

# GROUPE THÉMATIQUE SCIENCES DE LA MATIÈRE

Thierry Bret-Dibat (thématicien), Philippe Brunet, Olga Budenkova, Christophe Delaroche (thématicien), Bruno Denet, Pascale Domingo, Stéphane Dorbolo, Jean-Baptiste Manneville, François Pétreliis (Président), Isabelle Raspo, Laurence Rongy, Valérie Vidal, Régis Wunenburger  
Et le Conseil Scientifique du GDR Micropesanteur Fondamentale et Appliquée

## Les grandes questions en sciences de la matière traitées en micropesanteur

Les sciences de la matière s'intéressent aux propriétés physiques de la matière à des échelles mésoscopiques, intermédiaires entre les échelles microscopiques et macroscopiques. Tandis que ces deux dernières sont bien décrites par la physique quantique et atomique d'une part, et la physique classique d'autre part, les phénomènes d'organisation de la matière aux échelles intermédiaires sont encore mal connus, notamment lors de ses changements d'états (Fig.1). Il faut généralement faire appel à la physique non-linéaire et à la physique statistique d'états hors d'équilibre pour modéliser ces phénomènes.

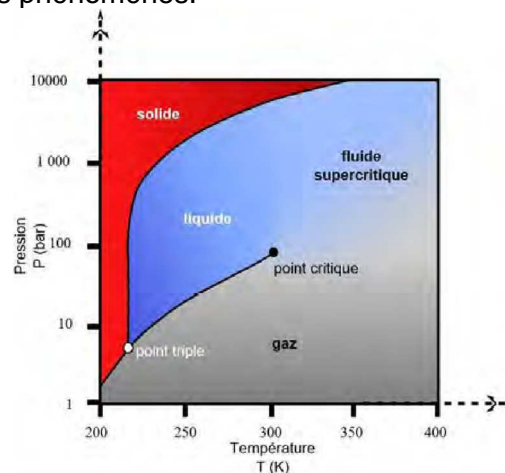


Fig.1 : Diagramme de phase du dioxyde de carbone, présentant les courbes d'équilibre entre les différents états.

Les Sciences de la Matière s'intéressent aux propriétés lorsque le système traverse ces courbes d'équilibre. Les systèmes y sont alors sensibles à la gravité.  
© Marc Jacobs, 2005

Soumise à la gravité Terrestre, la matière s'organise selon des mécanismes induits par la pesanteur, tels que la convection, la pression hydrostatique, la sédimentation ou le drainage. Ces mécanismes masquent, ou modifient fortement, la nature des états de la matière. Pour connaître les propriétés universelles qui régissent les états de la matière, et leurs transformations associées, il est donc nécessaire de s'affranchir de la pesanteur.

Le Cnes, et l'Esa, offrent aux laboratoires scientifiques la possibilité de réaliser des expériences hors contraintes de gravité et ainsi de mettre en évidence des phénomènes inattendus où toutes les propriétés physiques peuvent s'exprimer. La communauté française peut bénéficier de l'accès aux conditions de micropesanteur dans l'ISS, en vols paraboliques, en fusées sondes ou en tour à chute libre, avec pour l'ISS une mise en œuvre fortement majoritaire à travers le programme SciSpacE de l'Esa.

Le processus de sélection des projets est rationalisé en utilisant les principes de l'analyse dimensionnelle. L'importance relative des phénomènes physiques est exprimée par des nombres sans dimension. Lorsque la gravité joue un rôle, ces nombres font intervenir la gravité  $g$  multipliée par d'autres grandeurs caractéristiques du problème. Citons par exemple le nombre de Rayleigh en convection thermique, de Bond pour des phénomènes capillaires, etc. La micropesanteur est nécessaire pour étudier un phénomène physique s'il n'est pas possible de réduire ce nombre sans dimension soit pour des raisons techniques soit parce qu'en le modifiant, on en modifie un autre qui joue un rôle dans la physique du système.

Cette approche est cruciale dans le processus de sélection des projets.

# 1. BILAN ET AVANCEES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

Les scientifiques utilisateurs de la micropesanteur issus de différents laboratoires de physique sont regroupés au sein d'un Groupement de Recherche du CNRS (GdR), le GdR Micropesanteur Fondamentale et Appliquée, créé en 1992. Il compte plus de 150 chercheurs du CNRS, du CEA et des Universités.

La période écoulée a vu notamment la réalisation des programmes Cnes de l'instrument **Declic** dans l'ISS en coopération avec la Nasa et aussi l'utilisation de l'instrument **Fluidics** dans l'ISS.

Concernant les nouveaux sujets identifiés en 2019 et dans le cadre Cnes, les inserts **Scwo** et **Aerosol** du programme Declic terminent leur phase A, cependant leur cadre programmatique est incertain, la Nasa ayant besoin de redéfinir ses priorités scientifiques avant de préparer la suite de ses engagements. Un nouvel instrument pour l'étude de la turbulence d'onde Fluidics\_L termine également sa phase A. L'insert **Ali** de Declic a été mis à niveau et opéré, tandis que la deuxième mise à niveau de l'insert **DSI** ne pourra être réalisée avant la fin de l'accord de coopération avec la Nasa.

Dans le cadre du programme SciSpacE de l'Esa, autre priorité identifiée en 2019, la communauté française, la plus représentée, a participé à bon nombre d'expériences dans l'ISS, et en fusée sonde, ou à la définition et préparation de nouveaux instruments.

