Pessac (France), 27–29 Octobre 2026

Actes
du colloque annuel



Colloque annuel, Pessac, 28 Octobre 2026



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.external@cnes.fr)

Sommaire

Session 1 Solidification et croissance cristalline, nucléation, dissolution **1**

1.1 Croissance équiaxe d'alliages transparents dans l'instrument « Transparent alloys »à bord de la Station Spatiale Internationale
D. Olmos-Vicente, F. L. Mota, L. Sturz, S. Mc Fadden, G. Reinhart, **N. Bergeon** 2

1.2 Analyse d'expériences de solidification dirigée au cours de la préparation du dispositif XRF – EU1
G. Reinhart, D. Olmos-Vicente, H. Nguyen-Thi 5

1.3 Fusion eutectique
S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau 8

1.4 Dynamique à grande échelle de motifs de croissance eutectique : simulations numériques par la méthode du champ de phase
M. Plapp 11

1.5 Forçage paramétrique contrôlé lors de la solidification dirigée d'alliages transparents dans DECLIC-DSI à bord de la Station Spatiale Internationale
F.L. Mota, K. Ji, Y. Song, L. Littles, A. Karma, N. Bergeon 14

1.6 Investigation de la CET par radiographie X dans la fusée sonde TEXUS-61
G. Reinhart, H. Nguyen-Thi, D. Olmos-Vicente, N. Bergeon 17

1.7 Analyse quantitative de la croissance facettée au cours de la solidification dirigée du salol
A. Raad, N. Bergeon, N. Mangelinck-Noël, F.L. Mota 20

Session 2 Instabilité, Turbulence, convection Bénard - Marangoni **23**

2.1 Thermomagnetic convection in ferrofluids in microgravity
A. Hiremath, S. Kim, A. Meyer, C. Kang, **I. Mutabazi** 24

2.2 Effets dynamiques de champ électriques AC sur des bulles en croissance : deuxième campagne de vols paraboliques de l'expérience AEBIO
S. Siedel, T. Gu 27

2.3 Effect of miscibility on hydrodynamic instabilities : Phase-field based modeling
A. Duney, **S. Amiroudine** 30

2.4 The ESA project Giant Fluctuations
H. Bataller, **F. Croccolo** 33

2.5 Mesures interférométriques de coefficients de diffusion de solutions salines binaires
M. Hamon, C. Oko, F. Croccolo, B. Sobac, **H. Bataller** 36

2.6 Separating diffusion from gravity-driven convection in a quasi-one-dimensional electrochemical microfluidic platform
S. Agrawal, A. Saperstein, **F. Zoueshtiagh**, R. Narayanan, K. J. Ziegler 39
2.7 Vol de papillons en pesanteur modifiÃ®ée : cinématique 3D et aérodynamique
F. Schweitzer, A. Gayout, T. Engels, **M. Bourgoin**, N. Plihon 42
2.8 Ondes gelées en micropesanteur : premiers résultats de l'expérience FROWG
B. Corrège, **S. Fauve**, F. Pétrélis, M. Caelen, M. Berhanu, G. Michel, B.-J. Gréa, A. Castillo-Castellanos 45
2.9 Size and morphology of fluid parcels produced by a coaxial atomizer
P. Schleuniger, S.K. Sahoo, F. Thiesset, **N. Machicoane** 48
2.10 Recours à la convection thermogravitationnelle pour le dessalement de l'eau de mer
A. Elyazidi, A. Bergeon, S. Aniss, P. Costeseque, A. Mojtabi 51
2.11 Decay rates of non-equilibrium fluctuations in a ternary mixture : experimental insights from the Giant Fluctuations' Ground Reference Test
K. Papchenko, P. Fruton, F. Croccolo 54

Session 3 Combustion, Milieux réactifs **57**

3.1 Hydrothermal flames on a chip : μSCWO design for weightless experiments
S. Marre, C. Lecoutre, A. Erriguible, O. Nguyen, F. Palencia 58
3.2 A flamelet approach for flame spread over solids
J.-L. Consalvi, A. Dupuy, G. Legros 61
3.3 Electro-acoustic perturbations of flame spread in microgravity - latest results with UNBURNIT
A. Schmitt, J.-M. Citerne, A. Guibaud, J.-L. Consalvi, A. Dupuy, **A. Matynia**, G. Legros 64
3.4 Multi-Scale Fire Characterization of Materials under Space-Relevant Conditions
J. Sarazin, **S. Bourbigot** 67
3.5 Etude expérimentale de l'influence des transferts radiatifs sur la propagation des flammes ultra-lentes en conditions de microgravité
A. Tahri, R. Glaznev, J. Beeckman, H. Pitsch, C. Chauveau, **F. Halter** 70

Session 4 Interfaces fluides, interfaces fluide-solide, ébullition, condensation, bulles, gouttes **73**

4.1 Modélisation de la capillarité
O. Millet, A. Logerot 74
4.2 Contribution d'expériences en microgravité à la compréhension du mouillage partiel
M. Medale, R. Issa, P. Perrier, R. Rigard-Ceriso, **D. Brutin** 77
4.3 Ebullition nucléée en microgravité : expérience et modélisation de l'expérience RUBI
L. Favre, B. Gigon Veya, M. Mbaye, J. Sebilleau, **C. Colin** 80
4.4 Etudes de caloduc oscillant : analyse paramétrique
V. Nikolayev, G. Boudier, S. Bajić, E. Blond, T. Coquard, K. Le Floch, V. Ayel, N. Riaud 83

4.5 Evolution of Chemical Species in Aerosol Dynamics under Microgravity Conditions
C. Graziani, M. Nespoulous, R. Denoyel, N. Martin, S. Fauve, C. Chauveau, **M. Antoni** . 86
4.6 Evaporation de goutte sur substrat soluble
C. Pirat, **J. Colombani** 89
4.7 Bubble growth due to depressurization from a solid surface in HFE7000
A. Novi, J. Pinho, **A. Urbano** 92
4.8 Floating smectic bubbles under electric fields
S. Royer, M. Zhou, C. Tosarelli, M. Ezzen, M. Schön, T. Trittel, C. Klopp, K. Harp, R. Stannarius, **E. Lacaze** 95
4.9 Etude des métaux liquides en microgravité par stabilisation aérodynamique
M. Courtois, C. Bourges, M. Le Mener, W. Berckmans 98
4.10 Particle transport via the ratchet effect in a square lattice of pillars
P. Beltrame, **P. Trontin** 101
4.11 Numerical study of microlayer development
A. Lafontan, A. Urbano, S. Tanguy 104
4.12 Confined Drying of a Complex-Fluid Droplet : A Quantitative Interferometric Study under Controlled Humidity
O. Milark, J.-B. Salmon, B. Sobac 107

Session 5 Mousses, émulsions, suspensions, gels **111**
5.1 Hierarchical dynamics and time-length scale superposition in glassy suspensions of ultra-low crosslinked microgels
A. Martinelli, **L. Cipelletti** 112
5.2 Comment le mûrissement modèle les mousses d'émulsions ou de suspensions granulaires
X. Zhu, S. Cohen-Addad, N. Galvani, B. Saint-Michel, **O. Pitois** 115
5.3 Hydrodynamique des mousses humides
A. Salonen, C. Monteux, E. Rio, D. Langevin 118
5.4 Projet OILFOAM : Mousses d'huile, formation et stabilisation
A.-L. Fameau 121

Session 6 Milieu granulaires, objets biomimétiques **125**
6.1 Microstructure and density profile of concentrated suspensions of magnetic particles submitted to a shear flow
G. Bossis, Y. Grasselli, P. Khuzir, O. Volkova 126
6.2 Investigation of the Transient Rheology of Blood in Microgravity with the KRABS Experiment
L. Gatineau, M. Puthumana-Melepattu, C. De Loubens, G. Maîtrejean, B. Saint-Michel, C. Iorio, C. Minetti, **T. Podgorski** 129
6.3 Circulation du Sang et Motilité Cellulaire
M. Jin, M. Bendaoud, T. Kahali, A. Farutin, L. Bureau, W. Schmidt, D. Tsvirkun, **C. Misbah** 132

6.4 La margination des cellules sanguines dans la microcirculation
M. Abbasi, H. Klein, **M. Leonetti** 135
6.5 Mise à l'échelle d'un modèle de croissance de plantes supérieures, de la feuille au couvert végétal, en gravité réduite
L. Fleischer, L. Poulet, A. Paillet, C.-G. Dussap, **J.-P. Fontaine** 138
6.6 Influence des variations de gravité et des ultrasons sur l'activité de sphéroïdes neuronaux
A. Sureau, X. Benoit-Gonin, P.E. Lecoq, N. Heck, J.-M. Peyrin, **J.-L. Aider** 141
6.7 Characterizing granular matter in microgravity with acoustic waves
A. Goïcoechea, B. Tallon, J. Léopoldès 144
6.8 Impact of Microgravity on Endothelial Dysfunction : the SubOrbital express M17 flight campaign
D. Pedroni, D. Tsvirkun, L. Bureau, C. Misbah 147

Session 1

Solidification et croissance cristalline, nucléation, dissolution

1.1 Croissance équiaxe d'alliages transparents dans l'instrument « Transparent alloys »à bord de la Station Spatiale Internationale
D. Olmos-Vicente, F. L. Mota, L. Sturz, S. Mc Fadden, G. Reinhart, **N. Bergeon**

Croissance équiaxe d'alliages transparents dans l'instrument « Transparent alloys » à bord de la Station Spatiale Internationale

D. Olmos-Vicente[1], F. L. Mota[1], L. Sturz[2], S. Mc Fadden[3], G. Reinhart[1], N. Bergeon[1]

[1]Aix-Marseille Université – IM2NP UMR 7334 – Marseille, France
[2]ACCESS e.V., Aachen, Germany
[3]Ulster University, Londonderry, Royaume-Uni

Le MAP (Microgravity Application Promotion) de l'ESA « CETSOL (Columnar Equiaxed Transition in SOLidification processing) » initié en 2000 s'est achevé en décembre 2022. Les expériences et les développements d'expériences en microgravité planifiés se sont toutefois poursuivis avec le calendrier prévu initialement. Pour les alliages transparents, deux campagnes d'expériences spatiales dans l'instrument « Transparent Alloys » de l'ESA étaient prévues. Notre équipe à l'IM2NP porte la responsabilité de la deuxième campagne qui s'est déroulée de mai à juillet 2024 à bord de la Station Spatiale Internationale. Ces travaux se font en collaboration avec nos collègues européens L. Sturz (ACCESS e.V., Aachen, Allemagne) et S. Mc Fadden (Ulster Univ., Royaume-Uni).
Les études sont menées sur des alliages Néopentylglycol - Camphre (NPG-DC). Des études antérieures ont montré que ce système présente une transition d'orientation privilégiée des branches de dendrites entre 20 et 30% pds DC, de <100> vers <111>. Pour les expériences spatiales, nous avons donc choisi trois compositions dans cette gamme (20, 25 et 30% pds DC) afin d'étudier cette transition pour l'instant peu caractérisée. Les aspects tels que la distribution des températures de nucléation, la cinétique de croissance des branches dendritiques et les interactions des branches seront étudiés en solidification dans une large gamme de paramètres. Deux types de protocoles ont été développés pour induire la solidification : d'une part le refroidissement continu isotherme, associé à une pure croissance équiaxe, et d'autre part, un refroidissement continu en présence d'un gradient thermique, associé à des croissances colonnaire ou équiaxe selon les paramètres.

Résultats

Les premières analyses sont dédiées à l'étude de la croissance équiaxe en refroidissement isotherme, et la première étape des travaux est de déterminer les directions de croissance dendritique des grains observés dans les différentes expériences. Afin de pouvoir traiter les très nombreux grains de façon systématique, une procédure semi automatisée a été développée par programmation d'une extension spécifique pour le logiciel d'analyse cristallographique Pycotem[1]. Cette procédure a été utilisée sur l'ensemble des grains observés, càd pour environ 250 grains. Pour chaque grain, l'analyse d'image programmée dans Fiji débute par la détermination des vecteurs directeurs des branches en croissance. L'extension à Pycotem permet ensuite de superposer le grain sur une projection cristallographique d'un cristal cubique présentant les pôles des directions d'intérêt (<001>, <111>, <110>) et de faire pivoter automatiquement les projections stéréographiques dans l'espace jusqu'à ce que l'alignement optimal des directions avec les branches du cristal soit déterminé. Cette analyse permet de déterminer à la fois l'orientation cristalline des branches et l'axe de zone, qui définit l'orientation du cristal par rapport au plan de projection. Les informations relatives à l'axe de zone sont fondamentales pour convertir les mesures de longueur prises dans le plan d'observation en mesures 3D réelles.

Pour les alliages à 20 et 30%pds DC, les morphologies des grains sont respectivement typiques de croissances suivant <001> et <111> (fig 1), en accord avec les résultats antérieurs sur ces systèmes[2]. Pour la composition intermédiaire, le nombre très élevé de branches dans les grains, toujours supérieur à 8, est incompatible avec ces orientations simples. Deux possibilités ont été évaluées : une croissance de type <011> (12 branches max) ou une croissance mixte <001> + <111> (14 branches max). Les analyses montrent que la solution mixte est largement majoritaire, même si certains grains présentent toujours une ambiguïté d'orientation.

[1] *F. Mompiou et al, J. of Microscopy 282 (2021) 84*
[2] *G. Zimmermann et al. JCG 512 (2019) 47 ; L. Sturz et al. JCG 620 (2023) 127350*

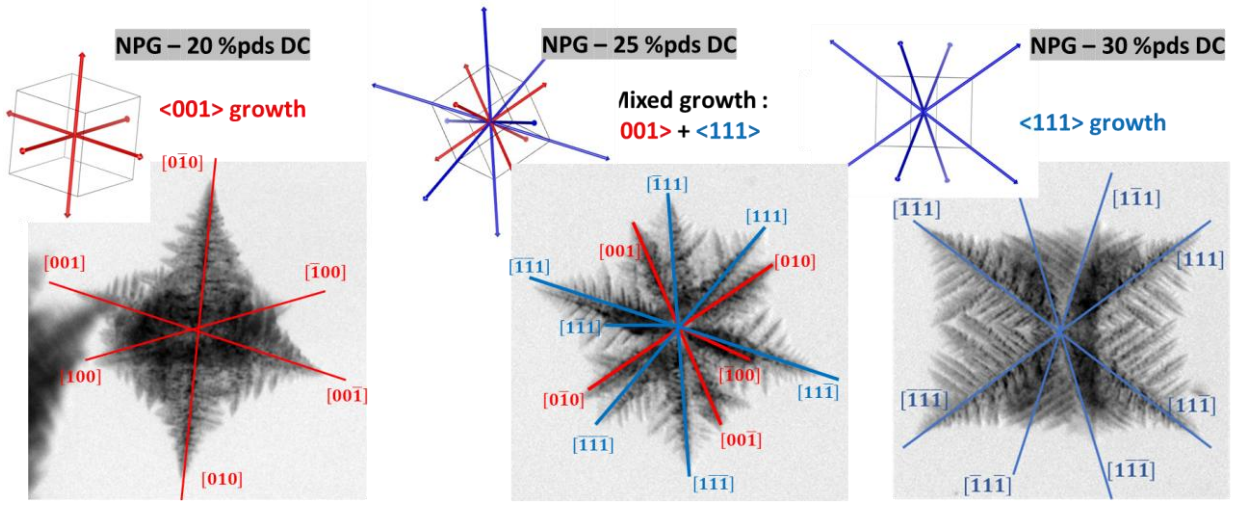


Figure 1 : Orientation des directions de croissance dendritiques pour les trois compositions d'alliages

Afin d'étudier la cinétique de croissance des branches dendritiques, les vitesses de croissance des pointes sont mesurées en fonction du sous-refroidissement pour tous les grains dans toutes les expériences. Là encore, une procédure automatisée, illustrée à la figure 2a, a été mise au point. Elle repose sur une analyse d'image pour détecter le contour du grain et les pointes. La connaissance de l'axe de zone permet de corriger les projections pour obtenir les longueurs réelles. Les mesures du taux de croissance en fonction du sous-refroidissement sont rassemblées dans la figure 2b. Il apparaît que la cinétique de croissance est plus rapide à 20 % en poids de DC qu'à 30 % en poids. La composition intermédiaire, présentant une croissance mixte, présente la même cinétique de croissance que celle observée à 30 % en poids dans la direction <111>.

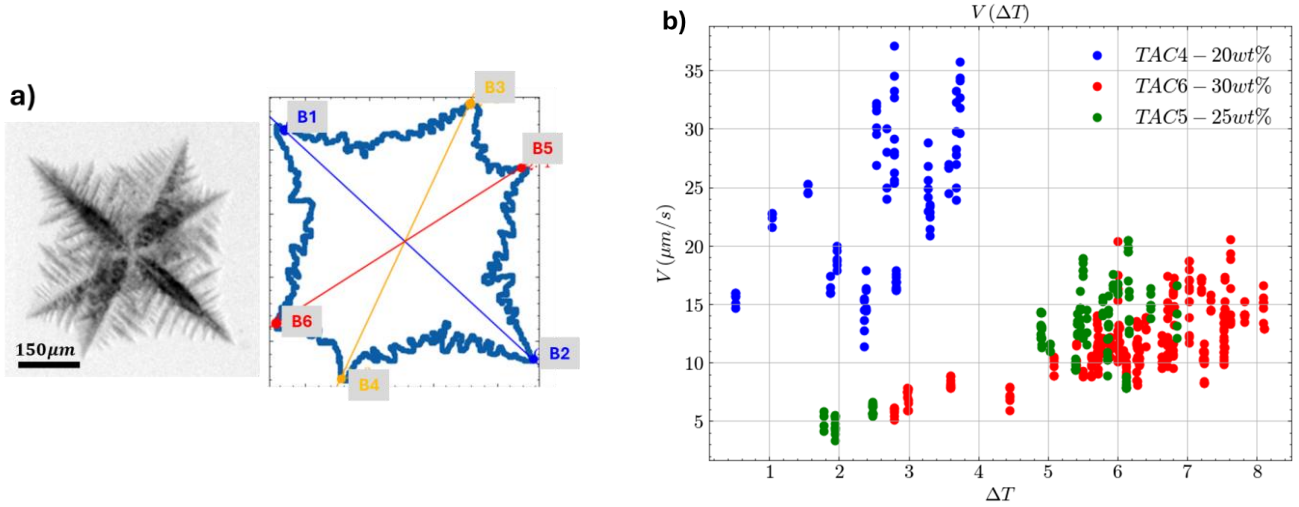


Figure 2 : a) Illustration de la procédure de mesure de la croissance des branches. b) Vitesse des pointe V en fonction du sous-refroidissement ΔT.

Poursuite des travaux

L'analyse des lois cinétiques de croissance dendritique, se poursuit. Des simulations thermiques sont menées afin de mieux comprendre le champ thermique à l'échelle de l'échantillon et, par conséquent, de mieux caractériser le sous-refroidissement local. Ces études se poursuivront avec la caractérisation de espacements secondaires des ramifications dendritiques et des interactions entre les grains.

Remerciements : Les auteurs remercient le CNES et l'ESA pour leur soutien et la réalisation des expériences.

1.2 Analyse d'expériences de solidification dirigée au cours de la préparation du dispositif XRF – EU1
G. Reinhart, D. Olmos-Vicente, H. Nguyen-Thi

Analyse d'expériences de solidification dirigée au cours de la préparation du dispositif XRF – EU1

G. Reinhart[1], D. Olmos-Vicente[1], H. Nguyen-Thi[1]

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

Introduction

La solidification d'alliages métalliques peut désormais être étudiée en laboratoire et de manière *in situ* et en temps réel en utilisant les sources et détecteurs de rayons X modernes. Le 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*) a pour objectif l'adaptation de ces dispositifs à des plateformes de microgravité.
Plusieurs expériences ont été réalisées avec succès à bord de de fusées sondes et de vols paraboliques au cours des dernières années[1], ce qui a permis 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 aluminium[2]. Cependant, la durée de la période de microgravité avec ces plateformes est limitée et n'est pas suffisante pour atteindre des régimes stationnaires en solidification dirigée. Jusqu'à présent, seul un petit nombre de conditions expérimentales ont été étudiées à cause des rares opportunités pour effectuer ce type d'expériences en microgravité.

L'utilisation d'un dispositif embarqué sur la station spatiale internationale ISS est une façon efficace de surmonter ces limitations. 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 Space. L'objectif est de rendre possible la réalisation de plusieurs expériences successives sur le même échantillon et 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.

Méthode

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 ≈ 200 µm, 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 µm 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 µm.

Résultats

La réalisation d'expériences de tirage rend possible de solidifier les échantillons sur des distances plus grandes que le champ de vue. Des vitesses de solidification très lentes peuvent aussi être appliquées afin de mettre en évidence les effets des mouvements convectifs résiduels. La figure 1 présente des

[1] G. Reinhart et al. npj Microgravity 9, 70 (2023)
[2] F. Ngomesse, et al. Acta Materialia 221 117401 (2021)

radiographies enregistrées lors d'une expérience de tirage réalisée sur un alliage Al-4 %pdsCu affiné, à une vitesse V = 1 µm/s. Après le début du tirage à l'instant t_0, le front de solidification se déplace d'abord vers l'arrière par rapport au gradient de température et à une vitesse égale à la vitesse de tirage. La partie la plus haute de l'interface solide-liquide atteint une position quasi fixe dans le champ de vision au bout d'environ 20 minutes. Cette position est située plus bas que la position initiale de l'interface solide-liquide, comme l'indique la ligne blanche en pointillés de la figure 1b. En revanche, la position de la partie la plus basse de l'interface solide-liquide continue de descendre, entraînant une déformation macroscopique progressive du front de solidification (figure 1c).

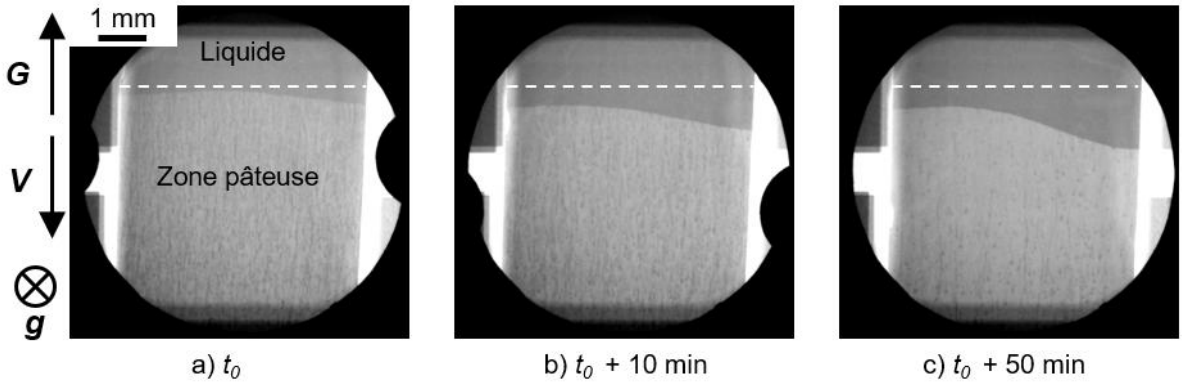


Figure 1 : Séquence de radiographies montrant a) le sommet de la zone pâteuse juste avant le tirage, b) le recul du front et une légère déformation du front de solidification après 10 minutes de tirage à V = 1 µm/s, et c) l'interface solide-liquide fortement déformée en raison de la présence d'un écoulement convectif résiduel après 50 minutes de tirage.

L'évolution de la forme de l'interface solide-liquide est attribuée à une accumulation de soluté induite par un écoulement convectif. Malgré les précautions prises, il est possible que l'échantillon ne soit pas dans une position parfaitement horizontale ; une légère inclinaison pourrait amener le soluté rejeté à s'écouler progressivement vers le côté, ralentissant ainsi la croissance de la phase solide. Par ailleurs, l'échantillon est disposé perpendiculairement à la gravité, se trouvant ainsi dans une configuration thermo-solutalement instable. Ce facteur, conjugué à la présence d'un gradient de température transversal résiduel, comme en témoigne la légère inclinaison de l'interface solide-liquide initiale après stabilisation, permet le développement d'un écoulement convectif au sein de l'échantillon, malgré sa faible épaisseur. On peut également noter l'absence d'instabilité au niveau de l'interface solide-liquide alors que la vitesse de tirage appliquée est plus grande que la vitesse critique de déstabilisation V_c = 0,27 µm/s. Une explication possible est l'étalement de la couche solutale devant le front de solidification par les mouvements convectifs, induisant une diminution du gradient de concentration qui est à l'origine de l'instabilité morphologique en solidification dirigée d'alliages.

Perspectives

La prochaine étape consiste à valider l'*Engineering Model* qui servira également de *Ground Test Model.* L'analyse des données obtenues se poursuit. Plusieurs séries de tests sont encore prévus fin 2026 dont les SVT (Science Verification Tests) dans le but d'obtenir un dispositif prêt dès le printemps 2027. La date d'envoi sur ISS reste encore à définir.

Publications

G. Reinhart, M. Becker, F. Kargl, N.Bellenbaum, L. Sturz, C. Pickmann, D. J. Browne, H. Nguyen-Thi, A. Frutos Pastor, A. Sgambati and W. Sillekens, In Situ Directional Solidification Investigations of Aluminum Alloys During Preparatory Ground Experiments Using the X-Ray Facility for the International Space Station (XRF-ISS), JOM (2026).

1.3 Fusion eutectique
S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau

Fusion eutectique

Silvère Akamatsu[1], Sabine Bottin-Rousseau[1]

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

Introduction

La fusion est la transformation, par chauffage, d'un solide en un liquide. C'est bien le processus inverse de la solidification, mais les dynamiques respectives sont très différentes. Considérons la solidification eutectique. Elle délivre un matériau multiphasé dont les microstructures composites sont la trace de formes de croissance auto-organisées à l'interface solide-liquide. Par contraste, ces mêmes microstructures, figées dans le solide, servent de condition initiale à la fusion –qui, elle, ne laisse pas de trace durable dans le liquide. La dynamique de fusion reste donc un processus obscur tant que l'on ne l'observe pas in situ. D'ailleurs, très peu d'études de la littérature s'y rapportent. Récemment, l'intérêt pour la fusion des alliages a été ravivé par le développement de techniques de fabrication additive mettant en jeu des cycles de fusion/solidification à une échelle submillimétrique. En collaboration avec G. Boussinot à Aachen, nous avons étudié les lois d'échelles qui gouvernent des changements morphologiques lors de la fusion directionnelle d'un eutectique binaire [1]. Le contexte de ce travail est d'abord celui du Topical Team « Melting », créé en 2022 par l'ESA, sous la direction de J. Zollinger (IJL, Nancy, France). Le but, comme en solidification, est d'étudier les phénomènes de fusion multiphasée gouvernés par la diffusion solutale, sans convection. En 2024, a démarré le projet ANR PRCI Franco-Allemand DYNAMELT. Outre l'équipe de l'IJL et la nôtre, ce projet regroupe des équipes d'Access e.V. (Aachen, Allemagne) et de l'Université d'Iena (FSU, Jena, Allemagne).

Méthode

Nous utilisons l'alliage transparent modèle (eutectique binaire) CBr_4-C_2Cl_6 en échantillons minces (12 µm) –la convection est bloquée, la dynamique est quasi bidimensionnelle (2D), et l'observation en vidéomicroscopie optique en temps réel est aisée. Pour des alliages de concentration très légèrement supérieure à celle de l'eutectique, le solide β est la phase primaire, et le solide α la phase secondaire. Des structures eutectiques lamellaires biphasées régulières, avec des espacements interphases λ de 4 à 20 µm environ, sont préparées en solidification directionnelle. Pour les fondre, il suffit, dans le même disositif, de renverser le sens de translation de l'échantillon vers le chaud, à des vitesses de fusion V_m variant, ici, de 0.5 à 100 µm/s. Nos collègues d'Access e.V. ont fait des simulations numériques (champ de phase) incluant les valeurs des paramètres physiques de l'alliage modèle.

Résultats

Le but est d'étudier les changements morphologiques des structures de front de fusion biphasée en fonction des deux paramètres V_m et λ. Ces structures (Fig. 1) se caractérisent par de fins doigts du solide primaire β en protubérance dans le liquide, tandis que le solide secondaire fond au voisinage de la température des lignes de jonction triple (trijonctions) α-β-liquide, donc près de la température eutectique (équilibre à trois phases).

Diverses évolutions morphologiques ont été observées et reproduites par des simulations numériques. A haute vitesse de fusion, la forme (très aciculaire) des doigts β (Fig. 2a) est déterminée par un couplage diffusif fort dans la région de la trijonction. Cette dynamique, où le gradient de température entre peu en jeu, obéit à la même loi d'échelle que celle du régime dit de « pénétration de liquide » [Brener et al, J. Phys. Condens. Matter 21 (2009) 464106]. A basse vitesse, un épaississement progressif des doigts β (Fig. 2b) est expliqué en comparant V_m à une vitesse seuil construite à partir du bilan de flux diffusif le long des doigts et à la pointe. Enfin, une instabilité de doublement de période (Fig. 2c) a

été découverte lorsque la valeur de V_m est basse, et celle de λ petite. Dans cette configuration, la période de la structure de fusion est doublée (2λ) par rapport à l'espacement lamellaire initial (λ). On montre que cette instabilité est gouvernée par la dynamique à la trijonction.

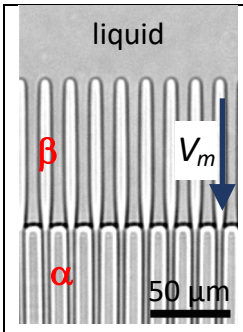


Figure 1 : Forme de fusion eutectique directionnelle (V_m = 1 µm/s), partant d'une microstructure lamellaire régulière solidifiée préalablement dans un alliage CBr_4-C_2Cl_6 en échantillon mince. Sur l'image, l'axe du gradient de température (et celui de la translation de l'échantillon) est vertical (le côté chaud en haut). La flèche indique la direction de propagation du front de fusion. Les phases α et β alternent dans le solide. La phase primaire β forme de longs doigts séparés par du liquide.

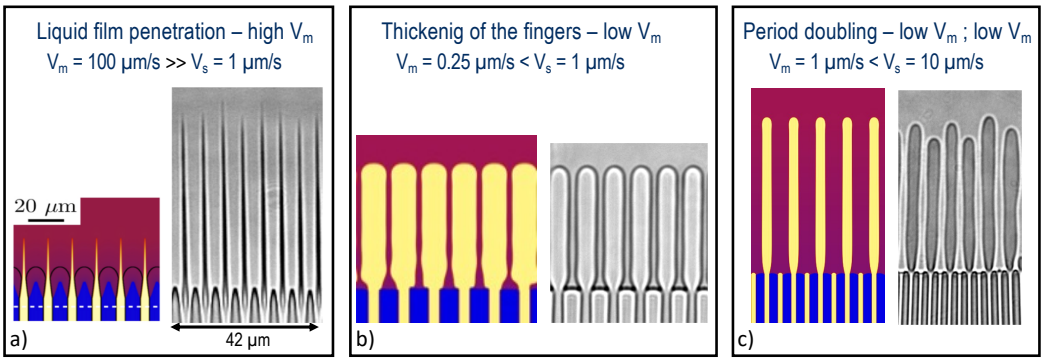


Figure 2 : Différentes formes de fusion eutectique. a) Régime de « pénétration de liquide » à haute vitesse de fusion. b) Elargissement des doigts β en dessous d'une vertaine vitesse critique. c) Doublement de période.

Théoriquement, en régime stationnaire, la longueur L_β des doigts β devrait être fixée par la concentration de l'alliage et la valeur du gradient de température. C'est ce qu'on voit dans les simulations, mais pas dans les expériences, où L_β varie beaucoup avec V_m. C'est une question qui mérite d'être étudiée.

Perspectives

En s'appuyant sur des expériences in situ et des simulations numériques, nous avons identifié les paramètres caractéristiques de différentes morphologies de fusion eutectique et établi les lois d'échelle correspondantes. Cependant, en considèrant un système confiné quasi 2D, et une microstructure dans laquelle les fractions volumiques η_α et η_β des deux phases dans le solide sont à peu près égales, plusieurs phénomènes nous ont certainement échappé.

Pour explorer d'autres dynamiques, nous étudierons la fusion d'un eutectique asymétrique ($\eta_\alpha >> \eta_\beta$) de type fibreux (SCN-DC) en échantillons massifs lors de la prochaine campagne d'expériences en micropesanteur (TA/SEBA4), prévue en 2027, utilisant l'appareil Transparent Alloys dans l'ISS. Durant cette même campagne, nous réitérerons, qualitativement parlant, les expériences de solidification faites en 2023 (TA/SEBA3) avec une éprouvette à gradient de concentration. Le but est d'acquérir de nouvelles observations de la transition morphologique lamelles/fibres, en montrant sa sensibilité à la composition de l'alliage. Les tests au sol effectués fin septembre (E-USOC Madrid), soit tout récemment, semblent conformer la fiabilité de la procédure de fabrication de l'éprouvette. Les expériences proprement dites sont prévues en avril 2027.

Publication

[1] R. Nellissery Rajan, R. Kumari Rajendran, G. Boussinot, K. Sbargoud, S. Bottin-Rousseau, S. Akamatsu, Pattern formation during melting of lamellar eutectics, *Phys. Rev. Lett.*, **136**, 256301 (2026).

Voir aussi : https://www.inp.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/structures-de-fusion-composites

1.4 Dynamique à grande échelle de motifs de croissance eutectique : simulations numériques par la méthode du champ de phase
M. Plapp

Dynamique à grande échelle de motifs de croissance eutectique : simulations numériques par la méthode du champ de phase

M. Plapp[1]

[1] Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (PMC), CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, 91120 Palaiseau

Introduction

La solidification d'alliages eutectiques produit naturellement des composites consistant de deux phases solides distinctes. Deux morphologies spatialement périodiques sont fréquemment observées : les lamelles et les fibres. Dans la théorie classique de Jackson et Hunt, les lamelles sont favorisées quand les fractions volumiques des deux phases sont comparables, et les fibres dans le cas contraire. L'échelle caractéristique des motifs – c'est-à-dire, l'espacement des lamelles ou fibres – est fixée par la compétition de la diffusion, qui favorise des petits espacements, et la capillarité, qui favorise au contraire les grands espacements.

En réalité, les motifs observés dans les expériences ne sont jamais parfaits. Il existe généralement une certaine densité de défauts, comme par exemple des lignes de faille dans les eutectiques lamellaires, dont l'origine est encore largement incomprise, ou des motifs mixtes qui mélangent lamelles et fibres. Des simulations par champ de phase pour des systèmes de taille typique d'une dizaine d'espacements ont révélé que ces motifs complexes étaient persistants, c'est-à-dire qu'ils n'évoluent pas vers un état régulier périodique sur des échelles de temps comparables aux expériences [1].

Se pose alors la question quels sont les mécanismes qui amènent les fronts eutectiques vers les états plus réguliers observés dans les expériences. Deux effets ont été identifiés. Premièrement, un gradient thermique transverse peut générer des motifs lamellaires réguliers par croissance latérale [2]. En combinaison avec une instabilité des lamelles, ce « drift » peut donner lieu à une transition entre lamelles et fibres lors d'un changement de vitesse de tirage, comme récemment observé dans les expériences spatiales du projet TRANSPARENT ALLOYS [3]. Deuxièmement, l'anisotropie des interfaces solide-solide peut favoriser certaines directions des lamelles, qui sont alors liées à la cristallographie [4]. C'est ce dernier effet que nous avons étudié en plus de détails cette année, en collaboration avec Supriyo Ghosh, ancien doctorant du PMC (à l'époque, co-financé par le CNES) et maintenant professeur à l'Indian Institute of Technology Roorkee (Inde).

Méthode

Nous avons utilisé le modèle de champ de phase mis en place précédemment [1,2,3,4], avec une anisotropie des interfaces solide-solide (les interfaces solide-liquide restant isotropes) qui combine un mode à symétrie cubique avec un terme qui favorise un plan particulier. Les paramètres sont les forces des deux anisotropies, ε_2 et ε_4, et l'orientation des axes cristallographiques par rapport au gradient de température dans le four de solidification directionnelle et aux bords de l'échantillon. Deux angles sont importants. Premièrement, l'inclinaison de l'axe cristallographiques par rapport à la direction de tirage, α, induit une inclinaison des lamelles qui fait que les lignes triples ont un « drift » latéral [5]. Deuxièmement, une rotation des axes cristallographiques dans le plan normal au gradient de température induit un décalage de la direction favorisée des lignes triples par rapport aux bords de l'échantillon par un angle β. Ceci induit un accroissement avec le temps de l'espacement lamellaire à un bord de l'échantillon (l'équivalent d'un « joint de grain divergent »), ce qui force les lamelles à brancher ou se réorienter.

Résultats

Un exemple pour une évolution temporelle de microstructures est montré ci-dessous (Fig. 1). Plusieurs effets intéressants sont visibles dans cette séquence. Nous démarrons la simulation avec un état lamellaire qui est orienté dans une direction qui est différente de la direction d'énergie minimale, mais qui correspond à la direction qui serait engendrée par le « drift » latéral. Par une instabilité, les lamelles commencent à s'orienter dans la direction d'énergie minimale (marquée par un trait noir). Dans le coin supérieur gauche, le « drift » augmente l'espacement des lamelles orientées selon la direction favorable avec le temps ; de nouvelles lamelles sont alors engendrées par une instabilité de branchement latéral des lamelles, qui est bien visible dans la troisième image. La dynamique engendre aussi plusieurs défauts morphologiques linéaires, qui rappellent les lignes de faille observées dans les expériences.

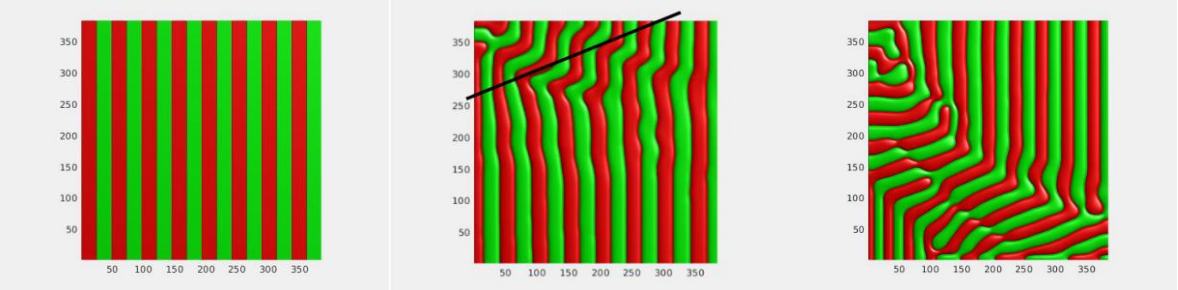


Fig. 1 : Images successives de l'évolution d'un front lamellaire en trois dimensions, vue de dessus. L'inclinaison α=15° induit un « drift » du haut vers le bas de toutes les lignes triples. La direction favorisée par l'énergie de surface des interfaces solide-solide (β=15°) est marquée par une ligne noire dans la figure du milieu.

Perspectives

Ces simulations donnent lieu à des observations préliminaires intéressantes. Elles seront poursuivies de manière systématique en collaboration avec Supriyo Ghosh. En parallèle, la thèse de Max Binkle (co-financée par le CNES) nous permettra d'approfondir notre compréhension de la transition lamelles-fibres, en accompagnant de nouvelles expériences spatiales à l'ISS prévues en 2027.

Publications

[1] A. Parisi, M. Plapp, Defects and multistability in eutectic solidification patterns, *EPL* **90**, 26010 (2010).

[2] M. Perrut, A. Parisi, S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau, G. Faivre, M. Plapp, Role of transverse temperature gradients in the generation of lamellar eutectic solidification patterns, *Acta Materialia* **58**, 1761 (2010)

[3] S. Akamatsu, S. Bottin-Rousseau, M. Şerefoğlu, 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)

[4] S. Ghosh, M. Plapp: Influence of interphase boundary anisotropy on bulk eutectic solidification microstructures, *Acta Materialia* **140**, 140-148 (2017)

[5] S. Ghosh, A. Choudhury, M. Plapp, S. Bottin-Rousseau, G. Faivre, S. Akamatsu: Interphase anisotropy effects on lamellar eutectics: A numerical study, *Phys. Rev. E* **91**, 022407 (2015)

Conférences

TMS (The Minerals, Metals, and Materials Society) meeting, San Diego, CA, march 15-19, 2026: "Lamella-to-rod transition in eutectic solidification: microgravity experiments and phase-field simulations".

1.5 Forçage paramétrique contrôlé lors de la solidification dirigée d'alliages transparents dans DECLIC-DSI à bord de la Station Spatiale Internationale
F.L. Mota, K. Ji, Y. Song, L. Littles, A. Karma, N. Bergeon

Forçage paramétrique contrôlé lors de la solidification dirigée d'alliages transparents dans DECLIC-DSI à bord de la Station Spatiale Internationale

Fatima L. Mota[1], Kaihua Ji[2,3], Younggil Song[2,3], Louise Littles[4], Alain Karma[2], Nathalie Bergeon[1]

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

[2] Physics Department, Northeastern University, Boston, USA

[3] Materials Science Division, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA

[4] Marshall Space Flight Center, Huntsville, USA

Dans le cadre du projet scientifique MISOL3D (MIcrostructures de SOLidification 3D) sélectionné par le CNES, nous avons participé au développement de l'Instrument DECLIC et de son insert DSI (Directional Solidification Insert), dédié à l'étude *in situ* de la formation des microstructures cellulaires et dendritiques dans des alliages transparents en conditions de transport purement diffusif. Les expériences réalisées en microgravité à bord de la Station Spatiale Internationale constituent une base de données de référence pour l'étude des mécanismes fondamentaux de la solidification, en s'affranchissant des effets de convection. Ce programme est mené en collaboration avec les équipes américaines du Pr. Trivedi (expériences en échantillons minces) et du Pr. Karma (simulations par champ-de-phase), sélectionnées par la NASA. Deux campagnes expérimentales ont été réalisées : la première (DSI), entre avril 2010 et mars 2011, a principalement porté sur les réseaux cellulaires, tandis que la seconde (DSI-R), entre octobre 2017 et novembre 2018, utilisant un alliage plus concentré (Succinonitrile – 0.46% pds Camphre), a permis d'étudier en détail les réseaux dendritiques, d'un intérêt majeur pour la métallurgie.

La maîtrise des microstructures de solidification constitue un enjeu essentiel pour le contrôle des propriétés des matériaux. Dans ce contexte, le forçage temporel des paramètres du procédé représente une approche prometteuse pour modifier la morphologie des réseaux dendritiques et orienter leur évolution. Ce travail exploite les expériences réalisées avec DECLIC-DSI afin d'étudier la réponse d'un réseau dendritique tridimensionnel soumis à des variations périodiques de la vitesse de tirage. Les observations expérimentales sont comparées à des simulations par champ de phase afin d'identifier les mécanismes gouvernant l'évolution de la microstructure.

Résultats

Le régime dendritique se caractérise par des pointes paraboliques et le développement de branches secondaires orientées suivant des directions cristallographiques privilégiées résultant directement l'anisotropie cristalline. La caractérisation de la dynamique de réseau constitue l'un des principaux intérêts du dispositif DECLIC-DSI qui permet l'observation *in* situ de réseaux dendritiques étendus 2D en configuration de croissance 3D. En solidification dirigée, les trois paramètres de contrôle de la formation de la microstructure sont la concentration en soluté C_0, le gradient thermique G et la vitesse de tirage V. Sous une vitesse constante de 1,5 µm/s, l'interface évolue progressivement vers un régime stationnaire caractérisé une stabilisation de la position et du rayon des pointes dendritiques et une fréquence de formation de branches secondaires pratiquement constante. Les observations par voie transverse permettent de mesurer directement le rayon des pointes dendritiques et la fréquence de branchement, fournissant un jeu de données quantitatif pour la validation des modèles numériques.

A partir d'une croissance stationnaire à V = 1,5 µm/s, des oscillations périodiques de la vitesse de tirage, en créneau entre V_{min} = 0 µm/s et V_{max} = 3 µm/s, sont appliquées. La réponse de la microstructure dépend alors fortement de la période des oscillations (Figure 1). Pour les périodes les plus courtes, les pointes dendritiques s'adaptent rapidement aux changements de vitesse en termes de position et conservent une morphologie proche de celle observée en régime stationnaire. Lorsque la période augmente, les oscillations de position restent synchronisées avec les changements de vitesse mais le rayon de courbure continue d'augmenter très largement après la fin de la phase à V = 0 µm/s avant une diminution brutale et rapide. Au-delà d'une période critique, la phase de tirage s'accompagne d'une nouvelle instabilité des pointes aplaties pendant la phase de repos, comparable

à l'instabilité morphologique du front plan. Cette phase, marquée par de nombreux dédoublements de pointes (*tip splittings)* induit une réorganisation irréversible du réseau dendritique.

