agrégation de globules rouges (GR), leur interaction avec l'endothélium tant sur le plan expérimental que simulation. En outre, nous avons développé des codes basés sur l'AI pour la classification des agrégats. Nous avons préparé l'expérience en fusée sonde (prévue en 2026) sur la dysfonction endothéliale. Enfin, nous avons analysé, théoriquement, la motilité cellulaire ou nous avons montré que seule la polymérisation de l'actine (sans les moteurs moléculaires) est suffisante pour induire la polarité et la motilité cellulaire. Nous avons également estimé le rôle de la microgravité dans la motilité cellulaire. Il ressort de notre analyse que la pression hydrostatique suffit à expliquer plusieurs effets observés en microgravité.

Résultats

Dysfonction endothéliale par adjonction d'enzymes et conséquence sur les cellules circulantes : La création d'une dysfonction endothéliales (CE) se fait par dégradation du glycocalyx des cellules (à l'aide d'enzymes ; amylase ou neuraminidase). Les mêmes enzymes sont utilisées pour les globules rouges (GR). Nous avons étudié, en utilisant notre modèle de microvascularisation sur puce (un circuit microfluidique recouvert de cellules endothéliales), les interactions entre GR et CE. L'expérience consiste à injecter des GR dans le dispositif, en interrompant temporairement le flux afin de permettre la sédimentation des GR et leur mise en contact avec l'endothélium. Après rétablissement du flux, nous mesurons le temps nécessaire aux GR (temps de résidence) pour se détacher de l'endothélium (voir Fig. 1). Ce temps augmente considérablement suite à l'action des enzymes, montrant ainsi que la dysfonction endothéliale (et l'altération des membranes de GR) peuvent être à l'origine d'occlusions vasculaires. A l'aide d'un modèle de type ligand-récepteur, nous avons pu rendre compte par simulation numérique de ces observations (Fig. 1).

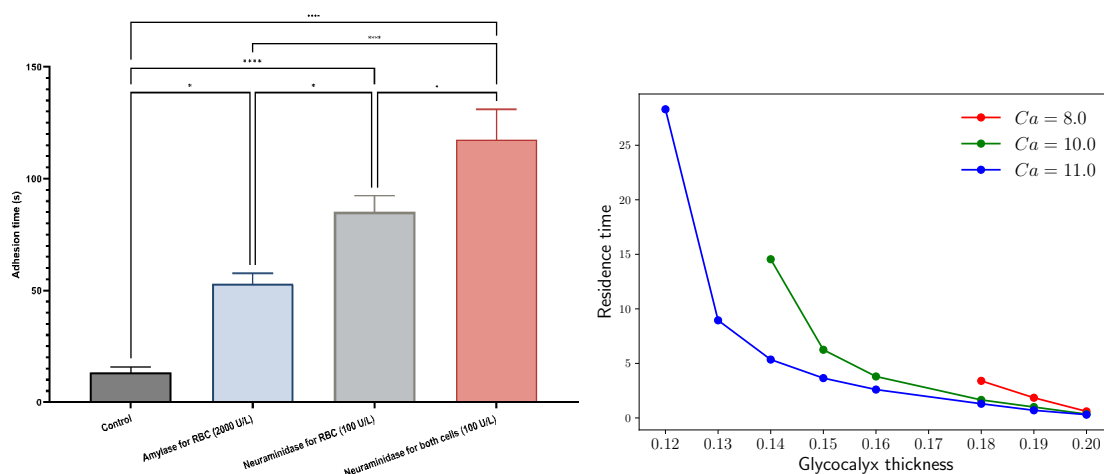


Figure 1: A gauche : le temps de résidence en fonction de l'action des enzymes sur les EC et GR. A droite : le temps de résidence simulé en fonction de la couche du glycocalyx (la diminution de la couche mime la dégradation due aux enzymes). Ca est le nombre capillaire (mesurant la force de l'écoulement). Le point d'arrêt de la courbe signifie que le GR ne se détache plus de l'endothélium.