Nous présentons maintenant les avancées scientifiques significatives obtenues par les équipes françaises dans les diverses thématiques constituant les Sciences de la Matière en mentionnant pour chacune les aspects transverses et applicatifs. Les progrès sont associés à des thématiques multiples et variées, qui de façons souvent indépendantes améliorent la compréhension des propriétés fondamentales de la matière (organisation, transition, propriétés statistiques et dynamiques).

## 1.1. MATIÈRE MOLLE ET FLUIDES COMPLEXES

La matière molle et les fluides complexes regroupent les mousses et émulsions, les granulaires et cristaux liquides ainsi que les écoulements fluides, notamment diphasique, et les tissus biologiques. Sous gravité terrestre, les causes de l'organisation de ces matériaux sont masquées. La micropesanteur permet de révéler les forces faibles en jeu, ainsi que de tester et valider les modèles numériques qui prévoient leur évolution. Bien que très en amont des applications, ces recherches touchent de nombreux domaines comme l'industrie minière et alimentaire, les cosmétiques, la santé.

### 1.1.1. MOUSSES ET ÉMULSIONS

Les mousses, émulsions, suspensions denses et gels colloïdaux sont des milieux emblématiques de la matière molle. A titre d'illustration, les mousses liquides sont des dispersions de gaz dans une phase aqueuse. Sur Terre, la gravité conduit au drainage rapide de l'eau. Très rapidement, les mousses deviennent « sèches » avec un fort gradient vertical de densité d'eau. Les expériences en microgravité constituent une opportunité unique d'étudier le comportement des mousses « humides », en particulier au voisinage de la transition de blocage (dite de *jamming*) où la mousse passe d'un comportement solide à celui d'un liquide « bulleux » concentré. Au cours des procédés de fabrication de certains matériaux, les mousses passent souvent par un stade proche de la transition de blocage, dont le vieillissement et le comportement mécanique n'ont jamais pu être étudiés sur Terre.

Le projet **Foam-C** porte sur leur vieillissement dû au mûrissement (grossissement des bulles induit par le transport de gaz entre elles du fait des différences de pression capillaire). Un nouveau domaine de mousses a été mis en évidence, les bulles s'y agrégeant entre elles sous l'effet d'un phénomène d'adhésion, repoussant alors la transition de blocage. L'existence de ce nouveau domaine soulève des questions jusqu'ici ignorées, alimentant actuellement des travaux de pointe à l'échelle internationale.

Le projet **Pasta** a étudié le comportement d'émulsions (dispersions constituées de deux phases liquides dont l'une apparaît sous forme de gouttes). Une nouvelle phénoménologie s'est révélée, montrant des séquences transitoires de coalescence accélérée au voisinage des agrégats de gouttes. Le contrôle de la vitesse de déstabilisation de l'émulsion, donc de son vieillissement, sont ainsi sujets à des avancées notables de l'état de l'art.

Enfin, le domaine des dispersions de particules colloïdales (browniennes, taille inférieure au micron), s'est montré particulièrement fécond ces dernières années. L'étude de la dynamique microscopique des verres mous en réponse à une sollicitation mécanique a dévoilé l'existence d'une transition universelle de comportement lorsque le seuil d'écoulement est dépassé, transition à présent prédite par un modèle dynamique issu d'une analogie avec le modèle de van der Waals pour la transition liquide-vapeur.

### 1.1.2. BIOPHYSIQUE

Entre physique de la matière molle et sciences du vivant, la biophysique s'intéresse aux propriétés de fluides et tissus biologiques tels le sang, l'endothélium, ou les agrégats cellulaires. Les études, menées entre laboratoires de physique et biologie, ont pour objectifs de : (i) élucider les mécanismes fondamentaux qui gouvernent les écoulements sanguins, (ii) développer des dispositifs biomimétiques de la microcirculation, (iii) mettre au point des méthodes physiques originales d'imagerie, de simulation numérique et de manipulations cellulaires. En micropesanteur, on s'affranchit des effets de sédimentation des cellules sanguines et on peut documenter les effets de la micropesanteur sur la réponse cellulaire et la circulation.

Les phénomènes de migration et d'agrégation dynamique sous flux de globules rouges en microcanaux ont été étudiés afin d'éclaircir le rôle des propriétés mécaniques des globules et de leurs interactions adhésives dans la distribution des cellules au sein de réseaux de vaisseaux ainsi que sur les propriétés rhéologiques locales du sang. L'agrégation de globules rouges lors d'une dégradation enzymatique de leur surface, similaire à celle observée en vols spatiaux, a également été étudiée expérimentalement en vols paraboliques et numériquement.

### 1.1.3. FLUIDES COMPLEXES

La physique des milieux granulaires est un domaine où l'absence de gravité permet de faire progresser la compréhension des processus en jeu dans les dynamiques collectives d'ensembles de particules. Cette dynamique est tributaire de forces extérieures imposées et de la sédimentation, difficilement contrôlable sur Terre.

Le modèle vol de l'instrument **Vipgran** de l'ESA est en cours de construction. Plusieurs résultats nouveaux ont été obtenus à l'aide d'un prototype vol parabolique. L'origine de la transition d'un « gaz » granulaire vers un amas dense (fig.2), lorsque leur nombre augmente, a été comprise. La dynamique de traceurs a permis de détecter l'émergence de cette transition et de proposer un modèle de minimisation d'énergie décrivant avec précision la formation d'hétérogénéités locales. Ces résultats ouvrent la possibilité d'étudier la formation des agrégats de type protoplanétaire. Par ailleurs, un analogue granulaire au phénomène d'osmose a été observé et quantifié.