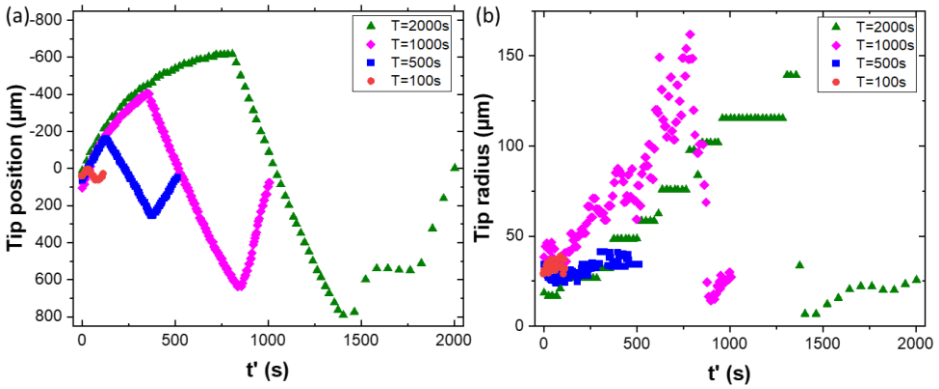


Figure 1: Réponse dynamique de (a) la position et du (b) le rayon de la pointe dendritique pour différentes périodes d'oscillation T de la vitesse de tirage.

Les simulations par champ-de-phase reproduisent fidèlement l'ensemble des comportements observés expérimentalement, depuis l'adaptation rapide observée pour les courtes périodes jusqu'au dédoublement des pointes pour les périodes les plus longues (Figure 2). Elles montrent que cette transition est gouvernée par la compétition entre la période imposée du forçage et les temps caractéristiques de relaxation de la diffusion et de la morphologie des dendrites.

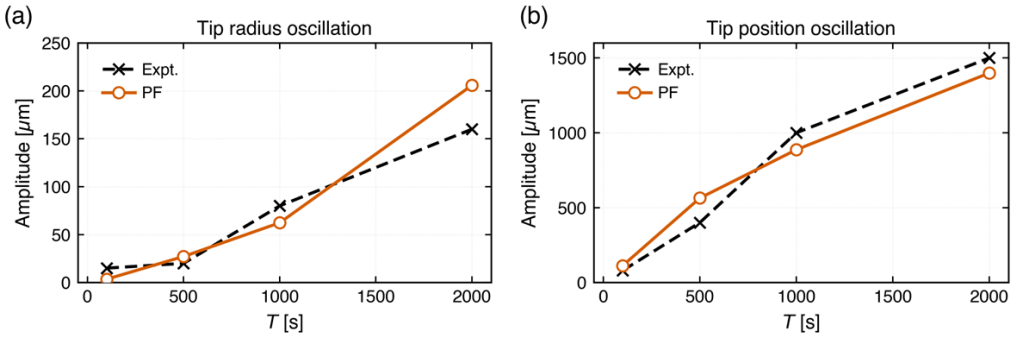


Figure 2: Comparaison entre les amplitudes d'oscillation mesurées expérimentalement et obtenues par simulation champ-de-phase pour (a) le rayon et (b) la position de la pointe dendritique.

Cette étude démontre que la réponse des réseaux dendritiques à un forçage périodique est gouvernée par des temps de relaxation intrinsèques qui déterminent les différents régimes morphologiques observés. Les résultats fournissent une compréhension quantitative des mécanismes responsables de l'adaptation, de la perte de stabilité et de la réorganisation des réseaux dendritiques, tout en validant la capacité des simulations par champ-de-phase à prédire ces phénomènes dans des conditions de croissance purement diffusives.

Perspectives

Malgré la fin du programme DECLIC, l'exploitation des données se poursuit afin d'approfondir la compréhension des mécanismes de sélection et de stabilité des microstructures de solidification.

Références 2026

- Mota F.L., Ji K., Song Y., Littles L.., Karma A., Bergeon N., Controlled parametric forcing during directional solidification of a bulk organic alloy under microgravity. *JOM* xxx (2026) xxx. Doi:10.1007/s11837-026-08649-z

Remerciements : Les auteurs remercient le CNES pour son soutien au projet MISOL3D.

1.6 Investigation de la CET par radiographie X dans la fusée sonde TEXUS-61

G. Reinhart, H. Nguyen-Thi, D. Olmos-Vicente, N. Bergeon

Investigation de la CET par radiographie X dans la fusée sonde TEXUS-61

G. Reinhart[1], H. Nguyen-Thi[1], D. Olmos-Vicente[1], N. Bergeon[1]

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

Introduction

Durant la solidification d'alliages, un rejet de soluté a lieu dans le bain fondu devant l'interface solide-liquide à cause de la différence de solubilité du soluté entre la phase liquide et la phase solide pour un coefficient de partage inférieur à l'unité. La couche de soluté créée dans le liquide est à l'origine d'une zone de liquide surfondu dite de constitution. L'intensité de cette surfusion est faible à basse vitesse de solidification et une structure « colonnaire » composée de grains très allongés se développe. Une augmentation de la vitesse de solidification augmente l'intensité de la surfusion de constitution, ce qui peut activer la germination de grains devant le front colonnaire. Dans les alliages affinés, =lLa germination hétérogène de ces grains se fait sur particules ajoutées sciemment dans l'alliage. Une transition colonnaire-équiaxe (CET : Columnar to Equiaxed Transition) se produira si le nombre de nouveaux grains équiaxes est suffisant pour bloquer la croissance des grains colonnaires.
La structure finale des grains est fortement impactée par l'action de la gravité sur le mouvement des grains équiaxes (sédimentation, flottaison) ou le transport de fragments de dendrites. Il est toutefois possible d'aboutir à une amélioration significative de la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lors de la CET grâce aux expériences spatiales. Le transport de chaleur et de soluté dans le bain fondu devient essentiellement diffusif et les effets de la gravité négligeables, ce qui permet de s'affranchir d'une partie des mécanismes complexes et d'effectuer une comparaison expérience - théorie plus directe.
Au cours du projet ESA intitulé XRMON, l'équipe a développé un dispositif de solidification avec observation *in situ* par radiographie X (XRMON-GF) utilisable à bord de fusée-sonde et lors de vols paraboliques. En juin 2019, l'équipe a réalisé une seconde expérience en fusée-sonde (MASER-14) dédiée à la transition colonnaire-équiaxe lors de la solidification d'un alliage Al-20%pdsCu affiné avec caractérisation *in situ* et en temps réel[1]. 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 à bord de la fusée-sonde TEXUS-61. 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.

Méthode

Les expériences de solidification sont effectuées avec le dispositif XRMON-GF (Gradient Furnace) qui se compose d'un four de type Bridgman et d'un système de radiographie X. 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 ≈ 210 µm 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 caméra CMOS fabriquée par PHOTONIC SCIENCE[2]. La taille des pixels de la caméra est de 9 µm x 9 µm 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 µm x 2 µm. La fréquence d'acquisition est de 2 images par secondes ce qui est suffisant pour suivre le développement des microstructures de solidification.

[1] F. Ngomesse et al., Acta Materialia 221 (2021) 117401
[2] https://photonicscience.com/products/x-ray-cameras/x-ray-scmos-16mp-detector/

Résultats

Une première campagne de tests a été effectuée en juillet 2025 dans les locaux de SSC Space afin de tester le nouveau détecteur. Plusieurs expériences de solidification ont été réalisées pendant cette campagne et les analyses des données et les observations ont montré que la qualité des images obtenues est très satisfaisante.
Des expériences complémentaires ont été menées dans le dispositif de laboratoire SFINX (Solidification Furnace with IN situ X-ray radiography) de l'IM2NP afin de définir de manière précise le profil de température qui permettra d'effectuer à la fois l'étape de fusion et l'étape de solidification pendant les 6 minutes de microgravité. Les premières analyses ont mis en évidence la difficulté de positionner l'interface solide-liquide dans le bas du champ de vue dans le cas de l'utilisation d'un gradient de température plus faible que dans les expériences précédentes, ce qui est nécessaire afin de pouvoir observer la transition-colonnaire équiaxe dans l'alliage Al-10%pdsCu affiné.
Une solution consiste à effectuer une étape de « conditionnement » pendant laquelle l'échantillon est fondu lentement jusqu'à positionner l'interface solide-liquide dans la région souhaitée (Fig. 1a). Les températures correspondantes sont ensuite relevées et l'échantillon est solidifié rapidement (Fig. 1b) pour être de nouveau refondu (Fig. 1c) et solidifié avec un profil de température permettant d'observer une transition colonnaire-équiaxe (Fig. 1d) dans la durée de la phase de microgravité accessible en fusée sonde. Cette procédure sera testée avec le dispositif XRMON-GF au cours d'expériences prévues dans les locaux de SSC Space en décembre 2026.

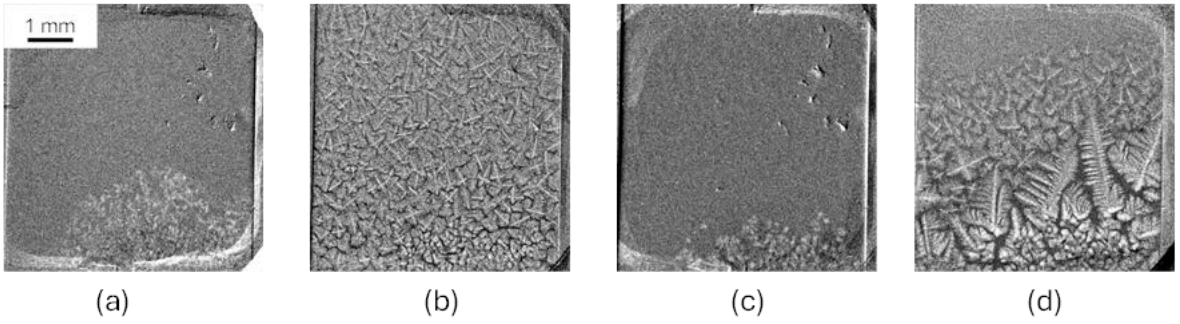


Figure 1 : séquence de radiographies montrant (a) l'interface solide-liquide positionnée en bas du champ de vue, (b) la microstructure après « conditionnement », (c) la position de l'interface solide-liquide après application des mêmes températures que pendant la précédente fusion et (d) transition colonnaire-équiaxe.

Perspectives

Le CDR (Critical Design Review) a eu lieu le 16 septembre et tous les feux sont au vert pour poursuivre le développement du dispositif. La prochaine étape consistera à réaliser les SVT (Science Verification Tests) prévus en décembre 2026 pendant lesquels sera testé précisément le profil de vol, incluant à la fois les étapes de fusion et de solidification, approprié aux 6 minutes de microgravité de l'expérience. 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 font 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.

1.7 Analyse quantitative de la croissance facettée au cours de la solidification dirigée du salol
A. Raad, N. Bergeon, N. Mangelinck-Noël, F.L. Mota

Analyse quantitative de la croissance facettée au cours de la solidification dirigée 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 la solidification influence fortement les propriétés macroscopiques des matériaux. La maitrise de la qualité des matériaux nécessite donc une compréhension approfondie des mécanismes physiques gouvernant la formation de ces microstructures. Dans ce contexte, notre équipe a contribué au développement de l'instrument DECLIC et de son insert DSI, dédiés à l'étude *in situ* de la formation de microstructures colonnaires dans des matériaux organiques transparents, dans le cadre du projet MISOL3D (MIcrostructures de SOLidification 3D) soutenu 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 principalement été utilisé avec des alliages transparents analogues des alliages métalliques à interface rugueuse. L'étude de matériaux facettés présente cependant un intérêt scientifique et industriel majeur, illustré notamment par le silicium cristallin utilisé dans la fabrication de cellules solaires photovoltaïques.
Notre objectif est de mieux comprendre les mécanismes de croissance facettée ainsi que le rôle des défauts dans l'évolution de la microstructure, afin de préparer de futures expériences en configuration de systèmes massifs 3D. 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 caractérisé physico-chimiquement par thermo-microscopie ou calorimétrie, puis leur dynamique de croissance est analysée dans l'instrument ECODIS (Experimental setup for COnfined DIrectional Solidification), un four de solidification dirigée pour échantillons minces équipé d'un microscope optique permettant des observations *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 (≈42°C), qui cristallise avec une interface macroscopiquement facettée en raison de sa forte anisotropie. Des expériences de solidification dirigée ont été réalisées sous différentes vitesses de tirage et gradients thermiques afin de mieux comprendre les mécanismes contrôlant la croissance des facettes.
Les observations montrent qu'après une phase transitoire, l'interface atteint un régime quasi stationnaire caractérisé par une position moyenne stable malgré des fluctuations locales liées à la dynamique des pointes facettées. Le recul de l'interface permet d'estimer le sous-refroidissement cinétique, paramètre essentiel puisqu'il gouverne la vitesse de croissance et les mécanismes d'attachement à l'interface.
L'analyse morphologique révèle une forte hétérogénéité des tailles de facettes. Les facettes deviennent globalement plus grandes lorsque le gradient thermique diminue, tandis qu'aucune influence systématique de la vitesse de tirage n'est clairement mise en évidence. Cette dispersion est principalement attribuée au caractère polycristallin des échantillons et aux phénomènes de compétition de croissance entre grains voisins, qui conduisent au développement de facettes irrégulières et à une variabilité importante des dimensions mesurées.
Une contribution majeure de ce travail est le développement d'une méthodologie permettant d'identifier la nature cristallographique des facettes observées directement pendant la solidification. Les angles mesurés expérimentalement entre les arêtes des facettes sont convertis en angles tridimensionnels à l'aide d'une reconstruction du cristal sous VESTA et des matrices d'orientation correspondantes. Cette approche montre que, malgré des germes initiaux d'orientation aléatoire, l'interface solide-liquide du salol est majoritairement limitée par des plans appartenant à la famille {111}. Les deux populations principales d'angles observées expérimentalement (environ 72.5° et 107.5°) correspondent à différentes projections géométriques de ces mêmes plans cristallographiques. La Figure 1 illustre cette méthodologie d'identification cristallographique des facettes.

Concernant la dynamique des pointes et des facettes, les vitesses des pointes présentent une dispersion importante et ne coïncident pas toujours avec la vitesse de tirage imposée. Ces écarts sont attribués aux interactions locales entre cristaux, aux phénomènes de compétition de croissance ainsi qu'à la présence de défauts tels que les bulles, les stries de croissance ou les contraintes mécaniques. Les vitesses normales aux facettes suivent globalement les prédictions géométriques attendues, tout en révélant le caractère dynamique de l'interface.

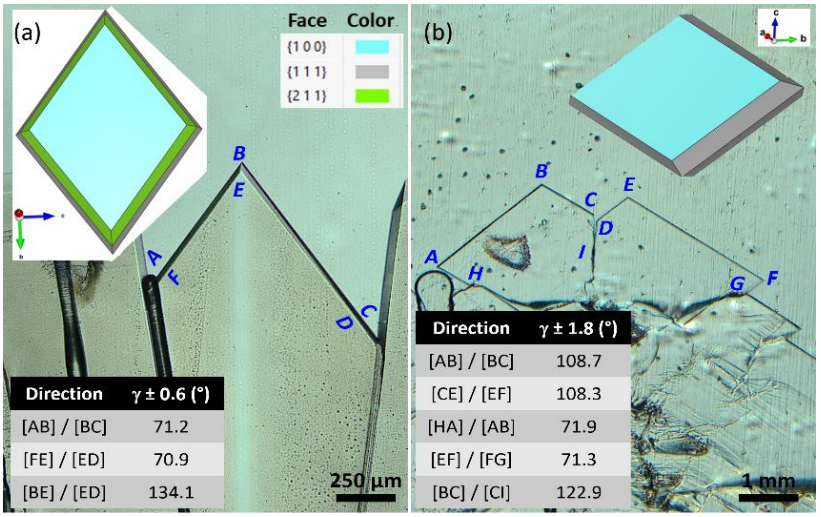


Figure 1 : Interface solide-liquide du salol avec les angles de facette mesurés et les formes cristallines générées par VESTA.

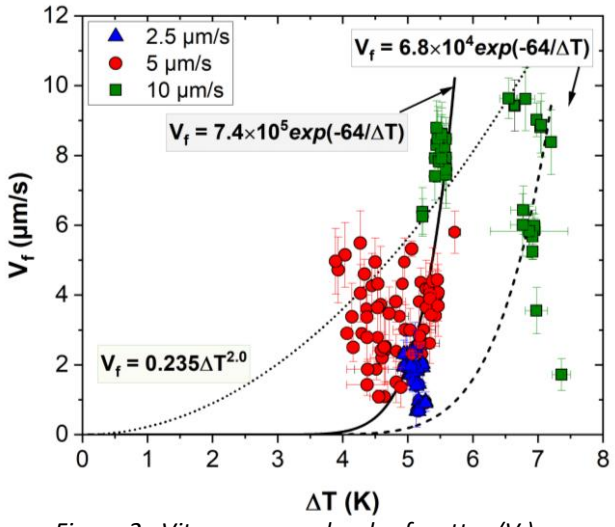


Figure 2 : Vitesses normales des facettes (V_f) en fonction du sous-refroidissement (ΔT), comparées à différentes lois cinétiques.

Enfin, des lois cinétiques de croissance ont été établies en reliant la vitesse normale des facettes au sous-refroidissement (Fig. 2). La majorité des données expérimentales est décrite par une loi exponentielle caractéristique d'un mécanisme de croissance contrôlé par la nucléation bidimensionnelle. Le coefficient exponentiel obtenu expérimentalement est en excellent accord avec la valeur théorique calculée à partir de l'énergie interfaciale et de l'enthalpie de fusion du salol, ce qui valide l'interprétation physique proposée. Seules quelques mesures restent compatibles avec une croissance contrôlée par des dislocations vis, sans toutefois permettre de conclure à un changement de mécanisme. Ces résultats montrent que, dans les conditions étudiées, la nucléation bidimensionnelle constitue le mécanisme dominant de croissance des facettes {111}.

Ce travail fournit ainsi un cadre expérimental quantitatif permettant d'identifier les facettes en croissance et de relier leur dynamique aux mécanismes physiques qui gouvernent leur évolution, constituant une étape importante vers la modélisation prédictive de la croissance facettée.

Perspectives

La caractérisation de la dynamique des facettes du salol et de leur compétition se poursuit, notamment par des expériences réalisées à des vitesses de tirage plus élevées. Des travaux sont également en cours pour mesurer plus précisément la surfusion des facettes afin d'établir des lois cinétiques plus robustes. Enfin, d'autres systèmes organiques, notamment à base succinonitrile, sont actuellement étudiés afin d'explorer des interfaces présentant un degré de facettage différent.

Références 2026

- Raad A., Bergeon N ., Mangelinck-Noel N., Mota F.L. *Acta Crystallographica B82* (2026) 143-153.

Remerciements : Les auteurs remercient le CNES pour son soutien au projet MISOL3D.

Session 2

Instabilité, Turbulence, convection Bénard - Marangoni

2.1 Thermomagnetic convection in ferrofluids in microgravity
A. Hiremath, S. Kim, A. Meyer, C. Kang, **I. Mutabazi**

Thermomagnetic convection in ferrofluids in microgravity

Anupam Hiremath[1], Subin Kim[2], Antoine Meyer[1], Changwoo Kang[2] & Innocent Mutabazi[1]

[1]Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC), UMR 6294, CNRS-Université du Havre, Normandie Université, 53, rue de Prony, 76058 Le Havre Cedex, France
[2] Department of Mechanical Engineering, Jeonbuk National University, Republic of Korea

To model thermal convection in planets interiors and atmospheres, it is suitable to perform experiments under microgravity conditions (drop tower, zero-g airbus, sounding rockets, ISS) using appropriate artificial gravity forces such as the electric gravity obtained from dielectrophoretic force when a high-frequency electric tension is applied to the electrodes of a container with a dielectric liquid. Depending on the properties of the dielectric liquid, it is possible to obtain the electric gravity with magnitude close to the Earth acceleration g. However, the dielectric liquids have some limitations such as breakdown potential, internal heating especially for polar dielectrics, safety constraints, noisy environments. Ferrofluids[1] i. e. colloidal aqueous or oil solutions of ferric or ferro-magnetic particles which tend to orient themselves in the direction of applied magnetic field $\vec{B}$, offer an alternative solution to achieve large values of artificial gravity[2] (about 30 times the Earth gravity). Their viscosity and thermal conductivity depend on their volume fraction and on the magnetic field[1]. Besides their different technical and medical applications, they are good candidates for investigation of heat transfer under microgravity[3]. The interaction between the magnetization $\vec{M}$ of a ferrofluid and an external magnetic field $\vec{B}$ yields the Kelvin force $\vec{F}_K = (\vec{M}.\vec{\nabla})\vec{B} = \vec{\nabla}P_m - \rho\alpha\theta\vec{g}_m$ where P_m is the magnetic pressure and the centripetal acceleration $\vec{g}_m = -g_m\vec{e}_r$ can be considered as a magnetic gravity. The term $\vec{F}_{mb} = -\rho\alpha\theta\vec{g}_m$ represents the magnetic buoyancy force which can induce *thermomagnetic convection*[1]. The magnetic gravity depends on the ferrofluid properties and on the magnitude of the applied magnetic field through the relation $g_m = \frac{KB}{\alpha\rho}kK_1(kr)$ 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 thermomagnetic convection in ferrofluid contained inside a stationary cylindrical annulus in microgravity. The inner cylinder of radius R_1 is maintained at temperature T_1 while the outer cylinder of radius $R_2 = R_1 + d$ is maintained at temperature $T_2 = T_1 - \Delta T$. Inside the inner cylinder, a stack of magnets with axial spacing $\lambda_b \cong 3.54\, d$ produces the magnetic field $\vec{B}$[3].

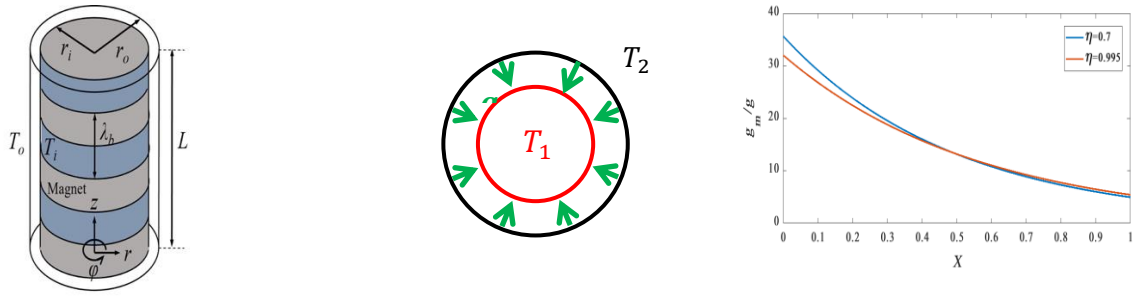


Figure 1: a) The flow configuration, b) Magnetic gravity, c) Radial profile of magnetic gravity

The ferrofluid in the stationary annulus with a radial temperature gradient is subject to two buoyancy forces: the Archimedean buoyancy dure to gravitational acceleration $\vec{g}$ and the magnetic buoyancy due to 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 $Pr = \nu/\kappa$ and the magnetic Rayleigh number $Ra_m = \alpha\Delta T g_m d^3/\nu^2\kappa$ with the mean radius $\bar{R} = (R_1 + R_2)/2$ and where α, ν and κ represent the thermal expansion coefficient, the kinematic viscosity and thermal diffusivity of the ferrofluid respectively. It

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

[2] R.E. Rosensweig *et al*., *Phys. Rev. Lett*. **83**, 4904-4907 (1999).

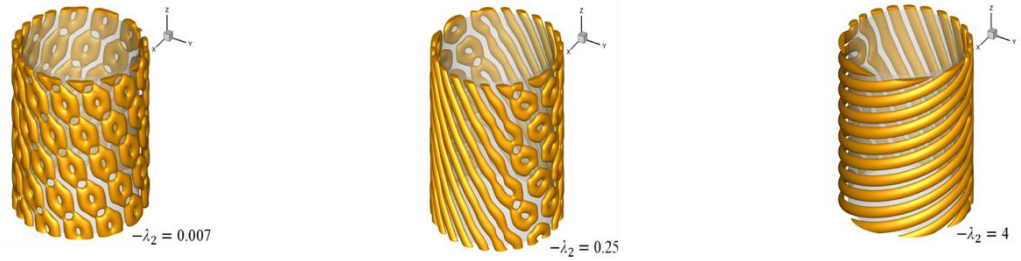
[3] J.E.Hart, *J. Fluid Mech*. **453**, 21-38 (2002).

is often useful to use the magnetic Galileo number $\mathrm{Ga}_m = \left(\frac{g_m d^3}{\nu^2}\right)^{1/2}$ which does not depend on the temperature difference. 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 stationary conduction state. Both the cylinders are assumed of infinite length, this allows to expand the perturbations in normal modes of the form $\exp[st + i(kz + n\varphi)]$, where $s = \sigma + i\omega$ is the complex growth rate, k is the axial wavenumber and n is the azimuthal wavenumber of the perturbations. The linear stability analysis yields the critical parameters (wavelength, threshold) from the marginal hypersurface $\sigma(Ra, Pr; k, n) = 0$ of thermomagnetic convection. The DNS are performed using periodic boundary conditions in the axial direction with the spatial period fixed by the critical wavenumber.

Results

We summarize the main results from linear stability analysis and from DNS in infinite cylindrical annulus of the thermal convection in a ferrofluid under microgravity:
i) the critical modes due to magnetic buoyancy which are called *thermomagnetic modes* are helical stationary modes (i.e. $\omega = 0, k \neq 0 \neq n$);
ii) the threshold of thermomagnetic convection Ra_{mc} is independent of Pr;
iii) the transition to thermal magnetic modes is supercritical;
iv) away from the critical state, thermomagnetic modes become oscillatory before they become chaotic;
v) the Nusselt number (*Nu*) increases from 1 (conduction) with Ra_m when thermo-magnetoconvection occurs.



Ra_m =1605 Ra_m =1750 Ra_m = 4000

Figure 2: Computed thermo-magneto-convective patterns for 3 values of Ra_m and λ_i, $i \in \{1, 2, 3\}$ are the eigenvalues of the velocity gradient tensor $\overline{\overline{D}} = \left(\partial u_i / \partial x_j\right)$ in cylindrical coordinates.

It is useful to remind that in terrestrial conditions, in the absence of magnetic convection, the Archimedean buoyancy yields critical modes which are thermal and oscillatory[2]. The solid body rotation delays the threshold of convection.

Publications

1. C. Kang, S. Kim, A. Meyer and I. Mutabazi, Numerical study of thermomagnetic convection in a ferrofluid, in revision for *J. Fluid Mech.* (2026).

2. 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.* **235**, 39-52 (2026) https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-025-01908-1(2026).

Acknowledgement

The present project has benefited of a support from CNES through the GdR MFA2799 (project INTHELDI), from ANR/LABEX EMC[3] (project INFEMA) and from collaborative project PHC-STAR (2026-2027) between France and South Kora. A.M.H. was supported by the Graduate School MES (Materials & Energy Sciences) and by the University of Le Havre Normandy.

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

2.2 Effets dynamiques de champ électriques AC sur des bulles en croissance : deuxième campagne de vols paraboliques de l'expérience AEBIO
S. Siedel, T. Gu

Effets dynamiques de champ électriques AC sur des bulles en croissance : deuxième campagne de vols paraboliques de l'expérience AEBIO

Samuel Siedel[1], Tianle Gu[1]

[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 cisaillé. 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 résonnance, 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'additionneront 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 Oscillations) 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 a été développé afin d'expérimenter la production de bulles par ébullition en site unique au cours de la campagne VP190 en mars 2026.

Résultats

Les résultats de la campagne VP190 de mars 2026 a pu en grande partie confirmer dans les cas de l'ébullition les observations faites au cours de la campagne précédente sur des bulles d'azote injectées. En particulier, la capacité d'un champ électrique périodique à synchroniser les cycles de bulles a été démontrée même lorsque les transferts thermiques pilotent la croissance. Comme en attestent les figures 1 et 2, l'initiation des bulles sur le site de nucléation artificiel et le détachement des bulles ont lieu chacun dans des conditions d'actuation électrique particulières, celle-ci étant d'ailleurs fonction de la fréquence du signal et de sa nature symétrique ou polarisée. Ces observations ainsi que d'autres ont permis de mettre en valeur des contributions conjointes mais différentes des forces électriques liées à la polarisation du fluide et d'autres liées à la présence de charges dans le fluide. La concentration de ces charges dépendent aussi bien des propriétés du fluide de travail que de la manière dont elles peuvent être générées par le champ électrique (dissociation ionique, injection pariétale) et de la nature des électrodes. Le matériau d'une électrode ayant été modifié (inox vers cuivre) entre les 2 campagnes expérimentale, des modifications significatives ont été observées lors des essais en polarité négative.

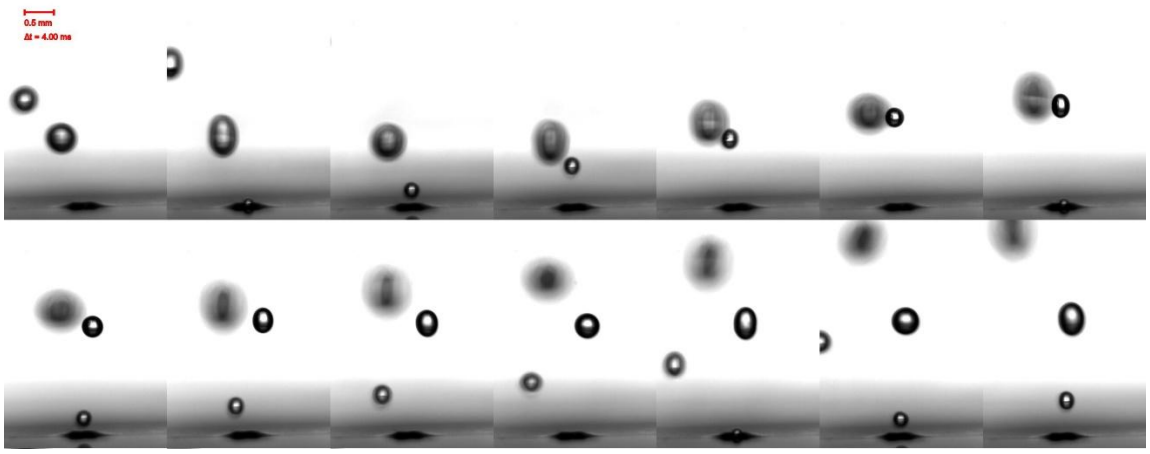


Figure 1 : Cycles de bulles en micropesanteur synchronisées sur le signal électrique. Δt = 4 ms entre les photos. Tension sinusoïdale de 50 Hz, avec U variant entre -12 et +12 kV

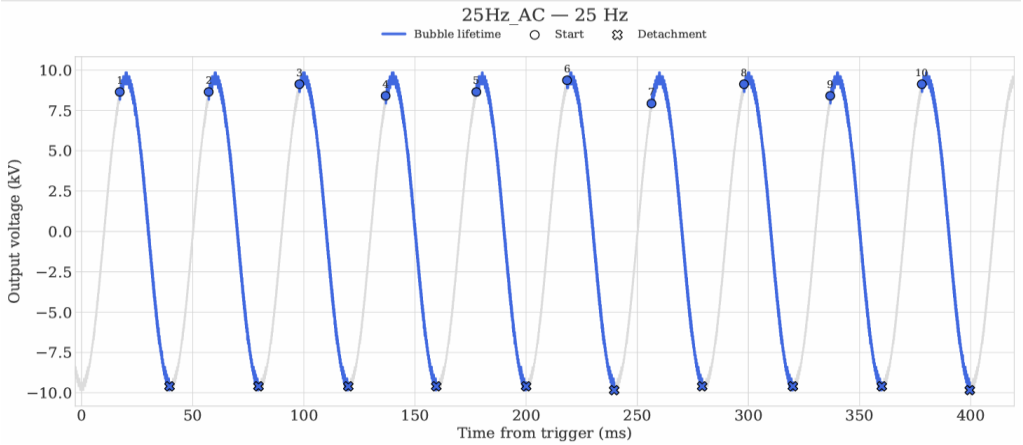


Figure 2 : Cycles de bulles traces sur le signal électrique en microgravité. Tension sinusoïdale de 25 Hz, avec U variant entre -12 et +12 kV

Perspectives

L'expérience AEBIO est en cours de modification afin d'une part d'amélioré des faiblesses observées lors de la campagne expérimentale (système de chauffage du bain, appel de courant important du générateur, …) et d'autre part de permettre de tester de nouveaux fluides de travail. La troisième campagne d'essai en vol parabolique de l'expérience est prévue en mars 2027.

Publications

- T. Gu and S. Siedel, Bubble oscillations and dynamics under periodic electric fields, *Experimental Thermal and Fluid Science* 172, 111668, 2026.
- 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.

2.3 Effect of miscibility on hydrodynamic instabilities : Phase-field based modeling
A. Duney, **S. Amiroudine**

Effect of miscibility on hydrodynamic instabilities : Phase-field based modeling

A. Dubey[1] and S. Amiroudine[1]

[1] Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, Bordeaux

Introduction

Binary fluids exhibiting miscibility gap provide distinctive setting in interfacial fluid mechanics as the density contrast, surface tension and bulk transport properties evolve together as a function of the thermodynamic state of the system. Naturally, such fluid pairs find applications in numerous avenues of industrial relevance such as flow pattern tuning, liquid-liquid mass transfer, extraction and preservation of bio-proteins, targeted drug delivery to name a few. In addition, binary fluid pairs have also been studied in the context of space applications [1]. Notably, the thermodynamic state of the system which governs the degree of miscibility between the two fluids is controlled through an external stimulus. This stimulus can either be the temperature, concentration or the pH of the system. Typically, a critical value of the stimulus (temperature in our case) is obtained beyond which the two fluids are completely miscible. Further, the interaction between the surface tension and the local value of the temperature accentuates the complexity of the phenomenon. Therefore, it is imperative to thoroughly investigate the flow dynamics to aid in efficient utilization of such fluid pairs. To this end, we proposed a novel phase-field approach that not only tracks the continuous evolution of binary fluids from an initially immiscible state to completely miscible state but also allows one to model the thermodynamically stable partially miscible states. Subsequently, the proposed model is employed to investigate the fundamental hydrodynamic instabilities namely the Rayleigh-Taylor (RT) instability and the Kelvin-Helmholtz (KH) instability through linear and non-linear routes.

Methodology

The phase-field method originates from the argument that the interface between two fluids comprises of a thin transition zone entailing a rapid but smooth property variation. Van der Waals [2] and Rayleigh [3] built upon this argument to establish gradient theories to model the interface using a color function that segregates the phases involved. Subsequently, Cahn and Hilliard [4] introduced the so-called phase-field method which provides a thermodynamic description for the interfacial thickness and models the binary fluids system within one-fluid formulation. Extending the classical Ginzburg-Landau description of a two-phase system, we proposed the incorporation of a tunable miscibility framework into the definition of the bulk free energy. This is accomplished by defining a miscibility parameter that characterizes the proximity of the system to the consolute point of the stimulus which governs the miscibility [5]. The miscibility parameter (r) is defined in such a way that it changes its sign as the system crosses the consolute temperature so that one could naturally achieve a transformation of the double well potential form of bulk free energy into a single well form, wherein the latter results in complete miscibility. The revised bulk free energy (f_0) can be writtten as :

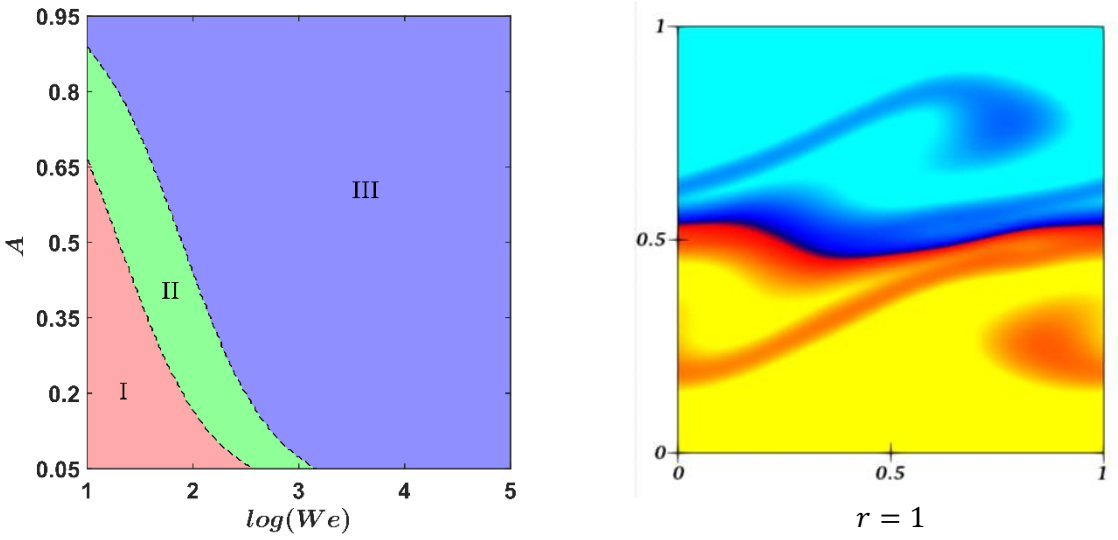
$$f_0(c) = \frac{\Lambda}{\epsilon^2}\left(\frac{1}{4}|r|^a c^4 - \frac{1}{2} r c^2\right) \text{ ; with } r = f\left(\frac{T_c - T}{T_c}\right)$$

Where c is the order parameter, a is an empirical constant, ϵ is the interfacial thickness and Λ is the mixing energy density.

Results

We begin our investigation from the Rayleigh-Taylor (RT) instability which refers to the spatio-temporal evolution of the fluid interface between the unstably stratified fluids subjected to an external acceleration, typically gravity. First, the governing equations were linearized to analytically obtain the dispersion relation in terms of the miscibility parameter. The dual rôle of miscibility in modifying the surface tension as well as the density contrast resulted in identification of three distinct zones of perturbation growth with qualitatively different behavior (see fig. 1(a)). We followed the linear analysis

with non-linear numerical simulations performed on the modified open-source solver phaseFieldFOAM (under the umbrella of OpenFOAM). The results from the numerical simulations corroborated the findings from the linear analysis with the maximum relative error of around 2.1%, thereby establishing the overall accuracy of our numerical solver. The late time dynamics of the RT instability revealed a miscibility dependent emanation of the Kelvin-Helmholtz (KH) rolls. Thus, we naturally followed up our analysis with dedicated investigation of the KH instability (see fig. 1(b)) to further understand the effect of miscibility. Our parameteric analysis revealed the competition between the diffusion based broadening of the interfacial region and the advection based thinning of the interface. Interestingly, for a window of parameters considered, we observed the dominance of diffusion based effects at early time stages as compared to the advection based thinning [6].



(a) (b)

Fig. 1 : Hydrodynamic instabilities in binary fluids with miscbility gap : (a) RT instability (here A is Atwood number and We is the Weber number) and (b) Phase-field parameter contour for Kelvin-Helmholtz instability at $r = 1$ (immiscible state).

Perspectives

Having established the validity of the proposed model and investigated the effects of miscibility on well defined and widely studied fundamental hydrodynamic instabilties, one could potentially undertake the exercise to further study interesting problems such as migration of miscible liquid droplets, crystal formation which may involve oscillatory convection.

References

[1] S. Ancherback, V. Yasnou, A. Mialdun and V. Shevtsova, 'Coexistence curve, density and viscosity for the binary system of Perfluorohexane + silicone oil', J. Chem. Eng. Data, 63, 3008-3017, 2018

[2] J. D. van der Waals, "'Translation of J. D. van der Waals': 'The thermodynamik theory of capillarity under the hypothesis of a continuous variation of density'," J. Stat. Phys., vol. 20, pp. 197–200, 1979.

[3] L. Rayleigh, 'XX. on the theory of surface forces.— II . Compressible fluids', The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. 3, pp. 209–220, 1892.

[4] J. W. Cahn and J. E. Hilliard, 'Free energy of a non-uniform system. I. Interfacial free energy' , J. Chem. Phys., vol. 28, p. 258, 1958.

[5] A. Dubey, C. Habes, H. Marschall and S. Amiroudine, 'Rayleigh-Taylor instability in binary fluids with miscibility gap', Phys. Rev. Fluids, 10(8), 084004, 2025

[6] A. Dubey and S. Amiroudine, 'Kelvin-Helmholtz instability in binary fluids with miscibility gap', Phys. Fluids, 38, 012112, 2026

2.4 The ESA project Giant Fluctuations

H. Bataller, **F. Croccolo**

The ESA project Giant Fluctuations

Henri Bataller[1], Fabrizio Croccolo[1],

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

Introduction

Le projet international ESA **Giant Fluctuations** (précédemment NEUF-DIX), coordonné par F. Croccolo et A. Vailati (Università degli Studi di Milano), vise à étudier les fluctuations de non-équilibre en absence de gravité, qui sur Terre limite l'amplitude des fluctuations de plus grande taille, dites fluctuations géantes [1]. Le programme scientifique couvre six 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 de protéines. Notre implication porte à la fois sur la codirection du projet et sur la responsabilité directe de l'expérience 1). Le programme prévoit quatre vols initialement prévus sur l'ISS mais actuellement sans date prévue.

Méthode

Les fluctuations sont mesurées par shadowgraphie dynamique. Nous avons développé un algorithme dynamique différentiel qui fournit la fonction de structure des fluctuations de densité en fonction du temps de corrélation et du vecteur d'onde, à partir d'un traitement statistique des séries d'images. L'efficacité de ce calcul est devenue cruciale avec l'augmentation de la taille et du nombre des images des caméras modernes. Les systèmes étudiés étant ternaires, deux concentrations indépendantes doivent être déterminées : nous avons donc développé une version bi-chromatique de la technique, comprenant le cadre théorique d'analyse des fonctions de structure obtenues aux deux longueurs d'onde et un dispositif expérimental dédié, validé sur un mélange binaire en séparant les contributions des fluctuations thermiques et de concentration [2–4]. Enfin, la fonction de transfert des quatre shadowgraphes de l'instrument a été calibrée sur l'Engineering Model (EM) chez RedWire (Anvers, BE), à partir des fluctuations thermiques de non-équilibre d'une couche de toluène pur.

Résultats

L'année 2026 a été consacrée à la préparation opérationnelle du premier vol, même sans une date prévue. Une campagne de Ground Reference Test (GRT) s'est tenue au centre ESA-EUSOC (Madrid, ES) en janvier 2026 sur l'EM, dont les quatre cellules avaient été remplies par RedWire à l'été 2025. Elle a permis de tester les procédures qui seront utilisées en vol. Sur les quatre cellules, une présentait une grosse bulle ne permettant pas l'exploitation des données. Pour les autre l'analyse des données est actuellement en cours. Un exemple de fonction de structure à un vecteur d'onde fixée et a différents gradients de température est montré en Fig. 1.

Les données de calibration de la fonction de transfert ont confirmé la similarité des quatre instruments et la pertinence des choix techniques du constructeur ; la campagne de compatibilité chimique des échantillons des vols 2 à 5 a été terminé, mais un problème du setup nécessite la répétition du test, à prévoir fin 20205/début 2027. Nous avons participé à plusieurs réunions de pilotage du projet et à la coordination entre partenaires, y compris la réunion d'information ESA sur la situation de l'ISS (fin septembre 2026).

Au sol, les activités du LFCR sur les fluctuations de non-équilibre se sont poursuivies, dans la continuité de la Chaire industrielle CO2ES (clôturée en mars 2025) : nous avons notamment mis en évidence, par shadowgraphie, une stratification de non-équilibre dans le CO_2 supercritique soumis à un gradient de température [5]. Ce travail ouvre des perspectives pour des futures expériences en condition de

microgravité sur des fluides en condition supercritique et donc à haute pression. Une perspective sur le benchmark de thermodiffusion des mélanges ternaires est en préparation pour Eur. Phys. J. E.

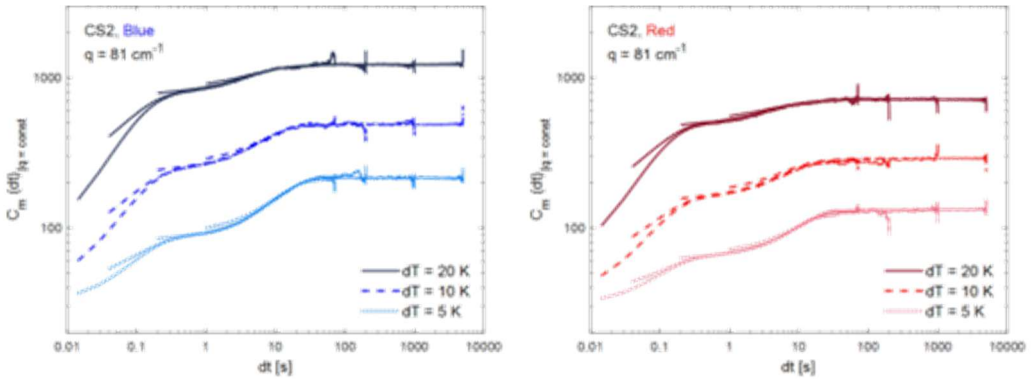


Fig. 1 : fonction de structure à un vecteur d'onde fixée et a différents gradients de température pour le mélange ternaire polystyrène-toluène-cyclohexane.

Perspectives

Les perspectives pour 2027 portent sur le premier vol vers l'ISS ou autre plateforme et l'exploitation des premières données de la campagne GRT. Il faudra surtout arriver à définir si l'instrument sera lancé sur l'ISS ou autre et à quelle date. Toute intervention du CNES à ce sujet sera un atout pour arriver au vol. Nous nous préparerons en tout cas pour l'analyse des premières données de vol, en particulier pour l'expérience 1), ainsi que les expériences de référence au sol menées en collaboration avec les équipes responsables des autres thématiques. La préparation des échantillons des vols suivants se poursuive pour l'instant en parallèle, comme si le calendrier était toujours le même.