Expérience en fusée sonde : Une partie importante de nos efforts a été consacrée à accompagner Airbus pour la réalisation du module expérimental qui va voler en fusée sonde en 2026 et ce grâce à des échanges multiples d'informations. Nous avons pu tester le module expérimental en présence de nos micropuces (vessel-on-chip) réalisées au Liphy. Nous avons relevé quelques limitations qui ont été réglées par Airbus, qui nous a ensuite expédié le nouveau module que nous avons testé à nouveau au Liphy. Nous avons établi un rapport des problèmes rencontrés qui sont en cours de vérification par Airbus. Au mois d'octobre 2025 nous avons participé, à Air Bus Bremen, aux tests de vibrations en présence de micropuces fonctionnalisées par des CE au Liphy.

Analyse des agrégats par IA : Nous avons développé un code dit YOLO (You Look Only Once) qui permet de détecter les agrégats avec une forte précision et impliquant un temps de calcul beaucoup plus faible que les codes classiques de traitement d'images. Ce code sera enrichi en vue d'étudier les amas de GR sur l'endothélium.

Motilité Cellulaire : Nous avons montré que les moteurs moléculaires ne sont pas nécessaires à la motilité cellulaire (seule la polymérisation de l'actine suffit). Ceci brise un vieux dogme en biologie. En plus, nous avons obtenu des informations importantes sur le déclin de la motilité cellulaire en microgravité. La chute de la pression hydrostatique seule en microgravité permet déjà de rendre compte du déclin de la motilité par 10 à 20 %. Par ailleurs, notre modèle a permis de montrer que la cellule peut se déplacer soit en ligne droite, ou en trajectoire circulaire ou en trajectoire chaotique complexe, et ce en fonction des paramètres (en particulier la vitesse de polymérisation de l'actine). Toutes ces trajectoires ont été révélées par diverses études expérimentales.

Perspectives

Nous étudierons systématiquement l'interaction GR et CE et analysons les conditions d'occlusions vasculaire. On réalisera l'expérience en fusée sonde sur la dysfonction endothéliale et analyserons différentes caractéristiques des CE (cytosquelette, jonction cellule-cellule, glycocalyx..). Ces travaux seront accompagnés de simulations numériques. On poursuivra l'analyse de la motilité cellulaire avec couplage aux expériences.

Publications

- 1) W. Schmidt, W. Zimmermann, C. Misbah, A. Farutin, Myosin-independent amoeboid cell motility, Phys. Rev. Lett. Avril (2025)
- 2) H. Zhang et al. Direct measurement of the viscopillary lift force near a liquid interface Phys. Rev. Lett. Mars (2025).
- 3) Z. Gou, C. Misbah, A. Farutin, A computational framework for simulating suspensions of phoretic particles, J. Fluid Mech. Juillet (2025).
- 4) A. FarutinC. Misbah, Towards a universal law for blood flow, Phys. Rev. Lett. (en révision)
- 5) S. Laha, A. Nayak, A. Farutin, S. Chakraborty, C. Misbah, When Blood Parts Ways: Phase Separation in Microstructured Environments ; Phys. Rev. Lett. (en révision).
- 6) M. Dynar, G. Dixit, M. Jin, C. Misbah, YOLO for red blood cells aggregates detection; soumis à J. Royal Society, Interface
- 7) G. Dixit, M. Dynar, M. Jin, C. Misbah YOLO detection of erythrocyte aggregates in disease, soumis à J. Royal Society, Interface

6.4 Phénomènes collectifs en microcirculation
M. Abbasi, **M. Leonetti**

Phénomènes collectifs en microcirculation

M. Abbasi, M. Leonetti

Centre Interdisciplinaire de Nanosciences de Marseille, Université d'Aix-Marseille, CNRS