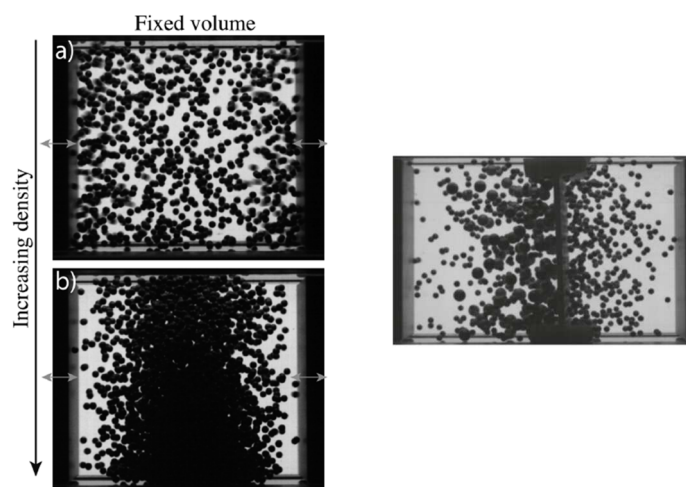


Fig.2 Visualisations en micropesanteur d'expériences sur milieux granulaires : a) et b) illustrent la transition vers un amas dense ; c) phénomène d'osmose en présence d'une paroi

Des études de la turbulence diphasique, ont été initiées, afin de comprendre notamment comment la turbulence peut modifier la distribution de taille des gouttelettes d'eau dans l'air, un processus

important de la physique des nuages. La différence de densité importante entre les deux phases rend la microgravité indispensable. Une expérience d'écoulement de von Karman diphasique a été réalisée et une réduction de traînée turbulente due à la migration de l'air a été identifiée.

## 1.2. ETATS ET TRANSITIONS D'ÉTAT DE LA MATIÈRE

L'étude fondamentale des transitions d'état, de l'état solide au domaine supercritique, conduit à se placer sur les points de transition et à observer le changement d'état de la matière en se maintenant sur ce point. Ce champ de recherche s'applique par exemple à la fabrication de matériaux métalliques de haute performance, aux échangeurs thermiques ou encore, pour ce qui concerne le domaine supercritique, à l'oxydation de particules organiques.

### 1.2.1. SOLIDIFICATION

La solidification étudie la dynamique des microstructures qui se forment à l'interface entre un solide et le liquide dans lequel il croît. Il peut s'agir d'alliages métalliques ou de matériaux transparents. La recherche amont en solidification a un très fort impact industriel, les microstructures de solidification déterminant les propriétés des matériaux élaborés.

En apesanteur, la solidification et les instabilités morphologiques associées sont gouvernées uniquement par la diffusion de solutés et de chaleur, couplée aux propriétés physico-chimiques du matériau utilisé. Ces conditions uniques permettent une exploration précise des phénomènes contrôlant la formation des microstructures dans un contexte de physique non-linéaire des structures hors équilibre.

La période écoulée a vu la continuation des expériences dans l'insert **Declic-DSI** en coopération avec la Nasa. Les expériences ont permis l'obtention de résultats sur la sélection microstructurale et la dynamique d'ordre/désordre sous l'influence de distorsions du champ thermique ou de la cristallographie (fig.3 : compétition de grains, "cellules solitaires").

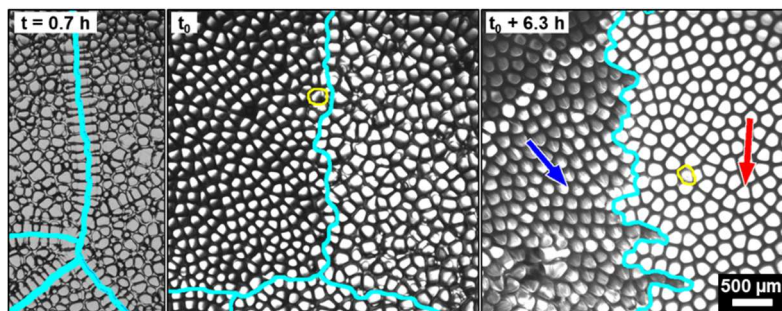


Fig.3 Interpénétration entre grains dans l'interface solide – liquide pendant la solidification dirigée en microgravité

Les joints de grains sont représentés en cyan ; une cellule « solitaire » est entourée en jaune ; les flèches rouge et bleu indiquent les directions de dérive globale des grains.

Une nouvelle mise à niveau de l'insert DSI\_(DSI\_R2) était prévue, mais les difficultés de développement combinées à la fin de l'accord de coopération avec la Nasa ont conduit à y renoncer.

Dans le cadre ESA, l'analyse des expériences de solidification *in situ* dans l'instrument « Transparent Alloys » (ISS) et leur modélisation numérique ont permis d'éclairer deux aspects de la croissance biphasée couplée des mélanges dits eutectiques : la mise en ordre hexagonal des structures en fibres en fonction de la vitesse de solidification et celui de la transition morphologique dite lamelles/fibres.

Le projet XRMON (fusée sonde) pour l'étude *in situ* de la croissance dendritique colonnaire ou équiaxe dans des échantillons d'alliages Al-Cu par radiographie X, a mis en évidence l'influence de la gravité sur la germination et la croissance de grains équiaxes lors de la transition colonnaire-équiaxe. Ces résultats ont permis d'éclairer les contributions respectives des blocages mécanique et solutal et mis en avant le rôle crucial en micropesanteur de l'écoulement provoqué par le retrait de solidification.

Les expériences CETSOL (ISS) ont fourni des résultats sur la transition colonnaire-équiaxe (impact de porosité, influence d'un champ magnétique et caractérisation tri-dimensionnelle) par analyse métallographique post-mortem, analysés grâce aux simulations numériques multi-phases et multi-échelles.