Publications

[1] A. Vailati, *et al.*, Non-equilibrium stratification in supercritical CO2, *npj Microgravity* **9**, 1 (2023)

[2] S. Castellini, *et al.*, Dynamics of non-equilibrium concentration fluctuations during free-diffusion in highly-stratified solutions of glycerol and water, *J. Chem. Phys.* **158**, 244201 (2023)

[3] S. Castellini, *et al.*, Modeling and correction of image drift in dynamic shadowgraphy experiments, *Eur. Phys. J. E* **47**, 25 (2024)

[4] M. Carpineti, *et al.*, A Cartesian diver to study oscillations and internal gravity waves in a stratified fluid, *Eur. J. Phys.* **45**, 045803 (2024)

[5] P. Fruton, *et al.*, Non-equilibrium stratification in supercritical CO_2, *Nat. Commun.* **17**, 7855 (2026)

[6] A. Sanjuan, *et al.*, 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 Astronautica **236**, 627 (2025)

Remerciements : Les auteurs expriment leur gratitude au CNES pour son soutien financier via le GdR 2799 MFA.

2.5 Mesures interférométriques de coefficients de diffusion de solutions salines binaires
M. Hamon, C. Oko, F. Croccolo, B. Sobac, **H. Bataller**

Mesures interférométriques de coefficients de diffusion de solutions salines binaires

M. Hamon[1], C. Oko[1], F. Croccolo[1], B. Sobac[1], H. Bataller[1]

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

Introduction

L'an dernier nous avons présenté une étude expérimentale et numérique d'instabilités double-diffusives, lorsque deux solutions salines aqueuses étaient superposées dans une cellule de diffusion [1]. Nous introduisions deux solutions binaires de sels différents (NaCl et Na_2SO_4) dans une cellule en quartz rectangulaire. La cellule était positionnée dans un interféromètre de Mach-Zehnder monochromatique avec la solution la plus dense toujours placée en bas dans le champ de pesanteur. L'analyse des interférogrammes nous avait permis de révéler la nature des instabilités, mais aussi de mesurer et d'étudier la dynamique du profil vertical d'indice de réfraction le long de la colonne fluide ainsi stratifiée et évolutive. Dans la zone de mélange des deux solutions, la séparation des champs de concentrations n'était pas possible avec une mesure optique à une seule longueur d'onde. Avant de développer un montage optique doté de trois longueurs d'onde (pour étudier des mélanges ternaires ou des phénomènes couplés plus complexes), nous avons effectué des expériences de diffusion de solutions binaires de sels avec le même équipement, l'objectif étant d'exploiter la dynamique du profil de concentration 1D d'un mélange binaire et de déterminer le coefficient de diffusion du sel dans l'eau sur la plage de concentration imposée entre le bas et le haut de la cellule. Cette méthodologie a déjà été appliquée dans la littérature en géométrie 1D,[1] mais également en 2D sur des expériences d'évaporation de gouttes par des membres de notre équipe [2].[2]

Méthode

Des solutions de NaCl de différentes concentrations (C_m = 2.7 M avec ΔC = 0.25 M ou 2 M ; C_m = 1 M avec ΔC = 2 M) ont été superposées dans la cellule (hauteur 58 mm, largeur 17 mm et épaisseur intérieure 1 mm), suivant la procédure établie dans notre précédente étude [1]. L'analyse des interférogrammes a été améliorée par l'introduction d'un nouvel algorithme de déroulement spatial de la phase,[3] d'un déroulement temporel et d'une procédure de correction dans le temps de la référence de phase, permettant une meilleure stabilité des profils verticaux d'indice de réfraction, et un suivi plus long dans le temps, comme dans la littérature [2].[2] Au préalable, les facteurs de contraste optique nécessaires pour convertir les profils d'indice de réfraction en profils de concentration de NaCl ont été mesurés. Inspirée des travaux cités en introduction, une procédure permettant de déterminer les coefficients de diffusion du sel le long de la cellule a été implémentée. Celle-ci a été validée par comparaison aux prédictions théoriques de profils de concentration résultant d'une diffusion libre 1D.

Résultats

La phase de remplissage et l'arrivée de l'interface sont facilement observables sur les images. Lorsque l'interface se positionne au centre de la cellule, les pompes d'injection sont arrêtées et les vannes fermées (Fig. 1a correspondant à une expérience dans laquelle deux solutions de NaCl à 1.7 M et 3.7 M sont superposées ; soit une concentration moyenne de C_m = 2.7 M et une différence de concentration entre le bas et le haut de la cellule de ΔC = 2 M). Contrairement à ce qui est attendu pour un processus purement diffusif, le point d'inflexion du profil de concentration n'est jamais fixe. Il se déplace d'abord rapidement vers le haut, d'environ 0.3 mm en 50 s (Fig. 1b et 1c), de façon quasi identique pour toutes les expériences. S'ensuit une dynamique lente, dont l'évolution dépend de la concentration moyenne et de la différence de concentration imposée entre le bas et le haut de la cellule. Nous n'avons pas encore d'explication pour ces dynamiques ; celles-ci ne sont pas d'origine

---

[1] Rashidnia, N. *et al.*, *Experiments in Fluids* **36**, 619–626 (2004)

[2] Sobac, B. *et al.*, *Soft Matter,* **16** 8213, (2020)

[3] Herráez, M. A. *et al.*, *App. Opt.* **41**, 7437–7444 (2002)

diffusive et pourraient être dues à des mouvements advectifs résiduels liés à la différence de flottabilité entre les deux couches.

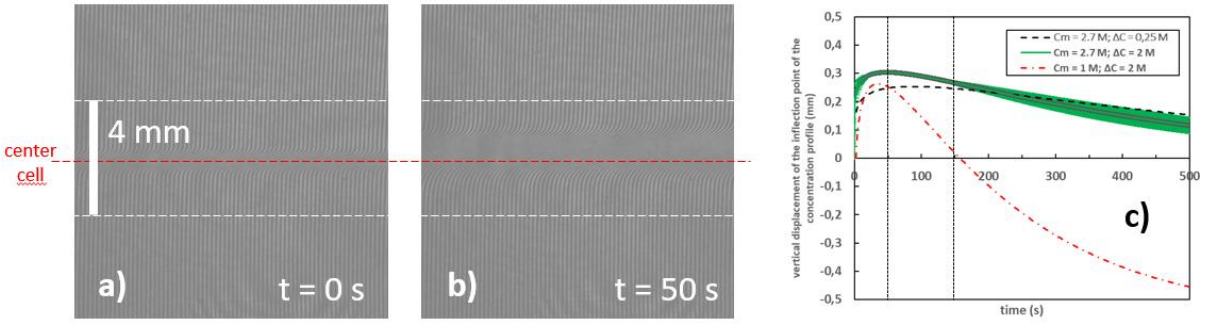


Fig. 1 : Interférogrammes obtenus a) à la fermeture des vannes et b) 50 s plus tard (expérience C_m = 2.7 M ; ΔC = 2 M). c) Déplacement vertical du point d'inflexion du profil de concentration pour trois expériences.

À la différence de notre précédente étude [1], qui portait sur des profils d'indice de réfraction, nous avons ici accès aux profils de concentration. La Fig. 2a montre l'évolution des profils verticaux de concentration entre 50 s et 150 s après la fermeture des vannes pour l'expérience C_m = 2.7 M, ΔC = 2 M : les profils s'élargissent progressivement de part et d'autre du point d'inflexion du profil, sous l'effet de la diffusion. Lorsque l'on applique la procédure de traitement permettant d'extraire des coefficients de diffusion à ces profils, enregistrés après la phase initiale de déplacement rapide de l'interface, les résultats obtenus sont cohérents avec la littérature (Fig. 2b). En raison de la procédure d'extraction des coefficients de diffusion, les valeurs au voisinage des bornes de l'intervalle de concentration imposé (associées aux plus faibles gradients de concentration) sont rejetées. Au centre de l'intervalle, les résultats sont les plus précis. Toutefois, la dynamique non diffusive observée aux temps courts réduit la fenêtre temporelle exploitable et limite ainsi la précision de la mesure.

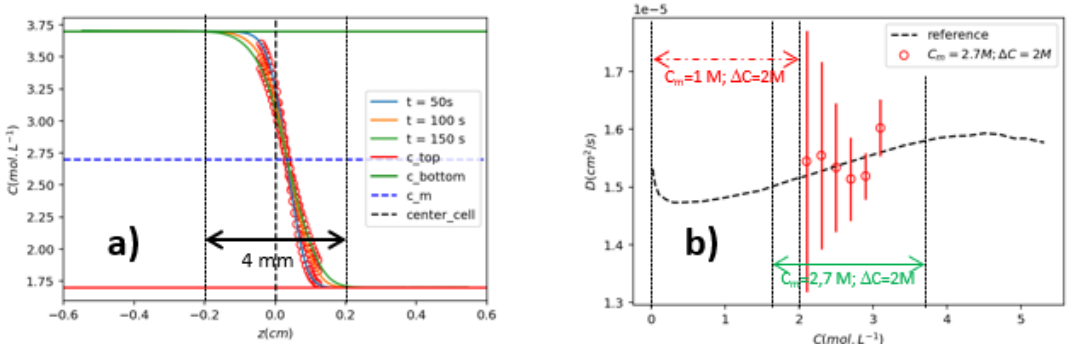


Fig. 2 : a) Profils verticaux de concentration de NaCl entre 50 s et 150 s après la fermeture des vannes (expérience C_m = 2.7 M ; ΔC = 2 M). b) Coefficient de diffusion de NaCl en fonction de la concentration obtenu pour la même expérience, comparé aux valeurs de référence.

Perspectives

Afin de limiter les perturbations advectives dans notre dispositif expérimental, nous prévoyons d'augmenter le degré de confinement en utilisant une cellule de diffusion plus fine ou des systèmes microfluidiques. Par ailleurs, en lien avec un autre projet en collaboration avec l'équipe « Fluides supercritiques » de l'ICMCB, des puces microfluidiques haute pression sont en cours de fabrication, dans lesquelles des expériences de diffusion libre de sels pourront être menées. Ces puces seront installées sur un nouvel interféromètre à trois longueurs d'onde.

Publications

[1] C.O. Oko, B. Šeta, A. Mialdun, M.M. Bou-Ali, V. Shevtsova, A. Lassin, H. Bataller, Salinity-Driven Convection Mechanisms in Stratified Brines, *Chemical Engineering Science,* 324, 123224 (2026).

[2] Milark O., Salmon, J.-B., Sobac B., Confined drying of a binary liquid mixture droplet: A quantitative interferometric study under humidity control, *Physical Review Fluids,* 11, 033603 (2026).

2.6 Separating diffusion from gravity-driven convection in a quasi-one-dimensional electrochemical microfluidic platform
S. Agrawal, A. Saperstein, **F. Zoueshtiagh**, R. Narayanan, K. J. Ziegler

Separating diffusion from gravity-driven convection in a quasi-one-dimensional electrochemical microfluidic platform

S. Agrawal[1], A. Saperstein[1], F. Zoueshtiagh[2], R. Narayanan[1] and K. J. Ziegler[1]

[1] Department of Chemical Engineering, University of Florida, Gainesville, FL, USA

[2] Université de Lille, CNRS, UPHF, Centrale Lille, UMR 8520 – IEMN, Lille, France

Introduction

Electrodeposition couples ionic transport, electrochemical reactions and interface motion. A particular difficulty is buoyancy-driven convection: ionic depletion and enrichment create density gradients which, under gravitational acceleration, may induce fluid motion when the concentration stratification is unstable. Such flows alter mass transfer and obscure comparisons with diffusion-based models. Sharp electrode edges add a separate complication by concentrating the electric field and promoting out-of-plane growth. Here we report a microfluidic electrochemical cell designed to suppress these two sources of uncertainty and permit in situ measurements of quasi-one-dimensional (quasi-1D) interfacial dynamics [1].

Methods

Two facing, thin-film copper electrodes are patterned on glass and separated by a micrometric electrolyte channel. Electrostatic COMSOL simulations guide the design of a dielectric overhang that covers the electrode top surfaces and shields their edges. The stack consists of a 100 nm tungsten adhesion layer, 1 µm copper, 10 nm pinhole-free alumina and 500 nm low-stress silicon nitride. Selective wet etching recesses both metals beneath the dielectric; critical-point drying preserves the suspended overhang (Fig. 1).

Cells are filled with 50 mM $CuSO_4$ and monitored by reflection optical microscopy while a potentiostat controls electrode potential. Image subtraction tracks anodic dissolution and cathodic growth. Importantly, the cells were carefully levelled in a horizontal plane, with the electrode plane perpendicular to gravity, specifically to minimize solutal buoyancy convection that a vertical offset between the electrodes could promote.

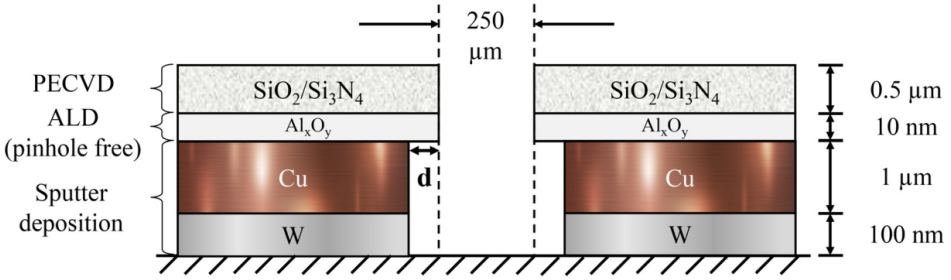


Fig. 1 – Cross-sectional concept of the metal/dielectric stack and the protective overhang (adapted from Fig. 4 in [1]).

Results

A 1 µm overhang already reduces the peak electric field by more than 70%. Above 15 µm, the maximum deviation of the field from the electrode normal falls below 5°. Combining electrostatic and mechanical constraints identifies 16–30 µm as a practical design range: longer cantilevers risk deflection and channel blockage (Fig. 2).

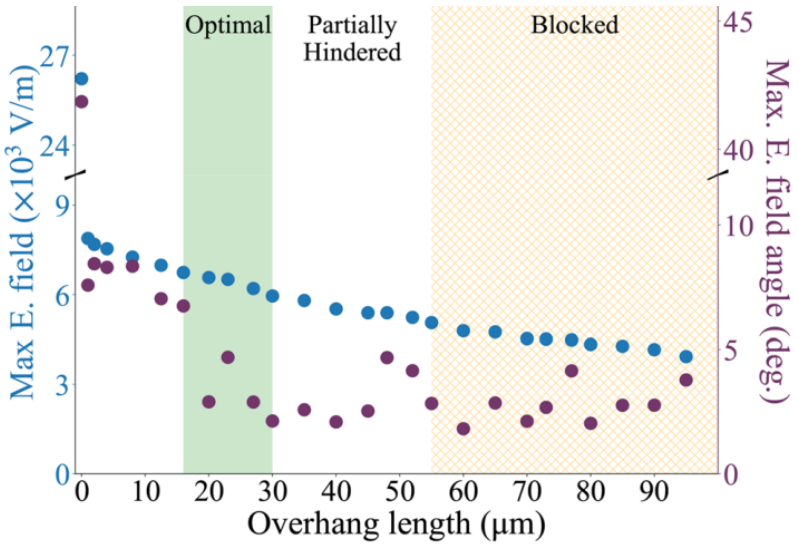


Fig. 2 – Maximum electric field and field angle versus dielectric-overhang length; green indicates the operating optimum (Fig. 3 in [1]).

Solutal buoyancy and gravity. Ion concentration gradients generate density differences (ρ_1 and ρ_2 near the anode and cathode). A slight tilt θ introduces a vertical height difference H = L sinθ over an electrode separation L. With solutal expansion $\beta_s = -(1/\rho_0)(\partial\rho/\partial C)$, the relevant Rayleigh number is $\mathbf{Ra_s = \beta_s(C_1 - C_2)gH^3/(\nu D)}$, where $\nu = \mu/\rho_0$. Its magnitude can be written $\mathbf{|Ra_s| = |\rho_1 - \rho_2|g(L\ \sin\theta)^3/(\mu D)}$. Thus, buoyancy depends linearly on gravitational acceleration g but cubically on the tilt-induced height H. The horizontal experimental orientation ($\theta \approx 0$) minimized this mechanism. In the tested conditions, $|Ra_s| \ll 1$, while front speeds below 70 nm s^{-1} yield $Re \approx 10^{-6}$, consistent with diffusion-dominated transport. Gravity variation and deliberate tilting were not studied here.

The images capture the transition from small interfacial protrusions to waves and dendrite-like deposits. Quantitative image differencing also shows why the overhang matters: without shielding, the apparent anode–cathode mass-balance discrepancy reaches about 98.5%, because much of the deposited copper grows outside the observation plane. With the overhang, this discrepancy falls to 22% on average (±16%), consistent with the optical measurement uncertainty and predominantly quasi-1D material transfer (Fig. 3).

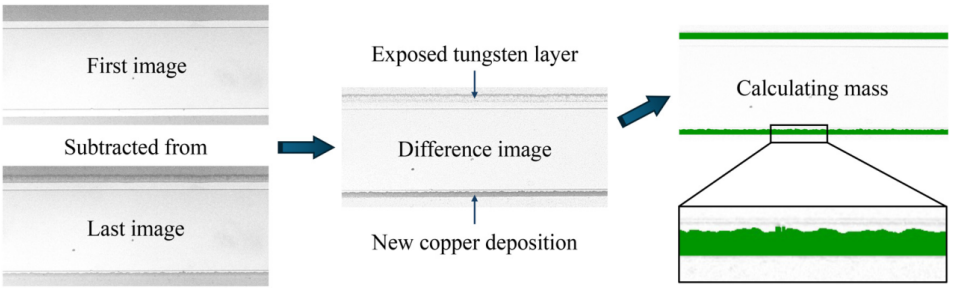


Fig. 3 – Differential imaging and comparison of anodic copper loss with cathodic deposition (Fig. 9 in [1]).

Outlook

The platform enables controlled studies of interfacial growth instabilities and transport–reaction coupling. Future experiments could deliberately tilt the cell or vary gravitational acceleration to investigate how solutal convection emerges as the buoyancy-to-diffusion ratio increases, including under microgravity or enhanced gravity. These are proposed extensions, not results of [1]. The modular design also accommodates other electrochemical systems and imaging methods.

Publication

[1] S. Agrawal, A. Saperstein, F. Zoueshtiagh, R. Narayanan and K. J. Ziegler, “A versatile microfluidic electrochemical platform for diffusion-controlled, quasi-one-dimensional interfacial studies”, Lab on a Chip (2026), https://doi.org/10.1039/D6LC00427J.

2.7 Vol de papillons en pesanteur modifiÃ®ée : cinématique 3D et aérodynamique
F. Schweitzer, A. Gayout, T. Engels, **M. Bourgoin**, N. Plihon

Vol de papillons en pesanteur modifiée : cinématique 3D et aérodynamique

François Schweitzer[1], Ariane Gayout[2], Thomas Engels[3], Mickaël Bourgoin[1], Nicolas Plihon[1]

[1] Univ Lyon, ENS de Lyon, CNRS, Laboratoire de Physique, F-69342 Lyon, France
[2] Groningen Institute for Evolutionary Life Sciences, University of Groningen, Groningen, Netherlands
[3]Institut des Sciences du Mouvement, CNRS et AMU, Marseille, France

Introduction

Le vol battu des insectes est un modèle de locomotion animale et une source d'inspiration pour les systèmes aériens bio-inspirés, mais l'influence de la pesanteur sur ses stratégies reste mal comprise, notamment en vol libre. Le projet PHOeBUS (*Flight Observation of Butterflies Under Space-like gravity*), soutenu par le CNES, étudie comment des papillons néotropicaux adaptent leur trajectoire, la cinématique de leurs ailes et leur production de forces aérodynamiques en micropesanteur (0 g) et en hyperpesanteur (1,8 g) lors de vols paraboliques. L'année 2026 a été consacrée à l'exploitation complète des campagnes CNES 68 (avril 2025) et 69 (septembre-octobre 2025) et à l'établissement d'un bilan aérodynamique quantitatif. Ces travaux forment le cœur de la thèse de François Schweitzer [1], dont la soutenance est prévue le 5 novembre 2026.

Méthode

Dispositif. L'enceinte de vol (cube de 60 cm bordé de panneaux LED, essuie-glaces motorisés déclenchant le vol à la demande) est observée par neuf caméras événementielles Prophesee EVK4-HD synchronisées, le tout intégré dans trois racks qualifiés à bord de l'Airbus A310 ZERO-G (Fig. 1, gauche) ; depuis la seconde campagne, un incubateur maintient les papillons au-dessus de 25 °C entre les séries de paraboles. Chaque campagne comprend trois vols de 31 paraboles, dont les phases à 1 g, 1,8 g et 0 g sont enregistrées en continu. Deux espèces sont étudiées : *Heliconius charithonia*, au motif alaire contrasté, et *Greta oto*, aux ailes transparentes.

Reconstruction. Les événements sont accumulés en pseudo-images de 1 ms, les points anatomiques détectés par apprentissage (DeepLabCut) puis reconstruits en 3D par géométrie multi-vues. On en extrait la trajectoire du centre de masse, l'attitude du corps et, pour chaque aile supposée rigide, les angles de position φ, de rotation α et d'élévation θ, battement par battement (Fig. 1, centre). Le jeu de données comprend pour *H. charithonia* 154 séquences et 2683 battements à bord (68 à 0 g, 59 à 1 g, 27 à 1,8 g ; dix individus) plus 53 séquences au laboratoire, et pour *G. oto* 111 séquences et 912 battements (comparaisons par modèles linéaires à effets mixtes).

Aérodynamique. Les forces aérodynamiques, non mesurables directement en vol libre, sont estimées pour *H. charithonia* par un modèle quasi-stationnaire (QSM) de type éléments de pale : chaque aile rigide est découpée en tranches le long de l'envergure, et la force instantanée sur chaque tranche s'exprime, à partir de sa vitesse et de son angle d'attaque locaux, par des termes de portance et traînée translationnelles, de circulation rotationnelle et de masse ajoutée pondérés par des coefficients empiriques. Ces 18 paramètres (14 coefficients de force, 4 bras de levier effectifs) ont été identifiés en ajustant forces et puissance du modèle à celles de simulations numériques directes (code adaptatif WABBIT, T. Engels) de six séquences mesurées, deux par niveau de pesanteur (Fig. 1, droite). Validé sur trois vols indépendants, le modèle est ensuite appliqué à faible coût à l'ensemble des battements pour en déduire forces, moments et puissance.

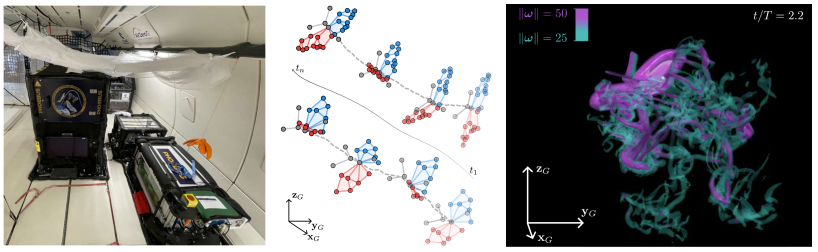


Fig. 1 : Plateforme à bord de l'Airbus A310 ZERO-G (gauche) ; reconstruction 3D des points anatomiques du corps (gris) et des ailes (rouge, bleu) le long d'une trajectoire de *H. charithonia* (centre) ; structures tourbillonnaires (iso-surfaces de vorticité) simulées par CFD à partir de la cinématique mesurée (droite).

Résultats

Référence à 1 g. Les vols à 1 g au laboratoire et à bord ne sont pas équivalents (posture, excursions des ailes, orientation des forces), sans qu'un paramètre unique (densité de l'air, accélérations résiduelles, environnement visuel) ne l'explique ; le 1 g à bord sert donc de référence interne.

Dynamique du corps. Quand la charge gravitationnelle augmente, le vol de *H. charithonia* devient plus lent et plus contraint : vitesse moyenne de 1,02 m/s (0 g) à 0,63 (1 g) et 0,57 m/s (1,8 g), rayon de courbure médian de 8,1 cm à 2,7 puis 1,6 cm, à accélération centripète quasi constante (12–13 m/s²) ; le tangage (nez relevé) passe de 7° à 44° puis 54°.

Cinématique des ailes. La pesanteur agit d'abord sur l'amplitude et la vitesse du mouvement des ailes, bien plus que sur son organisation temporelle (Fig. 2) : Δφ croît de 87° (0 g) à 105° (1 g) et 126° (1,8 g), Δα de 91° à 103° puis 113°, avec des vitesses angulaires plus élevées en hyperpesanteur, alors que la fréquence de battement reste stable (12,5, 12,0 et 11,9 Hz), de même que la partition descente/remontée et le déphasage rotation–position.

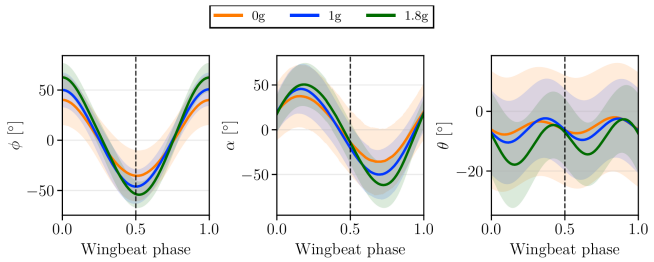


Fig. 2 : Angles de position φ, de rotation α et d'élévation θ de l'aile de *H. charithonia*, moyennés en phase sur un cycle de battement à 0 g, 1 g et 1,8 g (bandes : ± un écart-type).

Forces et puissance. Grace à la qualité des données cinématiques acquises à 0g, 1g et 1.8g, un modèle quasi-statique a été calibré à l'aide de simulations numériques haute-performances utilisant les données expérimentales comme paramètres d'entrée. Ces simulations ont été effectuées en collaboration avec Thomas Engels (Institut des Sciences du Mouvement, Marseille). Le modèle quasi-statique permet d'interpréter dynamiquement les observations. Le modèle quasi-stationnaire calibré révèle une réponse asymétrique (Fig. 3, gauche). À 0 g, la force verticale moyenne s'effondre ($F_z/mg_0 \approx 0{,}07$ contre 0,68 à 1 g) alors que la force totale ne baisse que de 15 % et la puissance aérodynamique positive de 25 % (21,5 contre 25,4 W/kg) : l'effort est réorienté vers la translation et les manœuvres (relâchement de contrainte). À 1,8 g, la force verticale augmente de 59 % ($\approx 1{,}13\ mg_0$) et la puissance de 50 % (35,0 W/kg), principalement par amplification de la descente de l'aile, tandis que l'angle d'attaque moyen et les coefficients C_L et C_D restent proches de leurs valeurs à 1 g : la compensation de charge s'obtient en intensifiant le mouvement, non en changeant de mécanisme aérodynamique, et à un coût croissant puisque la force totale par unité de puissance décroît de 1,41 (0 g) à 1,16 (1 g) et 0,92 N/W (1,8 g).

Comparaison inter-espèces. *G. oto* partage le noyau de réponses de *H. charithonia* (Fig. 3, droite) : vitesse et rayon de courbure décroissants, Δφ, Δα et vitesses angulaires croissants avec la pesanteur ; accélération, élévation et fréquence répondent de façon propre à chaque espèce. La pesanteur n'impose donc pas un programme cinématique unique : elle module l'intensité et l'orientation de l'action des ailes sans réorganiser le cycle de battement.

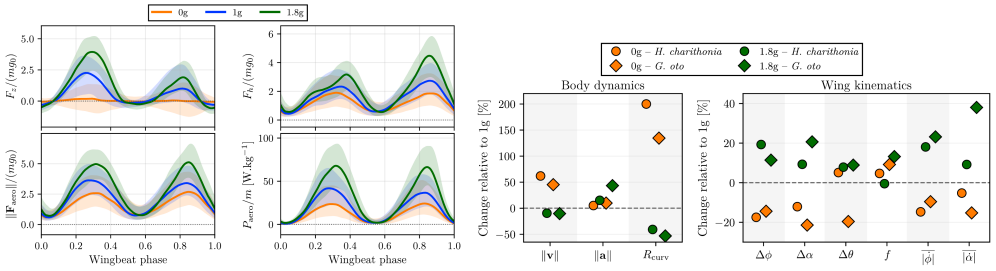


Fig. 3 : Gauche : force verticale F_z, force horizontale F_h, force totale et puissance aérodynamique massique au cours du cycle à 0 g, 1 g et 1,8 g (*H. charithonia* ; forces normalisées par le poids terrestre). Droite : variations relatives à la référence 1 g des grandeurs de corps et d'aile pour *H. charithonia* (ronds) et *G. oto* (losanges).

Perspectives

Une nouvelle thèse (Camille Planchon, cofinancée CNES / DGA AID) démarre à la rentrée 2026 selon trois axes : (i) reconstruire en 3D la déformation des ailes puis l'injecter dans la CFD, qui sous-estime d'environ 40 % la force verticale avec des ailes rigides ; (ii) mesurer l'écoulement généré par le battement, d'abord par PIV sur papillon fixe puis en vol libre avec les techniques événementielles de suivi de particules et de stéréo-PIV du laboratoire [3] ; (iii) élargir la gamme de pesanteurs et d'espèces, avec une proposition déposée pour la campagne ESA « Lunar Gravity » du printemps 2027 (0,16 g) et un contrôle thermique amélioré de l'enceinte

Publications

[1] F. Schweitzer, *Le vol des papillons en conditions de pesanteur modifiée : cinématique tridimensionnelle et aérodynamique*, Thèse de doctorat, ENS de Lyon, dir. N. Plihon et M. Bourgoin (soutenance le 5 novembre 2026).
[2] F. Schweitzer *et al.*, Butterfly flight aerodynamics in altered gravity: results from parabolic flights, *Eur. Fluid Dyn. Conf. 2*, Dublin, 2025 (oral) ; *GDR MFA 2025*, La Rochelle (oral) ; *JJC CNES 2025*, Toulouse (poster).
[3] S. Bera, D. Bao, F. Schweitzer *et al.*, Experimental characterization of quadrotor flow topology near the ground using event-based Stereo-PIV, *AIAA SCITECH 2026 Forum* (2026), doi:10.2514/6.2026-2108.

2.8 Ondes gelées en micropesanteur : premiers résultats de l'expérience FROWG
B. Corrège, **S. Fauve**, F. Pétrélis, M. Caelen, M. Berhanu, G. Michel, B.-J. Gréa, A. Castillo-Castellanos

Ondes gelées en micropesanteur : premiers résultats de l'expérience FROWG

B. Corrège[1], S. Fauve[1], F. Pétrélis[1], M. Caelen[1], M. Berhanu[2], G. Michel[3], B.-J. Gréa[4], A. Castillo-Castellanos[5]

[1] Laboratoire de Physique de l'ENS, Université Paris Sciences et Lettres, CNRS UMR 8023
[2] Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, Université Paris Cité, CNRS UMR 7057
[3] Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université, CNRS UMR 7190
[4] Laboratoire Matière en Conditions Extrêmes, CEA
[5] Centre Borelli, ENS Paris-Saclay

Introduction

Une interface liquide-liquide soumise à des vibrations rapides et parallèles à celle-ci peut développer une déformation stationnaire dans le référentiel oscillant : une « onde gelée » (*frozen wave*). Cette instabilité résulte du cisaillement oscillant entre les deux fluides, par un mécanisme analogue à celui de Kelvin–Helmholtz. Cet état constitue un exemple de vibroéquilibre : un état moyen stabilisé dynamiquement par le forçage oscillant [1].

En micropesanteur, la tension de surface devient le principal mécanisme de rappel, ce qui modifie fortement la dynamique et la sélection de structures interfaciales. Les prédictions établies en présence de gravité ne se transposent donc pas directement. L'expérience FROWG (*FROzen Waves Without Gravity*) vise à étudier l'apparition, la croissance et l'évolution de ces motifs interfaciaux. Elle explore un régime fortement non linéaire, complémentaire des études menées à forte inertie [2], avec un intérêt particulier pour les effets de la viscosité [3] et de la fréquence d'excitation.

Méthode

Le dispositif consiste en une cuve transparente et allongée, de 25 cm de longueur, contenant deux liquides non miscibles. Montée sur un rail, elle est entraînée horizontalement par un excitateur électrodynamique, qui impose une vibration de fréquence et d'amplitude contrôlées, parallèlement à l'interface au repos. Le couple de fluides principalement étudié est constitué d'une huile silicone peu visqueuse (2cSt et 20cSt) et d'une solution aqueuse dense de LST (Lithium hétéropolytungstates), présentant un contraste important de masse volumique. Les essais couvrent différentes fréquences et amplitudes de forçage. Deux caméras rapides permettent d'observer les déformations interfaciales et de suivre leur évolution temporelle. Les séquences acquises pendant les phases de micropesanteur, d'une durée d'environ vingt secondes, sont comparées aux observations à 1 g dans des conditions de forçage identiques. Les campagnes CNES VP190 et VP194 (mars puis octobre 2026) permettent de documenter la formation des motifs et leur évolution au cours d'une parabole. L'analyse des images donne accès aux longueurs d'onde, aux amplitudes et, dans la phase initiale, aux taux de croissance de l'instabilité.

Résultats

Les premières observations confirment la formation d'ondes gelées à l'interface LST–huile silicone pendant les phases de micropesanteur. À forçage comparable, la réponse de l'interface diffère nettement de celle obtenue au sol. En effet, en l'absence de gravité, l'amplitude de la déformation devient comparable à la taille de la cuve, conduisant ensuite à la formation de colonnes de fluide.

La séquence de la figure 1, enregistrée lors de la campagne VP194, montre différentes étapes de cette dynamique. Partant d'une interface presque plane, une déformation de faible amplitude apparaît, puis croît et se réorganise. Cette évolution s'accompagne d'une croissance de la longueur d'onde du motif.

Les colonnes observées peuvent être interprétées comme des configurations de vibroéquilibre, dans lesquelles l'action moyenne du forçage rapide contribue à stabiliser une répartition des fluides qui ne serait pas un équilibre statique ordinaire. Leur stabilité et les mécanismes de saturation restent toutefois à caractériser quantitativement.

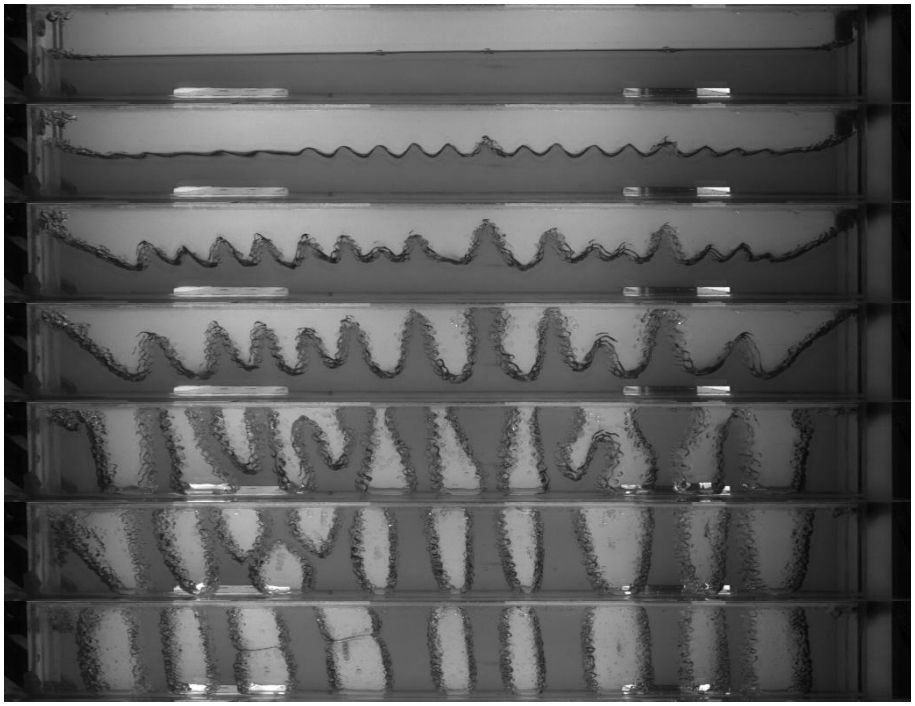


Fig. 1 : Évolution de l'interface LST–huile silicone lors d'une phase de micropesanteur (campagne CNES VP194). On observe la formation de colonnes normales à la direction de vibration.

Perspectives

L'objectif est désormais de construire un diagramme de stabilité en fonction de la fréquence et de l'amplitude des vibrations, puis de caractériser plus précisément les taux de croissance et la sélection des longueurs d'onde. L'évolution vers des colonnes soulève en particulier la question du rôle respectif de la capillarité, du confinement, du mouillage aux parois et des interactions non linéaires entre les structures. De nouvelles géométries de cuve et des excitations modulées permettront de tester la robustesse des configurations formées. Enfin, une confrontation aux simulations numériques directes doit permettre de mieux comprendre l'établissement et la stabilité de ces équilibres vibratoires en micropesanteur.

Références

[1] G. H. Wolf, « The dynamic stabilization of the Rayleigh–Taylor instability and the corresponding dynamic equilibrium », Zeitschrift für Physik 227, 291–300 (1969).
[2] B.-J. Gréa et al., « Frozen waves in the inertial regime », Journal of Fluid Mechanics 1021, A12 (2025).
[3] E. Talib, S. V. Jalikop et A. Juel, « The influence of viscosity on the frozen wave instability: Theory and experiment », Journal of Fluid Mechanics 584, 45–68 (2007).

2.9 Size and morphology of fluid parcels produced by a coaxial atomizer
P. Schleuniger, S.K. Sahoo, F. Thiesset, **N. Machicoane**

Size and morphology of fluid parcels produced by a coaxial atomizer

P. Schleuniger[1], S.K. Sahoo[2], F. Thiesset[3], N. Machicoane[1]

[1] Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels, Université Grenoble Alpes, CNRS
[2] Department of Mechanical and Industrial Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee, India
[3] Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie, Université et INSA Rouen, CNRS

Introduction

Sprays are encountered in numerous natural and industrial situations. Among the spray formation methods, coaxial two-fluid atomization provides fine sprays and is typically used, for instance, in propulsion applications. This technique consists of destabilizing a liquid jet with a high-speed gas jet, leading to its breakup into small droplets. A canonical atomizer, depicted in Figure 1, 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 [Sahoo & Machicoane, 2026]. Liquid structures detached from the liquid core, denoted as fluid parcels, constitute the missing step between the liquid jet destabilization and the droplet distribution in the far field. These parcels undergo a breakup cascade, leading to the final spray. It is therefore of great interest to study the morphology of such fluid parcels to have a better understanding of the mechanisms leading to the formation of the spray.

Method

The method lies in the image analysis of backlit spray images captured by a high-resolution camera, focused on the primary breakup region, where the liquid jet fragments into liquid parcels. A wide range of regimes is investigated, including multiple gas Weber numbers, liquid Reynolds numbers, and dynamic pressure ratios M. Two morphological parameters are used to describe the fluid parcel's shape, namely the sphericity Sp and the ellipticity ϵ. We used the representation of fluid parcels' shape within a morphological parameter space, which allows classifying the nature of the fluid parcel (ligament, ovoid, spherical droplet). Depending on its nature, the fluid parcel will belong to a different region of the morphological space, as depicted in Figure 2.

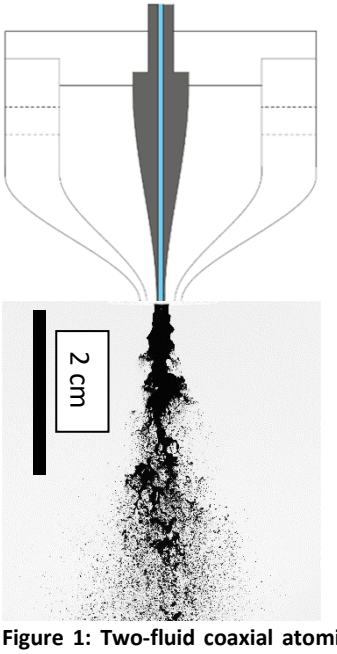


Figure 1: Two-fluid coaxial atomizer with a backlit spray image of the near field

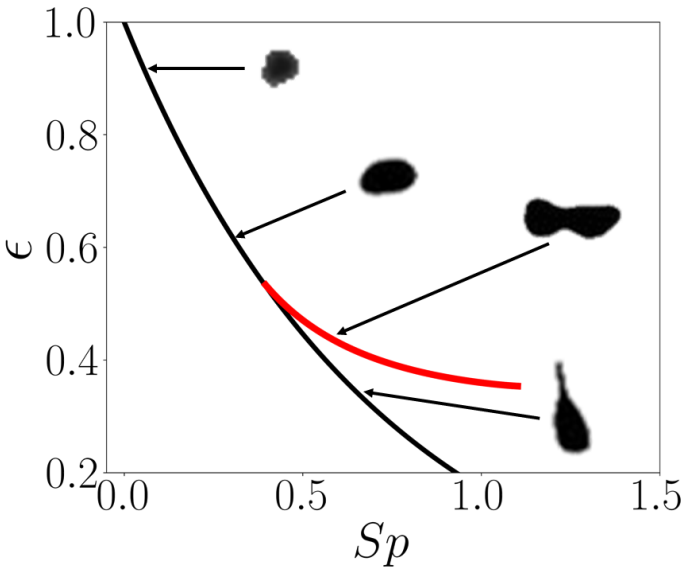


Figure 2: Fluid parcel classification within the morphological parameter space

Results

Results revealed that the proportion of small droplets, both in terms of number and volume of the spray, increases with the gas Weber number and *M*. Increasing the liquid Reynolds number tends to produce larger fluid parcels. The representation of fluid parcels in the shape parameter space (*Sp*, ϵ) revealed that increasing the Weber number allowed the deformation of fluid parcels with smaller equivalent diameter. This led us to define a Weber number associated with the fluid parcel size We_d, assuming a slip velocity equal to the gas bulk velocity, as liquid parcels have not yet significantly accelerated in the near field. Figure 3 represents the average ellipticity for a given class of sphericity. We observe that all curves sharing the same value of We_d collapse, indicating that fluid parcels sharing the same We_d have similar shapes regardless of the exit gas Weber number or liquid Reynolds number. This confirms that We_d is the physical parameter governing the shape of the fluid parcel.

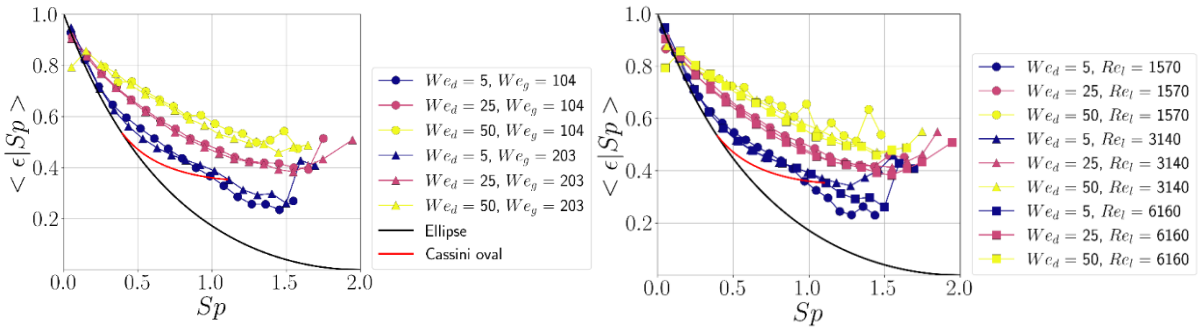


Figure 3: Average ellipticity ϵ for a given sphericity *Sp* for a constant liquid Reynolds number $Re_l = 6100$ (left) and a constant exit gas Weber number $We_g = 200$ (right). The legend indicates the local gas Weber number We_d, based on the liquid parcel size.

Perspectives

The present study sheds light on the effect of the Weber number and liquid Reynolds numbers on the fluid parcels' shape and size distributions. It shows that, independently of operating conditions, the morphology of the liquid parcel can be solely determined by a local gas Weber number defined on its size and the exit gas velocity (acting as a proxy for the slip velocity in the near field). This work is being finalized to be submitted to *Physical Review Fluids* [Schleuniger et al., 2026]. 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, flapping, and fluid parcel breakup). The analysis tools presented in this study, as well as tools developed for previous works, e.g., on the liquid core dynamics, could all be implemented to analyze in detail the data collected during parabolic flight. This image-based sizing method is both more practical than laser interferometry for parabolic flights and gives access to both the size and the morphology of liquid parcels, while non-spherical droplets are typically discarded when using interferometry.