Lors d'une inflammation, la réponse immunitaire de l'organisme se caractérise par des événements vasculaires charnières entre la détection d'un pathogène ou la présence de zones tumorales. Elle est composée de différentes étapes dont une signalisation chimique (alerte) et la diapédèse des GBs présents dans le sang, i.e le passage des GBs du sang vers les tissus au travers de la paroi de cellules endothéliales. Si les GBs étaient distribués de manière homogène dans les vaisseaux sanguins, le processus serait peu efficace. Or, il est observé depuis longtemps que les GBs se localisent à la périphérie des vaisseaux et donc à proximité des zones d'importance tandis que les GRs se regroupent au centre. Ce phénomène appelé margination reste aujourd'hui mal compris et ce par manque de données expérimentales. Ce phénomène apparaît comme une ségrégation induite par les interactions hydrodynamiques (Fig.1-G) au sein d'une suspension binaire.

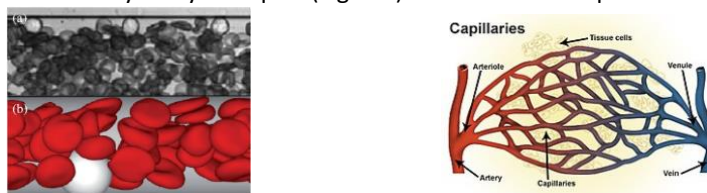


Figure 1 : Gauche – (a) expérience en quasi-2D et (b) simulation d'une suspension de GRs souples (rouge) et de GBs (blanc). Ceux-ci se localisent à la paroi. Droite – schéma typique d'un réseau vasculaire. Le sang s'écoule des artères vers les veines. A noter que les échanges avec l'environnement varient fortement entre les deux parties, rouge versus bleu.

Toutefois, la margination s'effectue alors que le sang circule dans un réseau vasculaire. En effet, il est noté dans la littérature en médecine que les globules blancs et les plaquettes ne marginent pas dans les mêmes conditions et aux mêmes endroits. Ainsi, les plaquettes marginent dans les artérioles tandis que les plaquettes marginent dans les veinules alors que l'on pourrait penser à une symétrie droite/gauche : Fig1-D. Pourquoi ? **La réponse à ce problème est inconnue.**

En microgravité, les vaisseaux ont tendance à se dilater associé à une modification du tonus musculaire impliquant ainsi une diminution du débit sanguin. Or, celui-ci fixe le cisaillement à la paroi et donc le processus de margination indispensable aux processus de réponse à une inflammation qu'elle qu'en soit l'origine et au phénomène de clotting (bouchage) induit par un dysfonctionnement de la paroi. Nos études visent à mieux comprendre l'ensemble de ces phénomènes.

La margination leucocytaire, processus par lequel les monocytes migrent vers la paroi vasculaire, constitue une étape clé du recrutement immunitaire. Paradoxalement à la fig 2-a, ce phénomène s'observe préférentiellement dans les veinules post-capillaires plutôt que les artérioles, malgré une géométrie artériolaire qui favorise théoriquement la margination comme montré sur la fig 2-a : les bifurcations divergentes propulsent les cellules du centre vers la paroi, Cette observation contre-intuitive soulève une question fondamentale : **quels mécanismes biophysiques expliquent cette sélectivité veineuse alors que la géométrie vasculaire joue en faveur des artérioles ?**

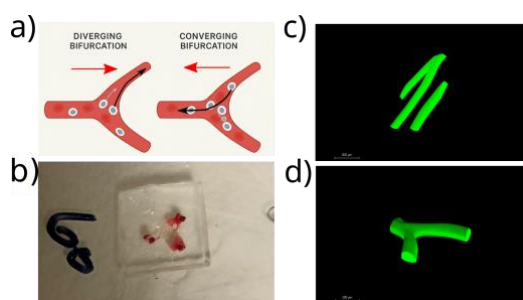


Figure 2: a) Schéma illustrant de manière simplifiée la margination des globules blancs dans les bifurcations convergentes et divergentes. Les flèches rouges indiquent la direction de l'écoulement, tandis que les flèches noires représentent les trajectoires attendues des globules blancs dans chaque configuration. b) Vue de la puce microfluidique. c) Image 3D d'une branche du circuit microfluidique avant traitement, présentant une section rectangulaire. d) Image 3D de la même branche après traitement, montrant une section circulaire.