## 1.2.2. EVAPORATION ET ÉBULLITION

Ces activités sur les écoulements diphasiques (liquide/vapeur en présence d'ébullition/évaporation) abordent la phénoménologie liée au changement de phase, telles, l'évaporation de gouttes sur des substrats de mouillabilité variable ou solubles ou la dynamique de lignes de contact. En pratique, l'évaporation et la condensation sont associées à d'intenses échanges de chaleur, ce dont tirent profit de nombreuses applications industrielles. Les expériences en micropesanteur permettent d'améliorer notre compréhension des phénomènes physiques grâce à des expériences ciblées à l'échelle d'une bulle ou d'une goutte en l'absence de force de flottabilité et en présence de forts effets capillaires.

L'expérience Esa **Rubi** (Multiscale Boiling) a permis de réaliser à bord de l'ISS des expériences uniques d'ébullition sur un site isolé, en présence d'un champ électrique et/ou d'un écoulement. Des bulles de tailles centimétriques ont été observées à de bien meilleures résolutions temporelles et spatiales des champs de température qu'à gravité terrestre. Il a été montré en particulier que l'évaporation au voisinage de la ligne de contact contribue pour une part importante à la croissance de la bulle (fig.4).

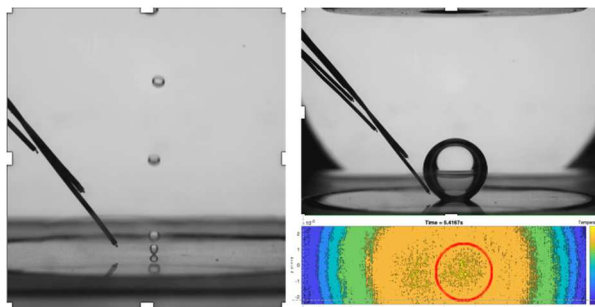


Fig.4 : expérience Rubi  
(gauche) ébullition à gravité terrestre ;  
(droite) ébullition en microgravité et champ de température associé (cercle rouge : pied de bulle)

Cette évaporation au voisinage de la ligne de contact joue un rôle important dans l'évaporation de gouttes, dont la cinétique dépend de la mouillabilité du substrat. Plusieurs expériences de formation et évaporation de gouttes sessiles sur les parois hydrophiles et hydrophobes ont été réalisées en vols paraboliques et en fusée sonde (**Arles**). Le mouillage d'une goutte sur un substrat n'est pas systématiquement prédit. Ce constat a motivé des études sur l'influence de la gravité sur l'angle macroscopique de mouillage lors de la formation d'une goutte sessile, éclairant le rôle de l'énergie de la zone triple.

L'évaporation d'un film liquide déposé sur une paroi joue un rôle important dans les caloducs oscillants, tels les PHP (pulsating heat pipe), candidats pour le refroidissement d'électronique de puissance. La figure 5 en présente un prototype. Le train de bouchons qu'est l'écoulement diphasique circulant dans le tube entre en mouvement auto-entretenu dès le contact au point chaud établi, conduisant la chaleur à la fois par évaporation-condensation et par advection. L'étude en vol parabolique a permis d'identifier les phénomènes physiques responsables de ce mouvement.

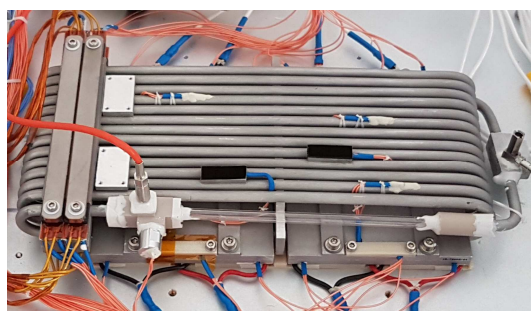


Fig.5 : Prototype de caloduc oscillant pour l'appareil HTH-1 de l'ESA.

## 1.2.3. FLUIDES SUPERCRITIQUES

La température au point critique définit le point du diagramme des phases où la coexistence des phases liquide et vapeur se termine. Au voisinage de cette température, le comportement du fluide devient très particulier à cause de la divergence de ses propriétés telles la capacité thermique ou la

compressibilité. Pour étudier les phénomènes à proximité du point critique, la stratification par effet gravitaire doit être supprimée. Les inserts **ALI** et **HTI** de l'instrument **Declic** (ISS) sont dédiés à cette tâche.

Les premières mesures avec ALI en apesanteur ont démontré l'importance de l'écart à la densité critique dans l'analyse théorique du comportement singulier de la propriété de turbidité (fig.6). La maîtrise de cet écart a permis de tester expérimentalement les modèles théoriques de la forme universelle de l'équation d'état. Ainsi, ces expériences ont permis de proposer un nouveau modèle prédictif, le seul à être en accord avec les résultats expérimentaux.

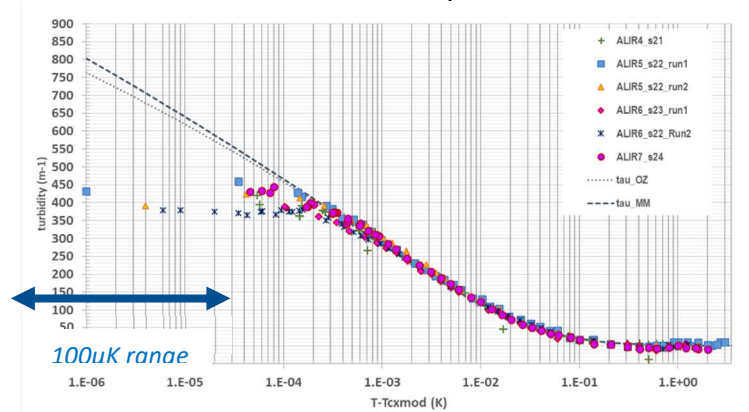


Fig.6 Mesures de turbidité lors d'expériences ALI-R dans l'ISS (2022-2023), jusqu'à une proximité de la température critique inférieure à 100µK.