Publications

S.K. Sahoo, N. Machicoane, “Two-phase flow turbulence in swirling sprays from a coaxial atomizer”, *Acta Mech*, (2026)

P. Schleuniger, F. Thiesset, N. Machicoane, “Morphological description of fluid parcels produced by a liquid jet fragmented by a coaxial gas jet” (in progress)

2.10 Recours à la convection thermogravitationnelle pour le dessalement de l'eau de mer
A. Elyazidi, A. Bergeon, S. Aniss, P. Costeseque, A. Mojtabi

Recours à la convection thermogravitationnelle pour le dessalement de l'eau de mer

A. Elyazidi[1,2], A. Bergeon[1], S. Aniss[2], P. Costeseque, A. Mojtabi[1]

[1] Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, UMR 5502, CNRS, Université de Toulouse

[2]Laboratoire de Mécanique et physique des hautes énergies, Univ. Hassan2 de Casablanca

Nos travaux sont menés dans le cadre des échanges internationaux qui ont lieu tous les deux ans lors des IMT (international Meeting on Thermal Diffusion). Le dernier, IMT16, a eu lieu à Milan en Italie du 9 au 13 juin 2025. Le prochain, IMT17, est prévu en 2027. Nos recherches sont dans la continuité de la collaboration initiée dans le cadre du Projet DCMIX qui a été soutenu par l'Agence spatiale européenne (ESA).
La recherche en cours fait suite à une partie des résultats obtenus lors de la thèse de M. SIOUD Khairi, soutenue en novembre 2022. On montre dans l'article [1] qu'il est possible de réaliser la séparation des espèces de façon continue dans une cavité remplie de fluide binaire.
Suite à cette étude, nous avons analysé la séparation des espèces de façon continue en milieu poreux [2]. Il ressort de ce travail qu'il est possible d'accéder à la mesure du coefficient de thermodiffusion du mélange binaire en milieu poreux en comparant les valeurs des gradients de fractions massiques, mesurées respectivement dans deux colonnes en milieu fluide et en milieu poreux saturé par le même fluide binaire. Des expériences seront menées par l'équipe du professeur Bou Ali Mounir, de l'Université de Mondragon, Espagne, pour vérifier la pertinence de cette procédure. J'ai également effectué un séjour d'une semaine, comme convenu, à l'Université de Mondragon avec l'équipe du professeur Shevtsova Valentina, Université Libre de Bruxelles, cette collaboration a donné lieu à l'article [3].

Une communication a été soumise au Congrès International de Mécanique qui aura lieu du 25 au 28 mai 2027 à Rabat Maroc.

M. El Yazidi, actuellement en troisième année de thèse, poursuit ses travaux sur le dessalement de l'eau de mer par le procédé de convection thermogravitationnelle. Son travail a donné lieu à une communication orale au IMT16, juin 2025 à Milan, Italie.
Un article a été soumis le 21 aout 2026 à l'International Communications in Heat and Mass Transfer journal.

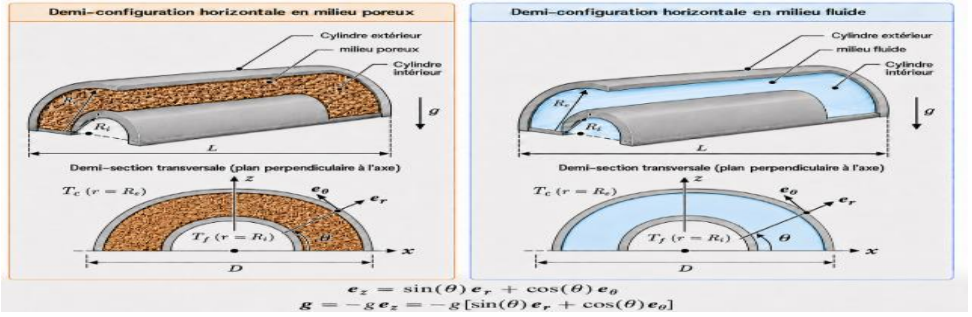
Travaux en cours :

Shuqi Xu et al. [4,5] ont utilisé la thermodiffusion pure pour le dessalement solaire de l'eau de mer. Ils ont utilisé un dispositif multicanal connu sous le nom de cascade de Bergers liquide (LBC). L'énergie électrique nécessaire pour le dessalement par ce procédé reste de l'ordre de moins de 1% de l'énergie nécessaire pour le dessalement quel que soit le procédé industriel utilisé (osmose inverse, l'électrodialyse…). D'autre part cette faible énergie peut être apportée par l'énergie solaire.

Tout récemment nous avons étudié la faisabilité du dessalement de l'eau de mer par le procédé de convection thermogravitationnelle, dans le cadre de la thèse de M. El Yazidi Ali. Ce dessalement peut être obtenu dans une cavité parallélépipédique inclinée d'un angle α par rapport à la verticale et soumise une densité de flux radiatif solaire uniforme imposée au niveau de sa paroi supérieure est refroidie au niveau de sa surface inférieure par une circulation forcée d'eau de mer.

Dans ce travail, nous avons choisi de réaliser une étude comparative du dessalement par séparation des espèces entre deux demi cavités annulaires coaxiale de faible épaisseur, en utilisant l'énergie solaire. L'une des cavités est poreuse saturée par l'eau de mer et l'autre est remplie uniquement d'eau de mer. L'objectif de cette étude est de quantifier l'importance du dessalement dans chacune des deux cavités.

Des simulations numérique (2D et 3D) ont été effectuées à l'aide de COMSOL Multiphysics sans aucune hypothèse restrictive. Une solution analytique, basée sur l'hypothèse de l'effet oublié a aussi été obtenue. Les résultats obtenus à partir de ces approches sont en bon accord pour ce qui est du champ de vitesse dans ces deux configurations. Nous avons montré qu'il est possible d'obtenir une séparation importante de l'eau de mer avec de faibles différences de température imposées aux deux parois. Les résultats analytiques obtenus, à partir d'hypothèses physiques sont en très bon accord avec les résultats de simulations numériques directes.
Une comparaison finale entre le dessalement obtenu par la thermodiffusion pure et la diffusion thermogravitationnelle, permet de déterminer la technique la plus appropriée pour optimiser la production de l'eau dessalée.



(fig.a) (fig.b)

Figure 1: Demi cavités annulaires cylindriques horizontales.

1- Sioud K., Mojtabi A. Charrier-Mojtabi M.C., Abdennadher A. and Bergeon A., Mixed convection in thermo-gravitational column : A continuous species separation, European Physical Journal E V. 48, I. 8-9, AUG 2025.
2- Mojtabi A., Sioud K., Charrier-Mojtabi M.C., Continuous species separation in an open ended porous thermogravitational column using mixed convection, Transport in Porous Media, V.152, I.8 JUL 2025.
3-Perez de Luco I.C., Errarte A., Arroiabe P.F., Mialdun A., Mojtabi A., Costeseque P., Shevtsova V., Bou-Ali M.M., Mass transport in LiBr-H2O solutions: coupling between diffusion, thermodiffusion, and composition, The Journal of Chemical Physics V.163, I., 21 July 2025.
4- Xu S.Q., Hutchinson A. J., Taher M., Corry B. and Torres J. F., Thermodiffusive desalination, Nature Communications, Article number 2996, MAY 2024.

5- Xu, S.Q. and Torres J.F., All-liquid thermal desalination and brine concentration via multichannel thermodiffusion, Nature Water 3(5) pp 617-631, May 2025,

2.11 Decay rates of non-equilibrium fluctuations in a ternary mixture : experimental insights from the Giant Fluctuations' Ground Reference Test
K. Papchenko, P. Fruton, F. Croccolo

Decay rates of non-equilibrium fluctuations in a ternary mixture: experimental insights from the Giant Fluctuations' Ground Reference Test

Kseniya Papchenko[1], *Paul Fruton*[1,2], *Fabrizio Croccolo*[1]

[1] Universite de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, LFCR UMR5150, Anglet, France
[2] Dipartimento di Fisica "A. Pontremoli", Università degli Studi di Milano, Milano, Italy

Introduction

Within the ESA project **Giant Fluctuations** (formerly NEUF-DIX), non-equilibrium fluctuations in complex liquids will be studied in the absence of gravity, which on Earth damps the fluctuations of largest size [1]. Ground Reference Tests (GRT) on the flight samples verify the nominal working of the instrument and provide the baseline for the interpretation of the data that will be collected in microgravity. A GRT campaign was performed in January 2026 at ESA-EUSOC (Madrid, ES) on the Engineering Model of the instrument. Here we report the results obtained on sample CS2, a dilute ternary mixture of polystyrene (PS, 5 kDa) in toluene and cyclohexane (2:39:59 wt%). In this system the Soret coefficients of the polymer and of the binary solvent have opposite signs [2,3]: when the mixture is heated from above, the polymer builds a stabilising density gradient and the solvent a destabilising one.

Method

A sample of thickness L = 1 mm, placed horizontally, was heated from above with ΔT = 5, 10 and 20 K at a mean temperature of 25 °C. Non-equilibrium fluctuations were measured by two-wavelength dynamic shadowgraphy, here analysed with the blue beam (λ = 405 nm). Image series acquired at 1, 5, 25 and 70 Hz were processed with a differential dynamic algorithm, and the resulting structure functions were concatenated to cover delay times from 14 ms to several thousand seconds. The intermediate scattering function was fitted with up to three exponential decays, and the static power spectra were obtained by correcting the amplitudes for the shadowgraph transfer function.

Results

Three relaxation modes are resolved simultaneously over four decades in time (Fig. 1a): a thermal mode, a fast solutal mode associated with the binary solvent and a slow solutal mode associated with the polymer. In the diffusive regime the decay times give $D_P = 2.42\times10^{-6}$ cm^2 s^{-1}, in agreement with the literature [3], and $D_S = 2.73\times10^{-5}$ cm^2 s^{-1}. The apparent thermal diffusivity, 1.56×10^{-3} cm^2 s^{-1}, is 1.7 times larger than expected: the thermal relaxation is at the limit of the present acquisition rate. The static spectra follow the $(\Delta T)^2$ scaling expected for non-equilibrium fluctuations at large wave numbers, and the roll-off of the solutal spectrum scales as $(\Delta T)^{1/4}$. The static roll-off yields a Soret coefficient of the polymer $S_{T,P} \approx 3.4\times10^{-2}$ K^{-1}, independent of ΔT within 8%, whereas the roll-off obtained from the decay times depends on ΔT.

At small wave numbers the decay rates cannot be described by independent modes. Below $q \approx 100$ cm^{-1} the solvent mode merges with the polymer one, as expected for a double-diffusive coupling of the two solutal modes [2]. The polymer decay time is equal approximately to 10 s at q = 25 cm^{-1}, with no apparent dependence on ΔT; it is almost two orders of magnitude above the prediction for a single solutal mode. The thermal decay time shows neither a gravitational roll-off nor the propagating modes predicted for an unbounded layer [4,5]. We have developed a model of non-equilibrium fluctuations in confined ternary mixtures, which will be presented in a forthcoming publication. Without adjustable parameters it reproduces the thermal decay times at small q and the saturation of the polymer mode (Fig. 1b), showing that confinement suppresses the internal gravity waves and, together with the coupling between modes, controls the large-scale dynamics on ground [6].

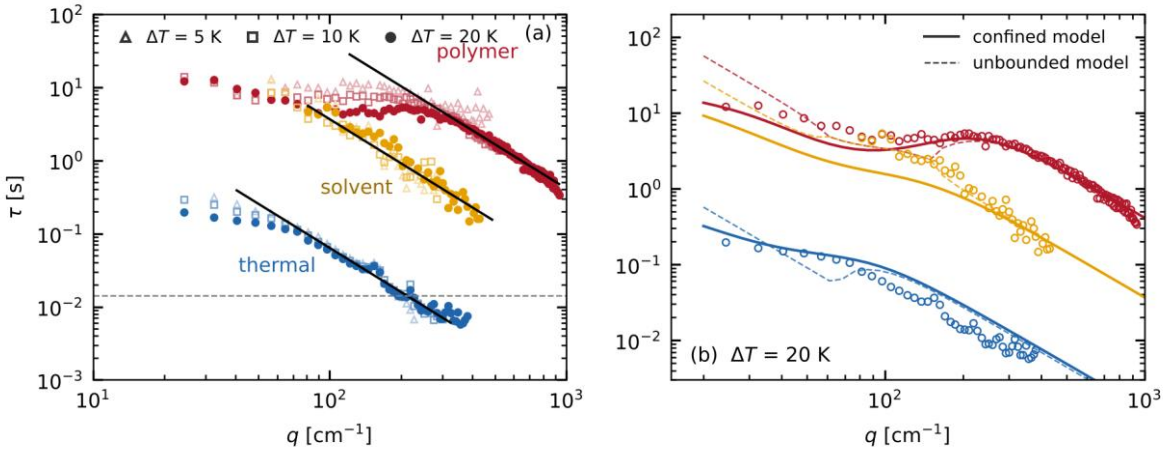


Fig. 1: (a) Decay times of the thermal (blue), solvent (amber) and polymer (red) modes of CS2 for ΔT = 5, 10 and 20 K; black lines: diffusive fits; dashed line: inverse of the maximum frame rate. (b) Decay times at ΔT = 20 K compared with the confined model (continuous lines) and the unbounded model (dashed lines).

Perspectives

These results constitute the reference for the measurements on CS2 in microgravity, where the buoyancy-driven roll-off and the density-mediated coupling between the solutal modes are expected to disappear, so that the comparison between ground and flight data will isolate the role of gravity. Next steps are the joint analysis of the two wavelengths, which requires the contrast factors of the mixture, the analysis of the other GRT samples, and the publication of the confined model and of the present results.

References

[1] A. Vailati, *et al.*, Giant fluctuations induced by thermal diffusion in complex liquids, *Microgravity Sci. Technol.* **32**, 873 (2020)

[2] L. García-Fernández, *et al.*, Coupled non-equilibrium fluctuations in a polymeric ternary mixture, *Eur. Phys. J. E* **42**, 124 (2019)

[3] L. García-Fernández, *et al.*, Stabilized convection in a ternary mixture with two Soret coefficients of opposite sign, *Eur. Phys. J. E* **45**, 52 (2022)

[4] F. Croccolo, *et al.*, Propagating modes in a binary liquid mixture under thermal stress, *Phys. Rev. E* **99**, 012602 (2019)

[5] S. Castellini and A. Vailati, Quenching of long-wavelength non-equilibrium temperature fluctuations in a thermophilic colloidal suspension heated from below, *J. Chem. Phys.* **163**, 144121 (2025)

[6] C. Giraudet, *et al.*, Confinement effect on the dynamics of non-equilibrium concentration fluctuations far from the onset of convection, *Eur. Phys. J. E* **39**, 120 (2016)

Acknowledgements: The authors acknowledge the financial support of CNES through the GdR 2799 MFA and of ESA through the Giant Fluctuations project.

Session 3

Combustion, Milieux réactifs

3.1 Hydrothermal flames on a chip : μSCWO design for weightless experiments
S. Marre, C. Lecoutre, A. Erriguible, O. Nguyen, F. Palencia

Hydrothermal flames on a chip: µSCWO design for weightless experiments

S. Marre[1], C. Lecoutre[1], Arnaud Erriguible[1,2], Olivier Nguyen[1], Fabien Palencia[1]

[1] Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, ICMCB, UMR 5026, F-33600 Pessac, France
Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33600 Pessac, France

Introduction

Following the pure fluids (ALI, ALI-R, HTI) and non-reacting fluids (HTI-R, HTI-R2) experimental studies using the DECLIC instrument on board the International Space Station ISS, chemical physics in supercritical fluids is the latest level of our scientific program on near and supercritical fluids, supported by CNES since 2000, and is both of fundamental and applied interest. One main scientific goal is indeed linked to human space exploration through organic waste recycling, using the technology based on Super Critical Water Oxidation (SCWO process)[1]. SCWO has been sought as one of the promising technologies for the treatment of organic waste, and has been proposed in the context of space exploration. To overcome limitations due to precipitation of salts at high pressure and temperature conditions of supercritical water, the process has garnered attention when used in conjunction with hydrothermal flames. Accounting for the high pressure and temperature conditions of this technology, we have proposed the miniaturization of the hydrothermal flames process to move it towards microscale (µSCWO). We present here the challenges and perspectives for an instrument definition and design for weightless experiments in the context of the end of ISS utilization.

Method

Under supercritical conditions (*i.e.* when the temperatures and the pressures of a substance are above its thermodynamic critical point), water becomes a fluid with unique properties that can be used to treat a wide variety of wastes. During SCWO process, organic wastes can be almost fully converted into carbon dioxide, water, and minerals, at moderate temperature (~400°C) and pressure (~30MPa) in a process harmless to the environment. We aim to study the coupling phenomena between such exothermic chemical reaction and heat and mass transfer in these near critical systems under microgravity conditions. Such investigations will benefit from the knowledge obtained in pure and salted near critical water with DECLIC HTI and HTI-R, but they also require additional technical specifications, in order to work in continuous flow mode, with the management of different fluids, and to proceed to *in situ* chemical analysis. The new technology developed at ICMCB, based on transparent microfluidic systems working in high pressure and high temperature, is specially designed to work in the temperature and pressure range of the hydrothermal oxidation process (see Figure 1).

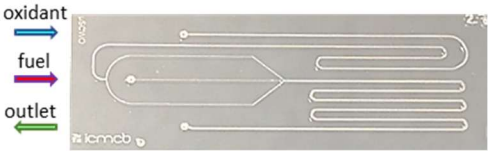


Figure 1 : The transparent device designed for the observation of hydrothermal flames in microgravity, with external dimensions 19 x 55 x 2 (mm), is the heart of µSCWO device (see text).

Transparency in a wide range of optical wavelength, typically 150 to 6500 nm, allows *in situ* optical observation of the hydrothermal flame using direct transmission, and chemical characterization with Raman spectroscopy. In addition, the miniaturization of the fluidic channels induces a very small amount of necessary fluids inside the reactor (~2µL), thus limiting the total amount of necessary flowing fluids for the completion of the experimental program. A dedicated injection device is at the interface with standard high-pressure connections, to allow injection of the fuel, the oxidant, or pure water as a cleaning solution, and to deliver the residue of chemical reaction towards the waste reservoir. The fluids selected for the weightless µSCWO experiments are ethanol as a model fuel,

[1] *See for example G. Pont et al., "Stepping stones towards oxidation processes in supercritical water" IAC_14_A2_6_5 (2014)*

hydrogen peroxide as the oxidant source, and pure water as a solvent. All fluids are liquids in the operating conditions, optimizing the volume of the reservoirs, and for safety considerations.

Results and perspectives

Preliminary ground work has combined predictive modelling activities and first experimental observation of hydrothermal flames, using the bench developed at ICMCB [1-2]. Based on this work, a µSCWO dedicated instrument for weightless hydrothermal combustion experiments is now in phase B study of development at CNES level (see Figure 2). In particular, operational scenario was elaborated for the completion of the scientific study, leading to dimensioning the 3 inlet fluid reservoirs to less than 200mL for oxidant and fuel, and 300mL for water, used for mixing and cleaning. The µSCWO device is planned to be teleoperated from the ground, in a semi-automatic mode of operations. An estimation of the necessary duration of the experiments for the whole program leads to about 3-month operations, accounting for preparation time onboard (heating, pressurizing), transmission duration of the images and raw data to Earth, and pre-analysis of the results. The instrument design is based on a 2 mid deck lockers housing, to fit the necessary equipment for the optical observation and the chemical characterization around the miniaturized furnace, the fluidic pumps and fittings, and the 4 reservoirs for inlets and outlet.

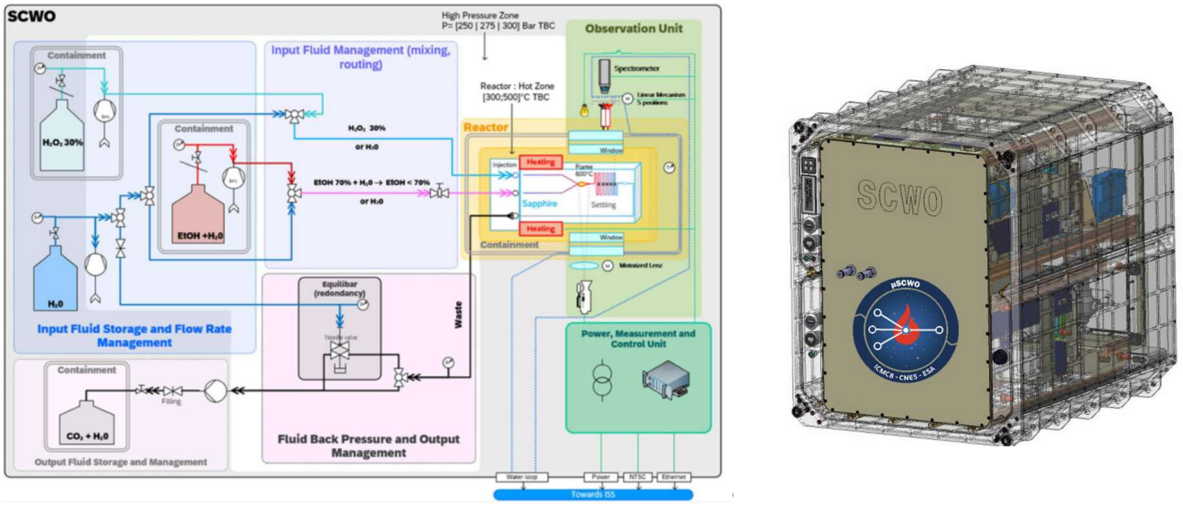


Figure 2 : Schematic functional view for a µSCWO instrument (left), and its possible accommodation for a space platform (right)

With the end of the International Space Station for the scientific experiments, boarding alternatives are investigated, such as commercial space cargos. However, these ones are not yet well defined, unmanned and limited in weigh, energy, and communication possibilities. In this context, assumptions are made for the instrument development, accounting for these limitations.

The objective today is to perform preliminary experiments, using the laboratory bench developed at ICMCB, in the Zero G airplane in 2028, to prepare the optimal experimental scenario in microgravity conditions with µSCWO device onboard a cargo platform in 2031.

Publications

[1] 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

[2] D. Sharma, C. Lecoutre, F. Palencia, O. Nguyen, A. Erriguible, S. Marre, Assessment of machine learning algorithms for predicting autoignition and ignition delay time in microscale supercritical water oxidation process, Fuel, 2023, 352, 129098, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129098

[3] 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

[4] 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

3.2 A flamelet approach for flame spread over solids
J.-L. Consalvi, A. Dupuy, G. Legros

A flamelet approach for flame spread over solids

J.L. Consalvi[1], A. Dupuy[2], G. Legros[2]

[1] Aix-Marseille Université IUSTI UMR 7343 5 rue E. Fermi 13453 Marseille
[2] Sorbonne University, CNRS, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Paris F-75005, France

Introduction

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 first objective is to understand how the conditions lead to flame extinction. A second 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.

The modeling of flame extinction and soot production and emission requires to incorporate a detailed description of the chemical kinetic, which results in a large number of species and reaction. This is computationally expensive. Flamelet models constitute a powerful approach to reduce computational costs related to chemistry. For gaseous fuel, these models assume that the complex thermochemistry of the system can be fully parameterized using a limited number of control variables: mixture fraction Z, progress variable Y_c, and an enthalpy defect parameter X_R characterizing radiative losses. Their application relies on the hypothesis of chemical kinetics faster than characteristic mixing times, allowing reaction zones to be assimilated to one-dimensional (1D) laminar flames. The flame structure is resolved a priori in 1D canonical configurations (counterflow flames), and gaseous thermochemical variables (temperature, species mass fraction, molecular transport coefficient,…) are stored in a table (fl supersript) as a function of control parameters. This standard flamelet approach assumes that gaseous fuel is introduced on one side and the oxidizer in the other side. It has been successfully applied in our previous studies on soot production and emission in microgravity flames [1,2]. However, it does not consider the fact that, in our application, the gaseous fuel results from a complex heat and mass transfer process between the pyrolyzing solid fuel and the gas phase through conduction and radiation.

The objective of this study is then to develop a flamelet methodology for the specific problem of flame spread over solid. It is inspirited for the work of Budzinski and Desjardin [3].

One Dimensional Flamelets with heat and mass transfer at the transpirating solid

The 1D diffusion flame problem represents the theoretical domain between an infinitely long slab of fuel held at the pyrolysis temperature T_P and a infinitely long plate where the species mass fractions and temperature are held at their respective values in the far field oxidizer stream (Fig. 1). The resulting problem involves solving the following reacting 1D conservation equations:

$$\dot{m}_f'' \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x}\right) + \dot{\omega}_\iota;\ \dot{m}_f'' C_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) - \sum_{i=1}^{N} \dot{\omega}_\iota \Delta h_i$$

Ou $\dot{m}_f''$ represent the pyrolysis mass flow rate, Y_i the mass fraction of species i with $\dot{\omega}_i$ the corresponding reaction rate. The following boundary conditions are applied, including the heat and mass transfer at the fuel surface.

- Fuel boundary condition:

$$T = T_D;\ \dot{m}_f'' L = \lambda \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0};\ \rho D \left.\frac{\partial Y_i}{\partial x}\right|_{x=0} + \dot{m}_f'' Y_i(0) = \dot{m}_f'' \quad (2)$$

- Oxidizer boundary condition:

$$T = T_{\infty;}\, Y_{O_2} = Y_{O_2,\infty};\; Y_{N_2} = 1 - Y_{O_2,\infty} \tag{3}$$

where L is the latent heat of evaporation of the solid.

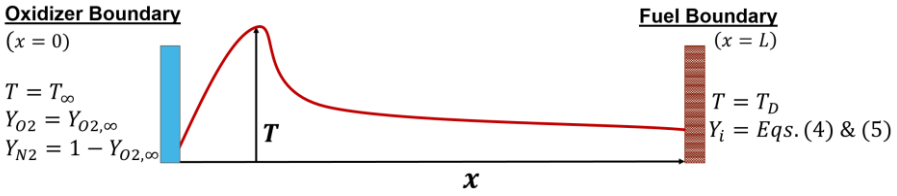


Figure 1. Representative diagram of the one dimensional CR-flamelet problem.

These flamelet equation are solved by reducing the distance between the two plate, δ, down to a value δ_q at which extinction occurs. The Figure 2 shows the evolution of the temperature for the different values of δ.

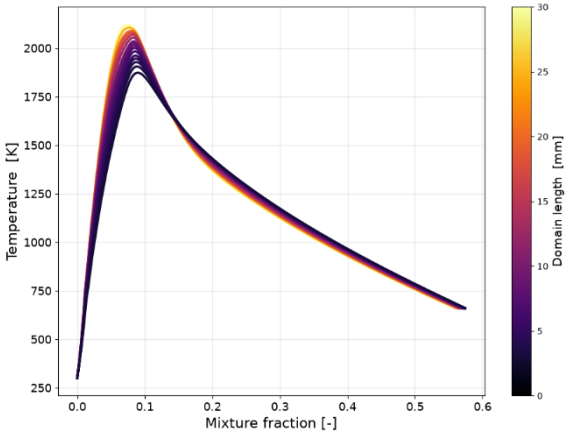


Figure 2. Steady state flame solutions for a Polyethylene-air diffusion flame showing several flame temperature profiles as a function of domain length.

Perspectives

The main perspective of this work is to incorporate radiation in the flamelet solutions and to use the generated flamelet table to predict soot production and flame spread under different ambient conditions. The solutions will be compared with experimental data obtained with DIAMOND.

References

[1] A. Guibaud, J.L. Consalvi, J.M. Citerne, G. Legros, Pressure effects on the soot production and radiative heat transfer of non-buoyant laminar diffusion flames spreading in opposed flow over insulated wires, Combustion and Flame, Volume 222, pp. 383-391, 2020.

[2] J.L. Consalvi, A. Guibaud, A. Coimbra, J.M. Citerne, G. Legros, Effects of oxygen depletion on soot production, emission and radiative heat transfer in opposed-flow flame spreading over insulated wire in microgravity, Combustion and Flame, Volume 230, pp. 111447, 2021.

[3] K. Budzinski, P. E. DesJardin, Radiative Flamelet Generated Manifolds for Solid Fuel Flame Spread in Microgravity, Combustion and Flame, Volume 256, pp. 112939, 2023

3.3 Electro-acoustic perturbations of flame spread in microgravity - latest results with UNBURNIT
A. Schmitt, J.-M. Citerne, A. Guibaud, J.-L. Consalvi, A. Dupuy, **A. Matynia**, 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. Legros[1]

[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 pecularities 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.

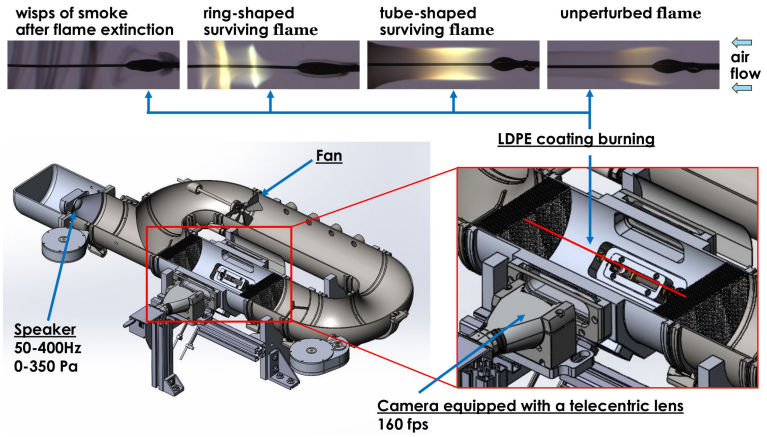


Figure 1: Schematic of the UNBURNIT setup. Following the frequency and the level of acoustic pressure, the acoustic perturbation of the flame spreading in microgravity (unperturbed flame) can lead to a steady tube shape of the flame, a shaky ring shape of the flame, or the extinction of the flame.

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.

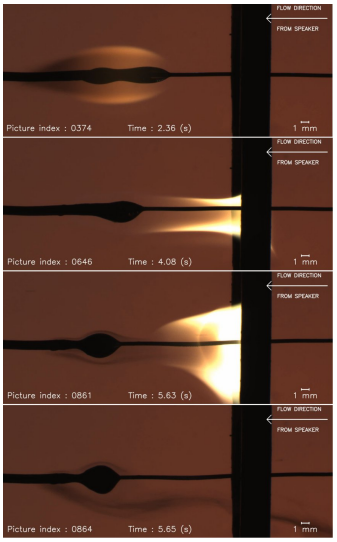


Figure 2: Sequence of frames along an electro-acoustic perturbation of a flame spreading in microgravity over the axisymmetric polyethylene coating a metallic core. From top to bottom: flame spreading at a steady rate; flame reversed by the DC electric voltage; flame reversed by the DC electric voltage 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 Multi-Scale Fire Characterization of Materials under Space-Relevant Conditions
J. Sarazin, **S. Bourbigot**

Multi-Scale Fire Characterization of Materials under Space-Relevant Conditions

J. Sarazin [1], S. Bourbigot [1,2]

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

[2] Institut Universitaire de France, Paris, France.

Introduction

The development of future crewed space missions to the Moon and Mars raises new challenges in terms of fire safety and the fire behaviour of materials. Unlike terrestrial conditions, these environments combine specific atmospheric and gravitational conditions that may alter the mechanisms governing ignition, combustion, and flame spread.

To reduce structural mass and the mechanical loads associated with pressurization, while facilitating and shortening extravehicular activities (EVAs), future spacecraft and habitats may operate at reduced pressure. Atmospheric conditions of 55–70 kPa with 27–35% O_2 have been considered for certain crewed space mission architectures [1]. These atmospheric conditions are also associated with gravitational levels that differ from those encountered on Earth, ranging from microgravity aboard spacecraft to the partial-gravity environments of the Moon (0.16 g) and Mars (0.38 g). The combination of these parameters may alter combustion mechanisms and the flammability of polymeric materials.

One of the main approaches used to improve the fire performance of polymeric materials is the incorporation of flame-retardant (FR) systems. However, conventional fire-reaction characterization methods have been established under terrestrial conditions, at atmospheric pressure, normal gravity, and approximately 21% O_2. They therefore do not fully allow the individual effects of pressure, oxygen concentration, and gravity, or their interactions, to be distinguished. Although the limiting oxygen index (LOI) and related methods can be used to assess material flammability under conditions representative of space environments [2], they do not reproduce the environmental conditions of a fire scenario representative of a space habitat.

The objective of this study is to develop a multi-scale experimental methodology that initially enables the main environmental parameters representative of future space missions to be investigated independently and subsequently coupled. This approach combines the adaptation of existing methods with the development of instrumented experimental facilities to establish a link between thermal decomposition and combustion mechanisms and the fire reaction of materials.

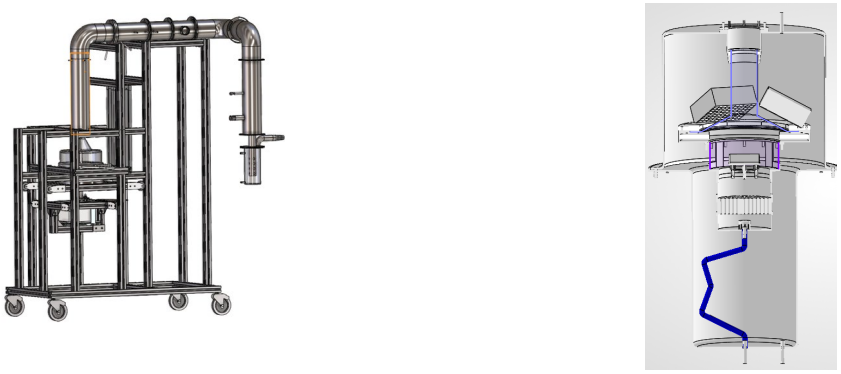
Experimental

This multi-scale approach has revealed significant changes in the behaviour of flame-retardant systems as atmospheric conditions depart from conventional terrestrial conditions. At the level of thermal decomposition mechanisms, thermogravimetric analyses performed on the model intumescent polypropylene (PP) system containing ammonium polyphosphate (APP), pentaerythritol (PER), and zeolite 4A (Z4A) [4] showed, in particular, a decrease in residual mass under normoxic conditions, indicating changes in the formation and stability of the carbonaceous residue. At the macroscopic scale, increasing the O_2 concentration resulted, for the same system, in an increase of up to 100% in the peak heat release rate (pHRR). This result highlights the strong influence of oxygen enrichment on the combustion dynamics of an intumescent system and demonstrates that atmospheric conditions can simultaneously affect decomposition mechanisms, the formation of the protective condensed phase, and, more broadly, the fire reaction of the material.

These initial findings have progressively driven the development of the experimental methodology, with the aim of first distinguishing the individual effects of oxygen concentration, pressure, and gravity, before investigating their coupled effects. Within the framework of the ERC Synergy FireSpace project, the CCO_2 (O_2 cone calorimeter) is currently being modified to incorporate pressure control (Figure 1a). This development will enable the coupled effects of oxygen concentration and pressure on the fire reaction of materials to be investigated at the laboratory scale using an instrumented experimental setup.

At a scale more representative of space environments, a new experimental facility is also being developed within the framework of the APR CNESDELOREAN by ATEAM² project (Figure 1b), *Dynamic Experiments on Low-pressure Oxygen-rich Reactive Environments for Assessment of Normoxic combustion by Advanced Thermal Experiments for Aerospace Materials in Microgravity*. This instrumented facility is designed to simultaneously reproduce the three environmental parameters characteristic of the conditions under investigation: an oxygen-enriched atmosphere, reduced pressure, and microgravity (O_2/dP/µG).

This experimental progression provides a pathway from the identification of fundamental mechanisms to the characterization of fire reaction under conditions that progressively approach those encountered in space environments. The individual effects of the different environmental parameters are first investigated separately and then progressively combined to identify their interactions and their influence on the fire behaviour of materials. Overall, this methodology pursues two complementary objectives: (i) to improve the understanding of the fundamental mechanisms governing the thermal decomposition, combustion, and fire reaction of materials under extreme environmental conditions, and (ii) to contribute to the development of new material systems and fire-protection strategies adapted to the specific conditions of aerospace applications.



A B

Figure 1 : desing of new bench scale test : A HOI/LOI B evolution du banc CCO2 en CCO2dP.

[1] A. Garbino, M.Y. Hew-Yang, P. Estep, B. Siders, K. Marshall-Goebel, NASA Exploration Atmosphere Tests 3 and 4: Development and Validation of Planetary Extravehicular Activity Prebreathe Protocols for Alternate Atmospheres and Suit Pressures, 2025 AsMA-UHMS Annual Scientific Meeting, Atlanta, GA

[2] Yusuke Konno, Muhammad Zhaffri Bin Zainal, Nozomu Hashimoto, Osamu Fujita, Application of ISO 4589-4 to determine limiting oxygen concentrations for opposed-flow flame spread over thin electric wires and their comparison with microgravity data, Fire Safety Journal,
Volume 141, 2023, https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103989.

[3] Effects of flame retardants on extinction limits, spread rate, and smoke release in opposed-flow flame spread over thin cylindrical polyethylene samples in microgravity.
Y. Li, A. Guibaud, J.-M. Citerne, J.-. Consalvi, A. Coimbra, J. Sarazin, S. Bourbigot, J.L. Torero, G. Legros, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 39, Issue 3, 2023,10.1016/j.proci.2022.08.030

[4] Bourbigot, S., Le Bras, M., Delobel, R., Decressain, R., Amoureux, J.-P. (1996).
Synergistic effect of zeolite in an intumescence process: study of the carbonaceous structures using solid-state NMR. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 92, 149–158.
DOI: 10.1039/FT9969200149.

3.5 Etude expérimentale de l'influence des transferts radiatifs sur la propagation des flammes ultra-lentes en conditions de microgravité
A. Tahri, R. Glaznev, J. Beeckman, H. Pitsch, C. Chauveau, **F. Halter**

Étude expérimentale de l'influence des transferts radiatifs sur la propagation des flammes ultra-lentes en conditions de microgravité

A. Tahri[1,2], R. Glaznev[3], J. Beeckmann[3], H. Pitsch[3], C. Chauveau[2], F. Halter[1,2]

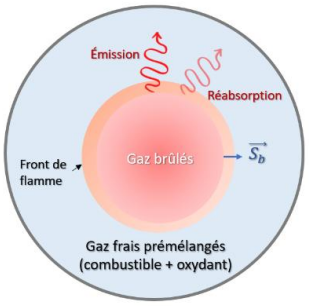
[1] Université d'Orléans, Château de la Source, Avenue du Parc Floral, 45100 Orléans

[2] Laboratoire ICARE-CNRS, 1C, avenue de la Recherche Scientifique, CS 50060, 45071 Orléans Cedex 2, France.

[3] RWTH-ITV Aachen, Templergraben 64, 52062 Aachen, Allemagne

Introduction

L'étude de la propagation de flammes permet de caractériser des propriétés fondamentales de la combustion, nécessaires à la modélisation et à la sécurité. Parmi ces propriétés, la vitesse de flamme laminaire non étirée (notée S_{Lu}^0) correspond à la vitesse à laquelle les gaz frais prémélangés sont consommés par le front de flamme.



Cette vitesse peut cependant être influencée par les transferts radiatifs [1], qui agissent sur la propagation de la flamme par plusieurs mécanismes. L'émission radiative des gaz brûlés entraîne leur refroidissement, modifie le champ thermique et la chimie de combustion et ralentit par conséquent la flamme [2]. À l'inverse, la réabsorption du rayonnement dans les gaz frais peut conduire à leur préchauffage, avec des effets sur la propagation qui dépendent notamment de la géométrie de la flamme [3].

Ces effets deviennent particulièrement importants à proximité des limites de flammabilité, où les temps caractéristiques de propagation élevés renforcent l'influence du rayonnement. Les pertes radiatives peuvent alors conduire à une sous-estimation de la vitesse de flamme laminaire non étirée si elles ne sont pas corrigées. Cependant, les corrections existantes reposent généralement sur l'hypothèse d'un milieu optiquement mince, considérant principalement l'émission des gaz brûlés. Cette approximation peut devenir insuffisante pour des flammes ultra-lentes ou très épaisses, lorsque la réabsorption dans les gaz frais devient significative.

L'étude expérimentale de ces régimes reste cependant délicate, car les effets de flottabilité et de convection naturelle peuvent perturber la propagation des flammes ultra-lentes et masquer l'influence du rayonnement. La microgravité constitue ainsi un moyen privilégié pour limiter ces perturbations et mieux isoler les effets radiatifs.

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de confronter expérimentalement les régimes de couplage entre combustion et rayonnement proposés dans la littérature [3,4], afin de caractériser les contributions respectives de l'émission et de la réabsorption dans les flammes ultra-lentes et d'évaluer la validité des approximations radiatives utilisées.

Méthode

Les conditions expérimentales sont choisies pour explorer différents régimes de couplage entre combustion et rayonnement. Leur caractérisation repose sur deux rapports de temps caractéristiques:

- $D_{a,conv} = \frac{\tau_{prop}}{\tau_{conv}}$ comparant le temps de propagation à celui de la convection naturelle, afin d'identifier les régimes pour lesquels la microgravité est nécessaire ;
- $D_{a,rad} = \frac{\tau_{prop}}{\tau_{rad}}$ comparant le temps de propagation au temps radiatif afin d'évaluer l'importance des échanges radiatifs au cours de la propagation.

Trois paramètres permettent d'agir sur ces phénomènes. La pression modifie la vitesse et l'épaisseur de flamme, ainsi que la concentration des espèces radiativement actives. La nature du combustible influence la composition des gaz brûlés et leurs propriétés émissives : les flammes d'hydrogène produisent principalement de la vapeur d'eau, tandis que celles de méthane et de méthanol produisent notamment H_2O et CO_2. Enfin, la composition des gaz frais, notamment par l'ajout de H_2O ou de CO_2, permet de modifier leur capacité de réabsorption.

Ces différents paramètres sont explorés à l'aide de deux dispositifs expérimentaux complémentaires en microgravité :

- **Le dispositif avion :** associe un diagnostic Rayleigh, permettant de mesurer l'évolution de la température au cours de la propagation, et une imagerie par chimiluminescence, permettant de suivre le contour de la flamme et d'en extraire la vitesse de propagation. Utilisé avec des

combustibles liquides, il a permis d'étudier des flammes de méthanol (CH_3OH) fortement diluées (12 % d'O_2 et 88 % de N_2 dans le comburant), à 373 K et à différentes pressions (2,5, 5 et 7,5 bar). Ces conditions permettent d'obtenir des flammes ultra-lentes et d'étudier l'influence des pertes par émission radiative.

- **Le dispositif tour de chute :** emploie l'imagerie Schlieren, permettant de visualiser le front de flamme et de suivre sa propagation, et un évaporateur permettant d'introduire de la vapeur d'eau dans les gaz frais. Utilisé avec des combustibles gazeux, il a permis d'étudier des flammes de méthane (CH_4, 5 % H_2O, 333 K, 1 atm) et d'hydrogène (H_2, 20 % H_2O, 373 K, 0,7 et 1 atm). Ces conditions visent à explorer l'influence de la composition des gaz brûlés et de la réabsorption radiative dans les gaz frais.

Résultats

Les mesures en vol parabolique montrent une diminution des vitesses de flamme avec la pression, particulièrement marquée pour les mélanges pauvres et stœchiométriques, tandis que celles des mélanges riches restent proches de 4 cm/s. Les profils de température obtenus par diffusion Rayleigh révèlent également une diminution de 300 à 600 K entre le voisinage du front et le centre des gaz brûlés (cf. Fig. 1). Les estimations d'épaisseur optique suggèrent une réabsorption limitée pour ces mélanges, ce qui motive

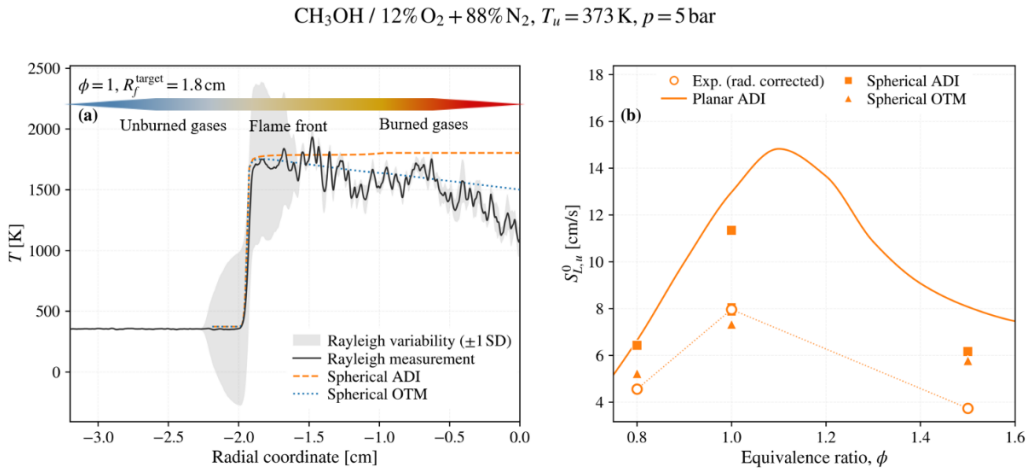


Figure 1- Influence des pertes radiatives sur la température et la vitesse de propagation des flammes de méthanol à 5 bar

l'utilisation de l'approximation optiquement mince (OTM, *Optically Thin Model).* Les corrections radiatives de Santner et al. [2], appliquées suivant Hesse et al. [5], montrent que négliger ces pertes conduit à une sous-estimation systématique de la vitesse de flamme laminaire non étirée déterminée expérimentalement. Cette correction dépend fortement de la richesse : elle est d'environ 2 % pour les mélanges stœchiométriques, atteint 4.5 % pour les mélanges pauvres et jusqu'à 13 % pour les mélanges riches à 2.5 bar. Pour ces derniers, elle diminue à environ 6 % et 4 % respectivement à 5 et 7.5 bar.