Méthode

Notre approche combine microfluidique, biomimétisme, imagerie expérimentale et des simulations numériques pour élucider ce paradoxe. Le défi technique majeur a consisté à transformer la section rectangulaire (fig 2-c) des circuits microfluidiques (fig2-b) développé par de la lithographie classique en section circulaires ou elliptiques (fig2-d), reproduisant fidèlement la géométrie vasculaire in vivo. Cette transformation a été réalisée par injection

contrôlée de polydiméthylsiloxane PDMS d'un coté du canal et d'air pressurisé de l'autre, permettant d'éliminer les coins dans la section des canaux microfluidique.

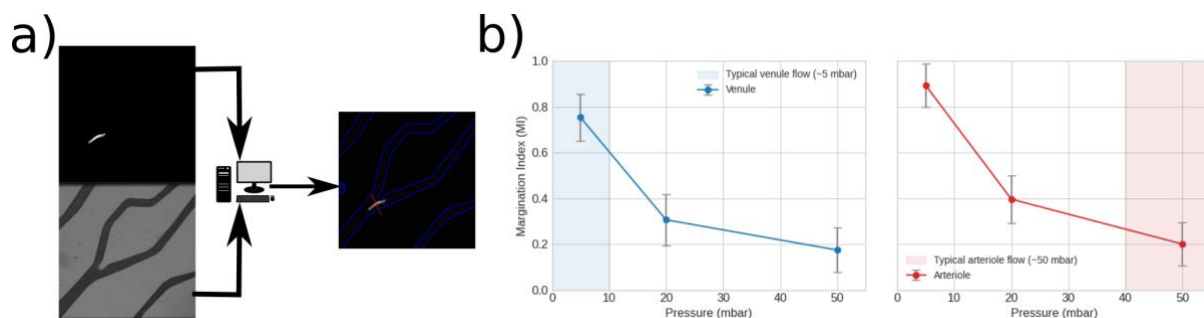


Figure 3: a) Les deux images proviennent d'acquisitions en microscopie confocale. En haut, on observe la trajectoire d'une cellule en mouvement ; en bas, une branche du réseau microfluidique. À droite, l'image traitée permet d'extraire quantitativement la vitesse des cellules ainsi que leur distance à la paroi. b) Résultats expérimentaux de l'indice de margination mesuré dans les artérioles et les veinules.

Résultats

Nos résultats démontrent d'abord une margination efficace des monocytes THP1 dans les conditions mimant les veinules post-capillaires (écoulement dans les branches convergent, vitesse $v \sim 0,8-1,2$ mm/s, cisaillement à la paroi $\tau \sim 0,5-2$ Pa), alors qu'une margination faible en configuration des artérioles (écoulement dans les branches divergents, vitesse $v \sim 2-6$ mm/s, cisaillement à la paroi $\tau \sim 6-15$ Pa). L'analyse systématique révèle que les sections (rapport d'aspect $\sim 0,5$), reproduisant la géométrie veineuse physiologique, amplifient significativement par rapport aux sections circulaires. Pour élucider les mécanismes sous-jacents, inaccessible expérimentalement en raison la concentration élevée en globules rouges ($\sim 20\%$ d'hématocrite), des simulations numériques par méthode Lattice Boltzmann couplée à modèle de membrane déformable ont été réalisées. Ces simulations révèlent la configuration spatio-temporelle des globules rouges, les distributions de contraintes de cisaillement locales sur les monocytes, établissant la corrélation directe entre ces paramètres hémodynamiques et l'efficacité de la margination mesurée expérimentalement.

Le traitement des images issues de la microscopie confocale a été réalisé à l'aide d'un code Python qu'on a développé au labo comme montre la fig 3-a, permettant de quantifier la distance à la paroi des cellules ainsi que leur vitesse à travers les trois niveaux de bifurcations successives.