Les expériences utilisant l'insert **HTI-R** ont mis en évidence la compétition entre les phénomènes de séparation de phase et les phénomènes d'ébullition en présence de sel, créant l'alternance de situations diphasiques stables et instables sans aucune modification apparente des niveaux thermiques locaux dans la cellule.

### 1.3. INSTABILITÉS, TRANSFERT ET ONDES

Ce champ de recherche regroupe la combustion et l'organisation des liquides face à un apport d'énergie sous différentes formes. L'objectif de recherche est lié à la transition énergétique et à la compréhension des phénomènes météorologiques.

#### 1.3.1. COMBUSTION

Les objectifs liés à la combustion en micropesanteur sont d'accroître les connaissances sur les phénomènes fondamentaux, puis d'en utiliser les résultats pour faire progresser les technologies liées à la maîtrise de la combustion. Les processus à gravité terrestre sont généralement fortement influencés par la convection naturelle. S'en affranchir permet de mener de nouvelles expériences dans lesquelles les écoulements et la sédimentation induits par la gravité sont pratiquement éliminés. L'élimination des perturbations causées par les forces de flottabilité peut en particulier accroître la durée des expériences, ouvrant sur l'examen des phénomènes à plus grande échelle temporelle. La pertinence de l'outil micropesanteur est illustrée en fig.7.

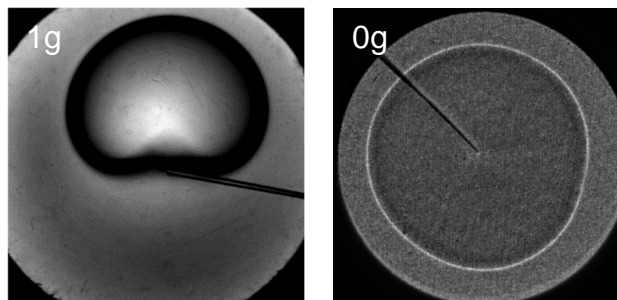


Fig.7 A conditions initiales identiques, propagation lente d'une flamme pré-mélangée (gauche) fortement convectée sous gravité terrestre ; (droite) en micropesanteur.

Au niveau international, différentes équipes de recherche travaillent sur ces problématiques de combustion en micropesanteur, avec une forte représentativité de la part des États-Unis et du Japon. L'Europe est faiblement active, exceptée en France où les recherches se concentrent sur la

combustion diphasique (spray combustible), ainsi que sur la propagation de flamme sur combustible solide.

Ces travaux permettent d'aborder les questions de sécurité relatives aux incendies, notamment à bord des engins spatiaux habités. Une coopération Cnes-Jaxa a permis une contribution significative d'une équipe française à une expérience en cours d'exploitation au sein du module japonais Kibo.

### 1.3.2. INSTABILITÉS HYDRODYNAMIQUES (CONVECTION) ET ONDES

Les instabilités hydrodynamiques jouent un rôle fondamental dans les processus géophysiques (météorologie, océanographie, climat), les écoulements astrophysiques (étoiles, disques d'accrétion, milieu interstellaire) ainsi que dans de nombreux dispositifs industriels. C'est en particulier le cas de la convection thermique. Celle-ci est un moyen efficace de transfert de chaleur entre un fluide et un autre milieu de température différente. En micropesanteur, la poussée d'Archimède, responsable de la convection naturelle, est négligeable.

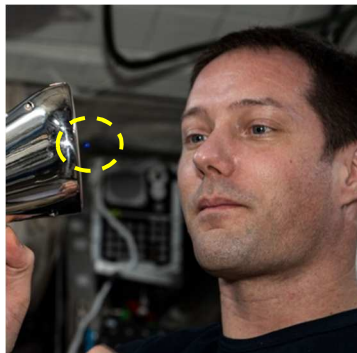
La compréhension des phénomènes de convection dans des liquides avec interface (convection thermocapillaire) et dans les mélanges binaires ou ternaires (convection thermosolutale) reste également un enjeu de taille pour la stabilité des mélanges ou la séparation des espèces en microgravité. Une partie de ces études a été réalisée dans le cadre de l'expérience Esa **DCMIX**.

La turbulence d'ondes concerne l'étude des propriétés dynamiques et statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction non-linéaire. Les applications sont diverses et concernent, par exemple, les vagues à la surface des océans ou les ondes d'Alfvén dans les plasmas astrophysiques. L'intérêt de la micropesanteur est de permettre l'étude des ondes capillaires à la surface d'un fluide sans effet parasite des ondes de gravité et également de pouvoir travailler avec une couche de fluide à symétrie sphérique, ce qui permet de s'affranchir des réflexions d'ondes sur des parois latérales toujours présentes au laboratoire. Les expériences qui ont eu lieu en vols paraboliques et à bord de l'ISS (instrument **Fluidics**, utilisé de 2017 à 2023) ont montré un bon accord avec les prédictions théoriques de la turbulence faible.