Afin d'évaluer l'influence de différents traitements du rayonnement sur la dynamique des flammes, des simulations ont été réalisées avec *FlameMaster* [7] un code de calcul 1D utilisé ici pour simuler la propagation instationnaire de flammes sphériques. La comparaison entre les simulations adiabatiques (ADI) et celles prenant en compte l'émission radiative dans l'approximation optiquement mince (OTM) montre une diminution des vitesses calculées et un refroidissement progressif des gaz brûlés, qualitativement cohérent avec les profils expérimentaux (cf. Fig. 1). L'accord sur les vitesses reste cependant variable selon les conditions : à 5 bar et ϕ = 1, la vitesse OTM est proche de la mesure (~7.3 contre 8 cm/s), tandis qu'à ϕ = 1.5, elle demeure supérieure à l'expérience (~5.8 contre 3.7 cm/s). La sensibilité marquée des mélanges riches aux corrections radiatives, ainsi que ces différences quantitatives, soulèvent la question du rôle de la composition chimique et des mécanismes de décomposition et d'oxydation du méthanol dans le bilan thermique et radiatif. La quantification des incertitudes expérimentales reste également à finaliser.

La seconde campagne, réalisée en tour de chute, explore les conditions susceptibles de renforcer la réabsorption. Les premières mesures montrent une modification des vitesses de propagation avec la dilution, sans permettre de distinguer les effets radiatifs des effets thermochimiques. Une observation particulièrement intéressante concerne la stabilité des flammes pauvres d'hydrogène : habituellement

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, caractérisant la forme géométrique de l'interface capillaire (Fig. 1).

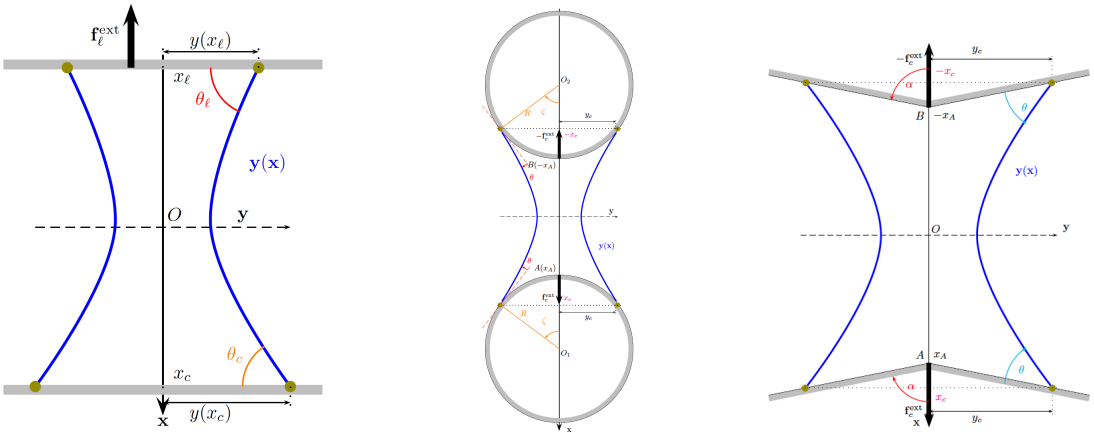


Figure 1: Représentation cartésienne d'un pont capillaire axisymétrique entre deux substrats solides plans ou de forme sphérique/conique.

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).

Ainsi, pour chaque configuration géométrique, nous retrouvons l'équation classique de Young-Laplace, qui régit la géométrie de l'interface liquide-gaz, et l'équation de Young généralisée, qui détermine l'angle de contact d'équilibre sur la ligne triple solide-liquide-gaz. Nous établissons également des expressions vectorielles explicites des forces capillaires correspondantes, en fonction de la géométrie des grains solides, qui permettent 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. Un hystérésis de la forces capillaire a été mis en évidence numériquement par des simulations LBM diphasiques lors de la coalescence/décoalescence de trois doublets capillaires entre trois grains sphériques (Fig. 2).

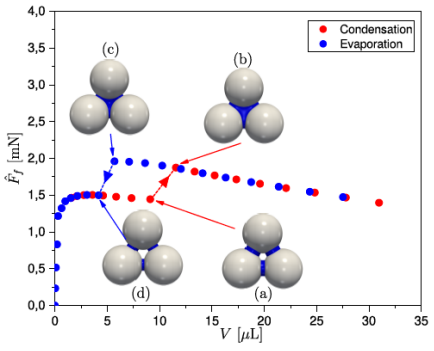


Figure 2: Hystérésis de la force capillaire lors de cycles de saturation/désaturation observé à la coalescence/décoalescence de 3 doublets capillaires entre 3 grains sphériques.

En outre, ces expressions de la force capillaire pour les configurations sphère-sphère et cône-cône fournissent un cadre théorique permettant d'étudier, sur un modèle simple, l'influence de la rugosité de surface sur les forces capillaires. Considérant une plaque présentant de multiples défauts hémisphériques ou coniques, nous introduisons la taille des défauts $r > 0$ comme paramètre caractéristique de la rugosité de surface et étudions la dépendance de la force d'adhésion vis-à-vis de r. Lorsque la taille des défauts diminue, le nombre de défauts pouvant être placés sur la plaque augmente. Nous avons établi mathématiquement que la rugosité de surface peut accroître significativement la force d'adhésion capillaire dans la limite des petits défauts. Enfin, nous avons illustré et quantifié cet accroissement au moyen d'une étude numérique, qui fournit une évaluation quantitative de l'influence de la taille des défauts sur la force d'adhésion résultante.

2. Perspectives

Lorsque la ligne de contact est ancrée du fait de la rugosité de surface et/ou de la présence de rainures, nous observons expérimentalement des variations de l'angle de contact alors que la ligne de contact reste fixe. De telles variations ne peuvent être entièrement décrites par l'équation classique de Young, qui relie l'angle de contact d'équilibre à l'équilibre des tensions interfaciales et suppose une surface idéale et homogène. Pour rendre compte de cette hystérésis de l'angle de contact, il faut introduire un terme supplémentaire prenant en compte l'énergie de flexion du système. Ce travail théorique a été effectué récemment au LaSIE et est en cours de publication. Des expériences en microgravité sont prévues en mars 2027, 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. CI. 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

Millet. O., Moreau. A., Logerot. A. and Médale. M. (2026): General Variational Formulation of Axisymmetric Capillary Bridges: Modeling Contact Angle Hysteresis and Capillary Forces." International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics (Volume 50, Issue 12): 4879-4892. https://doi.org/10.1002/nag.70363.

N. Younes, A. Wautier, R. Wan, O. Millet, F. Nicot (2026): Hysteresis phenomenon within unsaturated granular assemblies: Capillary forces and matric suction. Phys. Rev. E 113, 035401.

4.2 Contribution d'expériences en microgravité à la compréhension du mouillage partiel
M. Medale, R. Issa, P. Perrier, R. Rigard-Ceriso, **D. Brutin**

Contribution d'expériences en microgravité à la compréhension du mouillage partiel

M. Medale[1], R. Issa[1], P. Perrier[1], R. Rigard-Cerison[1] et D. Brutin[1]

[1] Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI, UMR 7343, Marseille

Introduction

Le mouillage partiel d'une surface par un liquide, au sein d'un milieu fluide environnant est une situation que l'on rencontre couramment dans la nature (gouttes de pluie sur une vitre, etc.) ou de nombreux procédés industriels (revêtement, collage, impression 3D, etc.). Ce phénomène est étudié depuis plus de deux siècles [1-2], mais les cas où les forces volumiques ne sont plus négligeables par rapport aux forces capillaires posent encore question : comment les échelles microscopiques et macroscopiques interagissent-elles ? Une première subtilité provient du fait que l'état du système dépend de toute l'histoire du processus, de la mise en contact du liquide avec le substrat, jusqu'à l'état considéré. La seconde subtilité est le caractère éminemment multi-échelles du problème. Les forces intermoléculaires régissent le comportement aux interfaces (solide-liquide, liquide-fluide, solide-fluide) [3-5] et à la ligne de contact où les trois milieux interagissent, définissant l'angle microscopique de contact [6]. D'autre part, lorsque le volume de liquide est à l'échelle macroscopique, les forces volumiques auxquelles il est soumis engendrent un gradient de courbure de l'interface liquide-fluide [2]. Pour comprendre le comportement à la ligne de contact, reprenons la définition de l'angle macroscopique de contact (AMC) originalement proposée par Young [1], comme étant celui formé par la tangente à l'interface liquide-fluide et le substrat, observé à l'échelle macroscopique. Ainsi, la valeur de cet angle pourrait résulter de la compétition entre d'une part, les forces intermoléculaires d'adhésion et de cohésion (qui définissent l'angle microscopique de contact) et d'autre part, les forces volumiques qui engendrent le gradient de courbure de l'interface liquide-fluide. Plusieurs expériences récentes ont observé que lorsque les effets relatifs de gravité ne sont plus négligeables alors l'AMC dépend du nombre de Bond, qui quantifie le rapport de forces en présence [7-11]. Ces résultats remettent en question l'interprétation classiquement admise (basée sur l'équation de Young-Dupré : $\cos\theta_Y = (\gamma_{sf}-\gamma_{sl})/\gamma_{lf}$, [12-13]), selon laquelle l'AMC ne dépendrait que des densités surfaciques d'énergies interfaciales. Mais, en est-il toujours ainsi ? Dans quelles conditions l'AMC dépend-il ou pas du nombre de Bond ? Comment interagissent les échelles microscopique et macroscopique ?

Méthode

Afin de comprendre l'influence des paramètres sur l'évolution de l'AMC, nous avons réalisé des expériences à bord de l'Airbus Zero-G de Novespace, durant la campagne de vols paraboliques VP190 du CNES (Dropwet en free-floating, du 17 au 19 mars 2026). Elles consistent à injecter à débit constant un volume de liquide au travers d'un trou de 1 mm percé dans le substrat, durant la phase d'apesanteur. Deux caméras filment en ombroscopie le profil de la goutte qui grossit et mouille de manière continue et monotone la surface supérieure du substrat. Ensuite, le post-traitement des images permet d'accéder à la géométrie de l'interface liquide-air, cf. Fig. 1, et de remonter aux grandeurs d'intérêt pour le mouillage (rayon de mouillage, hauteur de goutte, volume, AMC), cf. Fig. 2.

Résultats

La répétition de trois expériences avec les mêmes paramètres opératoires a permis de discerner les tendances communes, ainsi que les différences. Durant ces expériences en microgravité, la forme de la goutte peut être modélisée par une calotte sphérique. Ainsi le rayon de mouillage et la hauteur de la goutte sont les grandeurs mesurables avec une bonne précision cf. Fig. 1, qui définissent le volume de la goutte et l'AMC, cf. Fig. 2. Après une phase perturbée par le détachement de la ligne de contact au bord supérieur du trou, l'AMC évolue de manière non monotone, bien que la ligne de contact avance continument sur le substrat. Ceci traduit donc un effet de résistance au déplacement de la ligne de contact sur un substrat réel, pourvu de rugosités et d'hétérogénéités physico-chimiques. Ces effets de substrat réel représentent donc une déviation par rapport à la valeur de l'équation de Young-Dupré.

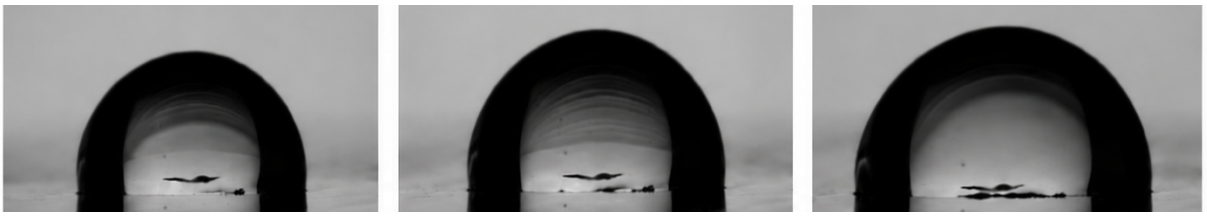


Fig. 1 : Séquence d'images d'une expérience de mouillage partiel (eau sur substrat en aluminium revêtu) correspondant à V=10, 30 et 60 µl (injection à débit constant en microgravité par un trou dans le substrat).

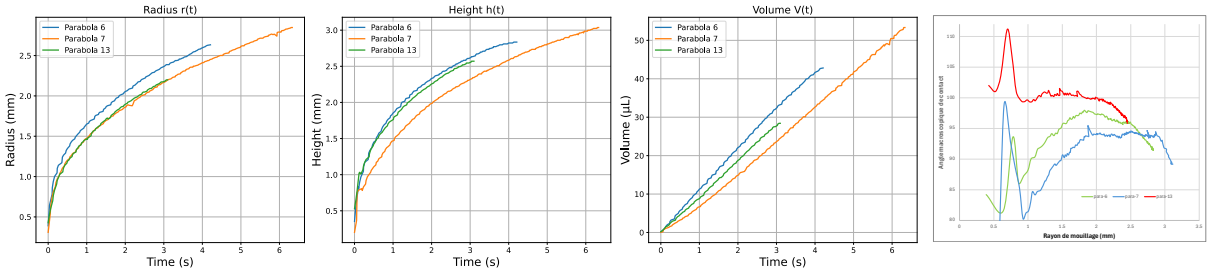


Fig. 2 : Évolutions du rayon de mouillage, de la hauteur de la goutte, de son volume et de l'angle macroscopique de contact au cours d'une répétition de trois expériences avec les mêmes paramètres opératoires.

Perspectives

La confrontation de ces résultats à ceux réalisés en conditions terrestres sera la prochaine étape de nos travaux afin de quantifier les contributions relatives des effets de substrat réel et de gravité.

Publications

R. Issa, H. Benabdelhalim, M. Medale, and D. Brutin. Drop volume effect on the advancing macroscopic contact angle. The European Physical Journal E 49, 47, (2026).

Références bibliographiques

[1] T. Young, An Essay on the Cohesion of Fluids. Philosop. Transactions, Roy. Soc. Lond., 95, 65, (1805).
[2] P. S. Laplace, Supplément au livre X du Traité de Mécanique Céleste. Sur l'action capillaire, Gauthier-Villars, Paris, (1806).
[3] M. V. Berry, The molecular mechanism of surface tension. Physics Education, 6, 79, (1971).
[4] J. S. Rowlinson and B. Widom, Molecular theory of capillarity. Dover Publications, INC., (1982).
[5] A. Marchand, J. H. Weijs, J. H. Snoeijer, and B. Andreotti. Why is surface tension a force parallel to the interface?, American Journal of Physics, 79, 999, (2011).
[6] J. C. Fan, J. De Coninck, H. A. Wu, and F. C. Wang. Microscopic origin of capillary force balance at contact line, Phys. Rev. Lett., 124, 125502, (2020).
[7] R. Tadmor and P. S. Yadav, As-placed contact angles for sessile drops. Journal of Colloid and Interface Science 317, 241, (2008).
[8] S. Gulec, S. Yadav, R. Das, V. Bhave, and R. Tadmor. The influence of gravity on contact angle and circumference of sessile and pendant drops has a crucial historic aspect, Langmuir 35, 5435, (2019).
[9] Y. M. Liu et al., Measurement of contact angle under different gravity generated by a long-arm centrifuge. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 588, 124381, (2020).
[10] A. Baldygin et al. Effect of gravity on the spreading of a droplet deposited by liquid needle deposition technique. npj Microgravity 9, 49, (2023).
[11] R. Issa, H. Benabdelhalim, M. Medale, and D. Brutin. Drop volume effect on the advancing macroscopic contact angle. The European Physical Journal E 49, 47, (2026).
[12] C. F. Gauss, Principia generalia Theoriae Figurae Fluidorum in Statu Aequilibrii. Gottinguen, (1830).
[13] A. Dupré, Théorie mécanique de la chaleur, Chapitre IX : Capillarité. Gauthier-Villars, Paris, (1869).

4.3 Ebullition nucléée en microgravité : expérience et modélisation de l'expérience RUBI
L. Favre, B. Gigon Veya, M. Mbaye, J. Sebilleau, **C. Colin**

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

L. Favre[1], B.Gigon Veya[1], M. Mbaye[1], J. Sebilleau[1], C. Colin[1]

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

Introduction

La prédiction des transferts de chaleur en ébullition est un enjeu important dans de nombreuses applications industrielles spatiales ou terrestres telles que les voyages spatiaux (boil-off), le refroidissement des composants électroniques ou des batteries ou encore l'énergie nucléaire (crise d'ébullition), ou plus généralement tout système impliquant un transfert de chaleur avec changement de phase (évaporateurs...). 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, de modélisation et numériques.

Méthode

L'ébullition étant un phénomène physique complexe multi-physique et multi-échelles, la compréhension de la physique à l'échelle d'une bulle a motivé l'expérience Multiscale Boiling (RUBI) menée par l'ESA et une équipe de scientifiques européens. 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 à l'ébullition convective sous l'effet d'un écoulement. Les expériences ont été réalisées dans diverses conditions 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]. En parallèle du traitement des données des simulations numériques ont été réalisées dans la thèse de Loric Torres avec le code DIVA et ont mis en évidence l'importance de l'évaporation au niveau de la ligne de contact entre la bulle et la paroi [3, 4].

Résultats

Les travaux réalisés cette année dans le cadre du post-doctorat de Luc Favre financé par le CNES et du stage de Master de Basile Gigon Veya ont permis de structurer la base de données de RUBI avec écoulement (Fig. 1) dans un espace GitHub qui comprend désormais toutes les données géométriques des images de bulles post-traitées, ainsi que les champ de températures de paroi après une recalibration des images de thermographie infrarouge en collaboration avec l'Université de Darmstadt.

Les travaux de cette année ont porté sur les critères de détachement des bulles de vapeur du site de nucléation, ainsi que sur le taux de croissance des bulles. Sur la figure 2, l'évolution du rayon des bulles est tracée ainsi que la position du centre de gravité. Avec écoulement une succession de bulles sont formées et se détachent du site de nucléation en glissant sur la paroi. La couche limite thermique s'épaissit avec le temps et le taux de croissance des bulles augmentent avec le temps de l'expérience. La bulle est déplacée légèrement à l'aval du site de nucléation, puis se détache (point matérialisé par une croix sur la figure 2 et un changement brutal de la pente sur la position de la bulle). Un bilan des forces agissant sur la bulle permet de montrer que dans la direction de l'écoulement la force de trainée tend à détacher la bulle et s'oppose à la force capillaire [5]. On remarque qu'après le détachement le taux de croissance de la bulle augmente, la bulle se déplaçant dans une couche limite thermique plus épaisse.

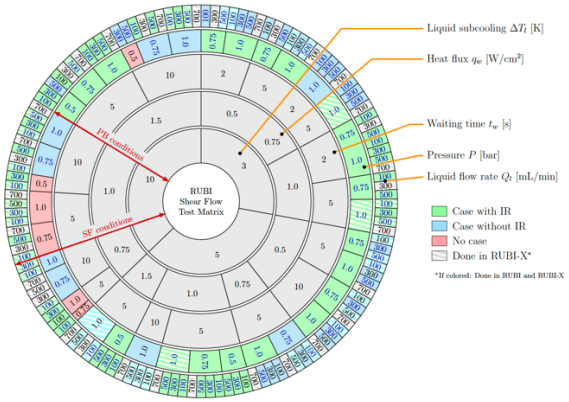


Fig. 1 : Cartographie des écoulements cisaillés (Github)

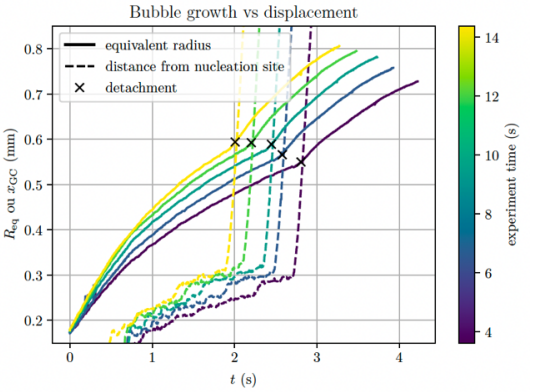


Fig. 2 : Taux de croissance des bulles

Les taux de croissance des bulles ont été lissés par des lois $R(t)=k(t-t_0)^n$, t_0 étant le temps de nucléation de la bulle de vapeur. Pour tous les essais les valeurs du paramètre k augmentent avec le temps alors que les valeurs de l'exposant n varient peu pour un seul essai. D'un essai à l'autre les valeurs de l'exposant n sont centrées autour de la valeur 0.5 correspondant aux modèles théoriques de croissance diffusive. Cependant cette valeur peut être beaucoup plus faible dans le cas d'un écoulement sous refroidi ou à forte vitesse de liquide lorsque de la recondensation se produit au sommet de la bulle. Les valeurs de k et n ont été dans un premier temps corrélées aux différents paramètres de l'expérience.

Perspectives

Concernant la modélisation de la croissance de bulle, le développement de la couche limite thermique sur la paroi sera calculé à l'aide du logiciel COMSOL. L'épaisseur de la couche limite thermique est en effet un paramètre important pour l'évolution des facteurs k et n. L'analyse de sensibilité montre que les paramètres d'essais (q_w, ΔT_l, Q_l) ont une influence couplée sur le taux de croissance, ce qui nécessite une analyse multi-factorielle. En parallèle des travaux de modélisation, des simulations numériques à l'aide du code DIVA seront poursuivies. Les simulations avec écoulement nécessitent cependant des ressources de calcul très importantes et les paramètres de la simulation devront être soigneusement choisis.

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] Favre L., Sebilleau J. Colin C., Tanguy S., Experimental investigation and modeling of bubble dynamics in zero-gravity shear flow boiling, ICBCHT 12 12TH International Conference On Boiling And Condensation Heat Transfer, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA, June 14-17, (2026)

4.4 Etudes de caloduc oscillant : analyse paramétrique
V. Nikolayev, G. Boudier, S. Bajić, E. Blond, T. Coquard, K. Le Floch, V. Ayel, N. Riaud

Etudes de caloduc oscillant : analyse paramétrique

Vadim Nikolayev[1], Guillaume Boudier[2], Slaven Bajić[2], Eric Blond[3], Typhaine Coquard[3], Katell Le Floch[4], Vincent Ayel[4], Nicolas Riaud[4]
[1]Service de Physique de l'Etat Condensé, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay
[2]Service de thermique, CNES, Toulouse
[3]Airbus Defence and Space SAS, Toulouse
[4]Institut Pprime, ENSMA, Poitiers

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) dans sa version 4. Le contexte très concurrentiel de ces études est le refroidissement des composantes des satellites de télécommunication, notamment de la constellation européenne IRIS[2]. Ces études se sont articulées en plusieurs volets.

Tout d'abord, il s'agit de la collaboration avec le CNES et ADS dans le cadre du projet ESA (AO/1-12129/24/NL/KML, Advanced structure with embedded Pulsating Heat Pipes for planar active antenna) et un projet CNES « Développement d'un caloduc oscillant pour une application spatiale »,

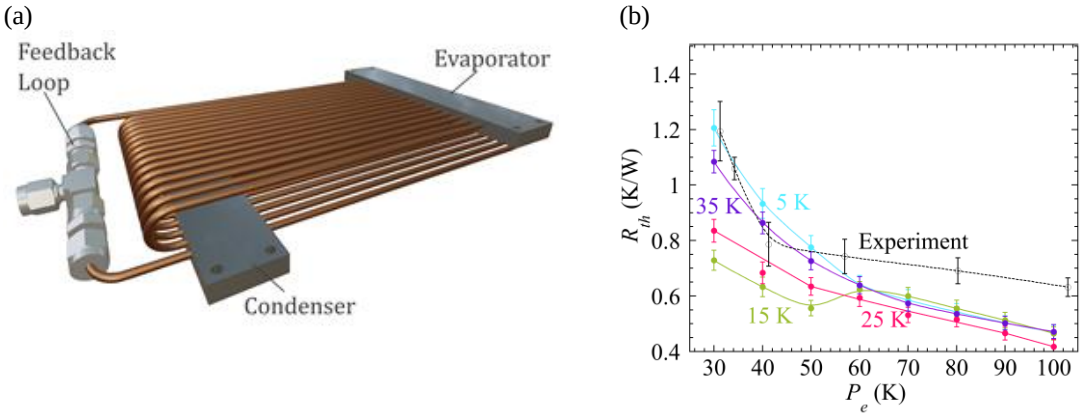


Fig. 1 Simulations CASCO du caloduc oscillant tubulaire : (a) sa géométrie et (b) sa résistance thermique en fonction de la puissance.

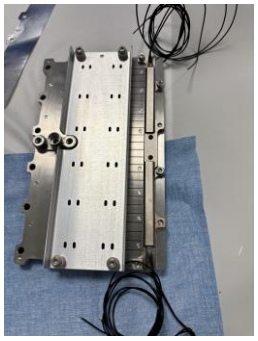
ORASOA202500659). Dans le cadre du postdoc CNES de S. Bajić qui s'est terminé fin janvier 2026, nous avons effectué une étude paramétrique de PHP tubulaire de 16 boucles remplis de HFE7100 (Fig. 1a) en confrontant d'abord les résultats de simulation avec l'expérience [1] (Fig. 1b) et ensuite en effectuant une étude en fonction de l'état de surface [2]. Pour cela, nous avons utilisé un paramètre de CASCO, la barrière de nucléation des nouvelles bulles ΔT_{nucl} (appelé autrement surchauffe de l'ONB, onset of nucleate boiling) qui est connu de dépendre fortement des propriétés de surface [3] et donc la caractériser. En fonction de ce paramètre, nous avons établi une carte de régimes d'oscillation définissant des zones du fonctionnement extrêmement efficace (celui des oscillations continues) et moins efficaces (oscillations intermittentes), un régime dit stopover. Un article [2] est soumis.

Dans le cadre thèse de K. Le Floch codirigée par V. Ayel et V. Nikolayev qui a démarré en 2025, CASCO est utilisé pour dimensionner un caloduc oscillant plat où le fluide s'écoule dans un canal bouclé gravés sur une plaque à la place d'un tube. Cette nouvelle configuration a demandé le développement d'une nouvelle version de CASCO intégrant un modèle thermique bidimensionnelle qui tient compte de la conduction thermique dans la plaque et l'échange avec le fluide. Cette thèse est cofinancée par le CNES et par Thales Alenia Space qui participe très activement dans son suivi.

Dans le cadre de Topical Team de l'ESA "Advanced Thermal Management in Space and Planetary Exploration" (ATeMS), nous participons dans 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. Le prototype (dont la

configuration a été choisi avec CASCO) a été fabriqué par la société Redwire (Fig. 2). Il est prévu de voler lors du premier vol de Space Rider en 2028.

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.

(a) 

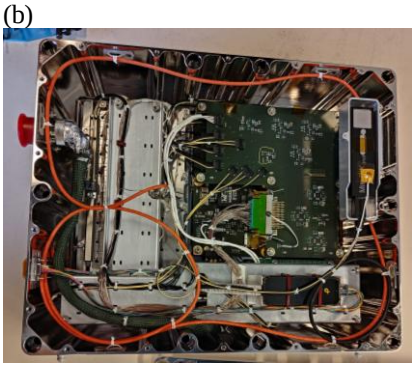
(b) 

Fig. 2 (a) Caloduc oscillant de Redwire avec les éléments chauffants (b) appareil HTH1 avec le caloduc oscillant monté pour les tests.

References

1. V. Nikolayev, S. Bajić, G. Boudier, E. Blondé, T. Coquard, M. Abela, M. Mameli, S. Filippeschi, *Studies of PHP with CASCO code and its experimental validation*. Joint 23rd IHPC and 17th IHPS, Gdańsk, Poland, May **2026**.
2. S. Bajić, G. Boudier, E. Blondé, T. Coquard, V. Nikolayev, Effect of the surface state on the pulsating heat pipe thermal performance and oscillation regime, soumis, **2026**.
3. Le Houedec, C.; Zajec, B.; Tecchio, C.; Roca i Cabarrocas, P.; Bulkin, P. & Nikolayev, V. S., *Structure of microlayer at water pool boiling for various bubble growth rates*, J. Fluid Mech., **2026** vol. 1035, A39.

4.5 Evolution of Chemical Species in Aerosol Dynamics under Microgravity Conditions
C. Graziani, M. Nespoulous, R. Denoyel, N. Martin, S. Fauve, C. Chauveau, **M. Antoni**

Evolution of Chemical Species in Aerosol Dynamics under Microgravity Conditions

C. Graziani[1], M. Nespoulous[1], R. Denoyel[1], N. Martin[1], S. Fauve[2] C. Chauveau[3], M. Antoni[1]
[1]MADIREL Aix-Marseille Université, [2] LP ENS-Paris, [3]ICARE Université Orléans

Aerosol evolution is a major challenge in climatology. Many questions remain unanswered, especially in the field of cloud microphysics. The aerosols studied here consist of micrometric water droplets formed from water saturated air and HFE 7100. They're studied using a set-up that combines optical microtomography and Fourier transform infrared spectrophotometry (FT-IR). Parabolic flight experiments were performed and about 500 droplets are tracked over time in an experimental cell. The slow motion of the droplets during the microgravity phase (about 22 s) ensures strong coherence between successive microtomographic images, enabling individual droplets to be tracked and their overall dynamics to be analyzed.

I – Calibration procedures

Figure 1 shows a typical time evolution of the absorbance in the CO_2 absorption region (2260-2420 cm^{-1}). It is obtained in the calibration procedure, performed in ground experiments, for an injected gas volume V = 300 µL. The typical CO_2 band is well resolved and shows the two classical bands of the asymmetric stretching mode, with the P (k < 2350 cm^{-1}) and R (k > 2350 cm^{-1}) bands. The rotational fine structures do not appear due to too large spectra resolution (4 cm^{-1}). The shape of the spectra remains the same when the injected CO_2 volume is changed, and only their amplitude varies. The signal can therefore be attributed to CO_2 alone and used to follow its quantity over time.

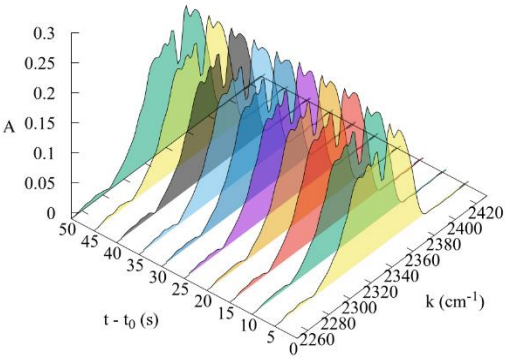


Figure 1: Absorbance in the range 2260 to 2420 cm^{-1} (resolution of 4 cm^{-1}). The baseline is obtained from a reference spectrum of clean air.

Calibration is performed by direct injection of known volumes of pure liquid HFE (resp. gaseous CO_2) with a syringe through a septum into the measurement cell where aerosols are produced [1,2]. Each injection produces an increase of the absorption bands, whose amplitude is measured and related to the injected volume. The integrated area for the CO_2 peak is displayed in Figure 2 that is further used to convert the absorbance measured during the µg experiments into an amount of CO_2 in the cell. Figure 2 shows that, although the injection procedure is rather rough, since the injections are manual and the injected volumes depend on the accuracy of the syringe, good reproducibility is achieved between successive injections. Well reproducible measurements are also obtained for HFE 7100, again demonstrating the reliability of the procedure.

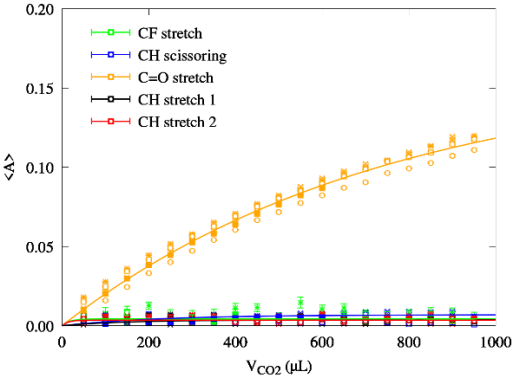


Figure 2: Calibration curve for CO_2 (solid line) together with measurement points (orange) as a function of the injected volume in the absence of HFE. The C-F and C-H vibrational modes expected for HFE are also displayed to verify the absence of contamination. Similar curves are obtained when HFE is injected in the experimental cell.

II – Microgravity measurements

Microgravity measurements were performed with the AEROSOL facility ([1,2]) during parabolic flights with water saturated air. The FT-IR spectra are recorded continuously during the microgravity phase, and the amplitude (or integrated peak areas) are converted into an amount of HFE and CO_2 using the calibration described in section I. This approach provides time-resolved access to the gas-phase content during droplet growth and evaporation, which can then be correlated with the droplet dynamics probed by an optical microtomography diagnostic. The aerosol is generated by a compression followed by an expansion, taking only a few seconds in total [2]. It produces populations of monodisperse microdroplets uniformly distributed throughout the experimental cell while limiting condensation zones.

Figure 3 illustrates typical spectra of a given parabola in the full spectral range for five different times. The functional bands of HFE 7100 and CO_2 can easily be identified (see also legend in Figure 4). The time reference, t_0, is taken at the precise moment of the expansion used to create the aerosol. This time also marks the beginning of the microgravity phase of the parabola. The significant baseline elevation is attributed to the strong IR absorption by water droplets once they're formed (precisely at $t = t_0$).

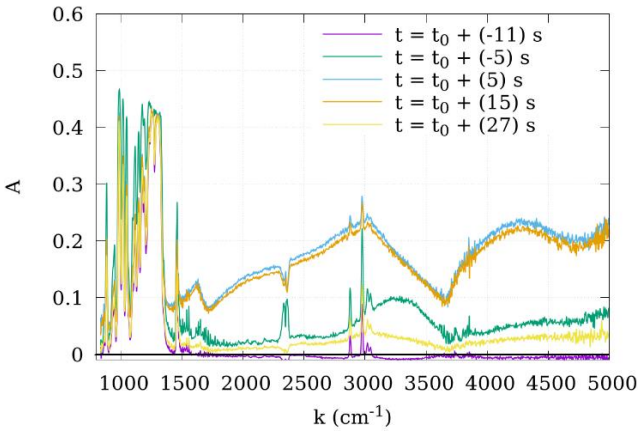


Figure 3: Spectra in the full spectral range (700 to 5000 cm^{-1}) at five different times. t_0 is the time at which the expansion is performed to generate the aerosol. The functional bands of CO_2 and of HFE 7100 are clearly visible (some of HFE are even saturated). Relative humidity is close to 100 %. (Parabola P26, campaign 67, October 2024).

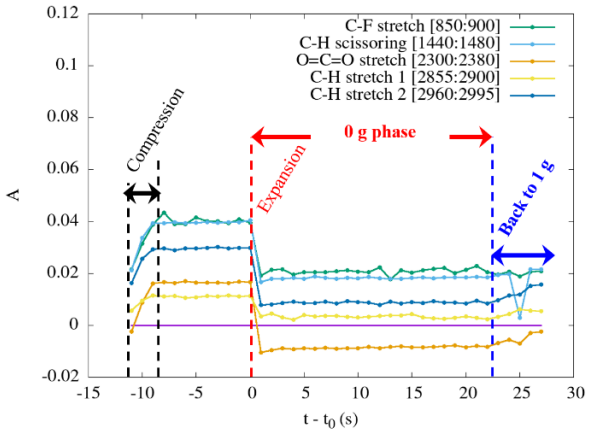


Figure 4: Evolution of the aveage absorbance, defined from the area of the peaks associated with four functional bands of HFE 7100 and one of CO_2. Spectral ranges are given in the legend. Definitions and experimental conditions are the same as in Figure 3. (Parabola P26, campaign 67, October 2024).

The time evolution of the average absorbance of computed form the peaks of four typical HFE bands, as well as of one CO_2 band from the air, is shown in Figure 4. The compression, expansion, and return to normal gravity phases appear clearly. The increase in absorbance during the compression phase reflects the higher pressure in the experimental cell. Then, it remains constant for all functional bands until the expansion, at which point it decreases sharply. A detailed inspection of this figure indicates that the absorbance of CO_2 reaches a value lower than its initial value (before compression) for the complete duration of the parabola. This observation suggests that part of the CO_2 was probably dissolved in the aerosol droplets.

Conclusion

The present work establishes the feasibility of aerosol analysis in microgravity by FT-IR spectroscopy. It gives access to the chemical composition of the gas phase and reveals a lack of CO_2 when aerosols are formed. This opens promising perspectives for the study of droplet nucleation and evaporation in gas mixtures.

References

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

Evaporation de goutte sur substrat soluble

Christophe Pirat et Jean Colombani[1],

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

Introduction

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 soluble est modifiée par cette évaporation.

Lorsqu'une goutte de suspension 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 'tache de café'. Si l'évaporation concerne un liquide pur, mais que celle-ci a lieu sur un substrat soluble, comme du sel, 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'. Si c'est une goutte de suspension colloïdale qui s'évapore sur un substrat soluble, le couplage de l'effet 'tache de café', à la fois du sel et des colloïdes, avec la diffusiophorèse des colloïdes dans les gradients de concentration de sel induits par la dissolution, sont susceptibles de conduire à l'apparition de morphologies de dépôt inédites.

Méthode

Nous avons étudié par observation directe de côté et de dessus l'évaporation de gouttes d'eau et de suspension colloïdale d'environ 1 µl déposées sur des substrats de sel NaCl monocristallin polis à des températures comprises entre 20 et 80°C. Les mesures ont été réalisées au laboratoire et en micropesanteur au cours des campagnes VP115, 119, 123 et 125 de Novespace. Ces observations ont été complétées sur terre par des mesures de la morphologie des dépôts finaux au profilomètre optique et au microscope électronique à balayage. Enfin, des expériences de microscopie confocale couplée à une analyse µ-PIV ont été réalisées pour connaître quantitativement la forme et la vitesse des écoulements au niveau du substrat au sein de la goutte pendant son évaporation.

Résultats

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. 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 'tache de café'. Une interprétation partielle en termes de profil d'écoulement, validée par des simulations numériques[1], est schématiquement donnée figure 1.

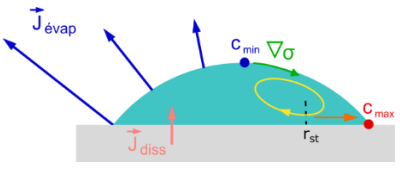


Fig. 1 : écoulement au sein de la goutte : Marangoni (en jaune) puis de type 'tache de café' (en orange).

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 triple[2]. Deux morphologies finales sont observées : ouverte (dépôt incliné vers l'intérieur) ou fermée (structure creuse hémi-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 déposée et l'angle de contact de celle-ci[3]. Les expériences sur terre et en vols 0g 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 rayon, d'angle de contact, de température et d'humidité (figure 2 gauche)[4].

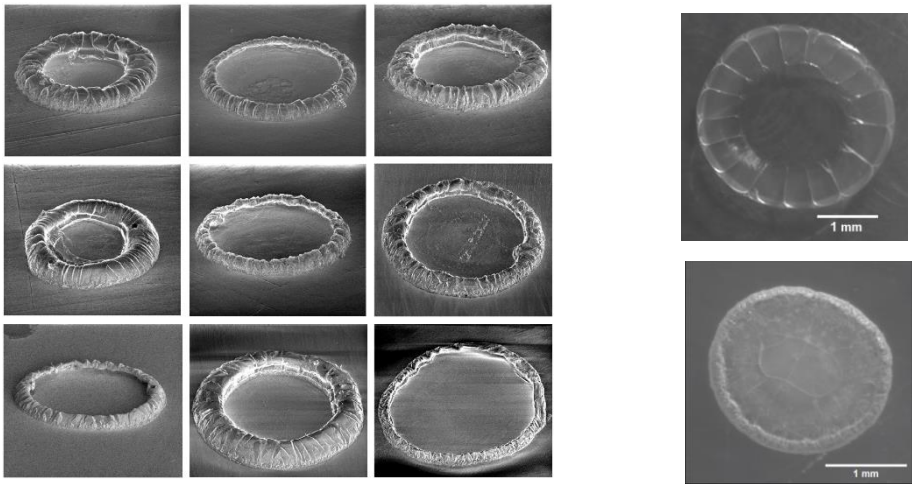


Fig. 2 : <u>Gauche</u> : dépôts après évaporation d'une goutte d'eau pure sur un monocristal de NaCl de types soit « ouvert », soit « fermé », pour des rayons de 1,25 à 3,2 mm, des angles de contact de 27 à 58°, des températures de 41 à 72°C et des humidités de 11 à 36%. <u>Droite</u> : dépôts après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

Perspectives

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 premiers résultats montrent que le dépôt périphérique est maintenant plein, et que le dépôt central présente un triple phénomène de gélification, de fracturation et de croissance de whiskers (figure 2 droite).

Publications

[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).

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

4.7 Bubble growth due to depressurization from a solid surface in HFE7000
A. Novi, J. Pinho, **A. Urbano**

Bubble growth due to depressurization from a solid surface in HFE7000

Alessandro Novi[1,2], Jorge Pinho[1] and Annafederica Urbano[2],

[1]Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Sint-Genesius-Rode, Belgium
[2]Fédération ENAC ISAE-SUPAERO ONERA, Toulouse, France

Introduction

Future space transportation architectures envision the long-term orbital storage of cryogenic propellants in dedicated depots to enable long term storage and in-orbit refueling. Cryogenic propellants are favored for their high specific impulse and are therefore key to future chemical propulsion systems. However, cryogens are inherently prone to phase change due to their extremely low storage temperatures. Accurate prediction of boiling and cavitation at both ground-level and under reduced gravity therefore represents a key technological challenge for future space propulsion [1-2]. Depressurization-driven cavitation can arise during venting, tank pressure control, and propellant transfer operations, where pressure decay rates can reach the order of bar/s. Despite its relevance to cryogenic fluid management, the onset of wall-attached cavitation remains poorly studied experimentally. This is partly attributed to the highly wetting nature of cryogenic fluids, which can flood surface cavities and prevent vapor entrapment, making bubble nucleation by pressure reduction alone difficult to achieve. As a result, previous experimental studies have generally relied on heating the substrate to promote bubble nucleation and growth [3–4].

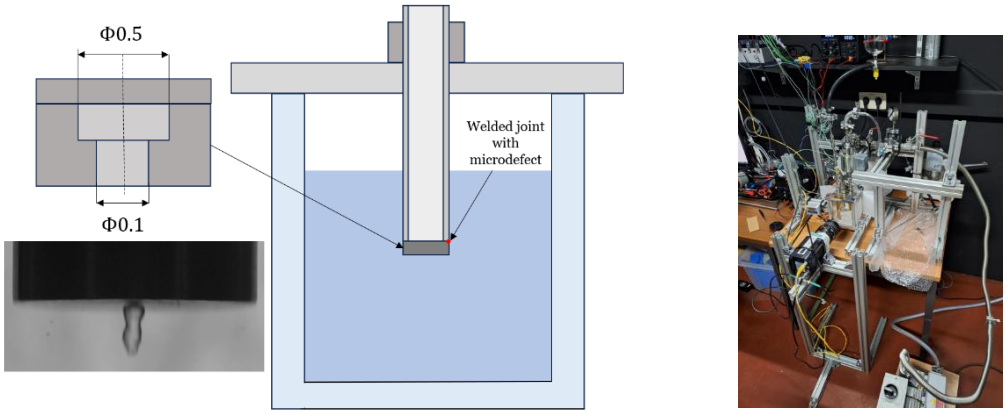


Figure 1: Test cell and reentrant cavity manufactured for gas entrapment and nucleation induced by depressurization (left). Test facility to study bubble growth due to depressurization of HFE7000 saturated pool (right).

Méthode

The objective of the SCREAMH2 project lead by the ESA topical team on propellant management physics is to investigate bubble cavitation on tank walls in microgravity with liquid hydrogen. In this context, this work experimentally investigates the inception and growth of vapor bubbles from a nucleation site during controlled depressurization of saturated HFE-7000, employed as a surrogate cryogenic fluid. The test bench consists of a cylindrical quartz vessel providing optical access, sealed at the top by a metal flange that accommodates the piping and instrumentation. The experimental approach aims to isolate depressurization-driven cavitation from wall-heating-induced boiling, thereby avoiding the development of a wall thermal boundary layer and providing well-defined boundary conditions for direct numerical simulations. To promote vapor entrapment, reentrant cavities are employed as artificial nucleation sites manufactured on a stainless-steel probe. A first cavity was successfully demonstrated using a downward-facing T-shaped geometry, manufactured by drilling two concentric holes in a metal disk laser-welded to the probe tip. The cavity geometry and a representative frame of bubble growth are shown in Figure 1 (right).

Bubble nucleation was also consistently observed at a defect in the laser weld on the probe surface, which is hypothesized to act as an naturally occurred reentrant cavity. All results presented below correspond to nucleation from this weld defect. The experimental facility is shown in Figure 1 (right).