L'analyse de la margination révèle que l'asymétrie observée entre bifurcation divergentes et convergente repose sur un mécanisme de déformation des monocytes sous les conditions de grand cisaillement dans les artérioles. En conditions des artérioles, on a observé une déformation intéressante par la mesure de l'indice de déformation sous écoulement ce qui explique la faible margination observée dans les artérioles. Dans ces conditions les monocytes représentent un comportement hydrodynamique similaire à celui des globules rouges, ce comportement réduit la margination malgré la géométrie divergente théoriquement favorable. À l'inverse, dans les veinules, les conditions hémodynamiques plus modérées maintiennent les cellules dans un état quasi-rigides, ce qui favorise leur margination par les interactions de collisions avec les globules rouges. Des expériences de contrôles menées avec des particules rigide de même taille que les monocytes confirment notre hypothèse : ces particules marginent dans les deux directions avec une préférence marquée dans les conditions des artérioles. Ces résultats démontrent que c'est la déformabilité cellulaire dépendante du flux sanguin, et non la seule géométrie du réseau, qui gouverne la sélectivité veineuse de la margination des globules blancs.

Perspectives

Dans la continuité de nos travaux sur la dynamique cellulaire en microcirculation, il devient crucial de déterminer si la dynamique des globules blancs est principalement gouvernée par leurs interactions avec les globules rouges ou par la viscosité du fluide (plasma + globules rouges). Nos études ont en général deux volets, l'un portant sur la l'écoulement du sang et ses implications dans divers processus physiologiques, l'autre portant sur la dynamique et la caractérisation de capsules élastiques sous contraintes. Dans ce compte-rendu, nous nous sommes focalisés sur la biophysique. Pour autant, la nature des publications et le nombre de publications sur l'autre versant est intéressant et devrait croître.

Publications relatives aux soutiens du CNES

Chachanidze R., Aouane O., Harting J., Wagner C., Leonetti M., Margination of artificially stiffened red blood cells, [Phys. Rev. Fluids], Status doi: [10.1103/PhysRevFluids.9.L091101](https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.L091101) avec Status = Publié, 2024
 Puthumana, V., Chen, P. G., Leonetti, M., Lasserre, R., & Jaeger, M., Assessment of coupled bilayer–cytoskeleton modelling strategy for red blood cell dynamics in flow. [Journal of Fluid Mechanics], Status doi : [10.1017/jfm.2023.1092](https://doi.org/10.1017/jfm.2023.1092) avec Status = Publié, 2024
 J. Wailliez, P. Regazzi, A. Salonen, P.G. Chen, M. Jaeger, M. Leonetti and E. Rio, Drop deformation in a planar elongational flow: impact of surfactant dynamics, [Soft Matter], Status doi: [10.1039/D4SM00642A](https://doi.org/10.1039/D4SM00642A) avec Status = Publié, 2024
 P. Regazzi et M. Leonetti, Drop deformation with soluble surfactants in linear flows: role of adsorption-desorption, [J. Fluid Mech.], Status doi: [10.48550/arXiv.2410.17365](https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17365) avec Status = Soumis, 2025

- 6.5 Evaluation of the evaporative flux of a leaf replica during parabolic flight experiments and investigation of a scaling up to a canopy level
J. Kuzman, L. Fleischer, L. Poulet, **J.-P. Fontaine**, C.-G. Dussap

Evaluation of the evaporative flux of a leaf replica during parabolic flight experiments and investigation of a scaling up to a canopy level

Joanna Kuzman^{1,2}, Louise Fleischer^{1,2}, Lucie Poulet¹, Jean-Pierre Fontaine¹, Claude-Gilles Dussap¹

¹Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal

²Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse

Long-term space exploration (like the Moon or Mars) requires the development of an efficient and robust life-support system (LSS) to recycle atmosphere, water, and waste for the crew survival. The European Space Agency (ESA) has been developing the MELiSSA (Micro-Ecological Life-Support System Alternative) project for more than 37 years. One of the issues is the growth of higher plants, which is strongly linked to environmental conditions (g, p, T, RH, air flow, partial pressure of O₂ or CO₂). Optimal growth conditions require a high level of control and management, and thus a thorough understanding of the key phenomena and of their interactions with the environment (like transpiration or mass transfer).