### 1.3.3. ONDES ACOUSTIQUES

Les ondes ultrasonores (fréquence > 20 kHz) sont des perturbations locales de la pression d'un milieu matériel, inaudibles pour les humains. À faible intensité, elles représentent des vecteurs d'information qui permettent de sonder fluides et solides, l'échographie étant l'application la plus connue. À forte intensité, ces ondes peuvent interagir avec la matière et engendrer l'apparition de forces, dite de pression de radiation, sur les objets impactés. L'intérêt de la micropesanteur est de permettre l'étude précise de ces phénomènes fondamentaux sans l'effet parasite de la pesanteur, pour ensuite développer des dispositifs technologiques les intégrant.

Le phénomène de pression de radiation acoustique permet de déplacer des objets sans les toucher. Une nouvelle modalité de manipulation a été développée : la pince acoustique. Elle est basée sur l'utilisation d'un faisceau unidirectionnel d'ondes ultrasonores qui exerce une force tridimensionnelle pouvant piéger un objet à un endroit précis de l'espace. Cette technologie sans contact présente un grand potentiel, notamment dans la science des matériaux, en micro-fluidique ou en microrobotique. Les expériences qui ont eu lieu en vols paraboliques et à bord de l'ISS (avec le démonstrateur technologique **Telemaque** en fig.8) ont mis en évidence l'intérêt des pinces ultrasonores pour manipuler une grande variété de matériaux dans diverses configurations en micropesanteur. Ces résultats ont permis de valider un modèle théorique prédictif permettant l'optimisation de la configuration des sources.



**Fig. 8 : Utilisation de la pince acoustique TELEMAQUE**  
pour piéger une bille (entourée en jaune) par Th. Pesquet lors de la mission Alpha (Juillet 2021).

## 2. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

### 2.1. MATIÈRE MOLLE ET FLUIDES COMPLEXES

#### 2.1.1. MOUSSES ET ÉMULSIONS

Les expériences sont réalisées grâce à des instruments originaux qui couplent rhéologie et diffusion de la lumière. Pour les mousses et les émulsions, le but est d'élucider les dynamiques de vieillissement au cours d'expériences dans l'ISS avec l'instrument **Foam-C**. Pour les gels et verres, il s'agit d'étudier la dynamique microscopique sous sollicitation mécanique avec l'instrument de diffusion de la lumière **Colis** de l'Esa. L'instrument **Flumias** de l'Esa sera utilisé pour des expériences sur des émulsions stimulables.

A plus long terme, les objectifs seront les suivants :

- Caractérisation et compréhension de la dynamique lors de la transition vitreuse (verres) ou de blocage (verres, gels, mousses), incluant le rôle des contraintes gravitationnelles.
- Compréhension de l'origine microscopique de la transition solide-fluide qui découle d'une sollicitation externe pour les gels et verres.

Outre la clarification des transitions vitreuses et de blocage sur le plan fondamental, les applications bénéficieront d'une compréhension plus fine des mécanismes responsables de la défaillance de matériaux désordonnés. La meilleure maîtrise des procédés de fabrication des mousses pourrait mener à des matériaux nouveaux pour la santé (biocompatibles) et la construction, notamment dans l'optique d'habitats lunaires/martiens car les mousses sont de bons isolants et nécessitent intrinsèquement moins de ressource que les matériaux massifs.

#### 2.1.2. BIOPHYSIQUE

Le soutien doit être en particulier orienté vers deux projets Esa embarqués en fusée sonde en 2025. Le projet **Krabs** fournira des informations sur le couplage entre agrégation et écoulement sanguin par des mesures simultanées de viscosité effective et des visualisations de l'agrégation. Le projet **Imedys** représentera, lui, la toute première expérience de caractérisation de la sensibilité des cellules endothéliales à des altérations de la gravité en présence du stimulus mécanique associé à la contrainte hydrodynamique de cisaillement. Les résultats consolideront la compréhension des phénomènes de déconditionnement vasculaire reportés lors des vols spatiaux.

Les dispositifs acousto-fluidiques mènent à des perspectives de manipulation et contrôle d'agrégats cellulaires pour la culture 3D et l'étude de sphéroïdes en microgravité.

Les travaux de simulations numériques des écoulements sanguins en réseaux de microcanaux, appuyés par les méthodes émergentes d'analyse de données par intelligence artificielle, doivent permettre quant à eux de fournir un cadre prédictif qui guidera le design des expériences.

#### 2.1.3. FLUIDES COMPLEXES

La participation au projet **Vipgran** de l'Esa devra se poursuivre lors de son exploitation dans l'ISS. Les régimes inaccessibles sur Terre devront être sondés, tels la dynamique post-excitation de relaxation d'un granulaire ou la rhéologie d'un granulaire dense proche du seuil de la transition de blocage (*jamming*). Enfin, déplacer un granulaire devient un défi majeur en impesanteur : l'application de vibrations au sein d'une cellule semi-cloisonnée serait une solution et répondrait à des questions ouvertes en physique statistique des systèmes hors d'équilibre.

Les expériences de turbulence diphasique doivent être poursuivies afin de comprendre le mécanisme de réduction de traînée turbulente résultant de la présence de bulles d'air dans l'eau. En priorité majeure, un nouvel insert **Aerosol** de **Declic** est en cours de conception au Cnes, permettant de mettre en évidence et d'étudier la génération de brouillard de gouttelettes dans un écoulement de vapeur d'eau et d'air.



## 2.2. ETATS ET TRANSITIONS D'ÉTAT DE LA MATIÈRE

### 2.2.1. SOLIDIFICATION

Pour l'étude de la croissance de grains équiaxes dans les alliages transparents des expériences devront être conduites dans la continuité du programme **Cetsol**.