Résultats

Bubble growth consistently exhibits different regimes depending on the Jakob number (Ja). The Jakob number is defined based on the vapor properties and superheat at the instant of bubble nucleation (“n”), while the liquid properties are evaluated at the equilibrium prior depressurization (“0”):

$$\mathrm{Ja} = \frac{\rho_{l0} c_{p,l0} (T_0 - T_{sat,n})}{p_{vn} h_{lv,n}}$$

At low Ja, the bubble remains nearly spherical until detachment. At high Ja, bubbles develop a mushroom-cap-like shape with an aspect ratio, defined as the ratio of bubble width to height, of approximately 2, consistent with the formation of a microlayer during the early stages of bubble growth [5]. Both bubble detachment radius and detachment time increase with Ja, as illustrated in Figure 2 (right), where bubble equivalent radius and aspect ratio are compared across the tested Jakob number range. The transition from a spherical growth regime at low Ja to a mushroom-cap, microlayer-driven regime at high Ja is reflected in the aspect-ratio evolution. This trend is further supported by the microlayer onset criterion proposed by Urbano et al. [5], which relates microlayer formation to the Jakob and capillary numbers (Ca) during nucleate boiling. To extend this criterion to cavitation, the thermal boundary layer thickness was corrected by considering that, during the thermal growth regime, the ratio between bubble radius and thermal boundary layer thickness is equal to 2Ja [7]. Based on this adaptation, microlayer onset is found to correlate with an aspect ratio greater than 2.

Across repeated experiments, nucleation does not occur at a unique superheat, exhibiting a stochastic behaviour. This variability might be attributed to changes in the receding contact angle at the nucleation site. In contrast, variations in non-condensable gas concentration (<4%) and hydrostatic pressure have a negligible effect on the nucleation threshold. Predictions based on the Young-Laplace equation suggest the nucleation site mouth radius is on the order of 1 micron.

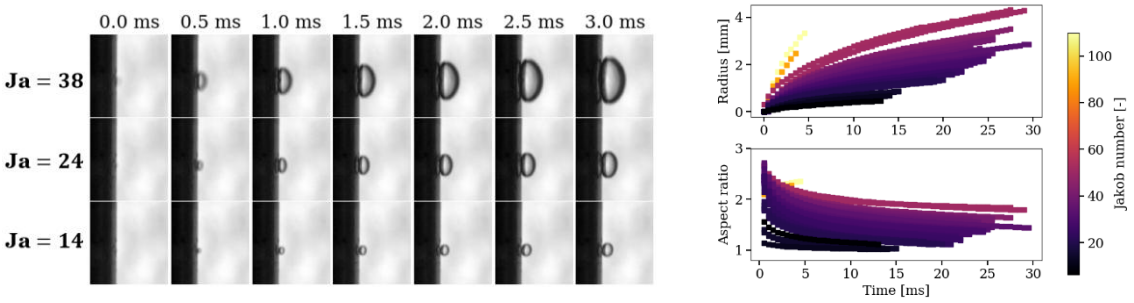


Figure 2: High-speed frames showing bubble growth at different instants for three different values of Ja (left). Bubble equivalent radius and aspect ratio vs. time for tests spanning a large Jakob number range (right).

Perspectives

This work successfully demonstrates vapor bubble nucleation solely by depressurization in a highly wetting fluid using a reentrant cavity, without substrate heating. Bubble nucleation was also observed at a laser weld defect, suggesting that such manufacturing defects can act as unintended reentrant cavities and provide preferential nucleation sites. STEM analysis will be used to characterize the morphology and dimensions of the defect.
The results identify the Jakob number as the primary parameter governing the bubble growth regime and detachment behaviour during depressurization. The observed transition towards a microlayer-driven growth regime at high Ja suggests that microlayer formation may also occur in non-water fluids, extending a predominantly reported phenomenon for water to high-wetting fluids. The next stage of the work will focus on manufacturing controlled reentrant cavities in different materials to isolate and characterize the effect of wall thermal effusivity on bubble growth dynamics. The dataset collected will also provide a benchmark for numerical simulations of bubble growth [6] using the DIVA solver.

Publications

[1] Simonini, A., Dreyer, M., Urbano, A., Sanfedino, F., Himeno, T., Behruzi, P., ... & Gouriet, J. B. (2024). Cryogenic propellant management in space: open challenges and perspectives. *npj Microgravity*, *10*(1), 34.
[2] Muratov, C. B., Osipov, V. V., & Smelyanskiy, V. N. (2011). *Issues of long-term cryogenic propellant storage in microgravity* (No. ARC-E-DAA-TN4295).
[3] Bland, M. E., Bailey, C. A., & Davey, G. (1973). Boiling from metal surfaces immersed in liquid nitrogen and liquid hydrogen. *Cryogenics*, *13*(11), 651-657.
[4] Weber, N. H., & Dreyer, M. E. (2023). Depressurization induced vapor bubble growth in liquid methane during microgravity. *Cryogenics*, *134*, 103716.
[5] Urbano, A., Tanguy, S., Huber, G., & Colin, C. (2018). Direct numerical simulation of nucleate boiling in micro-layer regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *123*, 1128-1137.
[6] Deferrez, M., Tanguy, S., Colin, C., & Urbano, A. (2026). Direct numerical simulation of bubble cavitation at a wall in micro-gravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *254*, 127612.

4.8 Floating smectic bubbles under electric fields
S. Royer, M. Zhou, C. Tosarelli, M. Ezzen, M. Schön, T. Trittel, C. Klopp, K. Harp, R. Stannarius, **E. Lacaze**

FLOATING SMECTIC BUBBLES UNDER ELECTRIC FIELDS

Sébastien Royer[1], Muyan Zhou[1], Caterina Tosarelli[1], Mohammad Ezzen[2], Maret Schön[2], Torsten Trittel[2], Christoph Klopp[3], Kirsten Harp[2], Ralf Stannarius[2], Emmanuelle Lacaze[1],
[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.

Introduction

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 and can be studied without any environmental stirring. 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 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 1c) 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 in Figure 1c). Studying these bubbles is thus also an efficient measure of the topological defect behavior [4].

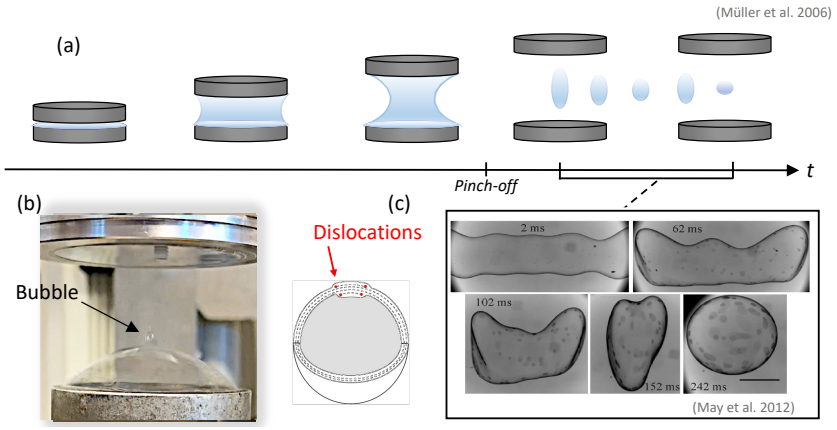


Figure 1 : (a) Rupture of a smectic catenoid allowing for bubble formation. (b) Photo of a bubble after the catenoid rupture. (c) Equilibration of the bubble which induces island formation until a spherical shape is reached for the bubble. After equilibration islands are induced with a model of the islands with dislocations which is shown in the left.

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 occuring [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].

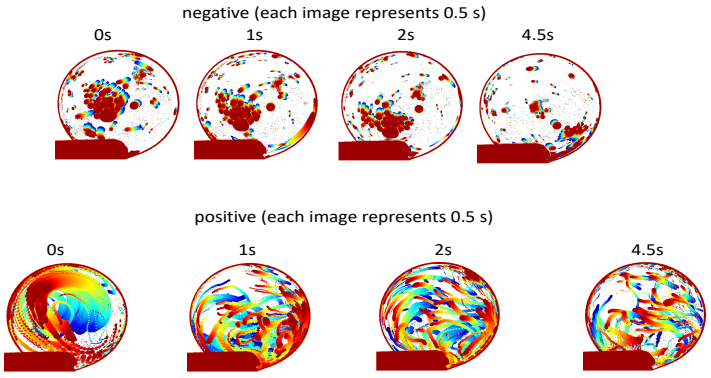


Figure 2: Evolution over 0.5 s (shown in colour) of the islands present on the floating smectic bubble after activation of an electric field presented over time – the needle appears at the bottom of the bubble - (a) for a negative electric field. (b) for a positive electric field.

Method

In October 2022, we have performed a first experiment on smectic C bubbles under electric field during CNES parabolic flights. The smectic bubbles are created by rupture of a catenoid (Figure 1a-c) and are studied by two fast cameras. 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, using a salt of Tetrabutylammonium bromide.

Results

Clear dynamical behavior has been induced by the electric field as shown in Figure 2 but with strong differences in the dynamics of the islands as a function of the polarity of the experiment (comparison between top and bottom of 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 (Top of Figure 2). A fast dynamics, similar to a fast convection, has been shown in contrast for positive polarity (Bottom of Figure 2). We interpreted them as 'electrospray'-type phenomena, where the ions, under the influence of the electric field, move and induce a motion of the liquid-crystal film. This entrainment effect is more efficient for bulky ions, so that the convection is stronger for a positive electric field than for a negative one. We also demonstrated the major role played by the position of the needle above the bubble, which imposes the electric field [8].

It is then particularly interesting to study in a second step this electric field induced dynamics in detail, in order to try to build a quantitative model of the observed features. This requires a systematic study of the influence of the crucial parameters that are the salt concentration, the salt nature and the electric field polarity. 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 tested at the campaign of parabolic flights of October 2025, allowing to finally vary the concentration of salt and the nature of salt (from Tetrabutylammonium bromide to Potassium tetraphenylborate) during the parabolic flight campaign of October 2026.

Perspectives

This last campaign appeared to be particularly successful allowing to collect a large number of data. We will analyze them in 2026/2027 with the necessary statistics which should allow us to build theoretical models in the future.

4.9 Etude des métaux liquides en microgravité par stabilisation aérodynamique
M. Courtois, C. Bourges, M. Le Mener, W. Berckmans

Etude des métaux liquides en microgravité par stabilisation aérodynamique

Mickael Courtois[1], Coline Bourges[1], Maelenn Le Mener[1], William Berckmans[1]

[1] IRDL, UMR CNRS 6027, Université Bretagne Sud

Introduction

Les procédés modernes de mise en œuvre des métaux, tels que le soudage, la fabrication additive ou les procédés de fusion, mettent en jeu des matériaux à l'état liquide à haute température, souvent supérieure à 2000 °C. La modélisation de ces procédés repose sur des approches thermo-hydrodynamiques et nécessite la connaissance précise des propriétés thermophysiques des métaux liquides, notamment leur viscosité, leur masse volumique et leur tension de surface. Or, ces données restent très limitées à haute température, en particulier pour les nouveaux alliages métalliques.
La mesure de ces propriétés est particulièrement difficile sur Terre. À très haute température, les matériaux doivent être maintenus sans contact par lévitation, mais la gravité qui s'oppose aux forces de lévitation déforme les échantillons et perturbe notamment les mesures de viscosité. La microgravité permet de réduire fortement ces effets et d'accéder à des conditions expérimentales inatteignables au sol. L'expérience CarMéLide (Caractérisation des Métaux Liquides par stabilisation aérodynamique) a pour objectif de développer une plateforme expérimentale permettant l'étude de métaux et alliages liquides entre 1500 et 3000 °C en microgravité reposant sur une approche originale de stabilisation aérodynamique.

Méthode

CarMéLide transpose en conditions de microgravité le savoir-faire développé à l'IRDL pour la lévitation aérodynamique de métaux à haute température. Un échantillon métallique de 30 mg (2 mm) est placé dans une enceinte inertée et maintenu dans une zone de stabilisation créée par des flux gazeux contrôlés. Plusieurs géométries de buses sont étudiées afin d'obtenir une stabilisation suffisante tout en minimisant les perturbations aérodynamiques susceptibles d'affecter les mesures.
L'échantillon est chauffé sans contact par laser. Sa température est mesurée par pyrométrie bichromatique et sa forme est enregistrée par plusieurs caméras rapides disposées selon différents angles de vue. Un système d'excitation acoustique permet de générer les oscillations de la goutte nécessaires à la détermination de ses propriétés physiques. L'ensemble des mesures est réalisé sans contact avec l'échantillon sans limitation de température.

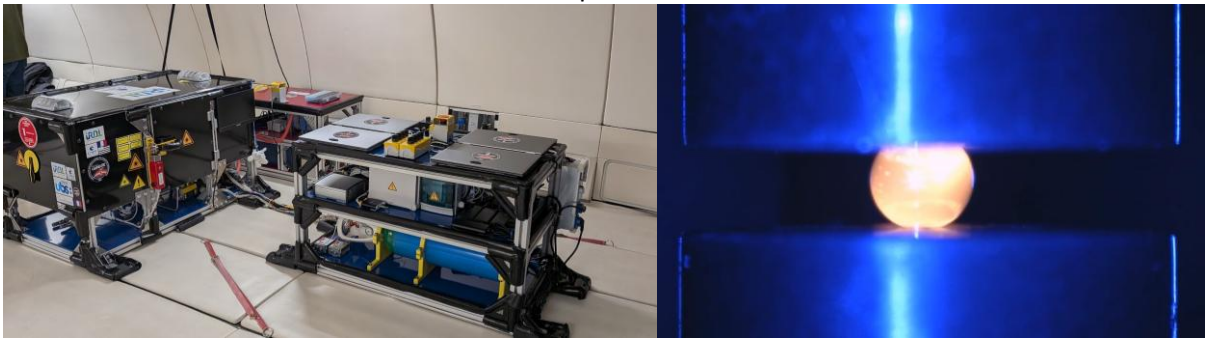


Figure 1 : Vue d'ensemble de l'expérience et vue d'une goutte de fer liquide en microgravité (1600 °C).

La première campagne de vol, réalisée en mars 2026 lors de la campagne CNES VP190_70, avait principalement pour objectif de qualifier le dispositif expérimental et ses différents systèmes en conditions de microgravité. Cette campagne a permis de valider notamment :

- le fonctionnement général de l'expérience et la sécurité en phase de microgravité ;
- la gestion, le contrôle des flux d'argon et la mise sous atmosphère contrôlée de l'échantillon ;
- le chauffage laser et la capacité à fondre un échantillon métallique à haute température ;
- la mesure et le contrôle de la température de l'échantillon ;

- l'acquisition d'images rapides et l'observation de l'échantillon ;

Cette première campagne a ainsi permis de démontrer la faisabilité du concept et d'identifier les améliorations nécessaires pour la stabilisation aérodynamique. Les géométries de buses initialement testées n'ayant pas donné entière satisfaction, leur conception a été revue afin de mieux contrôler la position de l'échantillon et de réduire les interactions avec le flux gazeux. Une deuxième campagne de vols est prévue début octobre 2026, lors de laquelle ces nouvelles géométries seront testées. L'objectif sera cette fois de commencer l'étude de matériaux d'intérêt, avec notamment du fer pur pour la validation de la méthode, puis différentes nuances d'aciers inoxydables.

Résultats

La première campagne de mars 2026 a fourni une première validation expérimentale de l'architecture complète de CarMéLide. Elle a notamment démontré qu'il était possible de mettre en œuvre, en vols paraboliques, un environnement contrôlé permettant de fondre un petit volume de métal par laser, de maîtriser sa température et d'observer l'échantillon pendant les phases de microgravité.
Les essais ont également permis d'identifier les limitations de la première génération de buses de stabilisation et de définir les évolutions de buses de mises en œuvre pour la campagne d'octobre 2026.
Les premières mesures quantitatives de viscosité issues de ces expériences sont attendues dans les prochains mois. Elles constitueront une première étape vers la constitution de données expérimentales sur les propriétés des métaux liquides à haute température, données aujourd'hui encore rares pour de nombreux matériaux. Ces résultats préliminaires ont fait l'objet de plusieurs communications [1-3] dont deux invitées (dont une au sein du DLR à Cologne).

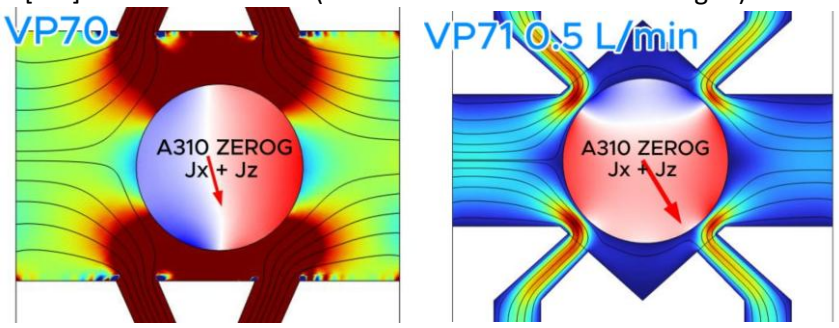


Figure 2 : Principe de la stabilisation aérodynamique et exemples de géométries envisagées.

Perspectives

A l'heure d'écrire ces lignes, la prochaine campagne est en cours de préparation. Cette campagne prévue début octobre 2026 doit permettre de franchir une nouvelle étape en recherchant les conditions de stabilisation permettant de conserver le métal liquide sous contrôle. Les premières mesures de viscosités sont attendues prochainement.
À plus long terme, CarMéLide a vocation à devenir une plateforme expérimentale pour l'étude des matériaux liquides à haute température en microgravité. Au-delà de la viscosité, de la masse volumique et de la tension de surface, le dispositif pourra être adapté à l'étude d'autres phénomènes tels que la solidification, la métallurgie ou la chimie des métaux.

Publications

[1] 12th Int. Conference High Temperature Capillarity, HTC 2026 Cologne, Germany, 4-7 May 26
Surface tension measurements of liquid metals via aerodynamic levitation: Recent results and methods to control evaporation. Mickael Courtois **Invitation & opening keynote**
[2] ECTP 2026 - 23rd European Conference on Thermophysical Properties, June 21 to June 24, Paris 2026. *Experimental and numerical study of liquid metals viscosity. Gravity effects study and microgravity exploration*. Mickael Courtois. **Invited speaker**
[3] ECTP 2026 - 23rd European Conference on Thermophysical Properties, June 21 to 24, Paris 2026
Carmélide: a new microgravity facility for measuring the viscosity of liquid metals at high temperatures
Coline Bourges. **Poster**

4.10 Particle transport via the ratchet effect in a square lattice of pillars
P. Beltrame, **P. Trontin**

Particle transport via the ratchet effect in a square lattice of pillars

Philippe Beltrame[1], Pierre Trontin[2]

[1] EMMAH - INRAE - Avignon Université
[2] LMFA – Université Claude Bernard Lyon 1

Introduction

Cette étude préparatoire consiste en une analyse préliminaire en vue du montage d'une expérience de transport et de tri de particules en apesanteur. Elle porte sur des particules en suspension dans l'air, transportées d'un bassin à un autre à travers une microstructure, tandis que l'air n'effectue que des oscillations. L'effet ratchet, particulièrement visible lorsque le rapport des densités entre la particule et le fluide est élevé, justifie le recours à la microgravité pour éviter la sédimentation des particules pendant l'expérience. L'objectif est donc de mener cette expérience dans le cadre de vols paraboliques afin de simuler l'absence de gravité.

Méthode

La simulation numérique repose sur l'hypothèse d'un écoulement quasi-statique de l'air au sein d'une microstructure composée de piliers. Dans ce régime, la résultante des contraintes de pression et de viscosité s'exprime linéairement en fonction de la vitesse et de la rotation de la particule : elle est donc la combinaison linéaire de trois contributions — l'écoulement autour d'une particule fixe, une particule en translation dans un fluide au repos et une particule en rotation dans un fluide au repos. La simulation s'effectue en deux étapes. D'une part, le champ de forces est calculé par un calcul 3D réalisé avec FreeFEM++, couplé au mailleur Fidelity Pointwise ; ce calcul a nécessité une parallélisation du code. D'autre part, l'équation différentielle ordinaire est intégrée au cours du temps ; une analyse de bifurcations et un suivi des états périodiques sont ensuite menés pour déterminer le domaine d'existence des solutions de transport avec le logiciel AUTO-07p.

Résultats

La première structure étudiée est constituée de piliers répartis dans un réseau carré et séparés d'une longueur *L*. Le rayon des piliers est et deux hauteurs de piliers ont été considérées : *H=0,2L* et *H=0,3L*. Ces choix ont été guidés par les travaux précédents, qui montrent la nécessité d'une structure très confinée afin d'obtenir l'effet ratchet. Deux tailles de particules ont été considérées : *a*=0,1*L* et *a*=0,05*L*. La longueur de la structure est un paramètre du système. Le problème est alors caractérisé par deux nombres adimensionnels : la vitesse adimensionnelle moyenne d'écoulement V et le nombre de Stokes Stk, qui caractérise l'inertie de la particule. Les dynamiques ont été étudiées en fonction de ces deux paramètres, ainsi que d'un troisième paramètre, α, lié à l'asymétrie du pompage.

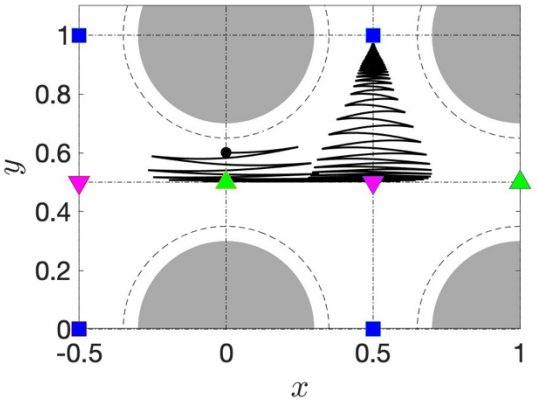


Fig. 1. Trajectoire de la particule (V=1,Stk=1)

Pour des vitesses d'écoulement inférieures à *2L/T*, la particule se confine entre deux piliers, où une zone stagnante est présente (Fig. 1). Pour des valeurs plus grandes de V, la trajectoire de la particule est attirée par l'axe de symétrie y = 0,5. Ainsi, le transport n'est possible que pour des valeurs suffisamment grandes de la vitesse du fluide, et la trajectoire est alors unidimensionnelle.

Dans ce contexte, les solutions de transport par effet ratchet dépendent fortement de l'ordre de grandeur du nombre de Stokes. Pour des nombres de Stokes inférieurs à 1, le seul effet ratchet observé est une dérive lente par intermittence, équivalente à la dérive de phase dans la théorie de la synchronisation. Lorsque cette solution existe, elle constitue un attracteur : pour toute condition initiale proche de l'axe *y = 0,5*, le transport a lieu. Le paramètre d'asymétrie α doit être non nul et est déterminant pour la vitesse de transport (Figure 2a). Dans le plan (Stk, α), les solutions de transport forment des bandes pour les faibles valeurs de Stk ; le domaine d'existence de ces solutions diminue lorsque Stk devient plus grand que l'unité.

En fait, pour des nombres de Stokes de l'ordre de 10 ou plus, il existe une solution de transport synchronisé dans laquelle la vitesse est un multiple de *L/T* (Figure 3a). La vitesse est dite verrouillée (*locked*) : elle ne varie pas lorsqu'on modifie un paramètre, conformément à la théorie de la synchronisation [1]. Cette solution peut toutefois être instable (Figure 3b) : la trajectoire devient alors très sensible à la condition initiale ainsi qu'aux paramètres. Notons que ces solutions ne nécessitent que de très faibles valeurs de l'asymétrie. Cette sensibilité aux paramètres physiques rend toutefois nécessaire une étude fine des dynamiques pour préparer une telle expérience.

Un article est en cours de rédaction sur la synthèse de ces travaux [2].

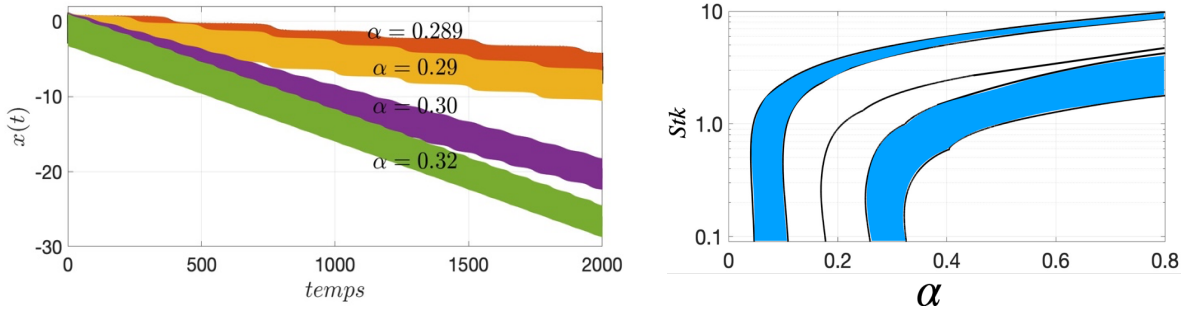


Fig. 2 (a) Évolutions temporelles de la position de la particule pour (Stk = 0.09495 et V=4.725) pour différentes valeurs de α. (b) Domaines d'existence (zones bleues) de la solution de transport intermittent dans le plan (Stk,α) pour *V=4.725*.

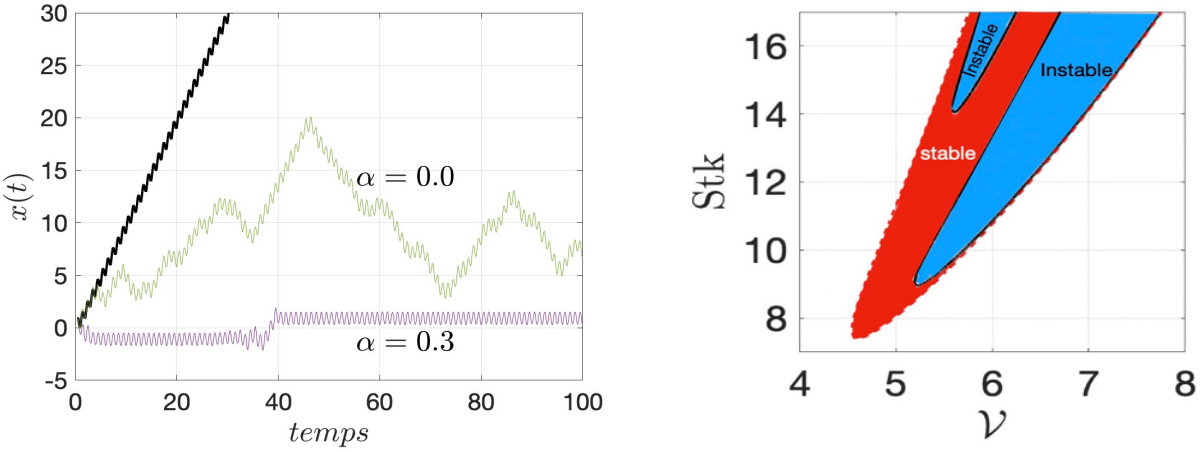


Fig. 3 (a) Évolutions temporelles de la position de la particule sur l'axe y=0.5. Courbe noire : **Transport synchronisé** avec la vitesse c=1 pour Stk=9, V=5 et alpha=0. Courbes en couleurs correspondent à la zone instable (Stk=14 et *V*=6.33) pour deux valeurs α=0 et α=0.3. (b) Domaine d'existence et stabilité de la solution de transport c=1 dans le plan de paramètre *(Stk,V).*

Perspectives

La géométrie carrée a démontré l'existence de solutions de transports. La sensibilité aux paramètres nécessite une étude approfondie des bassins d'attraction des différentes solutions de transport. Une seconde perspective est de considérer une géométrie en quinconce des piliers afin d'éviter qu'il existe des zones de piégeages de la particule. Des calculs en cours ont montré que le transport serait possible. La difficulté rencontrée est le rapprochement de la particule des parois et fait apparaître la nécessite de simuler le contact particule-paroi.

Publications

[1] P. Beltrame and P.Trontin, *Chaos as the Key: Unlocking Selective airborne Microparticle Transport*, **19th Chaos 2026**, 12-15 June, 2026, Crete - Greece

[2] P. Beltrame and P. Trontin, "Simulation of *selective airborne Microparticle Transport via Ratchet effect », preprint.*

4.11 Numerical study of microlayer development
A. Lafontan, A. Urbano, S. Tanguy

Numerical study of microlayer development

Adrien Lafontan[1,2], *Annafederica Urbano*[2], *Sébastien Tanguy*[1]

[1] IMFT, [2] ISAE-Supaéro

Introduction

Boiling plays a critical role in power generation, electronics cooling, and aerospace applications. In cryogenics, boiling is unavoidable and problematic, forcing propellant venting in liquid-propellant rockets to prevent tank rupture ("boil-off"). Despite its importance, boiling remains poorly understood due to its multi-scale nature, spanning millimeter-scale bubble growth, micrometer-scale liquid layers down to nanometer-scale contact line effects.

Experimental [1] and numerical [2] investigations revealed that two regimes can be denoted in nucleate boiling: a contact line regime where the bubble grows spherically and maintain a steady shape, and a micro-layer regime characterized by a faster lateral growth of the bubble with respect to the contact line de-wetting, inducing the deposition of a thin "micro-layer" liquid film (in the order of a few micrometers) and high heat fluxes.

Micro-layer dynamics are not well understood due to a lack of meaningful data since it is a short lived and small scale phenomenon, but it is believed to be a great contributor to bubble growth - estimated up to ~50% for water at atmospheric pressure [3]. Numerical works on micro-layer regime typically use models for the micro-layer, either derived from empirical data or adding an interface heat transfer resistance, using the controversial accommodation coefficient.

Méthode

In this work, the validation of our in-house code DIVA for nucleate boiling in micro-layer regime is performed reproducing the experiments of Bucci [4] and Tecchio [5] without the use of any additional model. The incompressible solver of DIVA is used along with sharp interface numerical methods. Incompressible Navier-Stokes equations are solved, the liquid/vapor interface is tracked using the level-set method and the variable jump across the interface are computed making use of the ghost fluid method.

Résultats

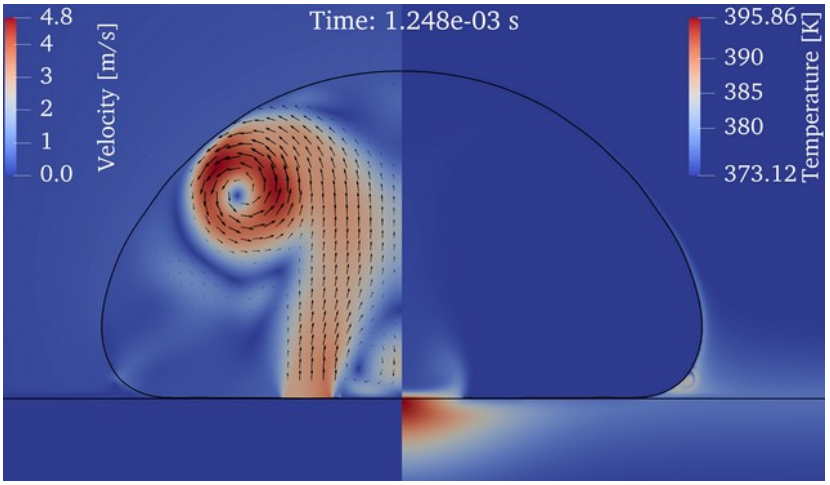


Fig. 1 : DIVA DNS snapshot (Tecchio's experiment) : Velocity field with vectors (left), Temperature field (right)

The two experiments were reproduced with good accuracy using DIVA, see Figures 2 and 3 :

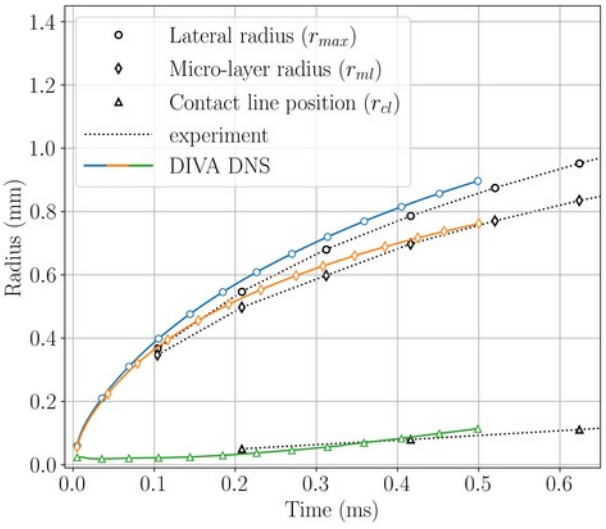


Fig.2 : DIVA DNS compared with Bucci's experiment

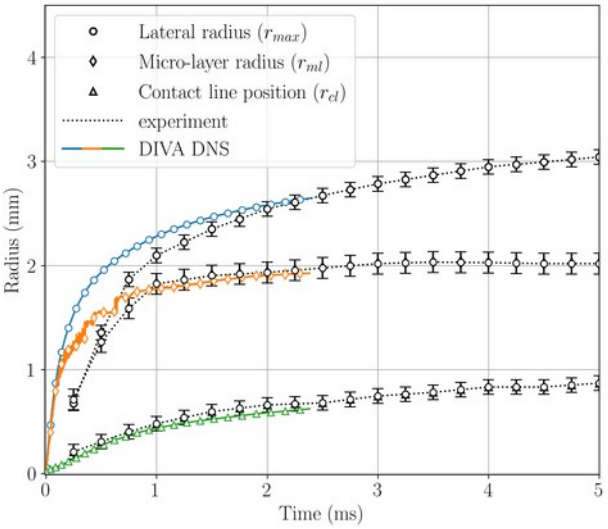


Fig.3 : DIVA DNS compared with Tecchio's experiment

The comparison of the mass flow going through the micro-layer with respect to the mass flow of the whole bubble highlights the important contribution of the micro-layer to bubble growth, from ~50% in Bucci's case up to ~70% in Tecchio's case.

The high heat fluxes and mass flow rates revealed a dominant contribution of the pumping of the solid substrate sensible heat. Finally, mass and enthalpy balances show that lateral liquid advection can be a non-negligible contributor to phase change that needs to be taken into account.

Perspectives

This work allows for a first validation of the DIVA code for nucleate boiling simulations in micro-layer regime. Future studies will focus on the characterization of micro-layer formation and depletion, also measuring the impact of the solid substrate on the results. This study will allow the development of a physical-based micro-layer model for larger scale simulations.

Publications

[1] Fischer, S. et al, On the development of a thin evaporating liquid film at a receding liquid/vapour-interface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 346–356, (2015)

[2] Urbano, A. et al, Direct numerical simulation of nucleate boiling in micro-layer regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer 123*, 1128–1137, (2018)

[3] Han, J. et al, Contribution of wall heat transfer in the transition region between microlayer and macroscopic regions to the growth of a single boiling bubble. *International Journal of Heat and Mass Transfer 235*, 126213. (2024)

[4] Bucci, M., A theoretical and experimental study of vapor bubble dynamics in separate effect pool boiling conditions. *University of Pisa.* (2020)

[5] Tecchio, C. et al, Microlayer evaporation during bubble growth in nucleate boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer 231*, 125860. (2024)

4.12 Confined Drying of a Complex-Fluid Droplet : A Quantitative Interferometric Study under Controlled Humidity
O. Milark, J.-B. Salmon, B. Sobac

Confined Drying of a Complex-Fluid Droplet: A Quantitative Interferometric Study under Controlled Humidity

O. Milark[1], J.-B. Salmon[2], B. Sobac[1]

[1] Université de Pau et des Pays de l'Adour, LFCR, CNRS UMR 5150, Anglet 64600, France
[2] Université de Bordeaux, CRPP, CNRS UMR 5031, Pessac 33600, France

Introduction

Drying of complex fluids is used in many processes ranging from inkjet printing and coatings to microfabrication and energy materials processing. Predicting the drying process requires knowledge of transport phenomena and associated thermodynamic properties that often depend on the exact composition of the fluids, which continuously evolves during drying. Drying in conventional geometries, such as sessile droplets and thin films, further involves complex coupled effects such as contact-line dynamics, interfacial instabilities, and internal flows, while internal concentration fields are difficult to access experimentally.
We therefore propose an experimental framework consisting of confined drying of a 2D droplet in a relative humidity (RH) controlled environment to isolate the mechanisms governing mass transport. In addition, Mach-Zehnder interferometry (MZI) is used to provide simultaneous measurements of the drying kinetics and the evolving internal concentration fields, enabling the characterization of transport and thermodynamic properties during drying.

Method

Confined 2D droplets of different complex fluids are placed in a RH-controlled chamber, and the drying process is observed using MZI [1]. This setup enables well-controlled experiments, with tunable RH in the range of 20-90%. The MZI, shown in Fig. 1 (a), provides measurements of drying kinetics via droplet contour detection and internal concentration fields during evaporation, with a spatial resolution of 3 µm/pixel, a temporal resolution of 1 frame/s and an absolute accuracy of 0.5% volume fraction for the analyzed fluids. An example of the processing of the images captured in the MZI is shown in Fig. 1 (b)-(d). Figure 1 (b) and (c) show the interferogram and the laser-illuminated image of a 2D droplet of the charged colloidal silica dispersion Ludox AS-40 during drying respectively, while (d) shows the postprocessed internal concentration field within the droplet, with the detected contour in red. Complementary bright-field and fluorescence microscopy are used to support the analysis, particularly for visualizing internal flows within the drying droplet.

Results

The approach is applied to pure water, binary water-glycerol mixtures, and aqueous colloidal dispersions. For pure water and water-glycerol, we validate the experimental framework and find good agreement with a quasi-steady isothermal model of diffusion-controlled evaporation, while enabling quantitative measurements of the drying kinetics and internal concentration fields as a function of RH and thus Péclet number. This further allows the characterization of internal mass transport and thermodynamic properties, including concentration-dependent diffusion coefficients and water chemical activity over the full range of volume fractions, with the complete curves obtainable from a single low-RH experiment. The method is finally extended to colloidal dispersions, where it still enables the characterization of drying dynamics, internal concentration fields and concentration-dependent properties, even when the fluid undergoes a phase transition first toward a soft glassy state and at higher volume fractions to a solid state during evaporation.

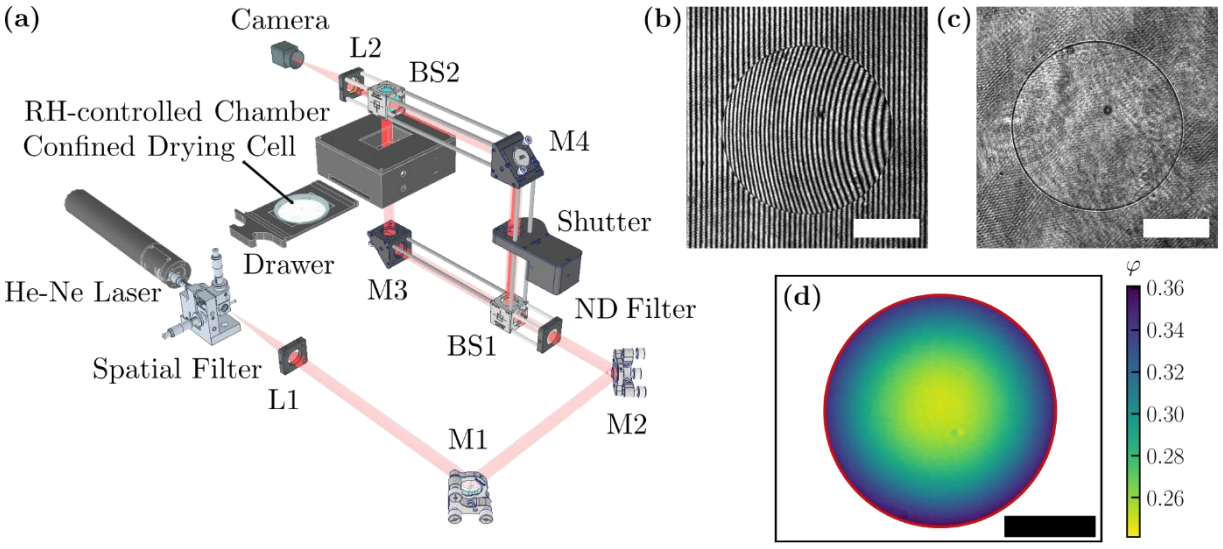


Fig. 1: Experimental setup and image processing. (a) shows the Mach-Zehnder interferometer with the RH-controlled chamber. (b) and (c) show the fringe image and the image with a shutter respectively, while (d) depicts the final concentration field after processing. The scale bars are 1 mm and the images show a droplet of the colloidal dispersions Ludox AS-40 with a starting volume fraction of $\varphi_0 = 0.23$ after drying for 50 min at $\mathrm{RH} = 50\%$ and $T = 23°\mathrm{C}$.

Perspectives

The validated experimental framework enables accurate characterization of the drying of the binary water-glycerol mixture, including the determination of the concentration-dependent mutual diffusion coefficient and water chemical activity over almost the entire range of volume fractions. However, such a comprehensive characterization across the full range of volume fractions is not possible for all complex fluids. While negligible for water-glycerol, in the case of the investigated charged colloidal silica dispersions, buoyancy-driven convection significantly influences internal mass transport at low volume fractions, preventing the reliable extraction of collective diffusion coefficients in this regime. For the colloidal dispersions our measurements are restricted to the range of $\varphi \simeq 0.2 - 0.55$ with the diffusion coefficient varying between $D(\varphi) \simeq 3 - 12\, D_0$, where D_0 is the Stokes-Einstein diffusion coefficient.

Suppressing these convective flows remains challenging: a vertical configuration would break axisymmetry and cause the droplet to flow under gravity, while reducing the gap height would enhance capillary effects and promote contact-line pinning. These limitations motivate experiments under microgravity conditions, such as those conducted in space, where buoyancy-driven convection can be suppressed without further reducing the gap height. Such an approach could extend diffusion coefficient measurements to more dilute regimes and contribute to a more comprehensive understanding of transport phenomena in complex fluids.

Publications

[1] Milark, O., Salmon, J. B., & Sobac, B., Confined drying of a binary liquid mixture droplet: A quantitative interferometric study under humidity control. Physical Review Fluids, 11(3), 033603. (2026)

Session 5

Mousses, émulsions, suspensions, gels

5.1 Hierarchical dynamics and time-length scale superposition in glassy suspensions of ultra-low cross-linked microgels
A. Martinelli, **L. Cipelletti**

Hierarchical dynamics and time-length scale superposition in glassy suspensions of ultra-low crosslinked microgels

A. Martinelli[1], L. Cipelletti[1]
[1] L2C, U. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

Introduction

Understanding how the dynamics of colloidal systems, such as foams, gels, and glasses, controls the material properties, including viscosity, elasticity, and transport mechanisms, is of great interest for both fundamental and applied perspectives. At the same time, external perturbations, such as gravity and mechanical deformations strongly influence the microscopic dynamics of these systems. The close relationship between microscopic dynamics, mechanical response (rheology) and gravity has recently been shown in one of our papers [1]. In the following, we present a new scaling relationship established in preliminary ground experiments on a colloidal glass studied with Colloidal Solids (COLIS) [2], a state-of-the-art light scattering setup developed for the International Space Station (ISS). The system is a suspension of ultra-low cross-linked PNIPAM microgels, for which we show that the microscopic dynamics are hierarchical, in both time and space. We observe the superposition of two relaxation mechanisms: the first is related to the internal degrees of freedoms of the polymer network composing the colloidal particles, while we attribute the second to stress-driven relaxations involving collective rearrangement of the colloidal glass structure. These findings are the first example of such dynamical (de-) coupling in soft colloidal glasses, and we are currently exploring this behavior in the data collected during the 2025 campaign in microgravity.

Methods & Results

We have used Photon Correlation Imaging (PCI), an advanced light scattering method that allows probing complex microscopic dynamics. The observable measured is the $g_2(t)$-1 function (intensity time autocorrelation function), modelled experimentally by a Kohlrausch–Williams–Watts (KWW) relaxation, $g_2(t) - 1 = \mathrm{e}^{-2(t/\tau)^{\beta}}$, with τ the relaxation time and β the shape parameter. Figure 1 shows some results as a function of different length-scales (defined as the inverse of the scattering vector, 1/q). The data are well fitted by the KWW functions, and the relaxation time increases as the scattering vector decreases. This behavior is well documented in literature (particles take longer to move over larger distances), but at the same time the shape parameter evolves as a function of q in an unexpected way. At high q's, β < 1, as often observed in nearly-arrested glass systems where the relaxations become dynamically heterogeneous. However, at lower q's the shape parameter shifts from stretched to compressed (β>1): such correlations are often attributed to the relaxation of internal stresses that modify the microscopic transport properties. The fitted τ and β parameters are shown in Fig. 2 as red diamonds.

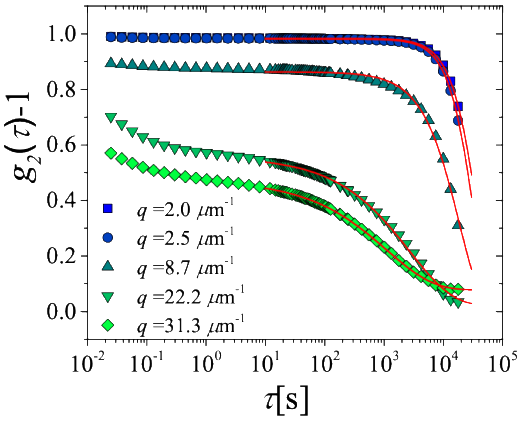


Fig.1: Intensity correlation functions for the microgel glass at φ =1.13, for various scattering vectors as shown by the labels, measured on ground with the COLIS setup. The red lines are best fits with a KWW function, as discussed in the text. Figure from [3].