The goal of this study is to improve and validate the mechanistic physical model (multi-layer, and multi-scale (space and time)) under development at the Institut Pascal (GePEB department) to predict the effect of microgravity or of a reduced gravity environment on plant growth at its morphological, physicochemical, and biochemical levels. Indeed, during growth the limiting phenomena are primarily the (i) evapo-transpiration transfer at the leaf associated with surface temperature regulation of the leaf, (ii) migration of water in the plant (coming from the ground or hydroponic medium after absorption by the roots) and (iii) CO₂/O₂ exchange produced from the process of photosynthesis. The model is based on mass and energy balances at a single leaf level, with the objective of estimating the transpiration gas exchange coefficients K_{La} for the environmental conditions of a space habitat.

The influence of gravity was introduced by L. Poulet (CNES-CNRS PhD, 2018), considering the altered gas exchanges due to the low or lack of free convection in reduced gravity. Reduced biomass production was predicted, but further validation was needed. J. Kuzma (CNES-ESA PhD, 2025) developed a specific leaf replica system, to eliminate all concomitant biological effects, for the VP175 and VP176 parabolic campaigns to characterize the evaporative flux in transient stages. Several air velocity intensities (0-1m/s) were investigated and the inclination of the replica (-30 to 30 deg) with the mean stream. The experiment was also investigated at 1-g for permanent regimes at the MELiSSA Pilot Plant (Universitat Autònoma de Barcelona). L. Fleischer started a CNES-UCA PhD in October 2024 on the scaling up of a model for higher plant growth from leaf to canopy in reduced gravity. The first goal is to first use Computational Fluid Dynamics (CFD) to better understand microclimatic effects within the plant canopy.

Results

The experimental set-up consists of a rack with 4 units, containing one leaf replica each; two units involved evaporative replicas and two non-evaporative ones.

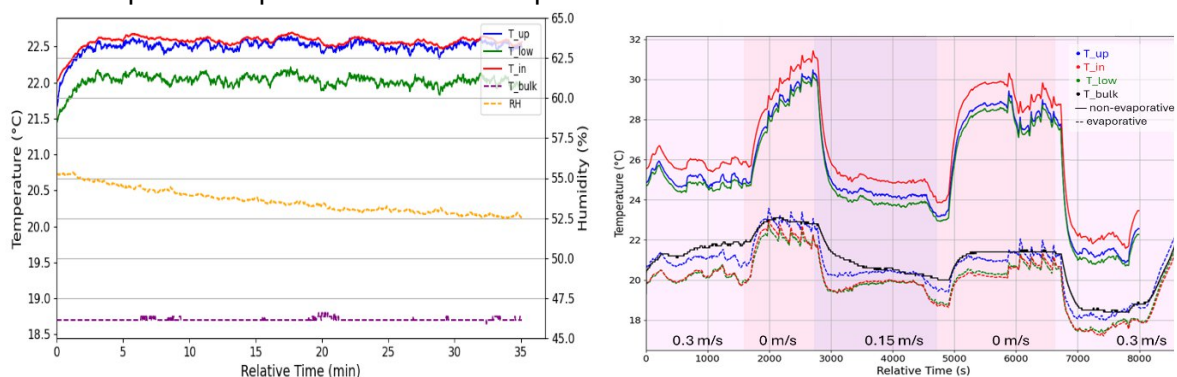


Fig. 1: Temperature response: a. evaporative leaf replica at 1g (UAB); b. evaporative and non-evaporative ones for different air velocities in a parabolic flight campaign.