Enfin, le potentiel majeur du dispositif développé dans le cadre du projet XRMON a mené l'Esa à initier le développement d'un nouveau dispositif **XRF** (X-Ray Facility) destiné à une utilisation dans ISS en 2026. L'expertise française doit y être soutenue.

### 2.2.2. EVAPORATION ET ÉBULLITION

Le post-traitement des données de **Rubi** et leur valorisation doivent se poursuivre dans les années futures. Les données de **Rubi** sont une référence pour la validation des modélisations physiques implémentées dans les codes de calcul.

Deux prototypes de caloducs oscillants sont en cours de développement et seront montés sur l'appareil **Heat Transfer Host 1** de l'Esa. Une collaboration Cea/Cnes sur la validation du code Casco pour le dimensionnement du caloduc oscillant démarrera dès 2024. Les expériences sur l'ébullition en tube en microgravité mériteraient, elles, d'être poursuivies avec une ouverture sur les problématiques de mise en froid de tubes, rencontrées lors du ré-allumage des moteurs de lanceurs. Il s'agit là d'une des priorités affichées par la Nasa et les industries du secteur aérospatial, notamment avec des fluides cryogéniques.

### 2.2.3. FLUIDES SUPERCRITIQUES

L'objectif prioritaire est de poser les bases du traitement de la matière organique dans l'eau supercritique, avec la mise en œuvre d'une technologie d'oxydation en eau supercritique (procédé SuperCritical Water Oxydation – **Declic Scwo**, fig.9) qui permettra l'étude *in situ* de la réactivité chimique, des flammes hydrothermales et des phénomènes de mélange. Cela présente un intérêt certain pour la neutralisation des déchets toxiques, avec des applications potentielles pour l'exploration spatiale.



Fig.9 : première visualisation de SCWO (~220 bar)

Enveloppe de flamme non-prémélangée bleue (caractéristique de la combustion des alcools)

## 2.3. INSTABILITÉS, TRANSFERT ET ONDES

### 2.3.1. COMBUSTION

Dans le domaine de la sécurité, les écoulements prémélangés air/réfrigérant présentent des vitesses de flamme relativement faibles et les études fondamentales en micropesanteur permettent alors l'exploration de conditions inaccessibles sur Terre. Une collaboration franco-germanique naissante s'intéresse à l'inflammabilité des réfrigérants, notamment ceux embarqués dans les engins spatiaux, et se traduit par une participation conjointe aux campagnes de vols paraboliques Cnes & DLR à soutenir.

Dans le domaine de la combustion solide, les configurations expérimentales développées permettent l'étude de la propagation de flamme sur polymère, qui mène à gravité terrestre au phénomène parasite d'égouttement. Ces études multiphasiques soutenues par le Cnes dans le contexte de collaborations internationales en cours sont particulièrement pertinentes dans le cadre de la sécurité-incendie des vols habités. Le contrôle de l'histoire de la combustion pourrait s'étendre

à l'étude de configurations sphériques, qui trouve un écho potentiel dans les efforts environnementaux de décarbonation de l'énergie et plus spécifiquement de la combustion de particules métalliques.

### 2.3.2. INSTABILITÉS HYDRODYNAMIQUES (CONVECTION) ET ONDES

La conception de l'instrument **Fluidics-L** est un sujet prioritaire majeur pour le CNES. Cet instrument est destiné à des expériences de dynamique des fluides sous forçage linéaire, original à bord de l'ISS, afin d'étudier d'une part la turbulence d'ondes (dans un régime purement capillaire et en géométrie sphérique irréalisable au sol) et d'autre part le contrôle actif de ballottements d'ergols dans des réservoirs. Ces deux sujets figurent parmi les domaines d'excellence des communautés scientifiques et industrielles françaises.

Par ailleurs, une expérience nouvelle, vise à affiner la modélisation des transferts thermiques atmosphériques (**Atmoflow**). Des expériences en vols paraboliques (DLR/Cnes) seront nécessaires pour aider les simulations numériques et les études théoriques en vue de préparer l'expérience ISS. Enfin, les études théoriques accompagnant l'expérience **DCMIX** de l'Esa doivent être poursuivies.

### 2.3.3. ONDES ACOUSTIQUES

Le phénomène de *streaming* peut accélérer les transferts thermiques dans des zones difficilement accessibles. En effet, les ondes acoustiques parviennent à se propager dans des géométries exiguës jusqu'à, par exemple, des circuits imprimés chauds. Les écoulements induits sont alors particulièrement intenses et il est alors possible de remplacer les dispositifs usuels de conditionnement thermique par des transducteurs piézoélectriques robustes. La première mise en évidence expérimentale au sol et les simulations numériques détaillant les caractéristiques optimales de ces dispositifs doivent ouvrir vers un prototype pour évaluer le potentiel de cette nouvelle technologie en micropesanteur.

## 2.4. SYNTHÈSE DES RECOMMANDATIONS

### 2.4.1. PRIORITÉS DU PROGRAMME DE RECHERCHE EN SCIENCE DE LA MATIÈRE

Parmi les priorités scientifiques, celles identifiées à travers le programme DECLIC-Evolution ont besoin de temps longs en micropesanteur et sont de vraies spécificités, inscrites jusqu'ici dans une coopération historique franco-américaine, et non traitées par d'autres agences. Pour ces nouveaux inserts, le cadre programmatique doit être consolidé, la Nasa ayant besoin de redéfinir ses priorités scientifiques avant de préparer la suite de ses engagements.