Given these findings, we assumed that the dynamics transition from spontaneous at short distances to stress-induced at larger length-scales and proposed that the $g_2(t)$-1 function should be modelled by combining two KWW functions, accounting for the two different modes. The model we chose is a simple product of two KWW: the results of the fitting with this model are shown in Fig. 2. Green circles correspond to a 'stretched', slow mode, while blue squares correspond to a 'compressed', fast mode.

As can be seen, our results demonstrate that the two modes are active at all measured scattering vectors but at the lowest and highest q's probed, where only the predominant one (i.e., the one with shorter τ), dictates the dynamics. Even more interestingly, we find that the two processes have very different q dependencies: the stretched one is sub-diffusive with $\tau \sim q^{-4}$, while the compressed one is super-diffusive with $\tau \sim q^{-0.4}$. This strengthens our interpretation of two independent processes. Finally, we explored these unusual dynamics as a function of the sample volume fraction, φ. We find that upon decreasing φ the two relaxation mechanisms are still active, but the crossover length-scale (equivalently, the cross-over q) shifts. Indeed, we find that all the data collapse on a single master curve, Fig.3, when normalizing the scattering vector by q^*, the crossover q-vector, and the relaxation time by τ^*, a trivial factor accounting for the usual slowdown of the dynamics with φ. Thus, the dynamics of this colloidal glass obey a 'time-length scale superposition principle' reminiscent of the time-temperature superposition principle in the mechanical or dielectric response of molecular glass formers. We rationalize this master curve by assuming that two distinct, hierarchical dynamical processes coexist, one implying the relaxation of density fluctuations via the collective motion of microgels (low q region), and the second one involving localized motion of the polymer chains than compose the microgels themselves (high q region). An interesting question remains open: are these hierarchical dynamics still present in microgravity conditions?

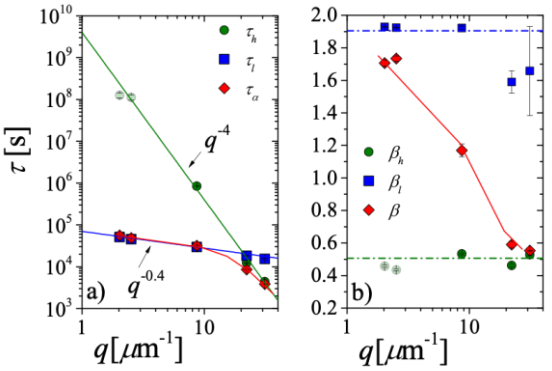


Fig.2: Fitting parameters for a sample at φ = 1.13, obtained using a single KWW function (red diamonds), or the product of two KWW functions (blue squares and green circles). a): relaxation time; b): shape parameter. Figure from [3].

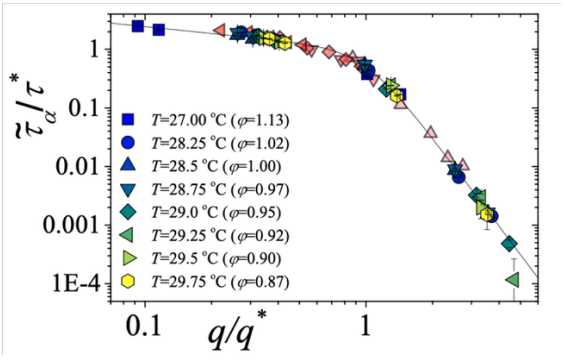


Fig.3: Master curve obtained by plotting the data for different volume fractions using scaled variables. Figure adapted from [3].

Perspectives

We are currently processing the partial data downloaded during the experimental campaign of May 2025 to understand if the hierarchical dynamics are present even in microgravity conditions. Furthermore, in the next months we will *i)* have access to the full data of the ISS experiments (successfully recovered, promised for fall 2026 at latest); *ii)* perform the ground reference tests on the very same samples that flight on the ISS (promised by ESA for summer 2026 but postponed…); *iii)* 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.

Publications

[1] A. Martinelli et al., *Rheology in space - A review of past and present ESA experiments*, Journal of Rheology 70 (3), 597-617 (2026).

[2] A. Martinelli et al., *An advanced light scattering apparatus for investigating soft matter onboard the International Space Station*, npj Microgravity, 10(1), 115 (2024).

[3] A. Martinelli, R. Elancheliyan, A. Scotti, A. V. Petrunin, D. Truzzolillo, and L. Cipelletti, *Hierarchical dynamics and time-length scale superposition in glassy suspensions of ultra-low crosslinked microgels*, The Journal of Chemical Physics 164, 154903 (2026).

5.2 Comment le mûrissement modèle les mousses d'émulsions ou de suspensions granulaires
X. Zhu, S. Cohen-Addad, N. Galvani, B. Saint-Michel, **O. Pitois**

Comment le mûrissement modèle les mousses d'émulsions ou de suspensions granulaires

X. Zhu[1,2], S. Cohen-Addad[1], N. Galvani [1,2,+], B. Saint-Michel [2,], O. Pitois[2]*

[1]Sorbonne Université – Institut des Nanosciences de Paris, UMR 7588 – Paris
[2]Université Gustave Eiffel, Laboratoire Navier, UMR 8205 – Champs-sur-Marne

Introduction

L'un des objectifs de notre projet CNES « mousses de fluides complexes » consiste à étudier le mûrissement de mousses ou dispersions de bulles dans lesquelles la phase continue est constituée d'une émulsion concentrée ou d'une suspension granulaire. Nos travaux se fondent sur un ensemble d'expériences réalisées au sol à l'aide de cellules clinostatiques et dans l'ISS [1,2] dans le cadre du projet MAP de l'ESA « Hydrodynamics of wet foams ». Les travaux présentés ici ont été réalisés dans le cadre des thèses de N. Galvani (CNES/ESA) et de X. Zhu (CNES/CNRS), en collaboration avec B. Saint-Michel. Nous montrons comment les contraintes plastiques qui se développent localement au cours du mûrissement dans une émulsion concentrée moussée, génèrent des protrusions à la surface des bulles. En outre, nous cherchons à déterminer les conditions nécessaires pour bloquer le mûrissement au sein d'une suspension granulaire moussée.

Méthode

Les systèmes étudiés sont : i) une émulsion transparente d'huile silicone dans une solution eau/glycérol/TTAB, ii) une suspension transparente de particules de PMMA ou de silice, dispersées dans un mélange eau/TDE/CAPB. Le moussage est réalisé par la technique de la double seringue, et permet de contrôler la fraction volumique $\phi = vol\ emulsion\ (resp. susepnsion)/vol\ mousse$. Les échantillons sont placés dans une cellule, soit hermétiquement fermée, soit avec contrôle de la pression osmotique qui permet d'accroître la contrainte seuil de l'émulsion, montée sur un clinostat [3]. La surface des échantillons est observée au cours du mûrissement à l'aide d'une caméra (fig. 1a), et les images analysées par un traitement automatisé de façon à mesurer l'évolution temporelle du rayon moyen $\bar{R}$ des bulles, ainsi que la forme du contour des bulles, sur un grand ensemble statistique de bulles [3, 4].

Résultats

Mûrissement d'une émulsion moussée. Dans une dispersion de bulles dans une phase liquide, sous l'effet des pressions capillaires, les petites bulles se dissolvent au profit des grosses, et peu à peu la taille moyenne des bulles croît. Nous observons qu'au sein d'une émulsion moussée la forme des bulles, initialement sphérique, en dévie fortement : des protrusions apparaissent à la surface des bulles (cf. fig. 1b). Nous caractérisons ces changements de morphologie par le rayon de courbure locale de la surface R_p, et par la fréquence des protrusions, m , que nous étudions en fonction des paramètres ϕ et $\bar{R}$, ou le nombre de Bingham caractéristique $\overline{\mathrm{Bi}} = \tau_y \bar{R}/\gamma$ qui compare la contrainte seuil de l'émulsion τ_y à la pression capillaire $\gamma/\bar{R}$. Nous avons observé que la fréquence m, définie comme le nombre de protrusions par bulle, augmente lorsque $\bar{R}$ ou $\overline{\mathrm{Bi}}$ augmente (fig. 1c). Les transferts de gaz s'accompagnent d'écoulement de liquide autour des bulles, ce qui génère des contraintes plastiques résiduelles locales. Lorsque $\bar{R}$ ou τ_y augmentent tel que $\overline{\mathrm{Bi}}$ excède une valeur seuil $\cong 0.06$, les pressions capillaires ne sont plus efficaces pour effacer la mémoire de ces écoulements, et les protrusions s'accumulent. Nous proposons un modèle statistique qui associe la formation des protrusions sur les grosses bulles à la disparition de petites bulles dans leur voisinage [4]. Lorsqu'une

---

[+] adresse actuelle : CNR, Istituto per lo studio dei materiali nanostrutturati, Bologna, Italia

[*] adresse actuelle : Telespazio Belgium S.R.L for the European Space Agency, Noordwijk, the Netherlands

petite bulle se rétracte au voisinage d'une grosse, l'émulsion autour exerce une traction sur la grosse bulle, qui s'oppose à la pression capillaire. En conséquence, la pression à la surface de la bulle varie le long de son contour dû aux variations des contraintes locales dans l'émulsion, et la courbure locale s'ajuste en conséquence. Notre analyse des contraintes en jeu prédit les variations du rayon des protrusions en fonction du rayon des bulles [4].

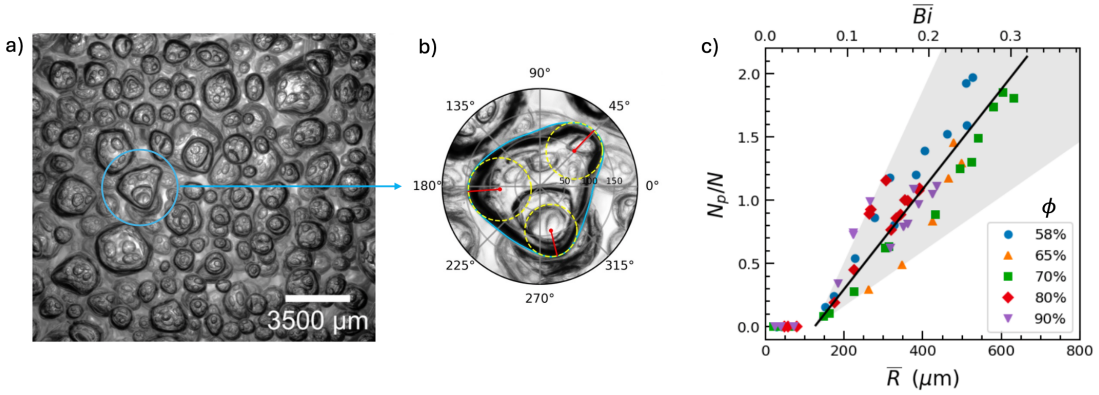


Fig. 1 : a) Photographie d'une dispersion de bulles dans une émulsion concentrée ($\tau_y = 16$ Pa, $\phi = 58\%$,) après une durée de mûrissement de 76h. b) Exemple d'une bulle dont le contour (ligne bleue) présente trois protrusions. La morphologie est caractérisée par le rayon de courbure local R_p du contour, illustré par les cercles pointillés jaunes, de rayon R_p là où la courbure est maximale. c) Fréquence des protrusions, $m = N_p/N$, définie comme le nombre de protrusions par bulle, en fonction du rayon moyen des bulles $\bar{R}$ ou du nombre de Bingham $\overline{\mathrm{Bi}}$, pour différentes fractions liquides ϕ. La droite est prédite par un modèle statistique [4].

Mûrissement d'une suspension granulaire moussée. Nous étudions l'évolution temporelle du rayon moyen des bulles en fonction du rayon des grains (varié dans la gamme entre 2 µm et 20 µm) et de leur fraction volumique dans la suspension φ_p, pour une fraction ϕ =25% fixée. Nos premiers résultats montrent que la croissance du rayon moyen des bulles finit par s'arrêter lorsque $\varphi_p \geq 48\%$. A l'aide du critère sur $\overline{\mathrm{Bi}}$, établi pour l'arrêt du mûrissement des émulsions moussées [3], nous en déduisons la contrainte seuil effective de la suspension confinée dans les interstices entre les bulles.

Perspectives

L'étude de l'arrêt du mûrissement dans les suspensions granulaires moussées sera poursuivie afin d'en déterminer les paramètres de contrôle et identifier les processus sous-jacents. Notamment, nous étudierons l'évolution la structure de ces mousses complexes en termes de distribution de tailles de bulles. Ceci nous amènera à revisiter les distributions de tailles induites par le mûrissement dans les mousses de fluides simples qui en constituent la référence.

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] N. Galvani, S. Cohen-Addad, N. Saint-Michel, O. Pitois, Plasticity Effects in Coarsening Bubbly Yield-Stress Fluids: From Damped Growth to Arrest, Physical Review Fluids, 10, 073604 (2025).

[4] N. Galvani, X. Zhu, S. Cohen-Addad, B. Saint-Michel, O. Pitois, How Coarsening and Plasticity Generate Surface Protrusions on Bubbles, en cours de révision (2026).

5.3 Hydrodynamique des mousses humides
A. Salonen, C. Monteux, E. Rio, D. Langevin

Hydrodynamique des mousses humides

A. Salonen[1], C. Monteux[1], E. Rio[2], D. Langevin[2],

[1] Sciences et ingénierie de la matière molle (SIMM) – ESPCI Paris - PSL
[2] Laboratoire de physique des solides – Université Paris-Saclay

Introduction

Les mousses liquides évoluent sous l'effet du drainage, de la coalescence et du mûrissement, c'est-à-dire du transfert de gaz des petites bulles vers les plus grandes sous l'effet des différences de pression de Laplace. Dans les mousses humides, le drainage gravitaire modifie rapidement la fraction liquide et complique l'étude du mûrissement et de la dynamique des bulles. Les expériences en microgravité réalisées dans le cadre du projet FOAM-C ont permis d'étudier le mûrissement et la dynamique des bulles en l'absence de drainage, notamment au voisinage de la transition entre une mousse constituée de bulles en contact et un liquide bulleux.

Les campagnes expérimentales FOAM-C sont achevées. Une partie des données a déjà été analysée et a donné lieu à des publications, mais une quantité importante reste à exploiter. Les travaux de l'année ont porté sur la poursuite de cette exploitation, en particulier sur les méthodes d'analyse de la dynamique des bulles, ainsi que sur la mise en place d'expériences complémentaires sur Terre.

Méthode

Nous avons travaillé sur les approches de traitement des séquences d'images acquises lors des expériences FOAM-C. Au-delà de l'évolution des tailles, l'objectif est de suivre les bulles au cours du temps pour caractériser leurs déplacements et les réarrangements de la structure (Fig 1 gauche). Cette analyse nécessite de distinguer les changements de taille, les disparitions de bulles et les mouvements de la mousse.

En parallèle, un dispositif d'observation de mousses confinées dans une cellule horizontale de type Hele-Shaw a été mis en place au laboratoire. La cellule est constituée de deux plaques de verre séparées par un espace de 1 – 5 mm, destiné à limiter le drainage. Un montage optique utilisant un prisme fournit des images contrastées des bulles et des régions liquides (Fig. 1 droite). Ce dispositif permet de réaliser des expériences complémentaires avec des formulations de même nature que celles étudiées en microgravité, afin d'explorer d'autres aspects de leur comportement.

Résultats

Les travaux sur les données FOAM-C ont porté sur la réflexion méthodologique nécessaire à l'analyse de la dynamique des bulles en collaboration avec Reinhard Höhler, INSP, Sorbonne Université. Le suivi temporel doit permettre de relier les déplacements et les réarrangements à l'évolution de la structure sous l'effet du mûrissement. La fiabilité de l'identification des bulles d'une image à l'autre et la distinction entre les différents types d'événements constituent des points centraux de ce travail, qui se poursuit sur les données encore inexploitées.

Dans le cadre du stage de master de David Agolli, le dispositif expérimental de mûrissement au laboratoire a été mise en place à SIMM. Des mousses de fractions liquides initiales comprises entre 10 et 30 % ont été suivies au cours du vieillissement. Les observations montrent une augmentation de la taille moyenne des bulles et une diminution de leur nombre, ainsi qu'une évolution de la fraction liquide apparente à la surface. Les mesures de perte de masse indiquent que l'évaporation est trop faible pour expliquer cette évolution ; un drainage résiduel constitue l'explication privilégiée. Ce travail

a permis de préciser les limites du confinement utilisé et fournit une base pour les futures expériences comparatives.

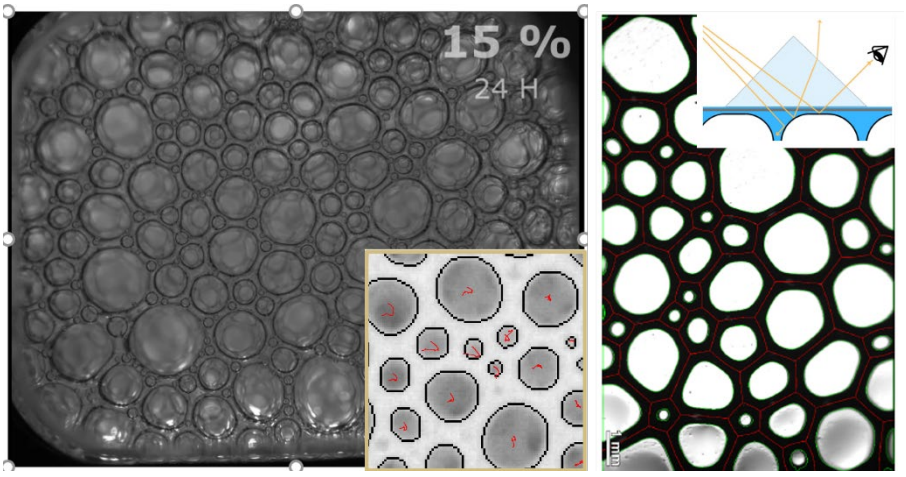


Fig. 1 : À gauche : image d'une mousse obtenue lors des expériences FOAM-C, avec, en encart, illustration des trajectoires des bulles. À droite : image d'une mousse sur Terre, acquise à l'aide d'un prisme, sur laquelle sont superposés les contours issus de la segmentation.

Nous avons également contribué à la rédaction d'une revue consacrée aux expériences de rhéologie et de dynamique de la matière molle menées dans le cadre des programmes de l'ESA [1]. Cette synthèse replace les travaux sur les mousses dans le contexte plus large des apports de la microgravité à l'étude des fluides complexes.

Perspectives

La suite des travaux sera principalement consacrée à la poursuite du traitement des données FOAM-C, avec un accent sur les déplacements et les réarrangements des bulles induits par le mûrissement. Les expériences au sol permettront de compléter cette analyse en explorant certaines questions avec des formulations comparables à celles utilisées dans l'espace. Nous préparons des projets visant à financer une thèse consacrée à la poursuite du traitement des données FOAM-C et à l'élaboration de matériaux moussés pour des applications spatiales.

Publications

[1] A. Martinelli, L. Cristofolini, D. Orsi, F. Ravera, L. Liggieri, A. Salonen, T. Podgorski, C. Minetti, M. Sperl, L. Cipelletti, N. Murdoch, M. Braibanti, S. Vincent-Bonnieu et B. Saint-Michel, « Rheology in Space – A review of past and present ESA experiments » J. Rheol. 70, 597–617 (2026)

5.4 Projet OILFOAM : Mousses d'huile, formation et stabilisation

A.-L. Fameau

Comment le mûrissement modèle les mousses d'émulsions ou de suspensions granulaires

X. Zhu[1,2], S. Cohen-Addad[1], N. Galvani [1,2,+], B. Saint-Michel [2,], O. Pitois[2]*

[1]Sorbonne Université – Institut des Nanosciences de Paris, UMR 7588 – Paris
[2]Université Gustave Eiffel, Laboratoire Navier, UMR 8205 – Champs-sur-Marne

Introduction

L'un des objectifs de notre projet CNES « mousses de fluides complexes » consiste à étudier le mûrissement de mousses ou dispersions de bulles dans lesquelles la phase continue est constituée d'une émulsion concentrée ou d'une suspension granulaire. Nos travaux se fondent sur un ensemble d'expériences réalisées au sol à l'aide de cellules clinostatiques et dans l'ISS [1,2] dans le cadre du projet MAP de l'ESA « Hydrodynamics of wet foams ». Les travaux présentés ici ont été réalisés dans le cadre des thèses de N. Galvani (CNES/ESA) et de X. Zhu (CNES/CNRS), en collaboration avec B. Saint-Michel. Nous montrons comment les contraintes plastiques qui se développent localement au cours du mûrissement dans une émulsion concentrée moussée, génèrent des protrusions à la surface des bulles. En outre, nous cherchons à déterminer les conditions nécessaires pour bloquer le mûrissement au sein d'une suspension granulaire moussée.

Méthode

Les systèmes étudiés sont : i) une émulsion transparente d'huile silicone dans une solution eau/glycérol/TTAB, ii) une suspension transparente de particules de PMMA ou de silice, dispersées dans un mélange eau/TDE/CAPB. Le moussage est réalisé par la technique de la double seringue, et permet de contrôler la fraction volumique $\phi = vol\ emulsion\ (resp. susepnsion)/vol\ mousse$. Les échantillons sont placés dans une cellule, soit hermétiquement fermée, soit avec contrôle de la pression osmotique qui permet d'accroître la contrainte seuil de l'émulsion, montée sur un clinostat [3]. La surface des échantillons est observée au cours du mûrissement à l'aide d'une caméra (fig. 1a), et les images analysées par un traitement automatisé de façon à mesurer l'évolution temporelle du rayon moyen $\bar{R}$ des bulles, ainsi que la forme du contour des bulles, sur un grand ensemble statistique de bulles [3, 4].

Résultats

Mûrissement d'une émulsion moussée. Dans une dispersion de bulles dans une phase liquide, sous l'effet des pressions capillaires, les petites bulles se dissolvent au profit des grosses, et peu à peu la taille moyenne des bulles croît. Nous observons qu'au sein d'une émulsion moussée la forme des bulles, initialement sphérique, en dévie fortement : des protrusions apparaissent à la surface des bulles (cf. fig. 1b). Nous caractérisons ces changements de morphologie par le rayon de courbure locale de la surface R_p, et par la fréquence des protrusions, m , que nous étudions en fonction des paramètres ϕ et $\bar{R}$, ou le nombre de Bingham caractéristique $\overline{\mathrm{Bi}} = \tau_y \bar{R}/\gamma$ qui compare la contrainte seuil de l'émulsion τ_y à la pression capillaire $\gamma/\bar{R}$. Nous avons observé que la fréquence m, définie comme le nombre de protrusions par bulle, augmente lorsque $\bar{R}$ ou $\overline{\mathrm{Bi}}$ augmente (fig. 1c). Les transferts de gaz s'accompagnent d'écoulement de liquide autour des bulles, ce qui génère des contraintes plastiques résiduelles locales. Lorsque $\bar{R}$ ou τ_y augmentent tel que $\overline{\mathrm{Bi}}$ excède une valeur seuil $\cong 0.06$, les pressions capillaires ne sont plus efficaces pour effacer la mémoire de ces écoulements, et les protrusions s'accumulent. Nous proposons un modèle statistique qui associe la formation des protrusions sur les grosses bulles à la disparition de petites bulles dans leur voisinage [4]. Lorsqu'une

---

[+] adresse actuelle : CNR, Istituto per lo studio dei materiali nanostrutturati, Bologna, Italia

[*] adresse actuelle : Telespazio Belgium S.R.L for the European Space Agency, Noordwijk, the Netherlands

petite bulle se rétracte au voisinage d'une grosse, l'émulsion autour exerce une traction sur la grosse bulle, qui s'oppose à la pression capillaire. En conséquence, la pression à la surface de la bulle varie le long de son contour dû aux variations des contraintes locales dans l'émulsion, et la courbure locale s'ajuste en conséquence. Notre analyse des contraintes en jeu prédit les variations du rayon des protrusions en fonction du rayon des bulles [4].

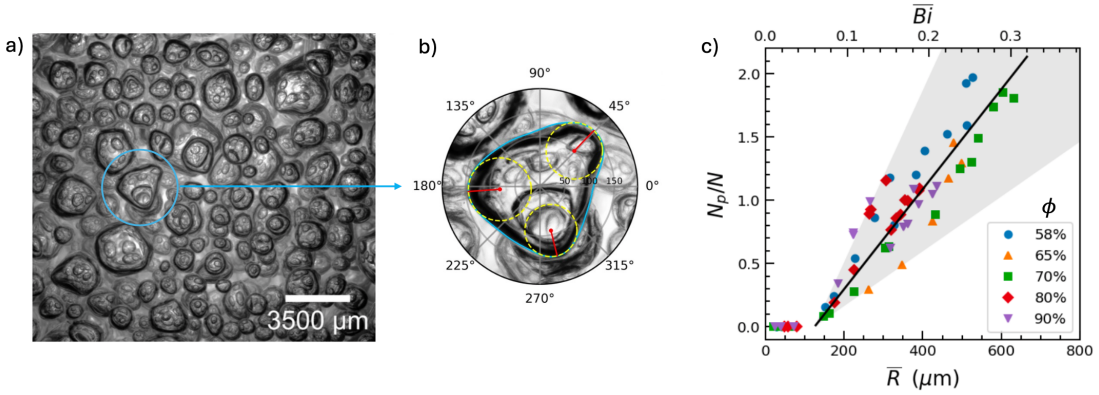


Fig. 1 : a) Photographie d'une dispersion de bulles dans une émulsion concentrée ($\tau_y = 16$ Pa, $\phi = 58\%$,) après une durée de mûrissement de 76h. b) Exemple d'une bulle dont le contour (ligne bleue) présente trois protrusions. La morphologie est caractérisée par le rayon de courbure local R_p du contour, illustré par les cercles pointillés jaunes, de rayon R_p là où la courbure est maximale. c) Fréquence des protrusions, $m = N_p/N$, définie comme le nombre de protrusions par bulle, en fonction du rayon moyen des bulles $\bar{R}$ ou du nombre de Bingham $\overline{\mathrm{Bi}}$, pour différentes fractions liquides ϕ. La droite est prédite par un modèle statistique [4].

Mûrissement d'une suspension granulaire moussée. Nous étudions l'évolution temporelle du rayon moyen des bulles en fonction du rayon des grains (varié dans la gamme entre 2 µm et 20 µm) et de leur fraction volumique dans la suspension φ_p, pour une fraction ϕ =25% fixée. Nos premiers résultats montrent que la croissance du rayon moyen des bulles finit par s'arrêter lorsque $\varphi_p \geq 48\%$. A l'aide du critère sur $\overline{\mathrm{Bi}}$, établi pour l'arrêt du mûrissement des émulsions moussées [3], nous en déduisons la contrainte seuil effective de la suspension confinée dans les interstices entre les bulles.

Perspectives

L'étude de l'arrêt du mûrissement dans les suspensions granulaires moussées sera poursuivie afin d'en déterminer les paramètres de contrôle et identifier les processus sous-jacents. Notamment, nous étudierons l'évolution la structure de ces mousses complexes en termes de distribution de tailles de bulles. Ceci nous amènera à revisiter les distributions de tailles induites par le mûrissement dans les mousses de fluides simples qui en constituent la référence.

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] N. Galvani, S. Cohen-Addad, N. Saint-Michel, O. Pitois, Plasticity Effects in Coarsening Bubbly Yield-Stress Fluids: From Damped Growth to Arrest, Physical Review Fluids, 10, 073604 (2025).

[4] N. Galvani, X. Zhu, S. Cohen-Addad, B. Saint-Michel, O. Pitois, How Coarsening and Plasticity Generate Surface Protrusions on Bubbles, en cours de révision (2026).

Session 6

Milieu granulaires, objets biomimétiques

6.1 Microstructure and density profile of concentrated suspensions of magnetic particles submitted to a shear flow
G. Bossis, Y. Grasselli, P. Khuzir, O. Volkova

Microstructure and density profile of concentrated suspensions of magnetic particles submitted to a shear flow

Georges Bossis[1], Yan Grasselli[2], Pavel Khuzir[1], Olga Volkova[1]
[1]InPhyNi, UMR 7010, CNRS,Université Côte d'Azur,France
[2]SKEMA 60 rue Dostoievski, CS30085, 06902 Sophia Antipolis, France

Introduction

Les suspensions de particules magnétiques de taille voisine du micron connues sous le terme de fluides magnétorhéologiques sont utilisées dans de nombreuses applications où on cherche à contrôler rapidement (de l'ordre de la milliseconde), par application d'un champ magnétique, la transmission de force ou de couple. En utilisant de fortes concentrations volumiques en particules (Φ>0.6) à l'aide de surfactants spécifiques, nous avons montré qu'il suffisait d'un faible champ magnétique pour provoquer le blocage de l'écoulement et accroître ainsi considérablement l'amplitude de la modulation de viscosité de ces fluides (*G. Bossis et al., Applied Physics. Letters, 2016*). 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. Une solution consiste à disperser une petite proportion de particules magnétiques au sein de particules non magnétiques moins denses telles que du carbonate de calcium. L'écoulement de ce type de mélange bi composant à forte concentration présente un phénomène de blocage au-delà d'une certaine contrainte critique que nous avons étudié dans des écoulements de jets[1] et en rhéométrie rotationnelle (G.Bossis et al Rheologica Acta,2023). Outre la sédimentation, la migration différentielle sous l'effet du cisaillement peut provoquer des inhomogénéités spatiales entre les 2 types de particule. Pour ces raisons il est important de pouvoir mesurer la répartition spatiale des particules magnétiques au sein de la suspension.

Méthode

Pour avoir des informations sur les phénomènes de sédimentation et/ou d'agrégation des particules nous avons mis au point un dispositif basé sur la mesure de la perméabilité magnétique de tranches de fluide contenu entre deux cylindres, à l'aide d'une bobine assujettie à un mouvement de translation vertical (cf fig.1). Ce dispositif installé sur un rhéomètre a été décrit plus amplement dans notre rapport précédent. Comme la perméabilité magnétique de la suspension est reliée à sa concentration volumique on a ainsi accès à l'évolution du profil vertical de concentration lors de la sédimentation et également à la redispersion de la suspension sous l'effet d'un cisaillement.

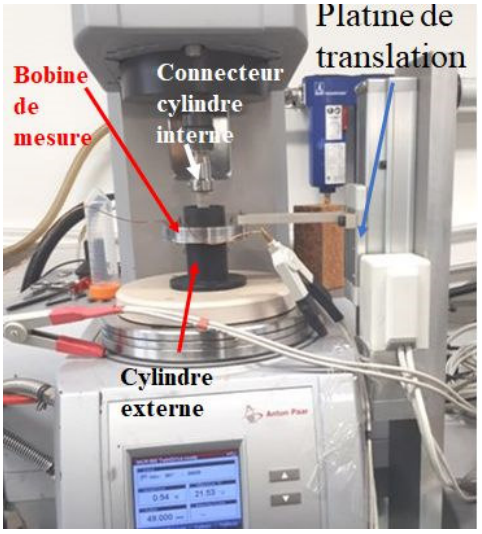


Fig.1 : Mesure de profil d'inductance

Résultats

La figure 2 représente l'évolution au cours du temps de la sédimentation d'une suspension de particules magnétiques (d~1μ) contenue entre 2 cylindres. On notera que la sédimentation n'est stabilisée qu'au bout de 8 jours. La comparaison avec la théorie nécessite l'adaptation du modèle de sédimentation de Kynch au cas d'une sédimentation entre 2 parois cylindriques. La sédimentation est ici réalisée en l'absence de cisaillement et l'inductance donne , après étalonnage, la concentration de la suspension en fonction de la position de la bobine de mesure. Par contre si on laisse la bobine en position fixe , par exemple à la moitié de la hauteur de la suspension, et que l'on enregistre l'inductance en présence d'un cisaillement on s'aperçoit que cette mesure varie

sur des temps courts en fonction de la valeur du taux de cisaillement (Fig.3). On sait que la perméabilité magnétique augmente en présence d'agrégats à cause de l'aimantation induite par le rapprochement entre les surfaces des particules. C'est ce phénomène qui explique l'augmentation d'inductance dans le domaine élastique (cf. Fig.3) où les déformations avant le début de l'écoulement rapprochent les particules sur l'axe de compression. Par la suite l'inductance diminue en corrélation avec la destruction de ces agrégats par le cisaillement. Après l'arrêt du cisaillement les particules se réagrègent en quelques secondes. Les changements de structuration et/ou de gaps entre particules jouent un rôle important dans la compréhension des transitions de blocage en cisaillement alternatif que nous avons récemment décrites [2].

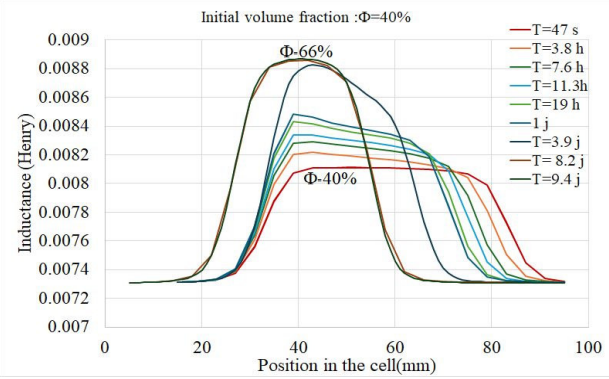


Fig.2 Evolution temporelle du profil de densité dans la cellule durant la sédimentation

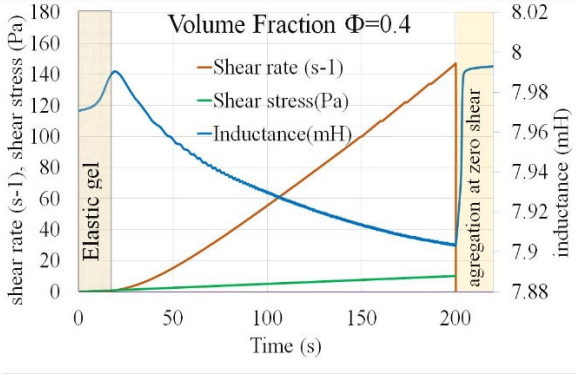


Fig.3 Inductance en fonction du taux de cisaillement pour une position fixe de la bobine

Sur la figure 4 est reportée la contrainte (en bleu) le taux de cisaillement (en rouge) et l'inductance (en vert) pour une demi période d'un cisaillement alternatif de période 0.01Hz. La contrainte nulle correspond au retournement de la direction du cisaillement et l'aplatissement du cisaillement au domaine solide élastique où la contrainte est inférieure à la contrainte seuil. En cisaillement continu ce domaine est caractérisé par une augmentation continue de l'inductance (cf. Fig.3) jusqu'à ce que la contrainte dépasse la contrainte seuil. Néanmoins, dans le cas d'un cisaillement alternatif, la formation de ces agrégats est détruite lors du changement de direction avant de se reformer dans l'autre direction ce qui provoque cette dépression soudaine de l'inductance au milieu du domaine correspondant à la réagrégation. Ensuite on retrouve la baisse de l'inductance liée à la destruction des agrégats par l'augmentation du taux de cisaillement. On voit donc que de nouvelles informations à la fois sur la structuration et la concentration des particules peuvent être obtenues par la mesure de l'inductance de suspensions de particules magnétiques . Ces résultats sont en cours de rédaction.

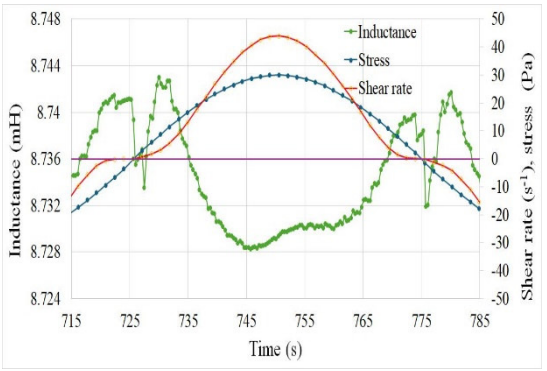


Fig.4 Effet du retournement des agrégats sur l''inductance (aux deux extrémités de la courbe verte) lors d'un cisaillement alternatif

Publications

[1]M. Meloussi, S. Touba Lo, O. Volkova, G. Bossis, and P. Kuzhir Flow-induced aggregation and structuring in fiber-reinforced calcium carbonate suspensions:from rotational shear to pressure-driven capillary flow in discontinuous shear thickening regime. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*,**235**, pp5011–5023 (2026)

[2]O.Volkova,Y. Grasselli,G.Bossis Viscoelastic behavior at high volume fraction of magnetorheological suspensions in the presence of discontinuous shear thickening *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*,**37** (17),pp1079-1090 (2026)

6.2 Investigation of the Transient Rheology of Blood in Microgravity with the KRABS Experiment
L. Gatineau, M. Puthumana-Melepattu, C. De Loubens, G. Maîtrejean, B. Saint-Michel, C. Iorio, C. Minetti, **T. Podgorski**

Investigation of the Transient Rheology of Blood in Microgravity with the KRABS Experiment

L. Gatineau[1], *M. Puthumana-Melepattu*[1], *C. De Loubens*[1], *G. Maîtrejean*[1], *B. Saint-Michel*[2], *C. Iorio*[3], *C. Minetti*[3] *et T. Podgorski*[1]

[1] Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LRP, F-38000 Grenoble, France
[2] European Space Agency / Telespazio Belgium S.R.L
[3] CREST, Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgique

Le sang est un fluide complexe dont la rhéologie est gouvernée par la déformabilité et l'agrégation des globules rouges (GR), notamment dans des régimes de faible cisaillement (1–50 s^{-1}) représentatifs des phases de stagnation observées *in vivo* en vol spatial (ex. : stagnation et reflux dans la veine jugulaire interne). Au sol, la sédimentation rapide des GR perturbe l'étude de ces régimes. Le projet KRABS (*Kinetics of Red cell Aggregation and Blood rheology and Structure*) vise à lever cet artefact via des expériences en microgravité, combinant microfluidique, mesures rhéologiques et caractérisation structurale en écoulement transitoire.

Après des vols paraboliques préparatoires et premières expériences en 2023–2025, nous avons testé et validé le module expérimental développé par SSC/Lambda-X pour la fusée sonde **S1X5-MASER 17** (livré fin 2025, *Science Verification Test*, résolution d'une sous-performance du système de diffusion de lumière, et ajustement des protocoles et réglages).

Le lancement de S1X5-MASER 17 (31 mai 2026) a confirmé un fonctionnement nominal de tous les sous-systèmes, avec acquisition de données de bonne qualité sur l'ensemble des séquences expérimentales (mesures de pression, débit, diffusion de lumière, microscopie, microscopie holographique).

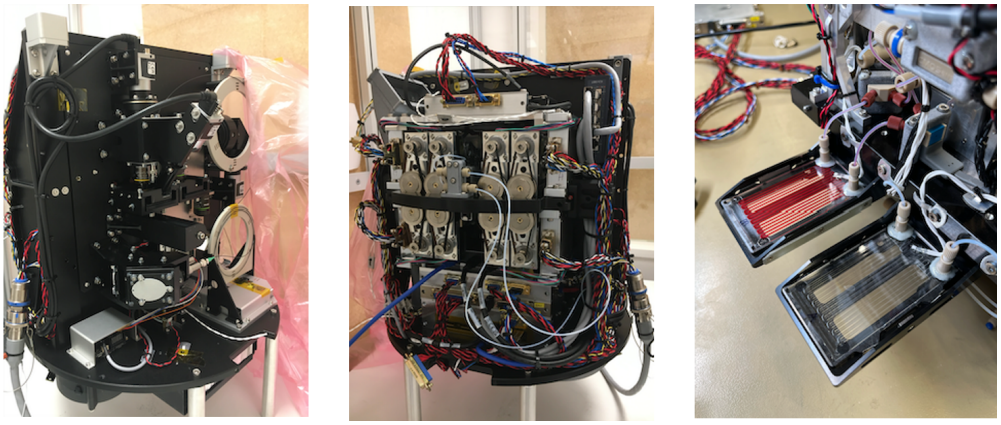


Fig. 1 : Module KRABS développé pour MASER 17. (SSC, Lambda-X). (a) côté instrumentation optique (microscope, diffusion de lumière, microscopie holographique) ; (b) côté fluidique (motorisation des pousse-seringues) ; (c) vue partielle de la Late Access Unit incluant les deux canaux fluidiques (haut et bas hématocrite)

Une première analyse des séquences de débit transitoire enregistrées en vol révèle une agrégation non négligeable dans des gammes de cisaillement faibles à modérées (1–50 s^{-1}) et une hystérésis rhéologique marquée (thixotropie) lors des cycles de cisaillement croissant/décroissant sur des plages caractéristiques des variations physiologiques observées en vol spatial. Cela se manifeste par des temps caractéristiques de variation de viscosité et de diffusion de lumière (liés à la structuration des agrégats) qui sont significativement différents de ceux mesurés au sol et qui en phase de ralentissement d'écoulement (agrégation) varient de τ_a = 2 à 8 s avec une dépendance nette à la composition du plasma tandis en phase d'augmentation de débit (désagrégation) la réponse est très rapide ($\tau_d \ll 1$ s). Lors des cycles de variation de débit, la viscosité apparente peut varier d'un facteur 2 à 3 suivant la concentration du plasma.

Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle les variations rhéologiques liées à l'agrégation sont susceptible d'induire ou de renforcer les phénomènes de stagnation veineuse en vol spatial (Marshall-Goebel et al., 2019) via des mécanismes d'instabilité dans les réseaux veineux.

En parallèle les études au laboratoire se sont poursuivies lors de 4 stages de niveau M1 ou M2 visant d'une part à acquérir de nouveaux résultats en microfluidique sur la stabilité d'agrégats en écoulement égationnel et dans les bifurcations et l'influence de l'agrégation sur la dynamique des GR en réseau de canaux, et d'autre part à préparer les évolutions techniques de l'expérience KRABS.

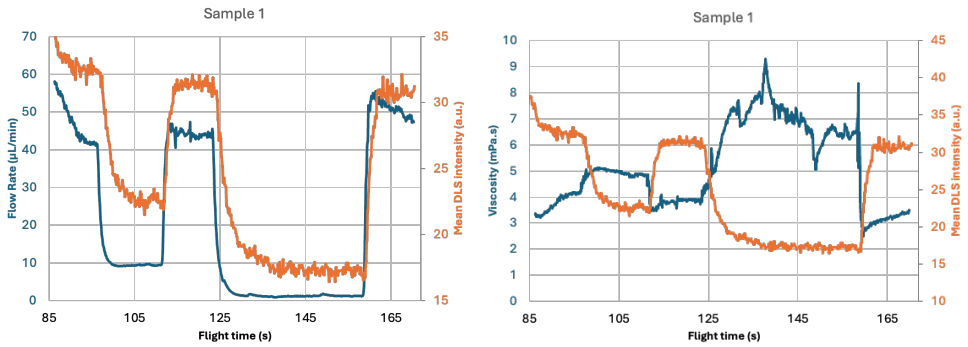


Fig. 2 : (a) Comparaison de la séquence de débit mesuré et d'intensité rétrodiffusée pour l'échantillon n°1 (Ht 45 %, Dextran 70 kDa 3 g/dL).(b) Évolution temporelle de l'intensité rétrodiffusée et de la viscosité, montrant des temps caractéristiques de quelques secondes en agrégation, <<1s en désagrégation.

Perspectives

L'analyse poussée des données MASER 17 est en cours en collaboration avec l'ULB Bruxelles , avec en particulier l'extraction de paramètres cinétiques d'agrégation/désagrégation à partir des données de diffusion de lumière (branche haut hématocrite de l'expérience) l'extraction de paramètres structuraux (tailles caractéristiques d'agrégats ou d'hétérogénéités de la suspension de globules rouges), ainsi que l'analyse des données des données de microscopie holographique (branche bas hématocrite de l'expérience) qui fournira des informations sur la stabilité et la dynamique d'agrégats individuels.
Sur le plan expérimental, les évolutions du dispositif KRABS sont en préparation pour les vols paraboliques CNES (mars 2027), avec un contrôle par pression imposée permettant d'étudier des séquences d'écoulement plus complexes et réalistes (ex. : écoulements pulsés). Sur le plan théorique, ces résultats alimenteront le développement de modèles rhéologiques thixotropes et la modélisation d'instabilités/multistabilité d'écoulement dans des réseaux de canaux qui pourront notamment reprendre les caractéristiques du réseau veineux céphalo-cervical, afin d'interpréter la stagnation dans la veine jugulaire interne observée en vol spatial.

Publications

[1] 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, *Journal of Rheology* 70, 597-617 (2026)

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

[3] 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).

6.3 Circulation du Sang et Motilité Cellulaire
M. Jin, M. Bendaoud, T. Kahali, A. Farutin, L. Bureau, W. Schmidt, D. Tsvirkun, **C. Misbah**

Circulation du Sang et Motilité Cellulaire

Min Jin, Mohammed Bendaoud, Tanoy Kahali, 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) dans des situations pathologiques. Nous avons également étudié la circulation des GR dans le cas de sphérocytose. Nous avons analysé, théoriquement, la motilité cellulaire en incluant l'effet de la déformation de la cellule et avons découvert un large éventail de trajectoires, avec le même modèle, couvrant ainsi toutes les trajectoires observées expérimentalement sur les cellules mammifères.