At 1-g steady regimes showed that the surface temperatures of the leaf replica are dependent on both the air velocity and the angle of orientation. The surface temperature of the evaporative leaf replica was lower by about 3 °C compared to the non-evaporative one due to the evaporation from the lower surface (where the stomata -plant transpiration- are located) for all angles and air velocities. The highest temperatures are usually obtained for a replica parallel to the main stream, and parabolic trends are seen when the angle varies from -30° to 30° with lower variations when the air velocity increases. Combined effect of evaporation and convection on the lower surface occurred when it faces the stream.

During flight campaigns, the evaporative leaf replica indicates temperatures lower by 5°C to 10°C, just below the bulk temperature except for a few peaks in microgravity. The temperature raise is much higher without evaporation and keeps increasing during the set of parabolas, while it decreases by almost 1°C with evaporation at each parabola (not seen). As a result, evaporation plays a crucial role in regulating temperature trends more closely to the bulk temperature variations, and also a faster kinetics of the global heat transfer phenomena when evaporation takes place. As a summary, airflow velocity and surface orientation are the dominant factors influencing surface temperature on both evaporative and non-evaporative leaf replicas ; gravitational acceleration has a measurable, statistically valid, but weaker, effect on thermal behaviour, compared to other factors ; RH strongly affects evaporative cooling efficiency in the evaporative replicas ; thermal responses are angle-dependent and non-linear, with maximum temperatures for horizontal positions and decreasing with inclinations.

A mechanistic model was derived from the experiments for convective heat and mass transfer that take into account natural and forced convection, boundary layer behaviour, and internal diffusion limitations. Capillary forces within the pores, representative of stomata were also considered. The results confirm the role of gravity and air velocity in modulating heat and mass transfer, and show the dominant contribution of the upper surface in heat loss. The model and data provide a physically grounded tool for analysing plant-environment interactions in altered gravity, with potential application in future space experiment.

The scaling up to the canopy level study has started with a literature review (Fleischer *et al.*) on theoretical analysis and the adaptation of current CFD studies to the modeling of plant growth, including stomata scales, in controlled space environment. A dimensionless analysis showed the influence of the Grashof, Peclet, Reynolds and Rayleigh numbers on heat/mass transfer and flow regimes, including some critical velocities, in reduced gravity. Initial CFD simulations for velocity and gravity fields have been conducted for a simplified configuration.

Perspectives

IR parabolic flight data still need to be analyzed for the plant leaf replicas (evaporative and non-evaporative) to complete the analysis based on thermocouple acquisitions.

CFD simulations will assist in designing an optimum canopy. A porous canopy model is considered to simulate the growth of soy beans. The scaling up will consider replicas in order to avoid all biology and biochemical constraints, in order to focus on the interaction of evaporative “leaves” placed in a canopy under different airflow intensities, RH, thermal conditions, and leaf inclinations. Those results will assist in designing a canopy that is planned to be tested in parabolic flight campaigns.

Publications

Kuzma, Poulet, Fontaine, Dussap, Modelling physical processes in higher plants using leaf replicas for space applications, *Comptes Rendus – Mécanique*, Online first (2023), pp. 1-17. doi : 10.5802/crmeca.152.

Kuzma, Poulet, Fontaine, Dussap, Main focusses on the use of higher plant growth models for life support systems, Proceedings of the 51st International Conference on Environmental Systems, St Paul, Minnesota, USA, July 2022.

Kuzma, Poulet, Dussap, Fontaine, Godia, Paillet (2024). Heat and mass transfer study between a leaf replica and its environment in parabolic flight experiments. 2024 ASGSR confe. Dec. 2024, Puerto Rico.

Kuzma (2025). Improvement and validation of a mechanistic physical model for the prediction of heat and mass transfer in higher plant growth in reduced gravity, PhD thesis defense October 23, 2025.

Fleischer, Poulet, Dussap, Paillet, Fontaine (2025). Where Gravity Fades: Adapting CFD models for extra-terrestrial greenhouses. 54th ICES 2025. July 13-17, 2025, Prague, Czech Republic.