Les sujets de recherches du programme DECLIC-Evolution, dans la programmation du CNES sont :

- La combustion froide dans l'eau supercritique : nouvel insert/instrument **SCWO**
- La nucléation de l'eau : nouvel insert/instrument **Aerosol**

Egalement, dans le cadre programmatique du Cnes, la communauté soutient fortement le développement d'un instrument **Fluidics\_L** pour l'étude de la turbulence d'ondes à grande échelle, à fort savoir-faire scientifique et technique français.

Le cadre programmatique Esa SciSpacE est depuis toujours fondamental pour satisfaire les besoins de la communauté française extrêmement présente. Il est crucial d'accompagner la communauté dans la préparation et proposition d'expériences, et d'aider à son positionnement dans les équipes de définition de nouveaux instruments. Parmi les thèmes privilégiés dans ce contexte nous trouvons les mousses, les différents transferts d'énergie et les milieux granulaires.

Enfin, pour les projets futurs, nous soutenons les projets interdisciplinaires, et poussons à favoriser les échanges entre disciplines scientifiques. Les sciences de la matière peuvent apporter un soutien fondamental à la santé avec la biophysique, la météorologie, la climatologie, la planétologie, etc, en apportant des modèles construits sur les propriétés universelles, hors gravité, de la matière. De même, il paraît essentiel de souligner le potentiel applicatif à long terme de la recherche fondamentale, notamment dans le contexte énergie/climat.

## 2.4.2. LES MOYENS : ELÉMENTS DE CONTEXTE

La fin de vie de la station internationale est programmée en 2030 avec une potentielle désorbitation en 2031. Les Etats-Unis ne souhaitent pas reproduire au-delà de cette date une infrastructure avec un modèle d'exploitation identique et comptent s'appuyer sur des modèles de services commerciaux d'infrastructures ou systèmes d'accueil en orbite basse (systèmes habités ou automatiques). Plusieurs acteurs commerciaux américains développent leur infrastructure orbitale et recherchent des partenariats internationaux avec l'industrie des différents partenaires européens, japonais ou canadiens notamment. La recherche en Sciences de la Matière nécessite l'accès à des infrastructures de recherche procurant des conditions deapesanteur sur des temps longs, et il est fondamental de préserver cet accès pour la communauté française. Il convient par l'action du Cnes et de l'Esa auprès des acteurs commerciaux et industriels nationaux et internationaux de chercher à en faciliter les mécanismes d'accès et à en optimiser les coûts.

Il paraît également utile de rappeler que les campagnes de vols paraboliques constituent un outil majeur pour la communauté, en préparation de vols de plus longue durée, mais aussi pour mener des activités de recherche à part entière. L'accès à cet outil assez unique peut également favoriser la coopération avec un partenaire international disposant d'expérience en orbite basse.

Par ailleurs, il est bon de prendre en compte que la stratégie de l'Esa sur l'Exploration pousse vers des activités scientifiques davantage dirigées au profit de l'Exploration. Dans ce contexte, il paraît indispensable d'identifier et valoriser clairement les activités répondant à ce critère, ainsi que celles avec un fort potentiel applicatif, mais surtout d'agir au sein de l'Esa pour préserver un volume d'activité suffisant destiné à la recherche fondamentale, à la base des progrès scientifiques.

Enfin, l'importance du dispositif APR doit être souligné : c'est une ressource centrale pour la communauté, en préparation mais également en réalisation d'expériences, notamment en Vols Paraboliques, avec le financement de l'instrumentation. Il est indispensable de le maintenir au minimum à son niveau actuel.

## 2.4.3. TABLEAUX DE SYNTHÈSE

### Recommandations priorités scientifiques

Objectif scientifique	Observable/type de mesure	Exemple de cadre de réalisation avec phase	R&T	Commentaire
<b>Micro-physique des nuages</b>	Condensation de l'eau et influence de la turbulence	DECLIC_EVO – Insert AEROSOL Phase A au CNES	Validation Vols Paraboliques	Engagement visé fin 2024 ? Horizon fin ISS ?
<b>Combustion bas carbone</b>	Combustion de matière organique dans l'eau supercritique	DECLIC_EVO – Insert SCWO Phase A au CNES	Dispositifs microfluidiques	Engagement visé fin 2024 ? Horizon fin ISS ?
<b>Etude des grandes échelles en turbulence d'ondes</b>	Dynamique d'interface	Fluidics_L Phase A au CNES Coopération Esa	Validation Vols Paraboliques	Engagement visé fin 2024
<b>Mousses Transferts d'énergie Milieux granulaires</b>	Rhéologie du murissement Evaporation de gouttes Milieu granulaire sous vibration	Esa SciSpace		Cadre programmatique Esa fondamental

<b>Programmes inter-disciplinaires</b> <b>Energie</b> <b>Climat</b> <b>Combustion</b> <b>Biophysique</b>		Esa SciSpacE, APR, AD		Orientation Exploration
--	--	-----------------------	--	-------------------------

### Recommandations sur les moyens

Contexte	Recommandation
La fin de l'ISS est programmée pour 2030 avec une suite commerciale	Garantir l'accès à des vols longue durée en µpesanteur dans ce nouveau contexte.
Les programmes Cnes et Esa de vols paraboliques procurent un outil essentiel pour la communauté scientifique, pour faire de la science, en préparation d'expériences plus longue durée	Il est crucial de maintenir ces programmes.
La stratégie ESA Terra Novae pousse pour de la Science plus orientée au profit de l'Exploration	Veiller à préserver les capacités de mener de la science fondamentale en SdM.
Le soutien de la communauté SdM à travers le dispositif Appels à Propositions de Recherche est fondamental pour l'émergence et la réalisation d'expériences en SdM.	Veiller à maintenir les capacités de ce soutien.