Résultats

Agrégation de GR suite à l'adjonction d'enzymes : *nous avons analysé sous flux hydrodynamique l'agrégation de GR soumise à une enzyme (neuraminidase), connue pour dégrader le glycocalyx des GR, comme cela arrive dans des pathologies (comme le diabète), ou suite à l'effet de stress oxydant en microgravité* **[H.P. Nguyen et al. The effects of real and simulated microgravity on cellular mitochondrial function, NPJ Microgravity, 7, 44 (2021)].** Nous observons une forte augmentation de la taille des aggrégats par rapport aux GR non traités par l'enzyme (voir Fig. 1). Nous avons analysé en détail la statistique des agrégats.

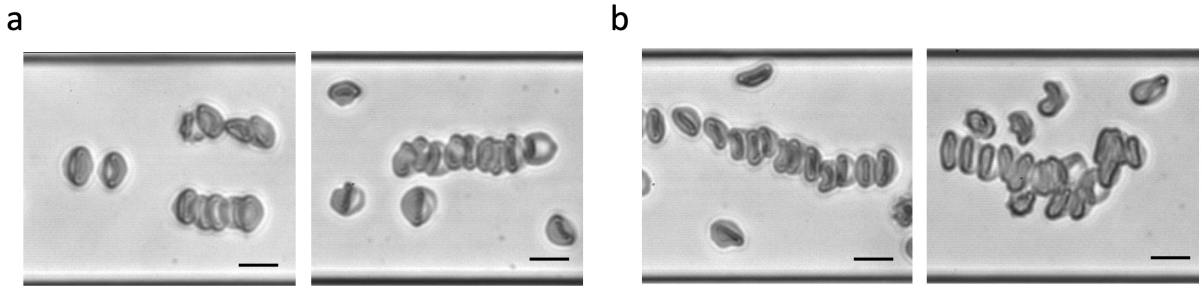


Figure 1 : Images microscopiques représentatives des morphologies des agrégats de globules rouges (GR) dans des conditions d'écoulement, au sein d'un microcanal de 45 µm de large, pour une contrainte de cisaillement à la paroi de τ = 0,40 Pa. Sens de l'écoulement : de gauche à droite ; barre d'échelle : 10 µm. (a) GR non traités (0 U/L de Neuraminidase=NA). (b) GR traités à la NA (100 U/L).

Analyse des agrégats de GR atteints de sphérocytose: La sphérocytose héréditaire est une maladie génétique du sang qui modifie la forme et la fragilité des GR. Au lieu d'avoir leur forme normale de disque biconcave (creux au centre, comme un donut sans trou), les globules rouges deviennent **ronds et sphériques**. On les appelle des **sphérocytes**. Typiquement, in vivo, on trouve une proportion de 10 à 20 % de GR qui ont la forme sphérocyte. Nous avons (i) analysé le flux sanguin quand toutes les cellules sont sphérocytes et avons trouvé une chute du flux sanguin pouvant atteindre 40% par rapport au cas normal. (ii) Nous avons considéré le cas réaliste d'une suspension hétérogène, et avons trouvé qu'une proportion de 10 à 30 % de sphérocytes fait chuter encore plus le flux sanguin par rapport à une solution homogène de 100% de sphérocytes. Nous avons donné des arguments physiques de base pour expliquer ce phénomène.

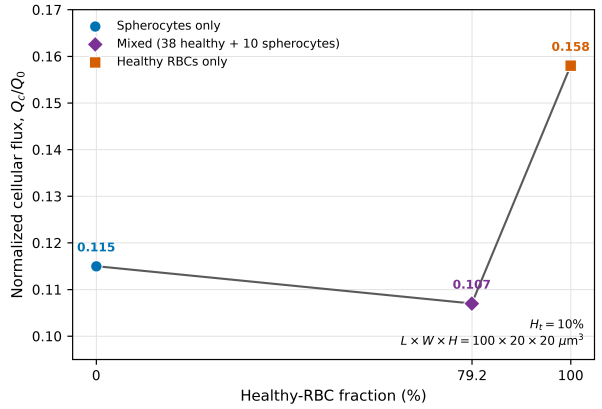


Figure 2: flux de GR Qc (normalisé par le flux en absence de cellules, Q0) en fonction de la proportion de sphérocytes. On observe que pour 10% de spherocytes le flux est encore plus faible que lorsque toute la suspension est composée de sphérocytes.

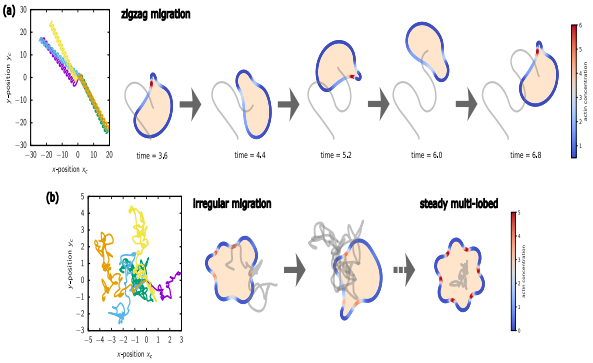


Figure3 : différents types de trajectoires

Motilité Cellulaire : Nous avions montré en 2025 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. Nous avons poursuivi nos études en permettant à la cellule de se déformer librement. Nous découvrons une grande richesse de mouvements. Outre les trajectoires linéaires et circulaires, on observe des états caractérisés par des protrusions hautement dynamiques — entraînant une migration en zigzag accompagnée de déformations oscillatoires de la forme et de trajectoires irrégulières (chaotiques) — ainsi que des cellules non migratoires présentant une forme déformée. Une telle diversité de mouvements est également constatée, au cours d'expériences, chez de nombreuses cellules mobiles (Figure 3).

Perspectives

Nous étudierons systématiquement l'interaction GR et cellules endothéliales et analysons les conditions d'occlusions vasculaire. Nous analysons l'effet du diabète sur l'agrégation cellulaire.

Publications

1) Z. Gou, A. Farutin, C. Misbah, Dynamics of periodic red blood cell suspensions in confined Poiseuille flows, Phys. Rev. Fluids, Septembre (2026).
2) M. Bendaoud,…, C. Misbah, Red blood cell positional history, sphericity, and network architecture influence lingering and partitioning, Biophys. J. Septembre (2026)
3) M. Jin, D. Tsvirkun, C. Misbah Neuraminidase-Mediated Desialylation Modulates Red Blood Cell Aggregation, Biophys. J., Octobre (2026) accepté
4) W. Schmidt, C. Misbah, A. Farutin, Amoeboid cell migration and shape dynamics driven by actin polymerization, Octobre (2026) accepté
5) A. Farutin ….C. Misbah, Towards a universal law for blood flow, Phys. Rev. Lett. (en révision)
6) S. Laha, A. Nayak, A. Farutin, S. Chakraborty, C. Misbah, When Blood Parts Ways: Phase Separation in Microstructured Environments ; Phys. Rev. Lett. (en révision).
7) M. Bendaoud, …, C. Misbah, Effects of red-blood-cell morphological heterogeneity on microchannel flow in spherocytosis, Phys. Rev. Fluids (en révison)

6.4 La margination des cellules sanguines dans la microcirculation
M. Abbasi, H. Klein, **M. Leonetti**

La margination des cellules sanguines dans la microcirculation

M. Abbasi[1], H. Klein[2], M. Leonetti[1]

[1] Aix Marseille Univ, CNRS, CINaM, Turing Centre for Living Systems, Marseille, France
[2] Aix Marseille Univ, CNRS, CINaM, Marseille, France

Introduction

Dans les petits vaisseaux sanguins (microcirculation), les globules rouges (GRs) –des cellules très déformables– interagissent avec les autres cellules (plaquettes et globules blancs) plus rigides et favorisant une organisation radiale hétérogène : un cœur riche en GR et une couche de la paroi appauvrie en GR (CFL) mais riche en cellule moins déformable comme les plaquettes et les globules blancs. Ce phénomène appelé la margination reste aujourd'hui mal compris et ce par manque de données expérimentales. Il constitue est une étape précoce de la réponse immunitaire, ainsi que la cascade de réactions plaquettaires déclenchée lors d'une lésion vasculaire. Ce phénomène apparaît comme une ségrégation induite par les interaction hydrodynamique (Fig,1-a) au sein d'une suspension binaire. Cette ségrégation dépend notamment de la concentration en GR (Hématocrite), du cisaillement, de la déformabilité cellulaire, de la géométrie du réseau vasculaire et de l'histoire des bifurcations. Comprendre ces couplages est pertinent pour la microcirculation et le transport cellulaire.

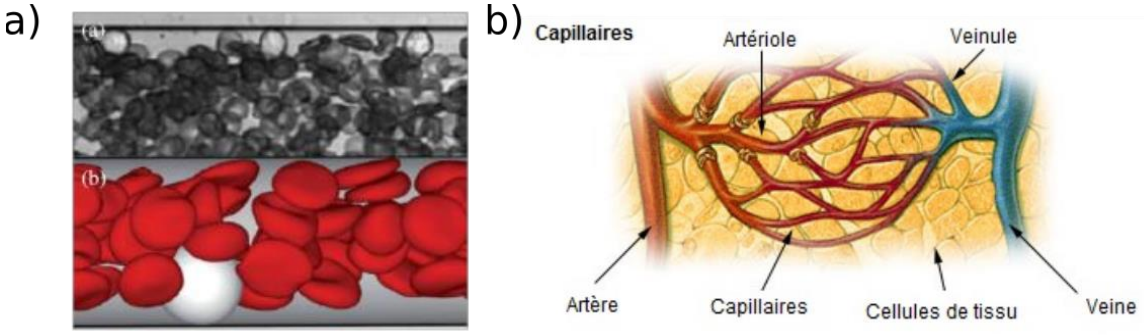


Figure 1: : Gauche – (a) expérience en quasi-2D et (b) simulation d'une suspension de GRs souples (rouge) et de GBs (blanc). Ceux-ci se localisent à la paroi. Droite - schéma typique d'un réseau vasculaire. Le sang s'écoule des artères vers les veines. A noter que les échanges avec l'environnement varient 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 B. Pourquoi ? La réponse à ce problème est inconnue.

Dans ce problème, la géométrie transversale des vaisseaux est importante parce qu'elle modifie les zones de confinement, les gradients de vitesse et les régions de courbure. Dans un réseau réel, la distribution n'est donc pas déterminée seulement par une vitesse moyenne ou par la concentration globale de GRs : elle dépend aussi de la manière dont les flux se séparent aux bifurcations et se réunissent aux confluences. Ces considérations motivent deux approches complémentaires dans nos travaux de recherches. Les expériences en microfluidique pour examiner le transport de particule rigides dans un réseau ramifié lorsqu'on varie l'hématocrite et la différence de pression. Les

simulations numériques pour isoler l'effet de la forme de la section et de la déformation des GR sur la margination de particules discoïdales représentant les plaquettes.

En microgravité, la réduction du gradient hydrostatique tête-pieds entraîne une redistribution des fluides corporels vers le thorax et la tête, modifiant les pressions veineuses, la pression transmurale et le retour veineux. Ces changements peuvent affecter la géométrie des vaisseaux souples et, par conséquent, les profils de vitesse, les contraintes hydrodynamiques et les interactions entre cellules sanguines et paroi, notamment lors de la margination des leucocytes et des plaquettes. Étudier l'influence de la géométrie vasculaire sur ces phénomènes permet ainsi d'explorer les mécanismes potentiellement affectés par les adaptations cardiovasculaires en microgravité, sans supposer une déformation uniforme du réseau vasculaire, dont la réponse dépend des propriétés mécaniques et des régulations propres à chaque segment.

Les observations en vol spatial révèlent des réponses vasculaires variables selon le segment vasculaire et les conditions expérimentales. Certaines études rapportent une augmentation du diamètre carotidien, tandis que d'autres montrent des réponses différentes. Les données relatives aux veines restent limitées, malgré des observations de distension et d'altération du flux. L'influence des variations géométriques sur les écoulements sanguins constitue ainsi une question pertinente à explorer.

Le vol parabolique offre des phases de microgravité de courte durée (environ 20 à 22 secondes), encadrées par des phases d'hypergravité. Des mesures hémodynamiques et de la microcirculation sublinguale y ont déjà été réalisées par imagerie optique. Ces contraintes temporelles motivent le développement de systèmes d'imagerie rapides et compacts. Le dispositif microfluidique et le contraste particule–globule rouge (GR) étudiés ici pourraient contribuer au suivi de suspensions denses dans ces conditions.

Le volet numérique étudie l'effet d'une section prescrite, circulaire ou elliptique, caractérisée par son excentricité (e), sur les écoulements en fonction du nombre capillaire (Ca), qui caractérise le rapport entre les forces visqueuses et élastiques membranaires. Il ne modélise pas directement la déformation vasculaire induite par la microgravité. Les approches expérimentale et numérique apportent donc des éclairages complémentaires, sans constituer une validation directe l'une de l'autre.

L'objectif est de quantifier l'influence de l'hématocrite (Ht), de la pression imposée, de la topologie du réseau, de l'excentricité de la section et de la déformabilité des GR sur la vitesse et la distribution spatiale des particules. À terme, cette approche combinant imagerie microfluidique et modélisation pourrait contribuer à identifier les mécanismes de transport cellulaire sensibles aux variations hémodynamiques rencontrées en environnement spatial.

Méthodes

Méthode expérimentale :

Le dispositif est un réseau microfluidique à section circulaire comprenant des branches artériolaires divergentes (AB1-AB3) et veineuses convergentes (VB1-VB3). Des particules rigides de diamètres 10µm, à concentration fixe de 1 %, sont mises en suspension avec des GRs avec différentes concentrations (5% - 40%). La différence de pression entrée-sortie est réglée par un contrôleur de pression (voir Fig3,a), L'imagerie est effectué dans le plan médian avec un microscope inversé équipé d'un objectif Uplan x20/0,85 à immersion d'huile, les particules sont suivies par détection à l'aide de l'intelligence artificielle YOLO (you only look once). L'analyse des images permet d'extraire les trajectoires des particules, leurs vitesses et leur distance à la paroi dans les différentes branches du

6.5 Mise à l'échelle d'un modèle de croissance de plantes supérieures, de la feuille au couvert végétal, en gravité réduite
L. Fleischer, L. Poulet, A. Paillet, C.-G. Dussap, **J.-P. Fontaine**

Mise à l'échelle d'un modèle de croissance de plantes supérieures, de la feuille au couvert végétal, en gravité réduite

Louise Fleischer[1,2], Lucie Poulet[1], Alexis Paillet[2], Claude-Gilles Dussap[1], Jean-Pierre Fontaine[1],
[1]Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Fd
[2]Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse

Introduction

L'exploration spatiale à long terme (Lune ou Mars) nécessite le développement de systèmes de support-vie (Life-Support System) efficaces et robustes, capables de recycler l'atmosphère, l'eau et les déchets afin d'assurer la survie de l'équipage et de s'affranchir de ravitaillements terrestres. L'ESA développe depuis près de 40 ans le projet MELiSSA (Micro-Ecological Life-Support System Alternative), qui vise développer un système support-vie biorégénératif afin de remplir ces fonctions de recyclage et de nourriture de l'équipage. La croissance des plantes est fortement influencée par les conditions environnementales (g, p, T, RH, pressions partielles en O_2 et en CO_2) et les phénomènes de transport concomitants régnants dans la cavité (serre ou vaisseau).

Méthode

Le but de cette étude est de développer un modèle physique mécaniste à l'Institut Pascal (axe GePEB), afin de prédire les effets de la gravité sur la croissance des plantes, aux niveaux morphologique, physicochimique et biochimique. Le modèle actuel est réalisé au niveau de la feuille à l'aide de bilans de masse et d'énergie, afin d'estimer les coefficients d'échange gazeux liés à la transpiration (K_La), sachant que les transferts liés à l'évapotranspiration sont un phénomène limitant de la croissance. La gravité a été introduite comme paramètre par L. Poulet (2018). Pour s'affranchir des effets biologiques et biochimiques un système spécifique de répliques de feuilles artificielles a été étudié (J. Kuzma, 2025) pour caractériser les flux d'évaporation lors de phases transitoires (campagnes de vols paraboliques VP175 et VP176). La mise à l'échelle de la feuille au couvert végétal est en cours d'étude par L. Fleischer depuis octobre 2014, à plusieurs niveaux : théorique, numérique et expérimental. L'objectif est d'optimiser la conception des chambres de culture extra-terrestres.

Résultats

1. Pour étudier les échanges d'énergie et de masse sur plusieurs échelles en culture de plantes, une étude adimensionnelle a permis de comparer les effets de la diffusion, de la convection naturelle ou forcée à l'aide d'un modèle de distribution de la masse le long d'une feuille, puis le long d'une canopée. Cette approche permet de faire le lien entre les phénomènes locaux (surfaces foliaires) et les propriétés émergentes d'une culture composée d'un grand nombre de feuilles. Elle permet également d'identifier où le comportement d'une canopée sera différent selon le niveau de gravité. Les vitesses d'air dans une chambre de culture contrôlée sont généralement suffisamment faibles pour correspondre à des régimes d'écoulements laminaires. Sans convection forcée, le mouvement de l'air autour des feuilles est principalement entraîné par la convection naturelle résultant des effets de flottabilité. Ceci implique des schémas de convection naturelle différents en environnement extraterrestre (Figure 1).

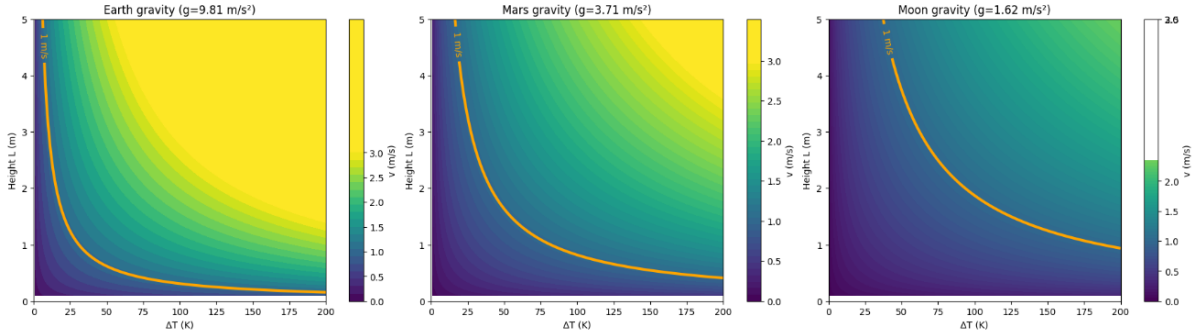


Figure 1. Vitesse de flux induit par les effets de flottabilité sous différentes gravités, en fonction de la différence de température et la hauteur de serre considérée.

Les résultats initiaux indiquent que, sous gravité terrestre ou lunaire, les seules forces de flottabilité sont insuffisantes pour assurer une croissance optimale des plantes dans des plages de hauteur et de température de serre raisonnables, induisant le besoin de convection forcée en milieu confiné.

2. Des travaux de simulation numérique (ANSYS-Fluent) à l'échelle des stomates, d'une culture entre deux étagères, et d'une chambre de culture spatiale ont été réalisés pour visualiser les couches et identifier les phénomènes qui peuvent être conservés ou simplifiés lors du changement d'échelle. Afin d'éviter le coût de calcul élevé de simulation de couverts végétaux une approche de milieu poreux est proposée (Fatnassi et al, *Biosystems engineering*, *230*, 388, 2023). Cependant, les paramètres nécessaires à la définition de tels milieux poreux reposent sur un nombre limité d'expériences terrestres, souvent réalisées en soufflerie et spécifiques à une espèce végétale (Molina-Aiz et al, *Biosystems engineering*, *93*(4), 2006).



L'objectif est donc d'estimer les coefficients de résistance aérodynamique du milieu poreux équivalent représentant une culture : la perméabilité, K_{perm} , et le coefficient de pertes inertielles, K_{loss}, à faibles nombres de Reynolds intervenant dans l'équation de Darcy-Forchheimer, en utilisant des couverts végétaux artificiels construits à partir de jeux de données statistiques issus de couverts réels (Figure 2). Les pertes de charge sont ensuite calculées avec le logiciel ANSYS-Fluent.

Figure 2. Exemple de couvert végétal artificiel (simulant des plantations de soja) avec les données empiriques de Blad and Baker (Agron. J., 64, *1972).*

Une méthode a été développée pour créer des plantes artificielles sur la base de données statistiques (taille des feuilles, inclinaison, densité foliaire), afin d'obtenir ces coefficients à bas Reynolds de manière numérique. Des premières études de sensibilité ont été menées afin de déterminer les paramètres les plus influents. Cette approche numérique doit permettre de réduire la dépendance aux essais expérimentaux et d'étendre les résultats à des architectures de cultures plus variées.
La méthodologie a été validée avec des données disponibles pour 4 plantes courantes (tomate, poivron, aubergine, haricot).

3. La croissance dynamique des plantes (masse sèche, transpiration) a été incorporée dans un algorithme en MATLAB développé dans le cadre du projet VARSITY (MELiSSA) pour simuler la croissance d'une pluri-culture de plusieurs semaines. Cette étape permet de dépasser une représentation statique de la culture et de prendre en compte l'évolution progressive de sa structure et de ses besoins en eau et en échanges gazeux.

Perspectives

La distribution des flux convectifs obtenus par simulation numérique dans une chambre de culture cylindrique sera confrontée à une expérimentation physique à petite échelle au sein de l'INRAe (Rennes, Unité OPAALE - Equipe ACTA) au cours de l'année à venir. La poursuite des simulations numériques pour la production de données de milieux poreux avec des plantes ciblées est prévu.

Publications

L. FLEISCHER, L. POULET, C.-G. DUSSAP, A. PAILLET, J.P. FONTAINE (2025). Where Gravity Fades: Adapting CFD models for extra-terrestrial greenhouses. 54th ICES 2025. July 13-17, 2025, Prague, Czech Republic.
L. FLEISCHER, L. POULET, C.-G. DUSSAP, A. PAILLET, J.-P. FONTAINE (2026). Comprendre l'écoulement de l'air autour des feuilles : analyse adimensionnelle sous différentes gravités. SFGP-2026, France.
L. FLEISCHER, L. POULET, C.-G. DUSSAP, A. PAILLET, J.-P. FONTAINE (2026). Estimation numérique des paramètres de milieu poreux pour des couverts végétaux à faibles nombres de Reynolds. SFGP-2026.

Remerciements : Les auteurs expriment leur gratitude au CNES et à l'ESA.

6.6 Influence des variations de gravité et des ultrasons sur l'activité de sphéroïdes neuronaux
A. Sureau, X. Benoit-Gonin, P.E. Lecoq, N. Heck, J.-M. Peyrin, **J.-L. Aider**

Mise à l'échelle d'un modèle de croissance de plantes supérieures, de la feuille au couvert végétal, en gravité réduite

Louise Fleischer[1,2], Lucie Poulet[1], Alexis Paillet[2], Claude-Gilles Dussap[1], Jean-Pierre Fontaine[1],
[1]Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Fd
[2]Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse

Introduction

L'exploration spatiale à long terme (Lune ou Mars) nécessite le développement de systèmes de support-vie (Life-Support System) efficaces et robustes, capables de recycler l'atmosphère, l'eau et les déchets afin d'assurer la survie de l'équipage et de s'affranchir de ravitaillements terrestres. L'ESA développe depuis près de 40 ans le projet MELiSSA (Micro-Ecological Life-Support System Alternative), qui vise développer un système support-vie biorégénératif afin de remplir ces fonctions de recyclage et de nourriture de l'équipage. La croissance des plantes est fortement influencée par les conditions environnementales (g, p, T, RH, pressions partielles en O_2 et en CO_2) et les phénomènes de transport concomitants régnants dans la cavité (serre ou vaisseau).

Méthode

Le but de cette étude est de développer un modèle physique mécaniste à l'Institut Pascal (axe GePEB), afin de prédire les effets de la gravité sur la croissance des plantes, aux niveaux morphologique, physicochimique et biochimique. Le modèle actuel est réalisé au niveau de la feuille à l'aide de bilans de masse et d'énergie, afin d'estimer les coefficients d'échange gazeux liés à la transpiration (K_La), sachant que les transferts liés à l'évapotranspiration sont un phénomène limitant de la croissance. La gravité a été introduite comme paramètre par L. Poulet (2018). Pour s'affranchir des effets biologiques et biochimiques un système spécifique de répliques de feuilles artificielles a été étudié (J. Kuzma, 2025) pour caractériser les flux d'évaporation lors de phases transitoires (campagnes de vols paraboliques VP175 et VP176). La mise à l'échelle de la feuille au couvert végétal est en cours d'étude par L. Fleischer depuis octobre 2014, à plusieurs niveaux : théorique, numérique et expérimental. L'objectif est d'optimiser la conception des chambres de culture extra-terrestres.

Résultats

1. Pour étudier les échanges d'énergie et de masse sur plusieurs échelles en culture de plantes, une étude adimensionnelle a permis de comparer les effets de la diffusion, de la convection naturelle ou forcée à l'aide d'un modèle de distribution de la masse le long d'une feuille, puis le long d'une canopée. Cette approche permet de faire le lien entre les phénomènes locaux (surfaces foliaires) et les propriétés émergentes d'une culture composée d'un grand nombre de feuilles. Elle permet également d'identifier où le comportement d'une canopée sera différent selon le niveau de gravité. Les vitesses d'air dans une chambre de culture contrôlée sont généralement suffisamment faibles pour correspondre à des régimes d'écoulements laminaires. Sans convection forcée, le mouvement de l'air autour des feuilles est principalement entraîné par la convection naturelle résultant des effets de flottabilité. Ceci implique des schémas de convection naturelle différents en environnement extraterrestre (Figure 1).

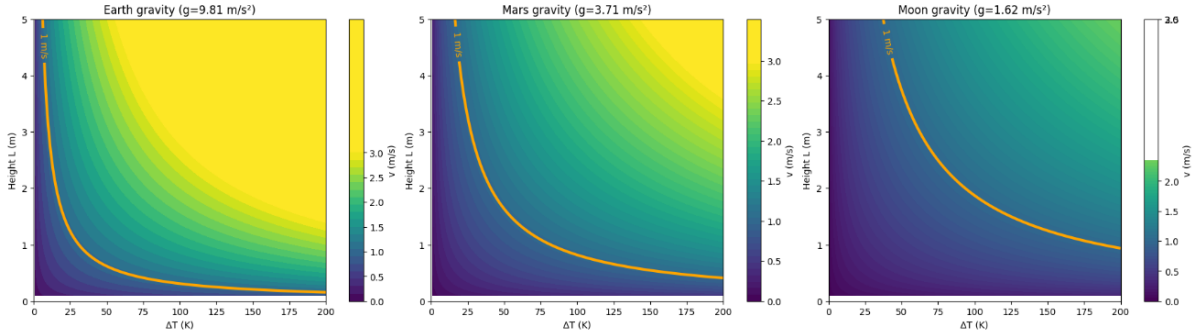


Figure 1. Vitesse de flux induit par les effets de flottabilité sous différentes gravités, en fonction de la différence de température et la hauteur de serre considérée.

Les résultats initiaux indiquent que, sous gravité terrestre ou lunaire, les seules forces de flottabilité sont insuffisantes pour assurer une croissance optimale des plantes dans des plages de hauteur et de température de serre raisonnables, induisant le besoin de convection forcée en milieu confiné.

2. Des travaux de simulation numérique (ANSYS-Fluent) à l'échelle des stomates, d'une culture entre deux étagères, et d'une chambre de culture spatiale ont été réalisés pour visualiser les couches et identifier les phénomènes qui peuvent être conservés ou simplifiés lors du changement d'échelle. Afin d'éviter le coût de calcul élevé de simulation de couverts végétaux une approche de milieu poreux est proposée (Fatnassi et al, *Biosystems engineering*, *230*, 388, 2023). Cependant, les paramètres nécessaires à la définition de tels milieux poreux reposent sur un nombre limité d'expériences terrestres, souvent réalisées en soufflerie et spécifiques à une espèce végétale (Molina-Aiz et al, *Biosystems engineering*, *93*(4), 2006).



L'objectif est donc d'estimer les coefficients de résistance aérodynamique du milieu poreux équivalent représentant une culture : la perméabilité, K_{perm} , et le coefficient de pertes inertielles, K_{loss}, à faibles nombres de Reynolds intervenant dans l'équation de Darcy-Forchheimer, en utilisant des couverts végétaux artificiels construits à partir de jeux de données statistiques issus de couverts réels (Figure 2). Les pertes de charge sont ensuite calculées avec le logiciel ANSYS-Fluent.

Figure 2. Exemple de couvert végétal artificiel (simulant des plantations de soja) avec les données empiriques de Blad and Baker (Agron. J., 64, *1972).*

Une méthode a été développée pour créer des plantes artificielles sur la base de données statistiques (taille des feuilles, inclinaison, densité foliaire), afin d'obtenir ces coefficients à bas Reynolds de manière numérique. Des premières études de sensibilité ont été menées afin de déterminer les paramètres les plus influents. Cette approche numérique doit permettre de réduire la dépendance aux essais expérimentaux et d'étendre les résultats à des architectures de cultures plus variées.
La méthodologie a été validée avec des données disponibles pour 4 plantes courantes (tomate, poivron, aubergine, haricot).

3. La croissance dynamique des plantes (masse sèche, transpiration) a été incorporée dans un algorithme en MATLAB développé dans le cadre du projet VARSITY (MELiSSA) pour simuler la croissance d'une pluri-culture de plusieurs semaines. Cette étape permet de dépasser une représentation statique de la culture et de prendre en compte l'évolution progressive de sa structure et de ses besoins en eau et en échanges gazeux.

Perspectives

La distribution des flux convectifs obtenus par simulation numérique dans une chambre de culture cylindrique sera confrontée à une expérimentation physique à petite échelle au sein de l'INRAe (Rennes, Unité OPAALE - Equipe ACTA) au cours de l'année à venir. La poursuite des simulations numériques pour la production de données de milieux poreux avec des plantes ciblées est prévu.

Publications

L. FLEISCHER, L. POULET, C.-G. DUSSAP, A. PAILLET, J.P. FONTAINE (2025). Where Gravity Fades: Adapting CFD models for extra-terrestrial greenhouses. 54th ICES 2025. July 13-17, 2025, Prague, Czech Republic.
L. FLEISCHER, L. POULET, C.-G. DUSSAP, A. PAILLET, J.-P. FONTAINE (2026). Comprendre l'écoulement de l'air autour des feuilles : analyse adimensionnelle sous différentes gravités. SFGP-2026, France.
L. FLEISCHER, L. POULET, C.-G. DUSSAP, A. PAILLET, J.-P. FONTAINE (2026). Estimation numérique des paramètres de milieu poreux pour des couverts végétaux à faibles nombres de Reynolds. SFGP-2026.

Remerciements : Les auteurs expriment leur gratitude au CNES et à l'ESA.

6.7 Characterizing granular matter in microgravity with acoustic waves
A. Goïcoechea, B. Tallon, J. Léopoldès

La margination des cellules sanguines dans la microcirculation

M. Abbasi[1], H. Klein[2], M. Leonetti[1]

[1] Aix Marseille Univ, CNRS, CINaM, Turing Centre for Living Systems, Marseille, France
[2] Aix Marseille Univ, CNRS, CINaM, Marseille, France

Introduction

Dans les petits vaisseaux sanguins (microcirculation), les globules rouges (GRs) –des cellules très déformables– interagissent avec les autres cellules (plaquettes et globules blancs) plus rigides et favorisant une organisation radiale hétérogène : un cœur riche en GR et une couche de la paroi appauvrie en GR (CFL) mais riche en cellule moins déformable comme les plaquettes et les globules blancs. Ce phénomène appelé la margination reste aujourd'hui mal compris et ce par manque de données expérimentales. Il constitue est une étape précoce de la réponse immunitaire, ainsi que la cascade de réactions plaquettaires déclenchée lors d'une lésion vasculaire. Ce phénomène apparaît comme une ségrégation induite par les interaction hydrodynamique (Fig,1-a) au sein d'une suspension binaire. Cette ségrégation dépend notamment de la concentration en GR (Hématocrite), du cisaillement, de la déformabilité cellulaire, de la géométrie du réseau vasculaire et de l'histoire des bifurcations. Comprendre ces couplages est pertinent pour la microcirculation et le transport cellulaire.

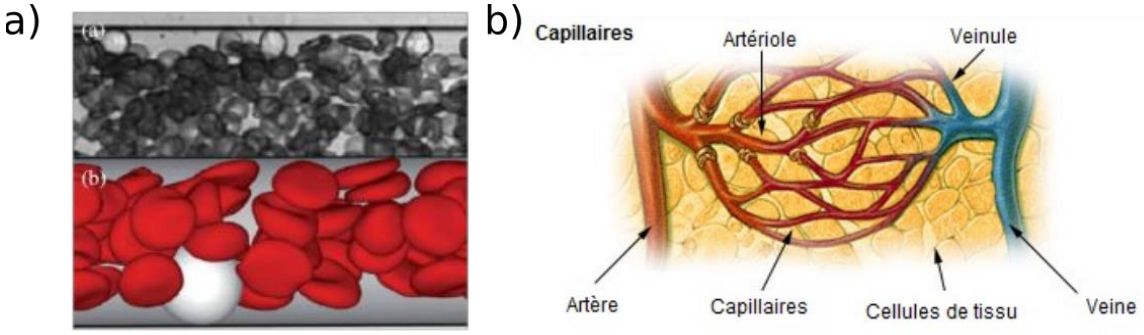


Figure 1: : Gauche – (a) expérience en quasi-2D et (b) simulation d'une suspension de GRs souples (rouge) et de GBs (blanc). Ceux-ci se localisent à la paroi. Droite - schéma typique d'un réseau vasculaire. Le sang s'écoule des artères vers les veines. A noter que les échanges avec l'environnement varient 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 B. Pourquoi ? La réponse à ce problème est inconnue.

Dans ce problème, la géométrie transversale des vaisseaux est importante parce qu'elle modifie les zones de confinement, les gradients de vitesse et les régions de courbure. Dans un réseau réel, la distribution n'est donc pas déterminée seulement par une vitesse moyenne ou par la concentration globale de GRs : elle dépend aussi de la manière dont les flux se séparent aux bifurcations et se réunissent aux confluences. Ces considérations motivent deux approches complémentaires dans nos travaux de recherches. Les expériences en microfluidique pour examiner le transport de particule rigides dans un réseau ramifié lorsqu'on varie l'hématocrite et la différence de pression. Les

simulations numériques pour isoler l'effet de la forme de la section et de la déformation des GR sur la margination de particules discoïdales représentant les plaquettes.

En microgravité, la réduction du gradient hydrostatique tête-pieds entraîne une redistribution des fluides corporels vers le thorax et la tête, modifiant les pressions veineuses, la pression transmurale et le retour veineux. Ces changements peuvent affecter la géométrie des vaisseaux souples et, par conséquent, les profils de vitesse, les contraintes hydrodynamiques et les interactions entre cellules sanguines et paroi, notamment lors de la margination des leucocytes et des plaquettes. Étudier l'influence de la géométrie vasculaire sur ces phénomènes permet ainsi d'explorer les mécanismes potentiellement affectés par les adaptations cardiovasculaires en microgravité, sans supposer une déformation uniforme du réseau vasculaire, dont la réponse dépend des propriétés mécaniques et des régulations propres à chaque segment.

Les observations en vol spatial révèlent des réponses vasculaires variables selon le segment vasculaire et les conditions expérimentales. Certaines études rapportent une augmentation du diamètre carotidien, tandis que d'autres montrent des réponses différentes. Les données relatives aux veines restent limitées, malgré des observations de distension et d'altération du flux. L'influence des variations géométriques sur les écoulements sanguins constitue ainsi une question pertinente à explorer.

Le vol parabolique offre des phases de microgravité de courte durée (environ 20 à 22 secondes), encadrées par des phases d'hypergravité. Des mesures hémodynamiques et de la microcirculation sublinguale y ont déjà été réalisées par imagerie optique. Ces contraintes temporelles motivent le développement de systèmes d'imagerie rapides et compacts. Le dispositif microfluidique et le contraste particule–globule rouge (GR) étudiés ici pourraient contribuer au suivi de suspensions denses dans ces conditions.

Le volet numérique étudie l'effet d'une section prescrite, circulaire ou elliptique, caractérisée par son excentricité (e), sur les écoulements en fonction du nombre capillaire (Ca), qui caractérise le rapport entre les forces visqueuses et élastiques membranaires. Il ne modélise pas directement la déformation vasculaire induite par la microgravité. Les approches expérimentale et numérique apportent donc des éclairages complémentaires, sans constituer une validation directe l'une de l'autre.

L'objectif est de quantifier l'influence de l'hématocrite (Ht), de la pression imposée, de la topologie du réseau, de l'excentricité de la section et de la déformabilité des GR sur la vitesse et la distribution spatiale des particules. À terme, cette approche combinant imagerie microfluidique et modélisation pourrait contribuer à identifier les mécanismes de transport cellulaire sensibles aux variations hémodynamiques rencontrées en environnement spatial.

Méthodes

Méthode expérimentale :

Le dispositif est un réseau microfluidique à section circulaire comprenant des branches artériolaires divergentes (AB1-AB3) et veineuses convergentes (VB1-VB3). Des particules rigides de diamètres 10µm, à concentration fixe de 1 %, sont mises en suspension avec des GRs avec différentes concentrations (5% - 40%). La différence de pression entrée-sortie est réglée par un contrôleur de pression (voir Fig3,a), L'imagerie est effectué dans le plan médian avec un microscope inversé équipé d'un objectif Uplan x20/0,85 à immersion d'huile, les particules sont suivies par détection à l'aide de l'intelligence artificielle YOLO (you only look once). L'analyse des images permet d'extraire les trajectoires des particules, leurs vitesses et leur distance à la paroi dans les différentes branches du

6.8 Impact of Microgravity on Endothelial Dysfunction : the SubOrbital express M17 flight campaign
D. Pedroni, D. Tsvirkun, L. Bureau, C. Misbah

Impact of Microgravity on Endothelial Dysfunction : the SubOrbital express M17 flight campaign

D. Pedroni[1], D. Tsvirkun[1], L. Bureau[1], C. Misbah[1]

[1] Laboratoire Interdisciplinaire de Physique, UMR 5588 CNRS-UGA, Grenoble

Introduction

The goal of the "endothelial dysfunction" project is to better understand the biophysical mechanisms that govern the interactions between circulating blood cells and blood vessel walls. These interactions are central to the mechanotransduction processes that regulate hemodynamics, angiogenesis, and the inflammatory response. In microgravity, these processes are affected because the physical forces acting on the endothelium (the monolayer of cells forming the inner wall of blood vessels) are altered in various ways: (i) reduced physical activity leads to an overall reduction in hemodynamics, resulting in a chronic decrease in the levels of hydrodynamic shear stress experienced by the endothelium; (ii) furthermore, a growing number of studies suggest that altered gravity directly impacts the proliferation, internal organization, and nitric oxide production of endothelial cells. In this context, the objective of the IMEDYS experiment, sponsored by the European Space Agency for a sounding rocket flight, is to assess the sensitivity of the endothelium to an altered level of gravity, and determine whether the two mechanical stimuli (shear and gravity) act in concert or independently on the organization of the endothelial cells' cytoskeleton and adhesive clusters, which are involved in the mechanotransduction processes of the vascular wall. The flight has taken place at the end of may 2026, during the S1X5/M17 launch campaign.

Methods

We use biomimetic microfluidic channel networks whose inner surface is covered with endothelial cells[1]: HMEC1 cells (immortalized Human Dermal Microvascular Endothelial Cells) are seeded into microchannels and cultured under flow until they form a confluent monolayer lining the inside of the flow chips. Those are incorporated into an experimental module (so-called Late Access Unit, Fig. 1), custom-designed by Airbus Space GmbH, which allows the endothelialized chips to be continuously perfused with cell culture medium under a physiological level of hydrodynamic shear stress (~1 Pa), while endothelial cells can be fixed, i.e. their molecular structures « frozen » by crosslinking, at various timepoints during the flight : (i) on the ground before launch, (ii) at the end of take-off (hypergravity phase), and (iii) at the end of the microgravity phase. The experiment comprised 4 late access units, each containing 3 microfluidic chips, a perfusion system and switching valves allowing to flow either medium, fixative or rinsing solution in the chips at the proper timepoint during the flight. No observation of the cells was done in situ, and all the analysis will rely on microscopy performed post-flight in our lab. Endothelial cell culture and seeding inside the microfluidic chips were started one month before the nominal launch date, at the biolab facility of Esrange in Sweden, where the rocket flight took place.

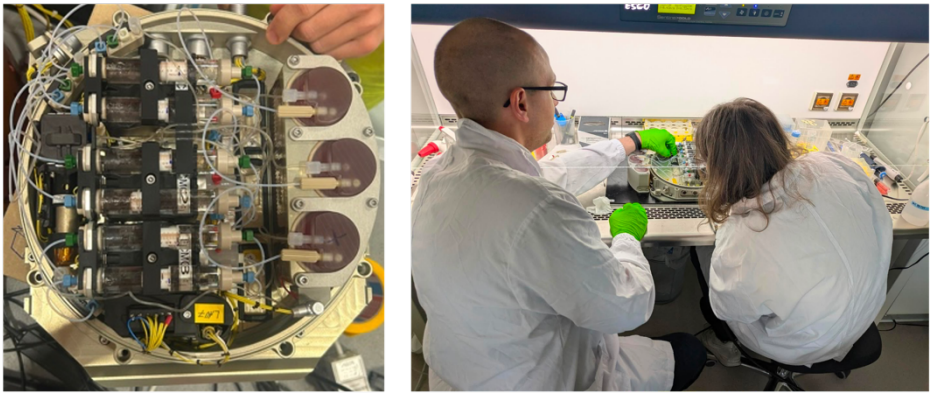


Fig. 1: (Left) A late access unit, filled with all fluids and including 3 microchips connected to the perfusion system. (Right) Integration of the chips in the unit before the launch.

[1] D. Tsvirkun, A. Grichine, A. Duperray, C. Misbah, L. Bureau, Microvasculature on a chip: study of the Endothelial Surface Layer and the flow structure of Red Blood Cells, Scientific Reports 7, 45036 (2017)

Results

We prepared our late access units by filling them with culture medium and fixative/rinsing solutions on Monday 25/5, earlier than nominally planned, without integrating the microfluidic chips. This was done upon request to be ready for an anticipated flight, on Tuesday 26/5, which was eventually postponed to Sunday 31/5. From 26/5 to 31/5, we therefore had to maintain and monitor the state of the fluids in the late access units, along with the state of the endothelialized chips to be integrated, part of which were lost or degraded due to bacterial contamination. We eventually could integrate the required number (12) of chips in the late access units, 9 of them being sub-optimal in terms of cell density inside the channels.

After integration into the late access units, the microfluidic chips remained in autonomous mode inside the modules for nearly 10 hours until launch, with the pumping and heating systems maintaining the required conditions throughout this period and the cells showing no apparent signs of adverse effects.

As mentioned above, no in situ observation of cells was planned during the flight. Temperature and pressure inside the late access units were nominal, and pumps and switching valves worked as expected. Late access units were retrieved and observed to be intact after landing. All the microfluidic chips were also intact. Endothelial cells were not detached from the walls of the microfluidic chips during the flight (Fig. 2), and we currently have at least one chip per gravity condition which are suitable for immunostaining and microscopy observations of the cell structures, which are going to be performed in our lab in the coming months.

Perspectives

Analysis of the samples is currently under way. In view of the limited number of samples available, we have first been through a validation step of the targeted cell structures and staining protocols performed on control cell cultures in our lab. As illustrated on Fig. 2, in addition to cell nuclei staining, we will focus on the study of the actin network (controlling cell shape and internal stresses[2]) and on the spatial distribution of ZO-1, a protein involved in tight junctions between neighboring cells. Evaluating the impact of altered gravity on such structures should provide valuable insights into how blood vessel walls integrate mechanical cues.

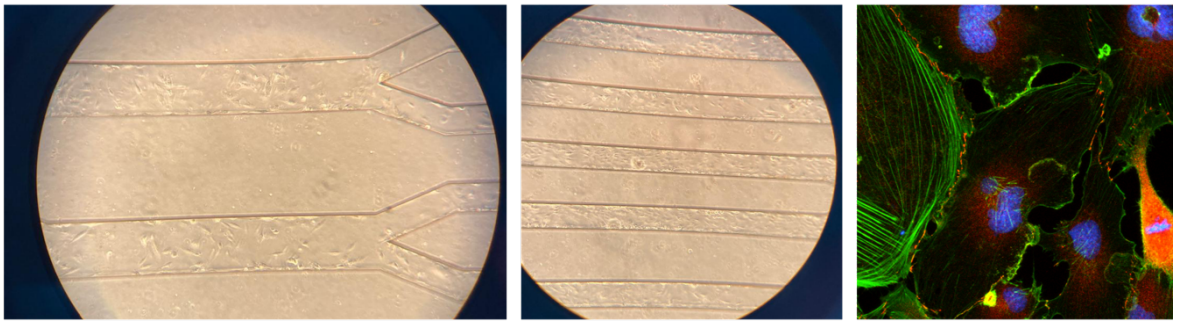


Fig. 2: (Left and center) Bright field images of the channels lined by HMEC-1 cells, fixed during the rocket flight. (Right) Confocal fluorescence image showing nuclei (blue), actin (green) and ZO-1 (red).

Publications

[2] M. Inglebert, L. Locatelli, D. Tsvirkun, J. Maier, C. Misbah, L. Bureau, The effect of shear stress reduction on endothelial cells: a microfluidic study of the actin cytoskeleton, Biomicrofluidics 14, 024115 (2020)